



universität
wien

DISSERTATION / DOCTORAL THESIS

Titel der Dissertation / Title of the Doctoral Thesis

Die Entstehungsgeschichte der (Speziellen und der Allgemeinen)
Relativitätstheorie und Ernst Machs Einfluss darauf

verfasst von / submitted by

Mag. rer. nat. Eren Simsek

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Doktor der Philosophie (Dr. phil.)

Wien, 2021 / Vienna 2021

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it
appears on the student record sheet:

UA 792 296

Dissertationsgebiet lt. Studienblatt /
field of study as it appears on the
student record sheet:

Philosophie

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. i.R. Mag. Dr. Friedrich Stadler

Betreut von / Supervisor:

Ao. Univ.-Prof. i.R. Dr. Bernhard Baumgartner

Plagiatserklärung

Hiermit erkläre ich, die vorgelegte Arbeit selbständig verfasst und ausschließlich die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Alle wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommenen Textpassagen und Gedankengänge sind durch genaue Angabe der Quelle in Form von Anmerkungen bzw. In-Text-Zitationen ausgewiesen. Dies gilt auch für Quellen aus dem Internet, bei denen zusätzlich URL und Zugriffsdatum angeführt sind. Mir ist bekannt, dass jeder Fall von Plagiat zur Nicht-Bewertung der gesamten Lehrveranstaltung führt und der Studienprogrammleitung gemeldet werden muss. Ferner versichere ich, diese Arbeit nicht bereits andernorts zur Beurteilung vorgelegt zu haben.

Danksagung

Ich möchte mich gleich zu Beginn bei meinen Betreuern/Mentoren Univ.-Prof. i.R. Mag. Dr. Friedrich Stadler und ao. Univ.-Prof. Dr. Bernhard Baumgartner bedanken. Sie haben mich von Beginn an stets unterstützt und durch ihre konstruktive Kritik die inhaltliche Qualität der Arbeit sehr gefördert. Ohne ihre Hilfe, Geduld und Rat hätte diese Arbeit nicht entstehen können.

Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Dr. John Norton und Prof. Dr. James Robert Brown herzlichst bedanken, weil ich bei ihnen einiges über Albert Einstein, Ernst Mach und Gedankenexperimente lernen durfte. Ihre Arbeiten gaben mir eine wichtige Orientierung über den Wissensstand zu meinem Thema.

Ganz besonders bedanke ich mich an dieser Stelle ebenso bei Prof. Dr. Gereon Wolters und Prof. Dr. Julian Barbour für die Gespräche und die Korrespondenz. Ihre Bücher waren für mich wegweisend und eine wichtige Quelle der Inspiration für diese Arbeit.

Allgemein möchte ich mich auch bei ao. Univ.-Prof. i.R. Mag. Dr. Elisabeth Nemeth und Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. Martin Kusch bedanken, von denen ich einiges lernen durfte und die mir immer geholfen haben, wenn ich eine Frage hatte. In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch bei der Fakultät für Philosophie und Bildungswissenschaft bedanken, welche mir erst die Möglichkeit gab, die Dissertation zu diesem Thema schreiben zu dürfen.

Zum Schluss geht mein Dank an meine Freunde und Familie – und vor allem meiner Freundin Valerie Marth für ihre wichtige Unterstützung.

Abkürzungsverzeichnis

Da *The Collected Papers of Albert Einstein*¹ Dokumente zu und von Einstein aus den Jahren 1879 bis 1925 zur Verfügung stellt, sind sie eine der primären Quellen für diese Arbeit.

Um den Lesefluss zu erleichtern und einen einfacheren Überblick zu bieten, werde ich in dieser Arbeit auf *The Collected Papers of Albert Einstein*, welche dank der Einstein-Forschung auch gratis online abrufbar sind, mit (CPAE X; Y; Z) verweisen, wo CPAE *The Collected Papers of Albert Einstein* bedeutet; X stellt das *Volume/Ausgabe* dar; Y ist die Dokumentnummer, wenn sie fehlt bzw. es sich um Kommentare der Herausgeber usw. handelt, dann ist "_" angegeben – und Z ist schließlich die Seitenzahl.

Ich verwende das Zitierformat von Michel Jannsen und Jürgen Renn (Jannsen & Renn, 2015) und füge die Seitenzahl hinzu, in der Hoffnung, dass der Leser die Passagen leichter finden kann.²

An dieser Stelle seien die Ausgaben den Abkürzungen (CPAE) für ein besseres Verständnis gegenüberstellt:

Einstein, Albert: *The Collected Papers of Albert Einstein*.

- CPAE 1: *Volume 1: The Early Years, 1879-1902*. Edited by John Stachel, David C. Cassidy, and Robert Schulmann. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 1987.
- CPAE 2: *Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909*. Edited by John Stachel, David C. Cassidy, Jürgen Renn, and Robert Schulmann. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 1989.
- CPAE 3: *Volume 3: The Swiss Years: Writings 1909-1911*. Edited by Martin J. Klein, A. J. Kox, Jürgen Renn, and Robert Schulmann. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 1993.
- CPAE 4: *Volume 4: The Swiss Years: Writings, 1912–1914*. Edited by Martin J. Klein, A. J. Kox, Jürgen Renn, and Robert Schulmann. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 1995.

¹ Quelle: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu>

² Wie in CPAE, werden auch wir in dieser Arbeit beim Zitieren auf die Fehler im Original nicht mit „[sic]“ oder ähnlichem hinweisen – allein aus dem Brief von Willem de Sitter an Einstein (CPAE 8, Part A; 272; p. 357-358) dürfte dem Leser klar werden, dass so ein Hinweis nicht zielführend sein kann.

- CPAE 5: *Volume 5: The Swiss Years: Correspondence, 1902–1914*. Edited by Martin J. Klein, A. J. Kox, and Robert Schulmann. Princeton: Princeton University Press 1993.
- CPAE 6: *Volume 6: The Berlin Years: Writings, 1914–1917*. Edited by, Martin J. Klein, A. J. Kox, and Robert Schulmann. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 1996.
- CPAE 7: *Volume 7: The Berlin Years: Writings, 1918–1921*. Edited by Michel Janssen, Robert Schulmann, József Illy, Christoph Lehner, and Diana Kormos Buchwald. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 2002.
- CPAE 8, Part A: *Volume 8, Part A: The Berlin Years: Correspondence, 1914–1917*. Edited by Robert Schulmann, A. J. Kox, Michel Janssen, and József Illy. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 1998.
- CPAE 8, Part B: *Volume 8, Part B: The Berlin Years: Correspondence 1918*. Edited by Robert Schulmann, A. J. Kox, Michel Janssen, and József Illy. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 1998.
- CPAE 9: *Volume 9: The Berlin Years: Correspondence January 1919-April 1920*. Edited by Diana Kormos Buchwald, Robert Schulmann, József Illy, Daniel J. Kennefick, and Tilman Sauer. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 2004.
- CPAE 10: *Volume 10: The Berlin Years: Correspondence May-December 1920 and Supplementary Correspondence 1909-1920*. Edited by Diana Kormos Buchwald, Tilman Sauer, Ze'ev Rosenkranz, József Illy, and Virginia Iris Holmes. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 2006.
- CPAE 12: *Volume 12: The Berlin Years: Correspondence January-December 1921*. Edited by Diana Kormos Buchwald, Ze'ev Rosenkranz, Tilman Sauer, József Illy, and Virginia Iris Holmes. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 2009.
- CPAE 13: *Volume 13: The Berlin Years: Writings & Correspondence January 1922-March 1923*. Edited by Diana Kormos Buchwald, József Illy, Ze'ev Rosenkranz, and Tilman Sauer. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 2012.
- CPAE 14: *Volume 14: The Berlin Years: Writings & Correspondence April-1923-May 1925*. Edited by Diana Kormos Buchwald, József Illy, Ze'ev Rosenkranz, Tilman Sauer, and Osik Moses. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 2015.

Inhaltsverzeichnis

EINLEITUNG.....	9
1.) KAPITEL: FORSCHUNGSSTAND UND FORSCHUNGSLÜCKE.....	14
1. FORSCHUNGSSTAND	14
1.1. 100. GEBURTSTAG VON ALBERT EINSTEIN (1979) – BIS JETZT	14
1.2. FORSCHUNGSLÜCKE	17
1.3. HYPOTHESEN ZU DEN FORSCHUNGSLÜCKEN.....	19
2.) KAPITEL: ENTSTEHUNGSGESCHICHTE DER SRT	21
2. 1. HYPOTHESE: WIEN UND COHNS EINFLUSS AUF EINSTEIN	21
2.1. DAS A UND O VON EINSTEINS „ZUR ELEKTRODYNAMIK BEWEGTER KÖRPER“	22
2.1.1. Das O von Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“	22
2.1.2. Das A von Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“	24
2.1.2.1. Die zwei Phasen des A und O	28
2.1.2.2. Das A: Wissenschaftlicher Dialog zwischen E. Cohn, W. Wien und A. Einstein	32
2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik	34
2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik	41
2.1.2.2.3. Der Diskurs und seine experimentelle Ebene: Magnet und Leiter	45
2.1.2.2.3.1. Ad 1.:	48
2.1.2.2.3.2. Ad 2.:	53
2.2. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND DIE DARAUS RESULTIERENDEN FORSCHUNGSFRAGEN FÜR DIE NÄCHSTEN ABSCHNITTE	63
2.2.1. Zusammenfassung der Ergebnisse	63
2.2.2. Die aus den Ergebnissen resultierenden Forschungsfragen für die nächsten Abschnitte	70
2.2.2.1. 1. Frage	70
2.2.2.2. 2. und 3. Frage	74
3.) KAPITEL: VON MACH ÜBER COHN ZUR EINSTEINS SRT	75
3. 3. HYPOTHESE: VON MACH, ÜBER COHN ZU EINSTEINS SPEZIELLER RELATIVITÄTSTHEORIE	75
3.1. E. MACHS PUBLIZIERTE ÄUßERUNGEN ZU EINSTEINS RELATIVITÄTSTHEORIE	76
3.1.1. (I) Machs erste Äußerung in: <i>Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit</i> (1909).....	76
3.1.2. (II) Machs zweite Äußerung in „ <i>Die Leitgedanken meiner naturwissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen</i> “ (1910)	82
3.1.3. (III) Machs dritte Äußerung in „ <i>Sinnliche Elemente und naturwissenschaftliche Begriffe</i> “ (1910)	82
3.2. ENTSTEHUNGSGESCHICHTE DER SRT: EINSTEIN ERWÄHNT COHN	84
3.3. ENTSTEHUNGSGESCHICHTE DER SRT: COHNS VERTEIDIGUNG DER SRT ALS ANDENKEN AN MACH	92
3.3.1. Das Relativitätsprinzip der Mechanik und das Machsche Forschungsprogramm	95
3.3.2. Die Widersprüche in den Experimenten vor der Speziellen Relativitätstheorie	98
3.3.2.1. Experiment von Fizeau – wiederholt von Michelson und Morley	99
3.3.2.2. Experiment von Michelson – wiederholt von Michelson und Morley	101
3.3.2.3. Widerspruch zwischen den Experimenten von Fizeau und Michelson.....	104
3.3.2.3.1. Der Weg zur SRT: Synchronisieren der Zeit	105
3.3.2.3.2. Die SRT als eine theoretische Antwort auf die experimentellen Ergebnisse.....	107
3.4. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND DIE DARAUS RESULTIERENDEN FORSCHUNGSFRAGEN FÜR DIE NÄCHSTEN ABSCHNITTE	116
3.4.1. Zusammenfassung der Ergebnisse	116
3.4.1.1. E. Machs publizierte Äußerungen zu Einsteins Relativitätstheorie	116
3.4.1.2. Einsteins Erwähnung von E. Cohn	117
3.4.1.3. Cohns Verteidigung der SRT als Andenken an Mach	118
3.4.1.4. Entstehungsgeschichte der SRT nach Cohns Ansicht.....	119
3.4.1.4.1. Das Relativitätsprinzip der Mechanik und das Machsche Forschungsprogramm	120
3.4.1.4.2. Die Widersprüche in den Experimenten vor der Speziellen Relativitätstheorie	120
3.4.1.5. Die aus den Ergebnissen resultierenden Forschungsfragen für die nächsten Abschnitte	122
3.4.1.5.1. 4. Frage:.....	122

3.4.1.5.2.	5. Frage:.....	122
3.4.1.5.3.	6. Frage:.....	123
4.)	KAPITEL: DIE REKONSTRUKTION VON EINSTEINS KYOTO-REDE	125
4.	EINSTEINS JAPAN-REISE, IHRE VORGESCHICHTE UND DIE KYOTO-REDE	125
4.1.	EINSTEINS JAPAN-REISE UND IHRE VORGESCHICHTE	126
4.2.	EINSTEINS-KYOTO REDE UND FORSCHUNGSSTAND.....	129
4.2.1.	<i>Hypothesen zur Kyoto-Rede</i>	<i>131</i>
4.3.	2. HYPOTHESE: DIE VORGESCHICHTE ZU EINSTEINS KYOTO-REDE	136
4.4.	EINSTEINS KYOTO-REDE	142
4.4.1.	<i>Die Analyse von Einsteins Rede: Teil I.....</i>	<i>148</i>
4.4.2.	<i>Teil I der Kyoto-Rede: Spezielle Relativitätstheorie [3]-[44]</i>	<i>149</i>
4.4.2.1.	Thema I: Das spezielle Relativitätsprinzip [3]-[15].....	149
4.4.2.1.1.	Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss	151
4.4.2.2.	Thema II: Der Widerspruch [16]-[25].....	163
4.4.2.3.	Thema III: Die Lösung des Widerspruchs (durch die Neudefinition der Zeit) [26]-[39]	167
4.4.2.3.1.	Die Neudefinition der Zeit: Cohns und Machs möglicher Einfluss	171
4.4.2.3.2.	Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein	175
4.4.2.3.3.	Der Doppler-Effekt als Lösung für die Diskussion zwischen Wien und Abraham	192
4.4.2.3.4.	Der Doppler-Effekt als Erklärung für Einsteins Gedankenexperiment „Chasing the light“	195
4.4.2.3.5.	Wieso wurde die bedeutende Rolle des Dopplerschen Prinzips übersehen?	207
4.4.2.3.5.1.	1. Grund: Die Geschichte des Dopplerschen Prinzips und der SRT wurden zu wenig erforscht, um Zusammenhänge erkennen zu können.	207
4.4.2.3.5.1.1.	Ad (I):	207
4.4.2.3.5.1.2.	Ad (II):	207
4.4.2.3.5.1.3.	Ad (III):	214
4.4.2.3.5.1.4.	Historischer Zufall oder konzeptionell notwendig?	214
4.4.2.3.5.1.5.	Didaktik.....	215
4.4.2.3.5.2.	2. Grund: Der Aufbau der „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905).....	217
4.4.2.3.5.3.	3. Grund: Einsteins Gedankenexperiment: Magnet und Leiter	218
4.4.2.3.5.4.	4. Grund: Die Emissionstheorie von Walter Ritz	219
4.4.2.4.	Thema IV: Die erkenntnistheoretische Ebene der SRT [40]-[44]	221
4.4.3.	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse und die daraus resultierenden Forschungsfragen für die nächsten Abschnitte</i>	<i>224</i>
4.4.3.1.	Zusammenfassung der Ergebnisse	224
4.4.3.1.1.	Antwort auf die 4. Frage.....	225
4.4.3.1.2.	Antwort auf die 5. Frage.....	227
4.4.3.2.	Die aus den Ergebnissen resultierenden Forschungsfragen für die nächsten Abschnitte	234
4.4.3.2.1.	7. Frage: Machs Einfluss auf die Allgemeine Relativitätstheorie	234
4.4.3.2.2.	8. Frage.....	234
4.4.4.	<i>Die Analyse von Einsteins Rede: Teil II.....</i>	<i>236</i>
4.4.4.1.	9. Frage	238
4.4.5.	<i>Teil II der Kyoto-Rede: Allgemeine Relativitätstheorie [45]-[89]</i>	<i>240</i>
4.4.5.1.	Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]	240
4.4.5.2.	Thema II: Das Äquivalenzprinzip [49]-[65].....	252
4.4.5.2.1.	Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip und Machs möglicher Einfluss	255
4.4.5.2.2.	Gedankenexperiment: Lichtablenkung am Gravitationsfeld	263
4.4.5.2.3.	Gedankenexperiment: Gravitationsbedingte Rotverschiebung	265
4.4.5.3.	Thema III: Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]	274
4.4.5.4.	Thema IV: Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89].....	287
4.4.6.	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse</i>	<i>302</i>
4.4.6.1.	Die Allgemeine Kovarianz und Machs (eindeutiger) Einfluss.....	302
4.4.6.2.	Das Äquivalenzprinzip und Machs (möglicher) Einfluss	304
4.4.6.3.	Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit (?)	308
4.4.6.4.	Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89].....	312
5.)	ANHANG	319
5.1.	ANHANG I: LAKATOS´ VERMUTUNG	319
5.1.1.	FORSCHUNGSPROGRAMM ALS WISSENSCHAFTSTHEORETISCHES KONZEPT	319
5.1.2.	FORSCHUNGSLÜCKE IN DER WISSENSCHAFTSTHEORIE	322

5.2. ANHANG II: DIE FEHLENDEN BRIEFE ZWISCHEN FELIX EHRENHAF UND ALBERT EINSTEIN IN <i>THE COLLECTED PAPERS OF ALBERT EINSTEIN</i>	324
5.3. ANHANG III: DAS MACHSCHE PRINZIP – WAS MEINTE MACH?	326
5.3.1. DAS MACHSCHE PRINZIP	326
5.3.2. DAS (SCHWACHE) MACHSCHE PRINZIP = MITFÜHRUNGSEFFEKT	326
5.3.3. VARIATIONEN DES MACHSCHEN PRINZIPS	327
5.3.3.1. <i>Mach0</i>	328
5.3.3.2. <i>Mach1</i>	328
5.3.3.3. <i>Mach2</i>	333
5.3.3.4. <i>Mach3</i>	334
5.3.3.5. <i>Mach4</i>	335
5.3.3.6. <i>Mach5</i>	337
5.3.3.7. <i>Mach6</i>	338
5.3.3.8. <i>Mach7</i>	339
5.3.3.9. <i>Mach8</i>	339
5.3.3.10. <i>Mach9</i>	340
5.3.3.11. <i>Mach10</i>	340
5.3.4. INTERVIEW MIT JULIAN BARBOUR	342
5.4. ANHANG IV: EINSTEINS UNTERHALTUNG MIT ERNST MACH ÜBER DIE ATOMTHEORIE – UND DIE LICHTQUANTENHYPOTHESE?	346
5.4.1. FORSCHUNGSSTAND	346
5.4.2. 1910: EINSTEINS EINZIGER BESUCH BEI UND SEIN PERSÖNLICHES GESPRÄCH MIT MACH	347
5.4.2.1. <i>Carlton Bereneda Weinberg über Einsteins Besuch bei Mach</i>	347
5.4.2.2. <i>Philipp Frank über den Besuch Einsteins bei Mach</i>	347
5.4.2.2.1. Zusammenfassung der bisherigen Resultate	353
5.4.2.2.1.1. Grund und Datum für Einsteins Reise nach Wien	353
5.4.2.2.1.2. An welchem Tag könnte Einstein Mach besucht haben?	353
5.4.2.3. <i>I. Bernhard Cohen über den Besuch Einsteins bei Mach</i>	354
5.4.2.3.1. Die Mach-Planck-Debatte – und Einsteins Verteidigung Machs	355
5.4.2.3.2. Einsteins wissenschaftliche Diskussion mit Planck über die Lichtquantenhypothese	355
5.4.3. EINSTEINS UND MACHS UNTERHALTUNG ÜBER DIE ATOMTHEORIE – UND DIE LICHTQUANTENHYPOTHESE?	362
5.4.3.1. <i>Argumente für Einsteins Unterhaltung mit Mach über die Lichtquantenhypothese</i>	366
5.4.3.1.1. I. Autobiographische Notizen Einsteins	366
5.4.3.1.2. II. Machs Beiträge zur Optik	367
5.4.3.1.3. III. Otto Neuraths Briefe an Mach	369
5.4.3.1.4. IV. Einsteins Arbeit, seine Visitenkarte und sein Notizbuch	372
5.4.3.1.4.1. a) Einsteins Arbeit und sein Notizbuch	372
5.4.3.1.4.2. b) Einsteins Visitenkarte und sein Notizbuch	375
5.4.4. 1921/1922 – EIN TURBULENTES JAHR FÜR EINSTEIN	381
6.) FAZIT UND AUSBLICK DER ARBEIT	387
6. SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE	387
6.1. <i>Theoretische Hintergründe: Die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien, Cohn und Abraham</i>	<i>387</i>
6.2. <i>Experimentelle Hintergründe: Spiegel-Experiment, Magnet und Leiter, Experiment von Fizeau und Michelson</i>	<i>396</i>
6.2.1. Experiment mit Spiegeln	396
6.2.2. Relativbewegung von Magnet und Leiter	399
6.2.3. Die Experimente von Fizeau und von Michelson	405
6.3. <i>Ausblick</i>	<i>406</i>
7. ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE	408
7.1. <i>Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]</i>	<i>409</i>
7.2. <i>Das Äquivalenzprinzip [49]-[65]</i>	<i>411</i>
7.2.1. Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip	413
7.2.2. Gedankenexperiment: Lichtablenkung am Gravitationsfeld	415
7.2.3. Gedankenexperiment: Gravitationsbedingte Rotverschiebung	416
7.3. <i>Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]</i>	<i>416</i>
7.4. <i>Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]</i>	<i>417</i>

7.5.	<i>Ausblick</i>	422
8.	DAS INTUITIVE MACHSCHE FORSCHUNGSPROGRAMM	424
8.1.	<i>Ausblick</i>	425
9.	DIE REKONSTRUKTION VON EINSTEINS KYOTO-REDE.....	426
9.1.	<i>Ausblick</i>	432
LITERATURVERZEICHNIS		433
ABBILDUNGSVERZEICHNIS		448
FIGURENVERZEICHNIS		449
TABELLENVERZEICHNIS		449
ABSTRACT		450
(ABSTRACT AUF DEUTSCH)		450
(ABSTRACT IN ENGLISH).....		450

Einleitung

„Indem ich Ihnen nochmals herzlich danke für Ihren freundlichen Brief verbleibe ich Ihr Sie verehrender Schüler

A. Einstein.“ (Wolters, 1987, p. 150) (CPAE 5; 175; p. 205)

Die oben zitierte Stelle ist die letzte Zeile aus einem Brief (vom 17.08.1909) von Albert Einstein an Ernst Mach. In seiner gesamten Korrespondenz hat sich Einstein niemals sonst als Schüler einer Person bezeichnet und schon gar nicht als ein (den Adressaten) „verehrender Schüler“. Er wird später Mach nicht nur persönlich besuchen (Wolters, 1987, pp. 130-134), um sich mit ihm über Physik zu unterhalten, sondern auch weitere Briefe schreiben – allesamt mit einem positiven Inhalt (Wolters, 1987, pp. 148-162). Diese geben ein Zeugnis darüber, wie sehr Einstein davon überzeugt war, die Konzepte Machs in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (nachfolgend ART) umsetzen zu können. Tragischerweise verstirbt Mach kurz bevor Einsteins Arbeit „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1916e) fertiggestellt wird – und Einstein schreibt selbst das Nachruf („Ernst Mach“) (Einstein, 1916c). Wie in vielen seiner Arbeiten zur ART vergisst Einstein auch im Nachruf nicht auf den Einfluss Machs hinzuweisen, der für die Entwicklung der Theorie von großer Bedeutung war – so auch in seinem Vortrag „Grundgedanken und Probleme der Relativitätstheorie“ (Einstein, 1923q, p. 8) für den Nobelpreis, den er 1921 für seine Verdienste in der theoretischen Physik und insbesondere für die Entdeckung des Gesetzes über den *photoelektrischen Effekt* bekam.³

Im selben Jahr (1921) wird *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) von Ernst Mach posthum erscheinen. Darin greift er im Vorwort die Relativitätstheorie (aber auch allgemein die Moderne Physik) sehr stark an.⁴ Einige Jahre später (1933) erscheint auch die letzte Ausgabe *Die Mechanik in ihrer Entwicklung* von Ernst Mach mit einem Vorwort von Ludwig Mach, seinem ältesten Sohn, worin auch dieser seinen Vater als einen Gegner der Relativitätstheorie zitiert (Mach, 2012, pp. 581-582).

³ Genau genommen bekam er 1922 rückwirkend für das Jahr 1921 den Nobelpreis.

⁴ Vgl. dazu (Mach, 1921, pp. VIII-IX). Um einen kurzen Einblick darin zu bekommen, wie *widersprüchlich* die Rezeptionen der Machschen Werke im Jahre 1921 waren, verweisen wir den Leser gerne auf (Mach, 2012, pp. 547-550).

Dass Einstein sich gewundert hat, „dass Mach nicht für die Relativitätstheorie war“ (CPAE 13; 175; p. 125), ist selbstverständlich. Doch was genau ist in der Zeit zwischen den positiven Briefwechseln von Einstein und Mach und der Veröffentlichung von *Die Prinzipien der physikalischen Optik* passiert, wodurch Mach sich im hohen Alter (und unter schwerem körperlichen Leid) veranlasst sah, seine Meinung derart radikal zu ändern?

Über ein halbes Jahrhundert (1987) musste vergehen, bevor Gereon Wolters darauf eine klare Antwort geben konnte. In seinem Buch *Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie. Eine Fälschung und ihre Folgen* (Wolters, 1987) gelang es ihm, zu zeigen, dass die Kritik Machs an der Relativitätstheorie durch dessen ältesten Sohn Ludwig Mach gefälscht war.⁵ Diese These, welche jahrelang kontrovers diskutiert wurde (Blackmore, 1989) (Holton, 1992), konnte Wolters schließlich in seinen Beiträgen erfolgreich verteidigen (Wolters, 1988) (Wolters, 2012) (Wolters, 2019). Wolters, der gemeinsam mit Giora Hon das Werk *Die Mechanik in ihrer Entwicklung: historisch-kritisch dargestellt. Ernst-Mach-Studienausgabe* (Mach, 2012) herausgegeben hat, gilt daher heute als eine Koryphäe auf dem Gebiet der Mach-Einstein-Forschung.

Da nun die Debatte um die Fälschungsthese Wolters zu seinen Gunsten als entschieden betrachtet werden kann (Hoffmann, 2020, pp. XI, XVII-XVIII)⁶, gewinnt es umso mehr an Bedeutung, auch den anderen Hinweisen in seinem Buch eine genauere Beachtung zu schenken. Beispielsweise weist er auf ein *intuitiv Machsches Forschungsprogramm* (Wolters,

⁵ Welche Dramatik und Ironie diese Angelegenheit besitzt, wird umso deutlicher, wenn wir bei Joseph Winternitz bereits 1923 lesen:

„Ist Einstein einerseits Machs Testamentvollstrecker dadurch, daß er seinen Gedanken der Relativität der Trägheit zur physikalischen Geltung brachte, so weiß er sich andererseits auch darin als Schüler Machs, daß ihm die Gebundenheit des physikalischen Denkens an das Bewußtseinsgegebene immer klar vor Augen steht. In der Tat ist die wunderbare Verbindung außerordentlicher spekulativer Kraft mit der innigsten ‘Anpassung der Gedanken an die Tatsachen’ – um den Machschen Ausdruck zu gebrauchen – für Einsteins Genius charakteristisch.“ (Winternitz, 1923, p. 209)

⁶ Es ist wohl nur noch eine Frage der Zeit bis Sätze wie:

„Mach (1838–1916) selbst würde sich durch den hier gefundenen Zusammenhang zwischen Massen des Kosmos und den Inertialsystemen vermutlich nicht bestätigt sehen; er akzeptierte nicht einmal die Spezielle Relativitätstheorie.“ (Fließbach, 2016, p. 264)

aus renommierten Physiklehrbüchern irgendwann zur Gänze entfernt oder mit mehr Vorsicht verwendet werden.

1987, p. 50) hin, dessen Elemente in der ART Einsteins erneut auftauchen (Wolters, 1987, pp. 49-70). Und in der Ernst-Mach-Studienausgabe lesen wir:

„Eine genauere Lektüre der *Mechanik* lässt sogar etwas wie ein Forschungsprogramm ‚Allgemeine Relativität‘ erkennen. Dessen Komponenten sind: (a) Relativität der Trägheit, (b) allgemeine Kovarianz, (c) Äquivalenz von träger und schwerer Masse, (d) Nahwirkungscharakter physikalischer Wirkungen.“ (Mach, 2012, p. XX)

Diese Annahme ist wissenschaftstheoretisch und physikalisch schon allein deshalb sehr interessant, weil bereits Einsteins Schüler und Freund Hans Reichenbach von einem „Anfang eines Programms“ (Reichenbach, 1928, p. 252) sprach, Imre Lakatos selbst ein Machsches Forschungsprogramm (nachfolgend MFP) für möglich hielt (Lakatos, 1982, p. 75) und schließlich Julian Barbour als theoretischer Physiker die Ansicht vertritt, dass die Allgemeine Relativitätstheorie Machs Forderungen genügt (Barbour, 1995c).

Aber auch zur Wissenschaftsgeschichte kann unsere Arbeit einen Beitrag leisten – beispielsweise schreibt Roman U. Sexl in seinem Artikel „Der unerschöpfliche Albert Einstein“ (Sexl, 1985), dass „gerade rund um die Ursprünge der speziellen Relativitätstheorie einige wesentliche wissenschaftsgeschichtliche Fragen“ noch „offen“ (Sexl, 1985, p. 35) stehen und betont: „Eine der interessantesten Fragen betrifft die Quellen Einsteins.“ (Sexl, 1985, p. 35). In diesem Zusammenhang kommt von ihm der wichtige Hinweis sich Einsteins Kyoto-Rede (1922) bzw. dessen „inoffizielle Nobelpreisrede“ (Sexl, 1985, p. 36) näher anzusehen. Diese Rede ist für die Mach-Einstein-Forschung von größerem Interesse, weil Einstein darin oft auf Mach hinweist. Weder der historische Kontext der Rede wurde bis jetzt in der Mach-Einstein-Forschung untersucht, noch der Versuch unternommen den Inhalt der Rede (anhand der derzeitigen Quellen) zu rekonstruieren. Betrachtet man den historischen Kontext, stellt dieser Vortrag nämlich Einsteins Reaktion zum (gefälschten) Vorwort (Mach, 1921) dar.

Allgemein scheint es deswegen (zusammengefasst) mindestens drei Gründe zu geben, sich mit dem Thema auseinanderzusetzen:

1.) Da neue Ergebnisse in der Mach-Einstein-Forschung (Sexl, 1985) (Wolters, 1987) (Barbour & Pfister, 1995a) (Mach, 2012) (Wolters, 2019) (Mach, 2020) vorliegen – welche von gravierenden Auswirkungen sind –, ist eine genauere Untersuchung der Wissenschaftsgeschichte, die ihren Fokus auf die Beziehung zwischen Mach und Einstein

richtet, dringend notwendig. Nicht nur weil eine Würdigung von Machs Konzepten in der Physik (auf Grund der Fälschung) zum Teil noch auf sich warten lässt, sondern auch weil die Entstehung der Relativitätstheorie auf Grund der neueren Erkenntnisse unter einem neuen, differenzierteren Licht erscheint und betrachtet werden muss.⁷ Beispielsweise wurde das „Machsche Prinzip“ zwei Jahre nach Machs Tod von Albert Einstein in die theoretische Physik eingeführt.⁸ Ob Mach damit einverstanden gewesen wäre, wissen wir nicht. Es stellt sich jedoch die Frage, ob Machs erkenntnistheoretischer Einfluss auf die Entstehungsgeschichte der ART tatsächlich nur darauf zu beschränken ist.

2.) Die Hinweise Lakatos' und die Forschung Wolters' legen nahe, dass eine Forschungslücke bezüglich eines möglichen MFPs existiert, die auch Jahrzehnte später noch nicht in Angriff genommen wurde.⁹ Für die Methodologie des Forschungsprogrammes nach Lakatos könnte somit in Zukunft vielleicht ein positives Rekonstruktionsbeispiel dargelegt werden. Zuvor ist jedoch eine historisch-kritische Analyse der Entstehungsgeschichte der Relativitätstheorie wichtig, und eine rationale Rekonstruktion notwendig, die untersucht, welchen Einfluss Mach auf Einstein diesbezüglich (anhand der Quellen) wirklich hatte.

3.) Mach, Sexl und Lakatos sind, bezüglich ihrer Fragestellungen, (zu) früh gestorben – auch wenn das keine wissenschaftliche Argumentation ist, war sie doch die treibende Motivation diese Arbeit zu schreiben. Ich denke, es ist ein Teil der wissenschaftsgeschichtlichen und

⁷ In der Arbeit (Simsek, 2014) wurden die Bücher *Principia Philosophiae* (1644) (*Die Prinzipien der Philosophie*) von Rene Descartes und *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) (*Die mathematischen Prinzipien der Philosophie der Natur*) von Newton miteinander verglichen. (Beide Bücher werden heute einfach als *Principia* bezeichnet.) Dabei hat sich gezeigt, dass Newton, der ein guter Kenner der Descartesschen Schriften war, sich nicht nur namentlich an Descartes' *Principia*, sondern auch inhaltlich daran orientierte (Simsek, 2014, pp. 109-110, 151-152). Er übernimmt nicht nur die *Anzahl* seiner drei Newtonschen Gesetze, sondern auch das *Konzept* von Descartes (Simsek, 2014, pp. 154-163), wie auch dessen falsches Brechungsgesetz (Simsek, 2014, pp. 208, 209-210). Zum Schluss wird sich Newton sogar nicht nehmen lassen, in seinem Buch *Optik*, seine *Principia* als *Prinzipien der Philosophie* zu bezeichnen (Simsek, 2014, p. 187). Diesen Umstand habe ich damals als *zeitverzögerten Dialog* (Simsek, 2014, p. 7) beschrieben. Einen intensiveren Dialog finden wir nun bei Mach und Einstein. Die Aufgabe dieser Arbeit ist insofern, zu zeigen, wie wichtig der in der Wissenschaft stattfindende Dialog ist.

⁸ Die Kennzeichnung als „Machsches Prinzip“ erfolgt von Einstein erst in seiner Schrift „Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1918e). Dort macht Einstein (unter anderem) eine klare Trennung zwischen der „Relativitätsprinzip“ und dem „Machschen Prinzip“ (Einstein, 1918e, pp. 241, fn. 1). (Siehe auch (Mach, 2012, pp. XXI, fn. 23).)

Siehe zum Machschen Prinzip auch den Anhang „5.3. Anhang III: Das Machsche Prinzip – was meinte Mach?“ mit einem Interview mit Julian B. Barbour.

⁹ Eine kurze Einführung zu Lakatos' Ansicht und allgemein zur Bedeutung unserer Arbeit für die Wissenschaftstheorie siehe „5.1. Anhang I: Lakatos' Vermutung“.

wissenschaftstheoretischen Aufgabe, für Menschen das Wort zu ergreifen, die für sich nicht mehr sprechen können.

Wir werden aus den oben genannten Gründen die Entstehungsgeschichte der (Speziellen und der Allgemeinen) Relativitätstheorie historisch-kritisch und rational rekonstruieren und Ernst Machs Einfluss darauf genauer untersuchen. Mit „historisch“ meinen wir, dass wir die aktuell vorhandenen (primären) Quellen (Bücher, Artikel, Briefe usw.) verwenden, „kritisch“ heißt, dass wir den Forschungsstand in der Mach-Einstein-Forschung hinterfragen und, wenn möglich, ergänzen werden und schließlich „rational“ in dem Sinne, dass die Rekonstruktion physikalisch sinnvoll und nachvollziehbar sein wird.¹⁰

¹⁰ Somit haben wir unsere Methode dem Leser deskriptiv vorgestellt.

1.) Kapitel: Forschungsstand und Forschungslücke

1. Forschungsstand

1.1. 100. Geburtstag von Albert Einstein (1979) – bis jetzt

Um den 100. Geburtstag Einsteins (1979) zu würdigen, erschien das Buch *Einstein: A Centenary Volume* (French, 1979), herausgegeben von Anthony Philip French, mit vielen Beiträgen von Wissenschaftlern zur Einstein-Forschung. Im Jahre 1985 wurde das Buch mit dem Titel *Albert Einstein Werk und Nachwirkung* (French, 1985) in deutscher Sprache, ebenfalls von Anthony Philip French, herausgegeben.¹¹

Gerade die deutsche Ausgabe dieses Buches ist interessant, weil dort ein Beitrag zu finden ist, der in der englischen Ausgabe fehlt¹²; nämlich der Artikel „Der unerschöpfliche Albert Einstein“ (Sexl, 1985) von Roman U. Sexl¹³. Im Abschnitt „Die Ursprünge der speziellen Relativitätstheorie“ (Sexl, 1985, p. 35) macht er darauf aufmerksam, dass „gerade rund um die Ursprünge der speziellen Relativitätstheorie einige wesentliche wissenschaftsgeschichtliche Fragen“ noch „offen“ (Sexl, 1985, p. 35) stehen und betont: „Eine der interessantesten Fragen betrifft die Quellen Einsteins.“ (Sexl, 1985, p. 35)

Einstein ist bekannt dafür, dass er allgemein auf wenige Quellen in seiner Arbeit hinweist – ein gutes Beispiel dafür ist sein Artikel „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“ (Einstein, 1905r), wo er auf gar keine Literatur hinweist. Deshalb stellt sich natürlich damals wie heute die Frage, welche Arbeiten Einstein bei der Entstehungsgeschichte beeinflusst haben könnten. Nun kommt von Sexl ein wichtiger Hinweis auf eine Rede Einsteins, welche für die zukünftige Einstein-Forschung, Mach-Forschung und somit für die Mach-Einstein-Forschung wichtig sein könnte:

¹¹ Zur Entstehungsgeschichte des Buches siehe „Vorwort zur deutschen Ausgabe“ (Sexl, 1985, pp. VII-VIII) von Roman U. Sexl.

¹² Es wurden wiederum ein paar Beiträge aus der englischen Fassung nicht mehr übernommen – siehe (French, 1985, p. IV)).

¹³ Roman Sexl hat nicht nur wichtige Beiträge zur Einstein-Forschung geleistet, sondern auch wissenschaftliche Arbeiten zur Relativitätstheorie – siehe (Aichelburg & Sexl, 1971), (Mansouri & Sexl, 1977a), (Mansouri & Sexl, 1977b) und (Mansouri & Sexl, 1977c).

„Seit Silvio Bergia seinen in diesem Band enthaltenen Artikel über die Ursprünge der Relativitätstheorie verfaßt hat, wurde eine Ansprache bekannt, die Einstein am 17. Dezember 1922 in Kyoto gehalten hatte. Diese Japan-Tournee hatte Einstein daran gehindert, an der Verleihung des Nobelpreises in Stockholm teilzunehmen.

Die auf deutsch gehaltene Ansprache wurde von Yun Ishiwara ins Japanische übersetzt und 1923 publiziert. 1979 erschienen Teile dieser Rede in englischer Übersetzung in einer japanischen Zeitschrift für Wissenschaftsgeschichte. Erst seit *Physics Today* im August 1982 die gesamte Rede Einsteins vorlegte, wurde die ‚inoffizielle Nobelpreisrede‘ einer breiteren Öffentlichkeit bekannt. [...]“ (Sextl, 1985, pp. 35-36)

Über „Einstein und sein Werk“ (French, 1985, pp. X-XI) sind zwölf Artikel zur Relativitätstheorie enthalten – weshalb verweist Sextl nun genau auf die Arbeit Silvio Bergias (Bergia, 1985)? Und inwiefern könnte diese Rede Einsteins hier eine wichtige Rolle spielen? Dafür gibt es gute Gründe:

In seinem Artikel „Über die Geburt der speziellen Relativitätstheorie“ (Bergia, 1985) versucht Bergia die Entstehungsgeschichte der SRT zu rekonstruieren. Dabei geht er auch auf das Michelson-Experiment ein (Bergia, 1985, pp. 151-158) und kommt jedoch zur folgenden Schlussfolgerung:

„Die ‚Ätherdrift-Experimente‘ waren Einstein durchaus bekannt; er verweist auf sie als ‚die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum ‚Licht-Medium‘ zu konstatieren‘; vor allem Holton hat das 1969 nachgewiesen. Das Experiment von Michelson war also keineswegs die Hauptmotivation für Einsteins Überlegungen. Denn er hat niemals direkt auf Michelsons Arbeit verwiesen und lieferte deutliche, wenn auch nicht ganz eindeutige Aussagen, als man ihn danach fragte.“ (Bergia, 1985, p. 165)

Es zeigt sich: Sowie Gerald Holton (1969) vertrat auch Silvio Bergia (1979) zehn Jahre später die Ansicht, dass das Michelson-Experiment für Einstein bei der Entstehungsgeschichte keine wesentliche Rolle gespielt hat. Sextl verweist jedoch auf die Kyoto-Rede (1922) von Einstein, die erst ab 1982 der Öffentlichkeit (vor allem im Westen) zugänglich wurde:

„Während ich über dieses Problem in meiner Studienzeit nachdachte, erfuhr ich vom seltsamen Resultat des Michelson-Experiments. Bald kam ich zum Schluß, daß unsere Idee über die Bewegung der Erde relativ zum Äther unkorrekt ist, wenn wir Michelsons Null-Resultat als Faktum anerkennen. Das war der erste Weg, der mich zur speziellen Relativitätstheorie führte.“ Einstein, zitiert nach (Sextl, 1985, p. 36)

Sextl kommentiert jene Stelle nun mit folgenden Worten:

„Bemerkenswert ist ferner die Parallelität zwischen Einsteins Aussagen und denjenigen von W. Wien, der in einem Artikel ‚Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper‘ ein Jahr zuvor in den *Annalen der Physik* gemeint hatte: [...]“

Auch als Wien im nächsten Band der *Annalen der Physik* in eine Polemik mit E. Cohn über seine ‚Differentialgleichungen der Elektrodynamik‘ verwickelt wird, erwähnt er nochmals den ‚Michelson-Morleyschen Interferenzversuch‘, ohne sich veranlagt zu sehen, ein Literaturzitat anzuführen. [...]

In ähnlicher Weise schreibt auch M. Abraham im gleichen Band der *Annalen der Physik*: [...]

Es erscheint plausibel, daß Einstein diese Artikel, die in der Zeitschrift erschienen, in der er seit einigen Jahren publizierte, gekannt hat.

Warum hatte Einstein später die Rolle des Michelson-Experiments so heruntergespielt?“
(Sexl, 1985, pp. 36-37)

Anschließend geht Sexl zu seinen Erläuterungen dazu über, was Einstein später als theoretischen Physiker wohl dazu bewog, die wichtige Rolle des Michelson-Morley-Experiments, herunterzuspielen (Sexl, 1985, pp. 37-39).

Sexl ist die Entdeckung zu verdanken, dass die Entstehungsgeschichte Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) mit Wilhelm Wiens Schrift „Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper“ (Wien, 1904b) eng verknüpft ist. Ebenfalls verweist Sexl auf die Diskussion zwischen Wilhelm Wien, Emil Cohn und Max Abraham.

Dadurch bringt er eine wichtige Fragestellung in die Einstein-Forschung ein: Da Einstein an bestimmten Zeitschriften, wie beispielsweise der *Annalen der Physik*, publizierte, musste er verständlicherweise die dort erschienen Arbeiten teilweise kennen, um auf dem Forschungsstand zu bleiben – an welchen Arbeiten hat er sich damals wie orientiert? Diese Frage ist eng verbunden mit jener Frage nach der wissenschaftlichen Entstehungsgeschichte der SRT.

1.2. Forschungslücke

Es gibt Forschungslücken, die wir in Sexls Artikel finden (, welche bis jetzt von anderen Autoren noch nicht geschlossen wurden)¹⁴:

1. In seinem Artikel geht Sexl nicht näher darauf ein, wie die Arbeiten von Wilhelm Wien, Emil Cohn und Max Abraham Einstein genau beeinflusst haben könnten.
2. Sexl hat den Versuch, die gesamte Kyoto-Rede von Einstein zu rekonstruieren, nicht unternommen. (Die Rekonstruktion anhand der Quellen wäre jedoch deshalb wichtig, weil von Einstein keine Notizen zu dieser Rede vorhanden sind. Darum muss überprüft werden, ob sich der Inhalt der Rede geschichtlich und inhaltlich rekonstruieren lässt.)
3. Eine genauere Rekonstruktion der Kyoto-Rede könnte vor allem deshalb zentral sein, weil Bergia beispielsweise in seiner Schrift auf den Einfluss Machs auf Einstein¹⁵ hinweist – was er mit Einstein-Zitaten belegt. Interessanter Weise wird Einstein auch in seiner Kyoto-Rede öfter auf Mach hinweisen, wie wir noch sehen werden. (Darauf geht Sexl nicht ein.) Diese Rede könnte daher eine Bereicherung für die Einstein-Forschung, Mach-Forschung und somit für die Mach-Einstein-Forschung sein.

Wir werden in der vorliegenden Arbeit daher versuchen diese Forschungslücken zu schließen und damit Sexls Arbeit weiterzuführen. Dass dieses Vorgehen im Sinne Sexls war, ist aus den Schlusssätzen seines Artikels deutlich zu entnehmen:

„Was bleibt noch zu leisten? [...] Die historische Forschung sollte sich [...] nicht nur auf Einstein allein beziehen. Zahlreiche andere Physiker haben wesentliche Beiträge zur Weiterentwicklung seiner Theorien geleistet. Auf dem Gebiet der Quantenphysik, auf dem Einstein als einer der großen Neuerer auftrat, ist dies völlig eindeutig, und die Leistungen Heisenbergs, Schrödingers, Paulis, Sommerfelds und vieler anderer wurden hier bereits in wissenschaftshistorischen Werken in ihren geschichtlichen Zusammenhang gebracht. Auf dem Gebiet der Relativitätstheorie verbleibt dagegen noch viel zu tun, [...]. Darüber hinaus müsste aber auch die Relation von Einsteins Werk zu seinen philosophischen

¹⁴ Diese Forschungslücken sind erhalten geblieben, weil man sich in den Diskussionen auf die Frage fokussierte, ob das Michelson-Experiment bei der Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie von Bedeutung war oder nicht.

¹⁵ In Bergias Arbeit wird Mach elf Mal erwähnt – siehe (Bergia, 1985, pp. 141-142, 160, 165, 167). Im gesamten Buch kommt Mach ansonsten nur noch dreimal vor (French, 1985, pp. 10, 125, 130). Es ist daher nicht unabwegig anzunehmen, dass der österreichische Physiker und Physikdidaktiker Sexl gerade auf Bergias Arbeit hinweist, weil bereits dessen Beitrag nahelegte, dass viele Gedanken des experimentellen Physikers und Wissenschaftstheoretikers Mach für die Entstehungsgeschichte der SRT eine herausragende Rolle gespielt haben.

Interpretationen, zu seinen populären Darstellungen, seiner Aufnahme oder Ablehnung unter wissenschaftlichen, philosophischen, politischen und anderen Gesichtspunkten beschrieben und analysiert werden. Angesichts von Tausenden von Titeln, die die Bibliographien zur Relativitätstheorie registrieren, ist dies eine Aufgabe, die innerhalb der heutigen wissenschaftspolitischen Organisation der Wissenschaftsgeschichte kaum lösbar erscheint und ein Teamwork erfordern würde, wie es derzeit nur bei Großforschungsprojekten etwa auf dem Gebiete der Elementarteilchenphysik zu finden ist.

So bleibt Albert Einsteins Einfluß auf unser Jahrhundert für uns auch heute noch, trotz der großen Anstrengungen des Jubiläumsjahres, unerschöpflich und voller Überraschungen.“

(Sexl, 1985, pp. 55-56)

1.3. Hypothesen zu den Forschungslücken

Aufgrund der drei vorhandenen Forschungslücken lassen sich drei Hypothesen vertreten:

1. Die Parallelen zwischen Wilhelm Wiens, Emil Cohns und Albert Einsteins Arbeiten zeigen, dass Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“ (Einstein, 1905r) zum Teil als eine Antwort auf die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien und Cohn ansehbar ist.
2. Im Jahre 1921 erschien das gefälschte Vorwort, welches Mach als einen Relativitätsgegner darstellte und ihn damit nicht als Wegbereiter der Relativitätstheorie ansah. Aufgrund der Korrespondenz (1921) zwischen Einstein und Sommerfeld (bezüglich des gefälschten Vorwortes von Ernst Mach), der zeitlichen Nähe und des Inhalts der Kyoto-Rede ist ersichtlich, dass diese als eine Verteidigungsschrift gegenüber dem gefälschten Vorwort zu lesen ist. Dazu ist es jedoch notwendig sowohl auf den sozial-historischen Kontext der Rede einzugehen, als auch darauf, dass sich der Inhalt der Rede aufgrund der Quellen geschichtlich und wissenschaftlich tatsächlich rekonstruieren lässt.
3. Auf Basis von Punkt eins und zwei lässt sich zeigen, dass Machs Einfluss auf Einstein und die Relativitätstheorie größer war als gedacht. (Was auch aus Einsteins eigenen Aussagen hervorgeht.)

Wir werden daher zuerst im zweiten Kapitel (Abschnitt „1. Hypothese: Wien und Cohns Einfluss auf Einstein“) die Arbeiten von Wilhelm Wien, Emil Cohn und Albert Einstein vergleichen und somit versuchen, die erste Forschungslücke zu schließen und Argumente für unsere erste Hypothese (und zugleich einen Teil der dritten Hypothese) zu geben. Dabei wollen wir, um die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie zu verstehen, ebenso versuchen auf folgende vier Fragen eine Antwort zu geben:

1. Weshalb veröffentlichte Einstein seine Arbeit erst im Jahre 1905 in den *Annalen der Physik*?
2. Weshalb lautet der Titel von Einsteins Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“?
3. Weshalb ging Einstein auf der ersten Seite seiner Arbeit nicht genauer auf die Experimente von Fizeau und Michelson ein?

4. Einstein teilt seine Arbeit in zwei Teilbereiche: „Kinematik“ und „Elektrodynamik“ – gibt es wissenschaftsgeschichtlich eine Erklärung für dieses Vorgehen?

Im dritten Kapitel (Abschnitt „3. 3. Hypothese: Von Mach, über Cohn zu Einsteins Spezieller Relativitätstheorie“) werden wir Machs Einfluss auf Cohn und Einstein genauer analysieren und weitere Argumente für unsere dritte Hypothese anbieten.

Anschließend werden wir im vierten und somit letzten Kapitel versuchen die Kyoto-Rede von Einstein zu rekonstruieren – damit schließen wir die zweite Forschungslücke und bringen Argumente für unsere zweite Hypothese (und zugleich einen weiteren Teil der dritten Hypothese) vor.

2.) Kapitel: Entstehungsgeschichte der SRT

2. 1. Hypothese: Wien und Cohns Einfluss auf Einstein

„Eine vorzügliche Darstellung des Gegenstandes [der Speziellen Relativitätstheorie, Anmerkung von E.S.] enthält: Physikalisches über Raum und Zeit von E. Cohn“ Albert Einstein (Einstein, 1915b, p. 713)

Nach unserer ersten Hypothese bestehen zwischen den Arbeiten von Wilhelm Wien, Emil Cohn und Albert Einsteins Parallelen, wodurch die Ansicht vertreten werden kann, dass Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“ (Einstein, 1905r) eine Antwort auf die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien und Cohn gibt. Wir werden im Folgenden anhand geschichtlicher Gegebenheiten sehen, dass Machs Einfluss – über Cohn und Besso – auf Einstein und die Entstehungsgeschichte der SRT größer ist als bisher angenommen.

Dass Ernst Machs Einfluss auf die Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie hatte, lässt sich schwer leugnen, da Einstein selbst auf die Vorarbeiten von Mach dazu stets hingewiesen hat. Der Frage, ob Mach ebenso auf die Entwicklung der SRT und somit auf Einsteins Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) einen Einfluss hatte, wurde bis jetzt in der Wissenschaft weniger Aufmerksamkeit geschenkt. Hier besteht daher eine breite Forschungslücke, wozu wir versuchen werden eine Teilantwort anzubieten.

2.1. Das A und O von Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“

Die Redewendung „das A und O“ geht auf das griechische Alphabet zurück, welches mit dem ersten Buchstaben A (Alpha) beginnt und mit dem letzten Ω (Omega) endet. Das „A und O“ hat daher einerseits die Bedeutung vom „Anfang und Ende“ und andererseits ist damit das „Wesentliche“ gemeint. In unserer Arbeit hat es beide Bedeutungen: Wir wollen uns den Anfang und das Ende von Einsteins Werk „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) ansehen, um damit der Entstehungsgeschichte wesentlich näher zu kommen. Auf einer zusätzlichen Ebene ist die Anmerkung „A und O“ zugleich eine Hommage an John Stachel's Einsatz für die Einstein-Forschung, die er im Buch „Einstein from 'B' to 'Z'“ (Stachel, 2002) zusammengefasst hat, worauf wir eingehen werden.

2.1.1. Das O von Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“

Am Ende von Einsteins Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) erfahren wir:

„Zum Schlusse bemerke ich, daß mir beim Arbeiten an dem hier behandelten Probleme mein Freund und Kollege *M. Besso* treu zur Seite stand und daß ich demselben manche wertvolle Anregung verdanke.

Bern, Juni 1905.

(Eingegangen 30. Juni 1905)“ (Einstein, 1905r, p. 921)

John Stachel bemerkt in seiner Arbeit *Einstein from 'B' to 'Z'* (Stachel, 2002) dies: „Besso is [...] the only person Einstein thanks for help in his 1905 paper on special relativity.“ (Stachel, 2002, p. 36). Er erläutert in einer weiteren Fußnote: „Besso's role is explained more precisely in later reminiscences by Einstein, notably his 1922 Kyoto lecture [...]. [...]“ (Stachel, 2002, pp. 54, fn. 75)

Wir werden auf die Kyoto-Rede von Einstein später näher eingehen und Bessos Einfluss auf ihn ebenso besprechen. Worauf wir bereits an dieser Stelle hinweisen können, ist, dass Bessos wichtige Rolle darin bestand, Einstein Machs Gedankenwelt näherzubringen:

„Einstein's comments on foundational problems manifest an informed concern, which he (and others) later attributed in good part to his extensive readings in this area, as well as discussions with friends and fellow physicists. While a student, he read two of Ernst Mach's historical-critical studies, the *Mechanik* and *Wärmelehre* (see Einstein to Marić, 10 September 1899, Einstein 1987, Doc. 54. pp. 229-231, especially note 8), at the suggestion of his friend Michele Besso, with whom he discussed foundational questions. In 1909, Einstein wrote to Mach:

Naturally I know your major works quite well, among which I particularly admire the *Mechanics*. You have had such an influence on the epistemological outlook of the younger generation of physicists, that even your present-day opponents, such as Planck, without doubt would be regarded by one of those physicists. such as they were by-and-large a couple of decades ago, as 'Machians.' (Einstein to Ernst Mach, 9 August 1909. Einstein 1993a, Doc. 174, p. 204)

Commenting later on the prevailing mechanistic outlook in physics at this time, Einstein stated: 'It was Ernst Mach who, in his *History of Mechanics*, upset this dogmatic faith; this book exercised a profound influence upon me in this regard while I was a student' (Einstein 1979, p. 18)" (Stachel, 2002, pp. 124-125)¹⁶

Wie genau Besso und Machs Werke Einstein nun direkt oder indirekt beeinflusst haben könnten, werden wir später eingehender untersuchen. Stachel schreibt:

„We have no details of this struggle, unfortunately. Finally, after a day spent wrestling once more with the problem in the company of his friend and patent office colleague Michele Besso, the only person thanked in the 1905 SRT paper, there came a moment of crucial insight.“ (Stachel, 2002, p. 166)

Stachel betont zurecht, dass wir derzeit über die Geschehnisse nichts Genaueres in Erfahrung bringen können („We have no details of this struggle [...]“), da Einstein in seiner Korrespondenz nicht näher auf die Gegebenheit eingeht. Hier haben wir eine Forschungslücke, welche sich womöglich zum Teil durch die Analyse von Einsteins Arbeit schließen lässt. Wir werden nämlich sehen, dass Einsteins Position sich im Laufe der Zeit änderte:

1.) Er lehnt das Konzept des Äthers noch nicht ab.

2) Er beginnt das Konzept des Äthers abzulehnen und sucht nach Alternativen.

Je mehr wir über die zweite Phase in Erfahrung bringen können, desto mehr Verständnis werden wir über Einsteins „struggle“ bekommen. (Und zwar werden wir die Ansicht vertreten, dass Einsteins Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) als eine Antwort auf Wiens und Cohns Arbeiten verstehbar ist.)

¹⁶ Siehe dazu (Einstein, 1983, p. 8). Einstein hat Poincaré gut gekannt (Stachel, 2002, p. 125). Für eine Einführung zu den Unterschieden von Poincares Ansichten (vor 1905) und Einsteins SRT siehe (Bergia, 1985, pp. 158-163). Was Einsteins Theorie von anderen Vor-Relativistischen Theorien unterschied, war nach Bergia (Bergia, 1985, p. 163) die Voraussagekraft.

Auf diese beiden Punkte werden wir später im Abschnitt „2.1.2.1. Die zwei Phasen des A und O“ eingehen.

2.1.2. Das A von Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“

Beginnen wir nun mit der ersten Seite der monumentalen Arbeit Einsteins – und fragen uns: Weshalb heißt die Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r)? In *The Collected Papers of Einstein* heißt es dazu:

„Hertz’s article, ‘Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik für bewegter Körper’ (*Hertz 1890b*, reprinted in *Hertz 1892*, pp. 256-285), appears to be the source of the phrase ‘die Elektrodynamik bewegter Körper.’ Einstein used these words in Doc. 52, and often thereafter, to designate the complex of problems, work on which ultimately led him to the special theory of relativity (Einstein 1905c).“ (CPAE 1; _ ; p. 223)

Der Artikel „Ueber die Grundgleichungen der Electrodynamik für bewegte Körper“ (Hertz, 1890) von Heinrich Hertz erschien in den *Annalen der Physik*, wie später die Arbeit Einsteins. Die veröffentlichten Arbeiten in den *Annalen der Physik* haben daher Einsteins Forschungsweg allgemein sehr geprägt. Heinrich Hertz war, ebenso wie Einstein und Mach, nicht nur an den Grundlagen der Elektrodynamik interessiert, sondern auch an der Mechanik. Im Vorwort seines Buches *Die Prinzipien der Mechanik* schreibt er: „In allgemeiner Hinsicht verdanke ich sehr viel dem schönen Buche über die Entwicklung der Mechanik von MACH.“ (Hertz, 1894, p. XXVI). Mach wiederum widmet in seinem Buch *Mechanik* der Hertzschen Mechanik einen eigenen Abschnitt (Mach, 2012, pp. 290-296). Es ist auch ein Briefwechsel zwischen Hertz und Mach erhalten, der von gegenseitiger Wertschätzung zeugt (Thiele, 1978, pp. 53-55). Der erste Brief (am 23. September 1890) ist von Hertz an Mach bezüglich der Tagung der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte, welche im Jahre 1891 in Halle stattfand und er möchte Mach deshalb einige Informationen diesbezüglich geben – dabei beendet er den Brief mit den Worten:

„Im Übrigen bin ich stolz darauf, mit Ihnen, hochverehrter Herr College, in persönliche Beziehung getreten zu sein und indem ich mich Ihrem Wohlwollen bestens empfehle, bin ich

Ihr ganz ergebener
Professor Dr. H. Hertz“

(Thiele, 1978, p. 54)

Darauf antwortet Mach (am 25. September 1890):

„Es wird mir ein großes Vergnügen sein, Sie in Halle kennen zu lernen. In Hamburg erfuhr ich im Sommer 1888 am Tage meiner Abreise von Ge[heim]r[at] Neumayr, daß Sie da seien, konnte aber von dieser Mittheilung keinen Gebrauch machen, so sehr ich gewünscht hätte, den Verfasser der Arbeit über die ‚Maxwell’sche u[nd] gegnerische Elektrodynamik‘ kennen zu lernen. Die Heidelberger Versammlung konnte ich wegen Krankheit nicht besuchen.

Mit ganz besonderem Interesse habe ich Ihre Arbeit ‚Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik‘ gelesen. Sie nähern sich darin sehr dem Ideal einer von Mythologie freien Physik, welches ich seinerzeit (Mechanik S. 468) den Collegen zu empfehlen mir erlaubte.“
(Thiele, 1978, pp. 54-55)

Insofern ist es nicht überraschend, dass Einstein, der sich mit der Grundlagenforschung beschäftigte, unter anderem an Machs und Hertz’ Werken interessiert war. Tatsächlich erzählt Einstein in dem Brief (am 10. August 1899) an Marić, dass er das Buch von Hertz lese und spricht von der „Elektrodynamik bewegter Körper“ (CPAE 1; 52; p. 226). Am 19. Dezember 1901 erwähnt Einstein in einem anderen Brief an Marić, dass er von seinen „Ideen zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (CPAE 1; 130; p. 328) Alfred Kleiner berichtet hatte und weiter:

„Er riet mir, meine Ideen über elektromagnetische Lichttheorie bewegter Körper zu veröffentlichen sammt der experimentellen Methode. Er fand, daß die von mir vorgeschlagene experimentelle Methode die denkbar einfachste und zweckmäßigste sei.“
(CPAE 1; 130; p. 328)

Mit diesem Experiment wollte Einstein die relative Bewegung zum Äther messen, wie wir später ebenfalls in seiner Kyoto-Rede erfahren werden. Solche experimentellen Überlegungen bezüglich des Äthers hatte Einstein bereits seit Langem. In einem Brief (am 10. September 1899) an Mileva Marić schreibt er, dass er sich „Bücher von Helmholtz Boltzmann & Mach“ (CPAE 1; 54; p. 230) bestellt habe, und weiter:

„In Aarau ist mir eine gute Idee gekommen zur Untersuchung, welchen Einfluß die Relativbewegung der Körper gegen den Lichtäther auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in durchsichtigen Körpern hat. Auch ist mir eine Theorie in den Sinn gekommen über diese Sache, die mir große Wahrscheinlichkeit zu besitzen scheint.“ (CPAE 1; 54; p. 230)

Einstein möchte also den „Einfluß die Relativbewegung der Körper gegen den Lichtäther auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in durchsichtigen Körpern“ untersuchen. Auf diese Idee kam er höchstwahrscheinlich aufgrund der Schrift „Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen“ (Wien, 1898) von Wilhelm Wien, wo Wien empfiehlt:

„Als Experiment, welches für diese Annahme von Wichtigkeit wäre, empfiehlt sich der Versuch, ob der Aether durch die Bewegung reflectirender durchsichtiger Medien in Bewegung gesetzt wird.“ (Wien, 1898, p. XVII)

Wilhelm Wiens Arbeit (Wien, 1898) war daher nicht nur wegweisend, sondern zugleich einer der ursprünglichen Anregungen für Einstein bei der Entwicklung der Relativitätstheorie. Das wird vor allem aus seinem nächsten Brief an Marić deutlich, die er ein paar Wochen später (am 28. September 1899) schreibt, welches für unsere Forschung höchst interessant ist:

„[...] ich habe viel büchergewurmt & sehr viel ausgetüftelt, zum Teil sehr interessant. Auch hab ich an Professor Wien in Aachen geschrieben über die vom ‚Prinzipal‘ so stiefmütterlich behandelte Arbeit über Relativbewegung des Lichtäthers gegen die ponderable Materie. Ich habe von diesem Mann eine sehr interessante Abhandlung vom Jahr 1898 über diesen Gegenstand gelesen. Er wird mir via Polytechnikum schreiben (wenns gewiß ist!).“
(CPAE 1; 57; p. 233-234)

Einstein erzählt in diesem Brief, dass er Wilhelm Wiens Abhandlung „Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen“ (Wien, 1898) gelesen, und Wien deshalb über sein eigenes Konzept kontaktiert hat – siehe dazu auch (CPAE 1; _ ; p. 224). Diese Arbeit Wiens stellt eine gute Einführung in die Forschungslage der Physik bezüglich des Äthers dar. Beispielsweise geht er auf den Fresnelschen Mitführungskoeffizienten für den Äther ein (Wien, 1898, p. XI) und schreibt:

„Lorentz erhält aus seiner Annahme unmittelbar den Fresnel’schen Coefficienten der Fortführung des Lichtes durch bewegte Medien, die Aberration und das Doppler’sche Princip. Alle drei hängen unmittelbar zusammen und ergeben sich aus einem allgemeinen Satze, wonach alle für ruhende Körper geltenden Gleichungen kleiner Schwingungen auf bewegte übertragen werden können, wenn anstatt der Zeit t die Variable $t - t_1 v A$ einführt, wo t_1 die Zeit bedeutet, die das Licht gebraucht, um im freien Aether von einem festen Punkte an einen beliebig betrachteten zu gelangen, und $v A$ das Verhältniss der Geschwindigkeit des Körpers zur Lichtgeschwindigkeit ist.“ (Wien, 1898, pp. XI-XII)

(Auf derselben Seite geht Wien in einem eigenen Abschnitt auf den Zusammenhang zwischen der Gravitation und der Trägheit bzw. des Äquivalenzprinzips ein, was erklärt, weshalb Einstein auch die Werke von Mach bestellt hatte. Diese Probleme wird er jedoch erst mit der Allgemeinen Relativitätstheorie lösen, worauf wir noch später eingehen werden. Fokussieren wir uns jedoch in diesem Abschnitt auf die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie.)

Wie wir sehen werden, sind genau die folgenden Punkte, die Einstein später zur Speziellen Relativitätstheorie führen werden: Dopplersches Prinzip, die Aberration und das physikalische Verständnis der „Ortszeit“ von Lorentz. Dass sich Einstein gerade den Themen Aberration und Dopplersches Prinzip widmen wird, ergibt sich daraus, dass Wien in seiner Schrift die experimentellen Versuche thematisiert und zuerst auf jene mit positiven Ergebnissen eingeht:

„A. Versuche mit positivem Ergebnis.

1. Die Aberration des Lichtes der Fixsterne. Die Aberration fand bekanntlich eine einfache Erklärung durch die Emissionshypothese des Lichtes. Die Schwierigkeiten in der Undulationstheorie sind erst ganz neuerdings von *H. A. Lorentz* durch die Annahme *ruhenden* Aethers beseitigt.

2. Das *Doppler'sche* Prinzip ist zwar seiner Natur nach von allgemeiner kinematischer Bedeutung, muss aber doch bei der Frage bewegten oder ruhenden Aethers berücksichtigt werden.

3. Der Versuch von *Fizeau* und seine Wiederholung durch *Michelson* und *Morley*. Ein Lichtstrahl, der durch fließendes Wasser in der Richtung der Bewegungen geht, erfährt eine Beschleunigung des Ganges im Verhältnis $1 + v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$, wo v die Geschwindigkeit, n den Brechungsindex des Wassers bezeichnen. Dies Ergebniss findet in der Annahme ruhenden Aethers seine vollständige Erklärung.“ (Wien, 1898, p. XIII)

Es gibt also genau drei experimentelle Resultate, die eine heile Welt der Physik abzeichnen, und sie alle beziehen sich auf die Aberration und das Dopplersche Prinzip. (Auch das dritte Experiment bezieht sich auf die Aberration des Lichtes, wie wir später erläutern werden.) Gerade das dritte Experiment physikalisch neu zu interpretieren und zu erklären, führte Einstein schließlich zum Erfolg. Dass er daher bei seinen Untersuchungen von diesen Gebieten (Dopplersches Prinzip und Aberration) aus seine Forschungen fortsetzte oder sie darauf aufbaute, ist allzu verständlich, weil man hier bereits positive Resultate erzielte. Nur so konnte er die Versuche mit negativen Ergebnissen eine Antwort liefern. Dabei zählt Wien gleich zehn Versuche auf, wobei aber nur der letzte eine wichtige Rolle für die Physikgeschichte spielen wird:

„B. Versuche mit negativem Ergebniss.

[...]

10. Der Versuch von *Michelson* und *Morley*. Wenn der Aether ruht, so muss die Zeit, die ein Lichtstrahl braucht, um zwischen zwei Glasplatten hin und herzugehen, sich ändern,

wenn die Platten sich bewegen. Die Veränderung hängt von der Grösse $v^2 A^2$ ab, müsste aber bei Anwendung von Interferenzen beobachtbar sein.

Das negative Ergebniss ist mit der Annahme ruhenden Aethers unvereinbar. Diese Annahme kann nur durch die Hypothese gehalten werden, dass die Längendimensionen fester Körper durch die Bewegung durch den ruhenden Aether hindurch in demselben Verhältniss geändert werden, um die Verlängerung des Weges des Lichtstrahls zu compensieren.

Die Annahme beweglichen Aethers würde die Möglichkeit ergeben, dass der Aether durch die Bewegung der Erde mitgenommen wird und relativ zu ihr ruht. Dadurch würden alle negativen Versuchsergebnisse erklärt sein. Es bliebe dann aber die Erklärung der Aberration übrig.“ (Wien, 1898, pp. XIV-XVI)

Bedauerlicherweise ist der Brief von Einstein an Wilhelm Wien in *The Collected Papers of Einstein* nicht vorhanden, ebenso wie die Antwort von Wien auf Einsteins Brief.¹⁷ Doch die weitere Korrespondenz von Einstein zeigt, dass er sich mit diesem Thema stets auseinandersetzte.

2.1.2.1. Die zwei Phasen des A und O

Allgemein sehen wir vor dem Jahr 1905, zwei Phasen in der Entwicklung von Einstein:

1. Phase: Einstein lehnt das Konzept des Äthers nicht ab.

Diese Phase dauerte vermutlich bis September 1901 – er schreibt (am 6? September 1901) nämlich an seinen guten Freund Marcel Grossmann:

„Zur Erforschung der Relativbewegung der Materie gegen den Lichtäther ist mir nun eine erheblich einfachere Methode in den Sinn gekommen, welche auf gewöhnlichen Interferenzversuchen beruht. Wenn mir nur einmal das unerbittliche Schicksal die zur Ausführung nötige Zeit und Ruhe gibt! Wenn wir uns wieder einmal sehen, werd ich Dir darüber berichten.“ (CPAE 1; 122; p. 316)

2. Phase: Einstein beginnt das Konzept des Äthers zu bezweifeln bzw. lehnt es ab.

Wann genau Einstein an dem Konzept des Äthers zu zweifeln begann, lässt sich schwer sagen – womöglich bereits gegen Ende des Jahres 1901. Wir wollen an dieser Stelle auf seine

¹⁷ In Volume 1 von *The Collected Papers of Albert Einstein* sind gar keine Korrespondenz zwischen Einstein und Wien zu finden, obwohl offensichtlich eine solche offensichtlich stattgefunden hat. Erhalten ist aber die Korrespondenz zwischen Wien und Einstein ab dem Jahr 1907 – siehe zum Beispiel (CPAE 5; 49; p. 60). Der Inhalt der Briefe zeugt von gegenseitiger Wertschätzung. Falls man irgendwann die Briefe aus früherer Zeit entdecken würde, könnten sie höchstwahrscheinlich einen wichtigen Beitrag zur Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie leisten.

letzten Äußerungen diesbezüglich eingehen. Ende Dezember (17. Dezember 1901) schreibt er an Marić:

„Ich arbeite eifrigst an einer Elektrodynamik bewegter Körper, welches eine kapitale Abhandlung zu werden verspricht. Ich habe Dir geschrieben, daß ich an der Richtigkeit der Ideen über die Relativbewegung zweifelte. Meine Bedenken beruhten jedoch lediglich auf einem simplen Rechenfehler. Ich glaube jetzt mehr denn je daran.“ (CPAE 1; 128; p. 325-326)

Dass Einstein „an der Richtigkeit der Ideen über die Relativbewegung“ nachdachte, könnte bereits ein Hinweis darauf sein, dass er das Relativitätsprinzip anvisiert hatte – doch mit Sicherheit lässt sich das schwer sagen. Am 28. Dezember 1901 schreibt er wieder an sie:

„Michele gab mir ein Buch über die Theorie des Äthers, geschrieben im Jahr 1885.¹⁸ Das kommt einem vor, wie wenn es aus dem Altertum käme, so veraltet sind die Anschauungen. Da sieht man wie schnell jetzt das Wissen sich entwickelt. Ich will mich nun dahinter machen, zu studieren, was Lorentz und Drude über die Elektrodynamik bewegter Körper geschrieben haben.“ (CPAE 1; 131; p. 330)

Ab wann Einstein nun den Äther zu bezweifeln begann und wann er dessen Existenz schließlich ablehnte, lässt sich anhand der Korrespondenz nicht genau sagen. Offensichtlich sprach er mit seinem Freund Michele Besso darüber. Besso, ein schweizerisch-jüdischer Maschinenbau-Student, war ein sehr guter Freund von Einstein. Besso ist in der Einstein-Forschung bekannt dafür, dass er Einstein Machs Gedanken näherbrachte und dessen Werke empfahl. Wenn Einstein gerade mit Besso über den Äther sprach, dann legt es bereits nahe, dass Einstein entweder direkt wegen Machs Arbeiten am Äther Konzept zweifelte, oder indirekt aufgrund der Arbeit eines anderen theoretischen Physikers, der von Mach beeinflusst wurde – oder beides. Doch wer könnte der andere theoretische Physiker – und womöglich ebenso wie Besso und Einstein jüdischer Abstammung – sein, der von Mach beeinflusst wurde und der wiederum Einstein beeinflusst haben könnte? Diese Fragestellung ist äußerst wichtig, um die 2. Phase von Einstein besser verstehen zu können.

Beleuchten wir die Geschichte der Physik genauer, so sehen wir, dass Einstein zu jener Zeit nicht der einzige Physiker war, der die Arbeiten von den beiden Physikern Hertz und Mach wertschätzte – er hatte sozusagen einen Vorgänger bzw. zumindest einen Mitstreiter, der ihm in vielen Punkten sehr ähnelte. Emil Cohn, ebenfalls wie Einstein ein deutsch-jüdischer, theoretischer Physiker beginnt sein Buch *Das Elektromagnetische Feld. Vorlesungen über die*

¹⁸ Es war kein Buch von Mach – siehe (CPAE 1; 131; p. 330, fn. 4).

Maxwell'sche Theorie (Cohn, 1900a) mit einem Zitat von Hertz. Cohns Arbeiten sind überaus bemerkenswert, denn bereits in seiner Abhandlung „Über die Gleichungen der Electrodynamik für bewegte Körper“ (Cohn, 1900b) verzichtet er auf das Konzept des Äthers (Cohn, 1900b, p. 516) und stellt eine Elektrodynamik für bewegte Körper auf, wodurch er die Aberration, das Experiment von Fizeau und Michelson erklären kann (Cohn, 1900b, pp. 516-517). Ähnlich verfährt er in seiner Arbeit: „Ueber die Gleichungen des elektromagnetischen Feldes für bewegte Körper“ (Cohn, 1901). Auch dort möchte er über den Äther nicht spekulieren – bei dieser Arbeit wird jedoch der Einfluss von Mach bereits stark ersichtlich, wenn er versucht dem Äther irgendeine physikalische Bedeutung zugeben:

„In dem vorstehenden Abriß der Elektrodynamik haben wir uns darauf beschränkt, zu zeigen, daß sich alle Beobachtungen, welche die Abhängigkeit der elektromagnetischen Vorgänge von den wahrnehmbaren Bewegungen der Körper betreffen, in ein einfaches Gesetz zusammenfassen lassen. [...] In dieser Darstellung ergab sich nirgends ein Anlaß, neben den ponderablen Körpern einen ‚Aether‘ einzuführen; es genügte, anzunehmen, daß sich auch in einem von Materie freien Raum elektromagnetische Energie ausbreiten könne.

Wir wollen nun nachträglich unsere Grundannahmen der Anschauung näher zu bringen suchen durch Einführung eines überall vorhandenen, die Materie durchdringenden Etwas, das wir ‚Aether‘ nennen wollen, ohne uns damit irgend eine der Vorstellungen zu eigen zu machen, welche im Lauf der Zeit mit diesem Wort verknüpft worden sind. Es ist nicht unsere Meinung, daß durch solche Bildersprache das geringste gewonnen werde bezüglich der oben abgehandelten Theorie. Aber möglicherweise kann sie einen heuristischen Werth gewinnen bei dem weiteren Ausbau dieser Theorie. Wir geben also demjenigen Theil unserer Grundannahmen, welcher sie von den Maxwell-Hertz'schen unterscheidet, nunmehr die folgende Fassung:

Ueberall ist Aether vorhanden, und überall ist er in absoluter Ruhe. Alle Geschwindigkeiten, von denen wir sprechen, sind Geschwindigkeiten relativ zum Aether. Unseren bisherigen Erfahrungen gegenüber genügt es, die Fixsterne ohne ‚Eigenbewegung‘ als ruhend gegen den Aether anzusehen.“ (Cohn, 1901, pp. 98-99)

Wie wir später sehen werden, geht der Verzicht auf den Äther tatsächlich auf Ernst Mach zurück, und ebenso die Überlegung anstelle des absoluten Raums die Fixsterne als Referenz zu verwenden. Robert R. Traill, der diese Arbeit von Cohn ins englische übersetzt hat, beginnt seine Einleitung mit den Worten:

„From 1851 to 1905, there were a series of interesting ‘prerelativity’ developments in the theory of light transmission. This approach was cut short by Einstein’s 1905 paper, and then forgotten in the chaos of two world wars.“ (Trail, 2008, p. 1)

Die zwei Weltkriege und die daraus resultierenden Begebenheiten haben womöglich die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie etwas verzerrt. Eine andere Verdunkelung der Geschichte gab es durch die Fälschung des Vorwortes von E. Mach. Wenn

wir uns die Arbeiten von Cohn und Mach näher ansehen, erkennen wir, dass sie als Wegbereiter der Speziellen Relativitätstheorie angesehen werden können, weil sie auf das Konzept des Äthers verzichtet haben. Doch ... es gibt noch mehr zu entdecken. Fokussieren wir uns zunächst auf die Arbeiten von Cohn.

Wir haben gesehen, dass Wiens Abhandlung „Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen“ (Wien, 1898) für Einstein ganz wichtig war, wobei er jedoch noch nicht am Äther zweifelte. Womöglich gegen Ende des Jahres 1901 begann er erst das Konzept des Äthers aufzugeben. Die Fragen, die sich stellen, sind:

- a) Weshalb benötigte Einstein über drei Jahre (1902-1905) für die Spezielle Relativitätstheorie? Und vor allem:
- b) Wieso veröffentlichte er die Arbeit gerade im Jahre 1905?

Ad a): Die erste Frage ist relativ einfach zu beantworten: Einstein war in diesem Zeitraum vor allem mit der Wärmelehre beschäftigt – darüber berichtet er an Besso (am 22. Jänner 1903):

„Meine Arbeit hab ich nun endlich <vorgestern Montag> abgeschickt nach vielfachem Umarbeiten und Verbessern. Jetzt aber ist sie vollkommen klar und einfach, so daß ich ganz zufrieden damit bin. Unter Voraussetzung des Energieprinzips und der atomistischen Theorie folgen die Begriffe Temperatur und Entropie, sowie mit Benützung der Hypothese, daß Zustandsverteilungen isol. Systeme niemals in unwahrscheinlichere übergehen, auch der zweite Hauptsatz in seiner allgemeinsten Form, nämlich die Unm[öglichkeit] eines perpetuum mobile zweiter Art.
[...] In der nächsten Zeit will ich mich mit den Molekularkräften in Gasen abgeben, und dann umfassende Studien in Elektronentheorie machen.“ (CPAE 5; 5; p. 10-11)

Doch offensichtlich fand er bereits gegen Ende des Jahres, am 5. Dezember 1903, für die Elektrodynamik Zeit, da er für die Naturforschende Gesellschaft in Bern den Vortrag über die Theorie der elektromagnetischen Wellen hielt – siehe (CPAE 2; _ ; p. 261).

Ad b): Umso wichtiger wird die zweite oben gestellte Frage, weshalb Einstein erst 1905 seine Untersuchungen zur Elektrodynamik abschließen und anschließend veröffentlichen konnte. Die Antwort darauf ist relativ einfach: Offensichtlich war für Einstein zu Beginn (1899) die Arbeit von Wien (Wien, 1898) äußerst wichtig und wegweisend, welche in den *Annalen der Physik* erschien – in dieser Zeitschrift wird Einstein auch seine eigene Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) veröffentlichen. Dass Einstein zwischen

1898 und 1901 regelmäßig die *Annalen der Physik* las, lässt sich aus seinen Korrespondenzen schließen. Dass er ebenso zwischen 1902 und 1905 einige Arbeiten in *Annalen der Physik* studierte, lässt sich ebenso annehmen (CPAE 2; _ ; p. 260) – schließlich wurden einige seiner Arbeiten bis 1905 darin veröffentlicht:

- „Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen“ (Einstein, 1901),
- „Über die thermodynamische Theorie der Potentialdifferenz zwischen Metallen und vollständig dissociirten Lösungen ihrer Salze und über eine elektrische Methode zur Erforschung der Molecularkräfte“ (Einstein, 1902a)
- „Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik“ (Einstein, 1902b),
- „Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik“ (Einstein, 1903),
- „Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme“ (Einstein, 1904).

(Aufgrund seiner Beiträge wird Einstein ebenso als Rezensent für die *Annalen der Physik* tätig werden (CPAE 2; _ ; p. 109)).

Da Einstein die Arbeit in den *Annalen der Physik* veröffentlichen wird, ist die Wahrscheinlichkeit aus den oben erläuterten Gründen sehr groß, dass gerade in den Ausgaben von 1904/05 ein Artikel erschienen sein muss, der ihm schlussendlich den zweiten Impuls zur Fertigstellung gab – interessanterweise war es wohl erneut eine Arbeit von Wilhelm Wien, nämlich seine Schrift „Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper“ (Teil I) (Wien, 1904b). Doch sehen wir uns das Jahr 1904 und die wissenschaftlichen Veröffentlichungen der damaligen Zeit etwas genauer an.

2.1.2.2. Das A: Wissenschaftlicher Dialog zwischen E. Cohn, W. Wien und A. Einstein

Das Jahr 1904 ist aus der Perspektive der Physikgeschichte von außerordentlicher Bedeutung:

(I.) 1904 war der 60. Geburtstag von Ludwig Boltzmann. Zu diesem Anlass wurden von vielen Wissenschaftlern aus unterschiedlichsten Nationalitäten Arbeiten verfasst, wobei 117 davon im Buch *Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstage* (Meyer, 1904) herausgegeben wurden. Einstein kannte dieses Buch, da er die Aufgabe hatte, 3 der 117

Arbeiten zu überprüfen (CPAE 2; _ ; p. 110). Einige interessante Schriften daraus seien an dieser Stelle kurz aufgezählt:

- Max Planck (Berlin): „Über die mechanische Bedeutung der Temperatur und der Entropie“ (Planck, 1904). (Interessanterweise findet sich in dieser Arbeit keinerlei Kritik an E. Mach.)
- Max Abraham (Göttingen): „Der Lichtdruck auf einen bewegten Spiegel und das Gesetz der schwarzen Strahlung“ (Abraham, 1904a)
- Wilhelm Wien (Würzburg): „Theorie eines bewegten leuchtenden Punktes“ (Wien, 1904a)
- Ernst Mach (Wien): „Objektive Darstellung der Interferenz des polarisierten Lichtes“¹⁹ (Mach, 1904) (In dieser Arbeit wird „Äther“ nicht einmal erwähnt! Mach war bekannt dafür, dass er sowohl das Konzept des absoluten Raumes als auch den Äther für unnötig hielt.)

(II.) Möchte man Einsteins „Wunderjahr“ („Annus mirabilis“) 1905 verstehen, so muss man sich den Forschungsstand, welche sich in zeitlicher (1904) und auch örtlicher²⁰ Nähe abspielte, genauer ansehen.

Aufgrund der Arbeit Wilhelm Wiens „Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen“ (Wien, 1898) und Einsteins Überlegungen zu einem Experiment

¹⁹ Bei dieser Arbeit erweiterte E. Mach das Experiment zur Polarisation und Interferenz, welches er gemeinsam mit seinem Assistenten W. Rosicky für seine Vorlesungen entwickelte (Mach, 1904, pp. 441, fn. 1). In der zweiten Fußnote schreibt er:

„Ich mußte mich bei meinem Leiden, welches mir unmöglich machte, selbst zu experimentieren, darauf beschränken, den Plan der Versuche zu entwerfen. Mein ältester Sohn, Dr. med. *Ludwig Mach*, hat die Experimente im Detail sorgfältig ausgeführt, während ich die Aufstellung und die Ergebnisse kontrolliert habe.“ (Mach, 1904, pp. 441, fn. 2)

Bereits aus dieser Fußnote sind zwei Sachen ersichtlich:

1. E. Mach gibt als Wissenschaftler an, wer bei den Experimenten wie mitwirkte.
2. E. Mach erwähnt seinen Sohn L. Mach namentlich.

Beide Punkte sind im gefälschten Vorwort nicht vorhanden.

²⁰ Mit örtlicher Nähe ist einerseits der deutschsprachige Raum gemeint und andererseits das Publikationsmedium, wie die *Annalen der Physik* und die Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften.

mit Spiegeln liegt es nahe, dass Einstein die Arbeiten „Der Lichtdruck auf einen bewegten Spiegel und das Gesetz der schwachen Strahlung“ (Abraham, 1904a) von Max Abraham und „Theorie eines leuchtenden Punktes“ (Wien, 1904a) von Wilhelm Wien wohl studierte.

Wie wir noch sehen werden, werden die Autoren dieser zwei Arbeiten im Jahre 1904 noch für einige Diskussionen und Polemiken sorgen: 1904 erschien nämlich in den *Annalen der Physik* „Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper“ (Teil I) (Wien, 1904b) und „Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper. II.“ (Teil II) (Wien, 1904c) von Wilhelm Wien, wo er die Arbeiten von Emil Cohn und Max Abraham diskutiert. Daraufhin werden E. Cohn und M. Abraham Arbeiten zu ihren Theorien präsentieren. (Sowohl Emil Cohn als auch Max Abraham (Walk, 1988, p. 3) waren, wie Einstein (Walk, 1988, p. 76), jüdischer Herkunft – siehe (Walk, 1988, p. 432). Womöglich wäre das auch ein weiteres Argument dafür, dass Einstein die Arbeiten von Cohn und Abraham als Student bereits verfolgte.)²¹

Dieser wissenschaftliche Dialog, welcher 1904 zwischen Wien, Cohn und Abraham stattfand, wird sich für Einstein 1905 als fruchtbarer Boden erweisen.

2.1.2.2.1. Der Diskurs²² zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik

In seiner Schrift „Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper“ (Wien, 1904b), welche in den *Annalen der Physik* erschien, versucht Wilhelm Wien die Lorentzsche Elektrodynamik der Cohnschen gegenüberzustellen und beginnt daher mit den Worten:

„Von den bisher aufgestellten Differentialgleichungen, welche die *Maxwellsche* Theorie für den Fall der Bewegung verallgemeinern, hat sich die von *H. A. Lorentz*²³ am

²¹ Andere Physiker mit jüdischen Wurzeln wären beispielsweise noch Erwin Freundlich, Arnold Sommerfeld, Warburg Emil, Walter Kaufmann, Wolfgang Pauli usw. Interessanterweise spielen sie alle für die Geschichte der Relativitätstheorie direkt oder indirekt eine wichtige Rolle.

Da die Wissenschaft verständlicherweise auch eine soziale Dimension besitzt, sollte in weiteren Arbeiten dieser Punkt weiter erforscht werden.

²² Dass der wissenschaftliche Dialog zwischen Kontrahenten für den Fortschritt der Wissenschaft ganz wichtig ist, sagt einem der Hausverstand. Wir werden im vierten Kapitel (Abschnitt: „4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]–[48]“) sehen, dass Einstein später (Einstein, 1914h, pp. 344–346) (Einstein, 1916c, pp. 102–103) (Einstein, 1918k) sogar, um seine Allgemeine Relativitätstheorie verständlich zu machen, in seinen Erörterungen – ähnlich wie Galilei – auf die Dialog-Form zurückgreifen wird.

²³ In einer Fußnote gibt er die Quelle an: „*H. A. Lorentz*, Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern. Leiden 1895.“ (Wien, 1904b, pp. 641, fn. 1). Das ist eine Arbeit, die Einstein sehr gut kannte und ihm in seinen theoretischen Studien weiterhalf. Wir werden später darauf weiter eingehen.

besten bewahrt. Die Theorie von *H. Hertz*²⁴, wonach der Träger der elektromagnetischen Wirkungen sich mit derselben Geschwindigkeit bewegen soll, wie die Materie, wird durch den von *Michelson* und *Morley*²⁵ wiederholten Fizeauschen Versuch widerlegt, der zeigt, daß ein Lichtstrahl von bewegtem Wasser nur in mit einem bestimmten Bruchteil der Geschwindigkeit mitgezogen wird. Da bisher alle Versuche eine Bewegung des Lichtäthers in dem von Materie freien Raum nachzuweisen gescheitert sind, liegt für die Theorie keine Veranlassung vor, sich mit der Komplikation einer derartigen Möglichkeit zu befassen. Neuerdings ist von *E. Cohn*²⁶ ein System von Gleichungen für bewegte Körper aufgestellt, das in der Tat zunächst geeignet erscheint, den beobachteten Tatsachen gerecht zu werden. So hat es vor dem *Lorentzschen* sogar den Vorzug, das negative Ergebnis des *Michelsonschen* Interferenzversuches ohne Zuhilfenahme einer weiteren Hypothese zu erklären, während Lorentz die Annahme machen muß, daß die Dimensionen der festen Körper von der Geschwindigkeit abhängig sind.

Dagegen enthält die Theorie von Cohn wieder in anderer Hinsicht Schwierigkeiten.“
(Wien, 1904b, p. 641)

Wien fasst somit bereits auf der ersten Seite den Forschungsstand der damaligen Zeit zusammen: Aufgrund des Fizeauschen-Experimentes (1851), welches von Michelson und Morley (1886) wiederholt wurde, nahm man eine Mitschleppung des Äthers in Körpern an. Andererseits konnte jedoch Michelson (1881) durch ein anderes Experiment – später gemeinsam mit Morley (1887) – mit seinem Interferenzversuch keinerlei Auswirkungen eines Äthers auf die Bewegung der Erde feststellen. Anschließend geht Wien auf die unterschiedlichen Konzepte auf diesem Gebiet ein, welche versuchten, diese experimentellen Resultate mit der Theorie in Einklang zu bringen – unter anderem eben auf die Theorie von Cohn, die nach seiner Ansicht einige Schwierigkeiten enthielt. Cohn nimmt dazu Stellung und weist in „Antikritisches zu Hrn. W. Wiens ‚Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper‘“ (Cohn, 1904) in den *Annalen der Physik* auf (nur) einer Seite daraufhin, dass Wien die Cohnschen Gleichungen (in Bezug auf die Translationsgeschwindigkeiten) nicht richtig angewendet hat (Cohn, 1904, p. 208). In „Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik des Herrn E. Cohn“ (Wien, 1904d) (in *Annalen der Physik*) antwortet nun Wien und diskutiert erneut die Interpretation der Translationsgeschwindigkeit (Wien, 1904d, pp. 632-633) usw.

Was man aus dieser Diskussion zwischen Cohn und Wien jedenfalls klar erkennen kann, ist, dass man relativistische Transformationsgleichungen und das aus ihnen abgeleitete

²⁴ In einer Fußnote gibt er die Quelle an: „*H. Hertz*, Wied. Ann. 41. p. 369. 1890.“ (Wien, 1904b, pp. 641, fn. 2)

²⁵ In einer Fußnote gibt er die Quelle an: „*W. A. Michelson* u. *E. W. Morley*, Amer. Journ. of Science (3) 31. p. 377. 1886.“ (Wien, 1904b, pp. 641, fn. 3)

²⁶ In einer Fußnote gibt er die Quelle an: „*E. Cohn*, Ann. d. Phys. 7. p. 29. 1902.“ (Wien, 1904b, pp. 641, fn. 4)

relativistische Geschwindigkeitsadditionstheorem benötigt, um die Translationsgeschwindigkeiten (ohne die Annahme eines Äthers) einordnen zu können.²⁷ Wohl aufgrund von Wiens Schriften, vergleicht Cohn noch im selben Jahr seine Theorie mit der Lorentzschen – so beginnt er seinen Artikel „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“ (Teil I) (Cohn, 1904a):

„Veranlasst durch eine Reihe experimenteller Untersuchungen der letzten Jahre, welche alle die Unabhängigkeit der beobachteten Erscheinungen von der Erdbewegung darthaten, hat H. A. LORENTZ neuerdings die Grundlagen der Elektronentheorie durch neue Hypothesen modificirt. Im Folgenden beabsichtige ich zu zeigen, dass nach diesen Modificationen die LORENTZ'schen Gleichungen der Elektrodynamik für ausgedehnte Körper übereinstimmen mit den Gleichungen, welche ich vor einigen Jahren aufgestellt habe.

§ 1. Eine Vergleichung meines Ansatzes mit dem LORENTZ'schen war bisher in vollem Umfang nicht möglich. Es ist diess darin begründet, dass die beiden >>Theorien<< durchaus verschiedener Art sind. Die meinige stellt in wenigen Gleichungen den Einfluss sichtbarer Bewegungen auf die elektromagnetischen Vorgänge in greifbaren Körpern dar. Sie ist auf diesem Gebiet direct mit der Erfahrung vergleichbar. Für eine zu entwickelnde Moleculartheorie gibt sie nur eine Anweisung: dieselbe so auszubilden, dass für die messbaren Mittelwerthe eben diese Gleichungen entstehen.

LORENTZ gibt direct eine Regel für die elektromagnetischen Wirkungen, welche supponirte kleinste Theile ausüben und erleiden. Aus diesen sind zunächst Gleichungen zu gewinnen für diejenigen Grössen, >>welche sich auf den Zustand sichtbarer Theile des Körpers beziehen und somit der Beobachtung zugänglich sind<<. Bis zu diesem Punkt findet sich die Theorie in den Sitzungsberichten der Amsterdamer Akademie von 1902 entwickelt.²⁸ Die Gleichungen lauten: [...]“ (Cohn, 1904a, p. 1294)

Es ist deutlich ersichtlich, dass Cohn im ersten Absatz das Michelson-Experiment als Quelle gar nicht angibt. Das wird jedoch dadurch verständlich, dass die Quellen bereits bei Wilhelm Wien gegeben waren – ebenso wird Einstein vorgehen. Da Cohns Arbeit eine Erwiderung auf Wiens Beitrag darstellt, sieht er keinen Anlass dazu, diese noch einmal anzuführen. Sehen wir uns nun Einsteins Arbeit an. Allein der Titel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) zeigt, wie nah Einsteins Arbeit zu der Diskussion zwischen Wien und Cohn steht. Auch die erste Seite zeugt davon:

„Daß die Elektrodynamik Maxwells – wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt – in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den

²⁷ Ähnliche Probleme sind auch in „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“ (Teil I) (Cohn, 1904a, pp. 1301-1302) zu finden.

²⁸ In einer Fußnote gibt er die Quelle: „LORENTZ, Amsterdam Proceedings, 27. September 1902, S. 254. Vorstehendes Citat aus der Einleitung. Dieselben Gleichungen Mathematische Encyclopädie V,2, S. 209.“ (Cohn, 1904a, pp. 1294, fn. 1). Zur Geschichte der Kontraktionshypothese von Lorentz siehe (Bergia, 1985, pp. 156-159).

Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber – Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt – zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum ‚Lichtmedium‘ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden ‚Prinzip der Relativität‘ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben [...]“ (Einstein, 1905r, p. 891)

(Weshalb Einstein im ersten Absatz auf die Symmetrie der elektrodynamischen Wechselwirkung hinweist, werden wir später besprechen²⁹ und ebenso auf sein Beispiel mit der Relativität zwischen Magnet und Leiter eingehen.)

Interessant ist hier der zweite Absatz von Einstein: Ähnlich wie Cohn verzichtet er darauf, auf Michelson oder auf Fizeau hinzuweisen. Da die Arbeit von Wien ebenfalls in den *Annalen der Physik* erschien, hielt Einstein das offensichtlich nicht für nötig. Dass Wiens und Einsteins Arbeit einige Parallelen aufweisen, wurde bereits in einer anderen Abhandlung erläutert – so machte bereits Sexl darauf aufmerksam: „Bemerkenswert ist ferner die Parallelität zwischen Einsteins Aussagen und denjenigen von W. Wien“ (Sexl, 1985, p. 36)

²⁹ Siehe dazu Abschnitt „2.1.2.2.3. Der Diskurs und seine experimentelle Ebene: Magnet und Leiter“. Auf der zweiten Seite bespricht Wien das Biot-Savartsche Gesetz bzw. die Heavisidischen Lösungen der Feldgleichungen und erklärt:

„[...] so scheint mir die Theorie von Cohn nicht mit den Tatsachen in Übereinstimmung zu stehen, wenn nicht eine Verschiedenheit der elektromagnetischen Energie, je nachdem die Erregung von bewegten oder von ruhenden Körpern ausgeht, angenommen wird. Dies würde wieder zu neuen prinzipiellen Schwierigkeiten führen.“ (Wien, 1904b, p. 642)

Weiter auf die Heavisidischen Lösungen geht er im zweiten Teil seiner Arbeit ein (Wien, 1904c). Cohn wiederum erläutert: „Meine Gleichungen sind, wie die HERTZ’schen, symmetrisch in den elektrischen und magnetischen Grössen, die LORENTZ’schen sind es nicht.“ (Cohn, 1904a, p. 1301)
Ob Einstein womöglich deshalb darauf eingeht, lässt sich nicht genau sagen.

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass sich bei einer knappen Gegenüberstellung von Wiens, Cohns und Einsteins Arbeit einige Zusammenhänge zeigen. Bekanntlich besteht Einsteins Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) aus zwei Teilen:

„I. Kinematischer Teil.“³⁰ (Einstein, 1905r, pp. 892-907)

„II. Elektrodynamischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 907-921).

Im ersten (kinematischen) Teil der Arbeit bespricht Einstein bereits die wichtigsten physikalischen und philosophischen bzw. erkenntnistheoretischen Aspekte der Speziellen Relativitätstheorie – wie beispielsweise die zwei Prinzipien der SRT, die Gleichzeitigkeit, die Relativität von Längen und Zeiten, die relativistischen Transformationsgleichungen und das relativistische Geschwindigkeitstheorem usw. Gerade für die Ausarbeitung dieses Teils dürfte die Diskussion zwischen Wien und Cohn wichtig gewesen sein. Im Folgenden seien daher ein paar Beispiele gegeben, aufgrund derer (zumindest ein Teil von) Einsteins Arbeit eigentlich als eine Antwort auf den wissenschaftlichen Dialog zwischen Wien und Cohn angesehen werden könnte. Dazu werden wir links Wiens Sichtweise angeben, was für eine konsequente Elektrodynamik wichtig sein sollte; rechts die Sichtweise von Cohn und in der Mitte Einsteins, der die wichtigen Punkte beider Sichtweisen miteinander zu verbinden scheint (Tab. 1):

³⁰ In diesem Teil befinden sich die Abschnitte:

- „§ 1. Definition der Gleichzeitigkeit.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-895)
- „§ 2. Über die Relativität von Längen und Zeiten.“ (Einstein, 1905r, pp. 895-897)
- „§ 3. Theorie der Koordinaten- und Zeittransformation von dem ruhenden auf ein relativ zu diesem in gleichförmiger Translationsbewegung befindliches System.“ (Einstein, 1905r, pp. 897-902)
- „§ 4. Physikalische Bedeutung der erhaltenen Gleichungen, bewegte starre Körper und bewegte Uhren betreffend.“ (Einstein, 1905r, pp. 903-905)
- „§ 5. Additionstheorem der Geschwindigkeiten“ (Einstein, 1905r, pp. 905-907)

Tabelle 1: Die Sichtweisen von Wien, Einstein und Cohn im Vergleich

Wien (1904) „Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper“	Einstein (1905) „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“	Cohn (1904) „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“
Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in der Maxwellschen Theorie ist zu beachten. (Wien, 1904b, p. 643)	Zwei Prinzipien: 1. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit 2. Das Relativitätsprinzip gilt. Äther ist daher nicht mehr notwendig und die Spezielle Relativitätstheorie umfasst beide Gebiete (Mechanik und Elektrodynamik).	Prinzip: Ökonomische Theorienbildung [im Machschen Sinne]: Das Konzept eines Äthers ist nicht notwendig. ³¹ Ergebnisse der Experimente (von Fizeau und Michelson) müssen (so einfach wie möglich) erklärt werden.

³¹ Die Schrift „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme. II.“ von Cohn endet mit den Worten:

„Auch die Betrachtung der mechanischen Kräfte also lässt unser früheres Resultat bestehen: keine Erfahrung hindert uns, unsere Grundgleichungen nach Willkür zu beziehen auf ein räumliches System das in der Erde ruht, oder auf ein solches, das gegen die Erde eine beliebige gleichförmige Geschwindigkeit besitzt von der Ordnung der relativen Geschwindigkeit Erde-Fixstern. Wir haben lediglich dem frei gewählten räumlichen System das zeitliche Bezugssystem anzupassen.“
 (Cohn, 1904b, p. 1416)

Diese Passage zeigt einerseits, dass nach Cohn das Konzept eines Äthers nicht notwendig ist, und andererseits, dass er das Relativitätsprinzip zwar schätzt und seine Bedeutung hervorhebt, aber zum Verständnis der physikalischen bzw. relativistischen Zeit damals noch nicht gänzlich vordringen konnte.

Wien (1904) „Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper“	Einstein (1905) „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“	Cohn (1904) „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“
	- Definition der Gleichzeitigkeit³² - Relativität von Längen und Zeiten	Nach der Lorentzschen Theorie gibt es eine physikalische Längenkontraktion, doch hier bleibt die „Ortszeit“ eine reine Rechengröße. Die Elektrodynamik von Lorentz erlaubt jedoch nicht, dass wir zwischen einer physikalischen allgemeinen Zeit und einer Ortszeit unterscheiden können, da nur die Messung in Inertialsystemen zählt. Raum und Zeiten sind nicht bloße Rechengrößen, sondern haben eine physikalische Bedeutung. Wichtig ist die Frage, wie man diese Erkenntnis mit der Mechanik in einen Zusammenhang bringt.³³

³² Hierbei dürfte Cohns Arbeit für Einstein wichtige Impulse gegeben haben – beispielsweise schreibt Cohn:

„Überall, wo nicht die Ausbreitung von Strahlung selbst das Objekt der Messung ist, legen wir identische Zeitmomente an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche dadurch fest, dass wir die Ausbreitung des Lichts als zeitlos behandeln. In der Optik aber definieren wir diese identischen Zeitmomente dadurch, dass wir für jedes relativ ruhende isotrope Medium eine Ausbreitung in Kugelwellen annehmen. Das heisst: die >>Zeit<<, welche uns zur Darstellung irdischer Vorgänge thatsächlich dient, ist die >>Ortszeit<< t' , [...] – nicht die >>allgemeine Zeit<< t .“ (Cohn, 1904b, p. 1408)

Obwohl die weiteren Erläuterungen von Cohn zu diesem Thema nicht ganz schlüssig sind, geben sie doch den Hinweis darauf, dass in der Fragestellung und in der physikalischen Interpretation der Ortszeit der Schlüssel zur Aufklärung gegeben ist. Dazu bedarf es aber eben noch der Definition der Gleichzeitigkeit.

³³ Cohn erkennt das Problem der Lorentzschen Elektrodynamik und erklärt:

„§ 4. Die LORENTZ'sche Deutung fordert von uns, zwischen den gemessenen Längen und Zeiten $x_0 \dots t_0$ und den wahren $x \dots t$ zu unterscheiden. Aber sie versagt uns die Mittel, die Aufgabe – selbst unter Voraussetzung idealer Messinstrumente – experimentell zu lösen. Die LORENTZ'sche Elektrodynamik und Mechanik ist nur entwickelt für $w = \text{constans}$. Wir haben daher gar keine Möglichkeit, Strecken anders als mit den >>falschen<< mitbewegten Maßstäben, und Zeiten anders als mit den >>falschgehenden<< mitbewegten Uhren zu messen. Damit wir >>richtige<<, also ruhende, Instrumente zu Messungen an unserem bewegten System benutzen könnten, müsste uns eine Mechanik oder Optik gegeben sein, die nicht nur innerhalb der beiden Gebiete $w = \text{const.}$ und $w = 0$ Geltung hätte, sondern aus dem einen in das andere durch das Gebiet der *variablen* w hinüberleitete.“ (Cohn, 1904a, p. 1300)

Cohn weist darauf hin, dass Transformationsgleichungen noch fehlen, welche Systeme von beliebiger Geschwindigkeit ineinander übersetzen können und womit dann auch die Geschwindigkeitsaddition verstanden werden könnte. Denn unterschiedliche Längen und Zeiten, welche an den Instrumenten gemessen werden können, können nicht nur Rechengrößen sein. Andererseits ist er mit der Kontraktionshypothese von Lorentz nicht zufrieden, weil er darin eine mechanische Erklärung sieht, die aber aus der Mechanik so nicht abgeleitet werden kann. Cohn unterscheidet daher zwischen der Elektrodynamik und der klassischen Mechanik – siehe (Cohn, 1904a, p. 1300) –, weshalb er erst gar nicht probiert unter dem Relativitätsprinzip die beiden Gebiete zu vereinen. Diese Aufgabe wird dann Einstein übernehmen.

2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham³⁴ und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik

Max Abraham geht in seinem Artikel „Theorie der Strahlung und des Strahlungsdruckes“ (Abraham, 1904b) auf Wiens Kritik ein³⁵ – diese Arbeit ist jedoch nicht nur als eine einfache Stellungnahme zu verstehen; sondern zugleich als eine Fortsetzung³⁶ seiner Schrift „Der Lichtdruck auf einen bewegten Spiegel und das Gesetz der schwachen Strahlung“³⁷ (Abraham, 1904a), die er für die *Festschrift Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstag* (Meyer, 1904) verfasste. Er bespricht sein Anliegen mit den Worten:

„Die Optik bewegter Körper war es gerade, von der *H. A. Lorentz* bei der Entwicklung seiner Theorie ausging. Es gelang ihm, nachzuweisen, daß mit derselben sehr wohl das Fehlen eines Einflusses erster Ordnung [...] der Erdbewegung auf die relative Strahlung irdischer Lichtquellen vereinbar ist. Schwierigkeiten machen indessen immer noch die Größen zweiter Ordnung. Um negative Resultate des *Michelsons*chen Interferenzversuches zu erklären, nimmt *Lorentz* bekanntlich an, daß im Ruhezustande isotrope feste Körper infolge der Erdbewegung eine Formänderung erfahren, mithin anisotrop werden. [...]

Jene Annahme einer Formänderung der Körper infolge der Erdbewegung führt tief in hypothetische Annahmen über die Molekularkräfte hinein. Die folgenden Untersuchungen beschäftigen sich mit Problemen der Optik bewegter Körper, deren Lösung mit der *Wirkung der Strahlung auf vollkommen schwarze und auf vollkommen spiegelnden Flächen*.“ (Abraham, 1904b, pp. 238-239)

Max Abraham – ein Schüler von Max Planck, und wie Cohn und Einstein, ein theoretischer Physiker mit jüdischen Wurzeln – bringt an dieser Stelle die Entwicklungen sehr gut auf den Punkt: Das Gebiet, welches einer Klärung bedurfte, war die „Optik bewegter Körper“, auf welchem Lorentz bereits Vorarbeiten geleistet hat, um die Theorie mit den experimentellen Ergebnissen von Michelson in Verbindung zu bringen. Aufgrund der neuen Entwicklungen in der Optik/Elektrodynamik und der Thermodynamik muss gerade in diesem Bereich weiter geforscht werden, wie Abraham betont:

„Das Problem der Reflexion eines Lichtbündels durch einen bewegten Spiegel ist das Grundproblem der thermodynamischen Strahlungstheorie. In der Tat, auf dem zuerst in der

³⁴ Es wird Jahre später (ab 1912) auch zu einer wissenschaftlichen Diskussion zwischen Max Abraham und Albert Einstein kommen, weil Abraham und Einstein unterschiedliche Gravitationstheorien vertreten werden. Wir werden in unserer Arbeit, wo wir die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie besprechen werden, nicht weiter darauf eingehen – den interessierten Leser verweisen wir auf den Artikel „Einstein on Gravitation and Relativity: The Static Field“ (CPAE 4; _ ; p. 124-127).

Eine Arbeit, die allgemein die unterschiedlichen Sichtweisen von Abraham und Einstein – sei es in Bezug auf die SRT oder die ART – behandelt, wäre in Zukunft sicher wünschenswert.

³⁵ siehe (Abraham, 1904b, pp. 242, 269-270, 274, 277-278, 286-287)

³⁶ siehe (Abraham, 1904a, p. 240)

³⁷ In dieser Arbeit versuchte Abraham das Verschiebungsgesetz von Wien auf ideale Spiegel mit beliebiger Geschwindigkeit anzuwenden (Abraham, 1904a, p. 86) usw.

Boltzmann-Festschrift von mir beschrittenen Wege erhält man die beiden thermodynamischen Strahlungsgesetze, das *Stefan-Boltzmannsche Gesetz* und das *Wiensche Verschiebungsgesetz*, mit einem Schlage; [...] Ich habe dort die Lösung des Reflexionsproblems nur für Bewegung des ebenen Spiegels senkrecht zu seiner Ebene gegeben. Im § 3 der vorliegenden Arbeit dehne ich sie auf beliebige Bewegung aus; [...]“
(Abraham, 1904b, p. 240)

Interessant an dieser Arbeit ist Folgendes: Abraham zeigt, dass die neuesten Erkenntnisse der Thermodynamik und der Optik/Elektrodynamik miteinander verbunden werden sollten. Im selben Band der *Annalen der Physik*, in welchem Abrahams „Theorie der Strahlung und des Strahlungsdruckes“ (Abraham, 1904b) veröffentlicht wird, erscheint ebenso Einsteins Artikel „Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme“ (Einstein, 1904). In dieser Arbeit behandelt auch er die Themen Strahlung und Wärmelehre. Da Einstein sich zu jener Zeit mit den genannten Gebieten auseinandersetzte, liegt es nahe, dass er die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien, Cohn und Abraham verfolgte.

Um nun das Problem des Lichtes an bewegten Spiegeln zu bearbeiten, muss man folgenderweise vorgehen:

- Zuerst ist das Dopplersche Prinzip aufzustellen (Abraham, 1904b, p. 244),
- um im Anschluss das Aberrationsgesetz anzugeben (Abraham, 1904b, p. 245).

Das ist für die nächsten Schritte unerlässlich, da man zuerst den Betrag der relativen Strahlung verstehen muss, um weitere Schritte besprechen zu können.

Eine ähnliche Struktur (unterteilt in Abschnitten) finden wir auch im zweiten Teil von Einsteins Arbeit („II. Elektrodynamischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 907-921)):

- „§ 7. Theorie des *Dopplerschen* Prinzips und der Aberration.“ (Einstein, 1905r, pp. 910-912)
- „§ 8. Transformation der Energie der Lichtstrahlen. Theorie des auf vollkommene Spiegel ausgeübten Strahlungsdruckes.“ (Einstein, 1905r, pp. 913-915)
- „§ 9. Transformation der *Maxwell-Hertzschen* Gleichung mit Berücksichtigung der Konvektionsströme.“ (Einstein, 1905r, pp. 916-917)
- „§ 10. Dynamik des (langsam beschleunigten) Elektrons.“ (Einstein, 1905r, pp. 917-921).

Aus diesem Vergleich – sowohl aus Abrahams als auch aus Einsteins Arbeit – ist zu erkennen, welche wichtige und primäre Rolle das Dopplersche Prinzip und das Aberrationsgesetz einnehmen.³⁸ (Wie wir später sehen werden, waren es wohl diese beiden Bereiche, die Einstein in seiner Forschung stark prägten.)

Kommen wir nun wieder zur Stellungnahme Abrahams gegenüber Wien. Er kritisiert Wien an einigen Stellen – vor allem aber im Abschnitt „§ 7. Theorie des bewegten leuchtenden Punktes“ (Abraham, 1904b, p. 273), welcher eine Anspielung auf den Titel von W. Wiens Arbeit „Theorie eines leuchtenden Punktes“ (Wien, 1904a) darstellt. (Diesen hatte Wien seinerseits für die *Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstage* (Meyer, 1904) verfasst.)³⁹

Auf Abrahams Kritik hat Wien wiederum in „Erwiderung auf die Kritik des Hrn. M. Abraham“ geantwortet:

„Hr. M. Abraham hat in seiner ‚Theorie der Strahlung und des Strahlungsdruckes‘ überschriebenen Arbeit eine Reihe von Angriffen gegen meine Untersuchungen über denselben Gegenstand gerichtet, die nicht nur völlig unbegründet sind, sondern von einer recht einseitigen Auffassung der theoretischen Fassung Zeugnis ablegen.

Die Elektrodynamik ist noch nicht bis zu einer solchen Entwicklung gediehen, daß in apodiktischer Weise von einer Gültigkeit beanspruchenden Theorie gesprochen werden darf. Und doch spricht Hr. Abraham so, als ob er im Besitz einer solchen wäre.“

(Wien, 1904e, p. 635)

Wie man deutlich erkennt, wurde die Diskussion zwischen Abraham und Wien in *den Annalen der Physik* mit „deutlich härteren Bandagen“ geführt (als zwischen Cohn und Wien). Einerseits warf Abraham Wien vor, dass dieser aufgrund des Dopplerschen Prinzips Korrekturen vornehmen müsste, was Wien jedoch verneint (Wien, 1904e, p. 635). Andererseits vertritt Abraham eine Elektronentheorie mit einer unveränderlichen Kugelgestalt, die nicht den damaligen Konsens repräsentierte (Wien, 1904e, p. 236). Die wohl wichtigste Frage in dieser Auseinandersetzung zwischen Wien und Abraham ist jedoch vor allem, wie sich die Elektronen verhalten würden, wenn der Betrag ihrer Geschwindigkeit

³⁸ Dass das Aberrationsgesetz beim Fizeauschen Experiment eine wichtige Rolle gespielt hat, werden wir weiter unten noch detaillierter besprechen. Dem Aberrationsgesetz geht jedoch das Verständnis des Dopplerschen Prinzip stets zuvor.

³⁹ Abraham verweist (Abraham, 1904b, p. 274) auch ausdrücklich auf Wiens Schrift (Wien, 1904a), so dass dieser Abschnitt unmissverständlich als eine Kritik an Wilhelm Wien anzusehen ist.

in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit kommen würde (Abraham, 1904b, pp. 286-287). Abraham will nicht ausschließen, dass auch Elektronen sich mit Lichtgeschwindigkeit oder gar mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen könnten (Abraham, 1904b, pp. 286-287) und Wien meint, dass (aufgrund der Heavisidischen Ellipsoide und den Untersuchungen von Lorentz) die Elektronen die Lichtgeschwindigkeit nicht überschreiten können (Wien, 1904e, p. 637). Nun kommt wiederum von Abraham eine „Kritik der Erwiderung des Hrn. W. Wien“ (Abraham, 1904c), in welcher er zwar zugibt, dass Wien das Dopplersche Prinzip verstanden habe, aber dafür den Poyntingsche Vektor nicht und schließt mit den Sätzen: „Ich glaubte voraussetzen zu dürfen, daß diese Sätze auch *Hrn. W. Wien* bekannt seien. Diese Voraussetzung war offenbar eine irrige.“ (Abraham, 1904c, p. 1040)

Diesen Vorwurf versucht nun Wien mit seiner Entgegnung „Poyntingscher Satz und Strahlung“ (Wien, 1904f) zu entkräften und beendet sie mit den Worten: „Eine Polemik⁴⁰, die ihren Ausgang von dieser Frage nimmt, ist nichts als ein Wortstreit und für die Wissenschaft wertlos.“ (Wien, 1904f, p. 414)

Diese wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien und Abraham, die für einen Außenstehenden womöglich wie ein Hickhack aussieht, ist wissenschaftsgeschichtlich überaus bedeutungsvoll – und aufgrund ihrer Länge und ihrer Schärfe dürfte es die damaligen Wissenschaftler „auch nicht kalt gelassen haben“. Aus den Schriften von Wien und Abraham wird ersichtlich, welche Fragen, die damalige Physik beschäftigten – auf alle diese Fragen geht Einstein im Abschnitt „II. Elektrodynamischer Teil“ (Einstein, 1905r, pp. 907-921) ein und gibt eine physikalische Antwort (siehe Fußnoten):

- Sind Elektronen punktförmige Ladungen⁴¹ (Wien) oder kugelförmig (Abraham)?
- Wie lautet das Dopplersche Prinzip und das Gesetz für die Aberration?⁴²
- Wie ist die longitudinale und transversale Masse des Elektrons gegeben?⁴³

⁴⁰ In einer Fußnote verweist Wien hier auf: „1) Vgl. *M. Abraham*, Ann. d. Phys. 14. p. 277 u. p. 1039. 1904; Physik. Zeitschr. p. 579. 1904.“ (Wien, 1904f, pp. 414, fn. 1).

Wie aus den Quellen deutlich ersichtlich, empfand Wien die Angriffe von Abraham als eine Polemik. Sexl meint dagegen, dass Wien von Cohn in eine „Polemik“ verwickelt wurde (Sexl, 1985, p. 36), was sich anhand der Quellen nicht bestätigen lässt.

⁴¹ (Einstein, 1905r, pp. 909-910, 917)

⁴² (Einstein, 1905r, pp. 910-912)

⁴³ (Einstein, 1905r, p. 919)

- Wie ist Theorie des auf idealen Spiegeln ausgeübten Strahlungsdrucks?⁴⁴
- Können Elektronen Überlichtgeschwindigkeit erreichen (Abraham) oder nicht (Wien)?⁴⁵

2.1.2.2.3. Der Diskurs und seine experimentelle Ebene: Magnet und Leiter

Im Abschnitt „2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“ haben wir geschrieben, dass wir uns die ersten Sätze (über Magnet und Leiter) von Einstein in „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) noch genauer ansehen werden – geben wir sie dafür an dieser Stelle erneut wieder:

„Daß die Elektrodynamik Maxwells – wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt – in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind.“ (Einstein, 1905r, p. 891)

Es wurde bereits in *The Collected Papers of Einstein* erkannt (CPAE 2; 23; p. 306, fn. 1), dass Einstein wahrscheinlich sein Gedankenexperiment mit dem Magneten und einem Leiter aus dem Buch *Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität* (Föppl, 1894) von Föppl übernommen und analysiert hat. Wir werden später noch darauf zurückkommen.

Fest steht, dass er sich über das magnetische und elektrische Feld bereits als Jugendlicher Gedanken machte. Der Grund dafür dürfte sein, dass seine Familie (seit 1882) ein Unternehmen in Elektrotechnik führte (CPAE 1; _ ; p. 5). So beginnt er mit 16 Jahren (1895)

Wien verweist – sowohl im ersten (Wien, 1904b, pp. 644, 662) als auch im zweiten Teil (Wien, 1904c, p. 667) auf Abrahams Schrift „Die Prinzipien der Dynamik des Elektrons“ (Abraham, 1903), wo Abraham die Definition der longitudinalen und transversalen Masse bespricht – siehe z.B.: (Abraham, 1903, pp. 106-107, 111, 114, 151-153, ...).

⁴⁴ (Einstein, 1905r, pp. 913-915)

Diesen Abschnitt („§ 8.“) beendet Einstein mit den Worten:

„Nach der hier benutzten Methode können alle Probleme der Optik bewegter Körper gelöst werden. Das Wesentliche ist, daß die elektrische und magnetische Kraft des Lichtes, welches durch einen bewegten Körper beeinflusst wird, auf ein relativ zu dem Körper ruhendes Koordinatensystem transformiert werden. Dadurch wird jedes Problem der Optik bewegter Körper auf eine Reihe von Problemen der Optik ruhender Körper zurückgeführt.“ (Einstein, 1905r, p. 915)

⁴⁵ Einsteins klare Antwort lautet: „Überlichtgeschwindigkeiten haben – wie bei unseren früheren Resultaten – keine Existenzmöglichkeit.“ (Einstein, 1905r, p. 920)

seine erste wissenschaftliche Arbeit mit dem Titel „Über die Untersuchung des Ätherzustandes im magnetischen Felde“ (1895) oder „Über Electricität und elektrischen Ströme“⁴⁶, die er unter anderem an seinen Onkel schickte, mit den Worten:

„Nachfolgende Zeilen sind der erste bescheidene Ausdruck einiger einfacher Gedanken über dies schwierige Thema. Mit schwerem Herzen dränge ich dieselben in einen Aufsatz zusammen, der eher wie ein Programm als wie eine Abhandlung aussieht. Weil es mir aber vollständig an Material fehlte, um tiefer in die Sache eindringen zu können, als es das bloße Nachdenken gestattete, so bitte ich, mir diesen Umstand nicht als Oberflächlichkeit auszulegen. Möge die Nachsicht des geneigten Lesers den bescheidenen Gefühlen entsprechen, mit denen ich ihm diese Zeilen übergebe.

Der elektrische Strom setzt bei seinem Entstehen den umliegenden Äther in irgend eine, bisher ihrem Wesen nach noch nicht sicher bestimmte, momentane Bewegung. Trotz Fortdauer der Ursache dieser Bewegung, nämlich des elektrischen Stroms, hört die Bewegung auf, der Äther verbleibt in einem potentiellen Zustande und bildet ein magnetisches Feld.⁴⁷ Daß das magnetische Feld ein potentieller Zustand sei, beweist der permanente Magnet, da das Gesetz von der Erhaltung der Energie hier die Möglichkeit eines Bewegungszustandes ausschließt. Die Bewegung des Äthers, welche durch einen elektrischen Strom bewirkt wird, wird so lange dauern, bis die wirkenden motorischen Kräfte durch äquivalente passive Kräfte kompensiert werden, welche von den durch die Bewegung des Äthers selbst erzeugten Deformationen herrühren.“ (Mehra & Einstein, 1971, p. 390) (CPAE 7; 5; p. 6-7)

Und an einer späteren Stelle schreibt er:

„Der interessanteste, aber auch subtilste Fall wäre die direkte experimentelle Untersuchung des magnetischen Feldes, welches um einen elektrischen Strom herum entsteht, denn die Erforschung des elastischen Zustandes des Äthers in diesem Falle erlaubten uns, einen Blick zu werfen in das geheimnisvolle Wesen des elektrischen Stromes. Die Analogie erlaubt uns aber auch sichere Schlüsse über den Ätherzustand im magnetischen Felde, das den elektrischen Strom umgibt, wenn nur die vorher angeführten Untersuchungen zu einem Ziele führen.“ (Mehra & Einstein, 1971, p. 391) (CPAE 7; 5; p. 9)

Offensichtlich war er am Zusammenhang des elektrischen und des magnetischen Feldes interessiert – Überlegungen zur relativen Bewegung von Magnet und Leiter usw. finden wir in dieser Arbeit aber noch nicht. Auch las Einstein zu dieser Zeit nicht das Buch von Föppl (Föppl, 1894) – siehe dazu (Mehra & Einstein, 1971, p. 386) und die Anmerkungen zu (CPAE 7; 5; p. 6-9).

⁴⁶ Womöglich verwendete er zwei unterschiedliche Titel für dieselbe Arbeit – siehe dazu „Einstein's First Scientific Essay“ (CPAE 1; _ ; p. 5, fn. 1).

⁴⁷ Zu Einsteins Annahmen zum Magnetfeld siehe (CPAE 1; _ ; p. 5).

Welcher Bedeutung diesem Gedankenexperiment in der Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie nun beizumessen wäre, ist daher allgemein leider nicht einfach zu beurteilen⁴⁸ – vor allem auch aufgrund von Einsteins eigenen Äußerungen.

Beispielsweise erläutert Einstein in seiner Schrift (aus dem Jahre 1920) „Gedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt“ (CPAE 7; 31; p. 245)⁴⁹ im Kapitel „I. Die spezielle Relativitätstheorie.“ (CPAE 7; 31; p. 245-264) detailliert die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie. Darin wird sein Gedankenexperiment von Leiter und Magnet nicht thematisiert. Überraschenderweise taucht sie jedoch im zweiten Kapitel „II. Die allgemeine Relativitätstheorie.“ (CPAE 7; 31; p. 264) auf – wir wollen sie daher an dieser Stelle zur Gänze wiedergeben:

„II. Die allgemeine Relativitätstheorie.

(15) *Der Grundgedanke der allgemeinen Relativitätstheorie in seiner ursprünglichen Gestalt.* Bei der Aufstellung der speziellen Relativitätstheorie hat für mich der folgende, hier noch nicht erwähnte Gedanke über die Faraday'sche magnet-elektrische Induktion eine führende Rolle gespielt.

Bei der Relativbewegung eines Magneten gegenüber einem elektrischen Stromkreise, wird nach Faraday in letzterem ein elektrischer Strom induziert. Ob der Magnet bewegt wird oder der Leiter, ist gleichgültig; es kommt nur auf die Relativ-Bewegung an. Nach der Maxwell-Lorentz'schen Theorie ist aber die theoretische Deutung des Phänomens in beiden Fällen eine sehr verschiedene:

Ist der Magnet bewegt, so existiert im Raume ein zeitlich veränderliches magnetisches Feld, welches nach Maxwell geschlossene elektrische Kraftlinien, d. h. ein physikalisch reales elektrisches Feld erzeugt; dieses elektrische Feld setzt dann die beweglichen elektrischen Massen innerhalb des Leiters in Bewegung. Ist aber der Magnet in Ruhe und der Stromkreis bewegt, so entsteht kein elektrisches Feld; der Strom im Leiter entsteht vielmehr dadurch, dass die mit ihm bewegten Elektrizitäten infolge ihrer (mechanisch erzwungenen) Bewegung relativ zum magnetischen Felde eine von Lorentz hypothetisch eingeführte elektromotorische Kraft erleiden.

Der Gedanke, dass es sich hier um zwei wesens-verschiedene Fälle handle, war mir aber unerträglich. Der Unterschied zwischen beiden konnte nach meiner Überzeugung nur ein Unterschied in der Wahl des Standpunktes sein, nicht aber ein realer Unterschied. Vom Magneten aus beurteilt, war sicherlich kein elektrisches Feld vorhanden, vom Stromkreis aus beurteilt war sicher ein solches vorhanden. Die Existenz des elektrischen Feldes war also eine relative, je nach dem Bewegungszustand des benutzten Koordinatensystems, und nur dem elektrischen und magnetischen Felde zusammen konnte, abgesehen vom Bewegungszustande des Beobachters, bzw. Koordinatensystems, eine Art objektiver

⁴⁸ Das Gedankenexperiment spielt unter anderem in der Rekonstruktion „Einstein's Special Theory of Relativity and the Problems in the Electrodynamics of Moving Bodies that Led him to it“ (Norton, 2004) von John Norton eine wesentliche Rolle. In dieser Arbeit (Norton, 2004) kommen aber weder Wilhelm Wien, Emil Cohn, Max Abraham noch Alexander Eichenwald vor – unsere Rekonstruktion ist daher grundsätzlich von Nortons verschieden. (Das soll jedoch nicht bedeuten, dass Nortons Rekonstruktion nicht richtig ist – unsere bietet eine ebenso auf Fakten basierende Alternative an.)

⁴⁹ Der Titel dürfte eine Anlehnung an Machs Buch *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt* gewesen sein – siehe (CPAE 7; 31; p. 279, fn. 2).

Realität zugestanden werden. Die[se] Erscheinung der magnetelektrischen Induktion zwang mich dazu, das (spezielle) Relativitätsprinzip zu postulieren.“ (CPAE 7; 31; p. 264-265)

In einer Fußnote erläutert er zum Schluss:

„Die zu überwindende Schwierigkeit lag dann in der Konstanz der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, die ich zunächst aufgeben zu müssen glaubte. Erst nach jahrelangem Tasten bemerkte ich, dass die Schwierigkeit auf der Willkür der kinematischen Grundbegriffe beruhte.“ (CPAE 7; 31; p. 280, fn. 34)

Anschließend bespricht Einstein durch welches Gedankenexperiment er zum Äquivalenzprinzip kam, welches zur zündenden Idee für die Allgemeine Relativitätstheorie wurde (CPAE 7; 31; p. 265) – wir werden später im Abschnitt „4.4.5.2.1. Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip und Machs möglicher Einfluss“ sehen, dass er dieses Gedankenexperiment wohl von Mach übernommen hat.

Es ist jedenfalls seltsam, weshalb Einstein dieses Gedankenexperiment von Leiter und Magnet erst im Kapitel zur Allgemeinen Relativitätstheorie erwähnt. Allgemein ist daher nicht klar, welche Rolle es von Beginn an hatte. Wir werden deshalb folgende Sichtweise vertreten: Es wird wohl stimmen, dass Einstein dieses Gedankenexperiment bereits sehr früh beschäftigte; doch von Bedeutung wurde es für ihn erst 1904/1905. In diesem Fall stellen sich jedoch zwei Fragen:

1. Ab wann hat Einstein wohl begonnen sich mit diesem Thema intensiv zu beschäftigen?
2. Warum hat sich Einstein 1905 dieses Buch und dieses Kapitel von Föppl angesehen?

2.1.2.2.3.1. Ad 1.:

Ab wann hat Einstein wohl begonnen sich mit diesem Thema intensiv zu beschäftigen?

In den *Annalen der Physik* – der ganzen Reihe 316. Band; Folge 5 – ist Einsteins Arbeit „Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik“ (Einstein, 1903) erschienen⁵⁰. Der erste Artikel in diesem Band (und in derselben Folge) der *Annalen der Physik* ist die Arbeit „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1903a)

⁵⁰ Dieser Band der *Annalen der Physik* ist überaus interessant und wichtig – siehe dazu auch den Abschnitt „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“.

von Alexander Eichenwald⁵¹, wo er gleich zu Beginn auf bewegte Leiter eingeht – siehe Abschnitt „I. Bewegte Leiter“ (Eichenwald, 1903a, pp. 1-4). In seiner nächsten Arbeit mit demselben Titel „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1903b) (im selben, der ganzen Reihe, 316. Band, Folge 6) fasst er die Ergebnisse seiner Untersuchungen zusammen:

„Resultate.

In der vorliegenden Arbeit sind die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde unter möglichst variierten Versuchsbedingungen *quantitativ* untersucht worden. [...]

Unter allen diesen Beschränkungen lassen sich die Ergebnisse unserer Versuche folgendermaßen kurz zusammenstellen.

1. Bei der Bewegung der Körper im elektrostatischen Felde entstehen im allgemeinen Konvektions-, Konduktions- und Verschiebungsströme; alle diese Ströme sind in Bezug auf magnetische Wirkungen den Wirkungen eines galvanischen Stromes von gleichem numerischen Betrage völlig äquivalent,

2. Im Falle reiner elektrischer Konvektion sind die Bewegungen und die magnetischen Wirkungen der bewegten Ladungen unabhängig voneinander. Die Ladungen haften an der Materie.

3. Alle von uns beobachteten Ströme bilden stets geschlossene Stromkreise.

4. Die Versuche sind mit der Annahme eines überall auch in den bewegten Dielektrika ruhenden Äthers im Einklange. Zum Schluß will ich noch bemerken, daß ganz analoge Gesetze auch für die Bewegung der Körper im magnetischen Felde gelten müssen; nur haben wir keinen ‘wahren’ Magnetismus.“ (Eichenwald, 1903b, p. 441)

Einstein, der stets auch die experimentelle Lage verfolgte, dürfte sich wahrscheinlich vor allem nach 1903 durch die Ergebnisse von Eichenwald für Relativbewegung von Leiter und Magnet (Einstein, 1905r, p. 891) interessiert haben. Die Experimente zeigten, dass man von einem überall ruhenden Äther ausgehen sollte. Wenn der Äther überall ruht, so ist der Schritt die Gleichwertigkeit von Inertialsystemen und somit das Relativitätsprinzip zu postulieren, nicht mehr weit, denn ein überall ruhender Äther hat (in gewissem Sinne) denselben Einfluss, wie gar kein Äther. Doch der Beitrag von Eichenwalds Arbeiten

⁵¹ Arthur I. Miller geht in seinem Buch nur auf diese Arbeit (Eichenwald, 1903a) von Eichenwald mehrmals ein (Miller, 1998, pp. 14, 149-150, 168). Er bringt Eichenwalds Schrift mit Einsteins Arbeit (Einstein, 1905r) nicht direkt in Verbindung. Der Grund dürfte sein, dass Miller die späteren Arbeiten von Eichenwald nicht thematisiert. In anderen Schriften zur Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie wird Eichenwald gar nicht erwähnt, z.B.: (French, 1985) (Stachel, 2002) (Norton, 2004) (Janssen & Stachel, 2004). In *The Collected Papers of Einstein* finden wir einige Seiten zu Eichenwald. Beispielsweise geht Einstein in seinem Manuskript zur Speziellen Relativitätstheorie, welches er zwischen 1912-1914 fertigte – das aber nie veröffentlicht wurde – zuerst auf Magnet und Leiter ein (CPAE 4; 1; p. 15-27) und in diesem und weiterem Zusammenhang verweist er auch auf die Arbeit(en) von Eichenwald (CPAE 4; 1; p. 17).

(Eichenwald, 1903a) (Eichenwald, 1903b) für die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie ist an dieser Stelle noch nicht zu Ende, sondern erst am Anfang...

Wir haben im Abschnitt „2.1.2.2. Das A: Wissenschaftlicher Dialog zwischen E. Cohn, W. Wien und A. Einstein“ darauf hingewiesen, dass 1904 in den *Annalen der Physik* zwei Arbeiten „Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper“ (Teil I) (Wien, 1904b) und „Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper. II.“ (Teil II) (Wien, 1904c) von Wilhelm Wien erschienen sind, wo Wien die Arbeiten von Emil Cohn und Max Abraham diskutierte, woraufhin es zu einer wissenschaftlichen Diskussion zwischen E. Cohn, M. Abraham und W. Wien kam, wovon Einstein maßgeblich profitierte – siehe dazu die vorherigen Abschnitte „2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“ und „2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“.

Beide Arbeiten (Wien, 1904b) (Wien, 1904c) von Wien erschienen in den *Annalen der Physik* in (der ganzen Reihe) 318. Band (Folge 4). Im selben Band (der ganzen Reihe 318. Band, Folge 4) finden wir auch die Arbeit „Ueber das innere Feld der Elektronen“ (Eichenwald, 1904a), wo Eichenwald, ausgehend von Max Abrahams Elektronentheorie, versucht das innere Feld des Elektrons zu beschreiben (Eichenwald, 1904a, pp. 770, 776-777, 782). Dass die Diskussion um Abrahams Elektronentheorie für die Entstehungsgeschichte eine Rolle gespielt hat, haben wir im Abschnitt „2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“ besprochen.

Im selben Band (der ganzen Reihe 318. Band, Folge 5) wird eine weitere Schrift von Eichenwald erscheinen – diese trägt denselben Titel „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1904b), wie seine früheren Artikel (Eichenwald, 1903a) (Eichenwald, 1903b) und ist somit von großer Bedeutung. Gleich auf der ersten Seite verweist er darauf, dass ihn Emil Cohn auf einen Fehler in seiner Arbeit (Eichenwald, 1903b) aufmerksam machte, „wofür“ er „ihm“ seinen „verbindlichsten Dank“ ausspricht (Eichenwald, 1904b, p. 919). Auch in dieser Arbeit wird er die „Unbeweglichkeit des Äthers“ (Eichenwald, 1904b, p. 923) betonen und kommt zum Ergebnis:

„Resultat.

Ich glaube, daß durch die hier beschriebenen Versuche die magnetische Wirkung der im elektrostatischen Felde bewegten Dielektrika quantitativ nicht minder sichergestellt worden ist, als die magnetische Wirkung bewegter Leiter.“ (Eichenwald, 1904b, p. 938)

Interessant ist, dass Eichenwald im nächsten und letzten Abschnitt **„Zur Theorie.“**

(Eichenwald, 1904b, pp. 937-943) nun drei Theorien miteinander vergleicht; und zwar jene

- von H. Hertz, wo der Äther mit der Materie zusammen bewegt wird (Eichenwald, 1904b, p. 938),
- von H. Lorentz, wo bei bewegter Materie der Äther ruht (Eichenwald, 1904b, p. 938) und
- von E. Cohn, wo die elektrische bzw. die magnetische Feldintensität der bewegten Körper etwas anders definiert wird als bei Lorentz (Eichenwald, 1904b, p. 938)⁵².

Anschließend erklärt Eichenwald, dass aufgrund der Messgenauigkeit seiner Versuche eine experimentelle Unterscheidung zwischen der Lorentzschen und der Cohnschen Theorie nicht möglich ist (Eichenwald, 1904b, p. 939) – weshalb er von da an von einer „Lorentz-Cohnschen Theorie“ (Eichenwald, 1904b, p. 939) spricht:

„In allen unseren Versuchen war M_0 , die mit dem Magnetometer beobachtete Größe und im günstigsten Falle war $M_0 = 10^{-5}$ C. G. S. Da M von derselben Größenordnung ist wie M_0 und da für die größten von uns realisierten Geschwindigkeiten das Verhältnis u/V etwa 10^{-6} nicht überstieg, so konnte die Größe $[u/V \cdot M]$ überhaupt nicht beobachtet werden. Für unsere Versuche können wir demnach $E = E_0$ setzen. Dann verschwindet aber der Unterschied zwischen der *H. Lorentzschen* und der *E. Cohnschen* Theorie, und unsere Versuche können auch zwischen diesen beiden Theorien nicht entscheiden.“

(Eichenwald, 1904b, pp. 938-939)⁵³

Da die Experimente nur eine Genauigkeit von erster Ordnung $\left(\frac{u}{V} = \frac{v}{c}\right)$ erreichen können, kann man nach Eichenwald E_0 mit E gleichsetzen, was gleichbedeutend ist mit der Aussage,

⁵² Wir haben bereits im Abschnitt „2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“ darauf hingewiesen, dass Cohn bei seinen Konzepten auf einen Äther verzichtet.

⁵³ Für ein besseres Verständnis seien an dieser Stelle die physikalischen Symbole erklärt:

M_0 = magnetische Feldintensität im Äther

E_0 = elektrische Feldintensität im Äther

M = magnetische Feldintensität im bewegten Körper

E = elektrische Feldintensität im bewegten Körper

u = die Geschwindigkeit des Körpers

V = Lichtgeschwindigkeit

Siehe dazu (Eichenwald, 1904b, p. 937).

dass ein Äther nicht benötigt wird, um die experimentellen Resultate erklären zu können – indem Fall wäre ebenso $M_0 = M$. Das elektrische Feld und das magnetische Feld, wie bei einem Leiter und einem Magnet, würden dann nur von der Relativbewegung zueinander abhängen.

Danach bespricht Eichenwald zwei (experimentelle) Fälle, wo er die Hertzsche Theorie der Lorentz-Cohnschen Theorie gegenüberstellt. In beiden Fällen gewinnt (nach seiner Ansicht) die Theorie von Lorentz-Cohn und die Hertzsche verliert (Eichenwald, 1904b, pp. 940-941); er beendet seine Arbeit mit den Worten:

„Wir haben gesehen, daß nach der Hertzschen Theorie dem Äther dieselbe Geschwindigkeit wie der Materie zugeschrieben wird; nach *H. Lorentz* bleibt der Äther in Ruhe; und auch *E. Cohn* kommt zu der Anschauung eines überall ruhenden Äthers. *Da unsere Versuche gegen die Hertzsche Annahme sprechen, so müssen wir den Äther auch in den bewegten Dielektrika als ruhend annehmen.*

Ganz analoge Bedeutung für die rein optischen Erscheinungen haben die bekannten Versuche von Fizeau und von Michelson und Morley mit dem strömenden Wasser; aber auch hier ist die Genauigkeit nicht groß genug, um zwischen den Theorien von *H. Lorentz* und *E. Cohn* zu entscheiden.“ (Eichenwald, 1904b, p. 943)

Das Experiment von Fizeau, welches von Michelson und Morley wiederholt wurde, hat ebenso nur eine Genauigkeit erster Ordnung ($\frac{u}{v} = \frac{v}{c}$) betont Eichenwald und kann somit ebenfalls nicht zwischen den Theorien von Lorentz und Cohn unterscheiden. Somit dürfte Einstein endgültig klar geworden sein, dass man auf einen Äther, ähnlich wie Mach und Cohn, verzichten konnte. Geben wir nun Einsteins einleitende Worte wieder:

„Daß die Elektrodynamik *Maxwells* – wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt⁵⁴ – in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber – Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt – zu elektrischen Strömen von derselben

⁵⁴ Eichenwald erklärt: „Allen drei Theorien ist dasselbe Maxwellsche Gleichungssystem zugrunde gelegt [...]“ (Eichenwald, 1904b, p. 937), nur einige Begriffe, welche die Feldlinien physikalisch definieren, haben eine andere Bedeutung (Eichenwald, 1904b, p. 938).

Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.⁵⁵

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum 'Lichtmedium' zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung⁵⁶ bereits erwiesen ist. [...]“ (Einstein, 1905r, p. 891)

Wenn wir Eichenwalds Arbeit (Eichenwald, 1904b) heranziehen, werden die Zeilen von Einstein verständlich (siehe Fußnoten). Vor allem wird auch klar, weshalb Einstein (später) oft betonte, dass das Michelson-Morley Interferenzversuch für ihn nicht wichtig war, sondern das Experiment von Fizeau (Shankland, 1963, p. 48). Er hatte sich nämlich zum Schluss wohl mehr an Eichenwald orientiert und dieser hatte vor allem auf das Experiment von Fizeau hingewiesen.

2.1.2.2.3.2. Ad 2.:

Warum hat sich Einstein 1904/1905 dieses Buch und dieses Kapitel von Föppl angesehen?

Eine mögliche Antwort wird hier kurz dargelegt:

Besso hat Einstein (wahrscheinlich) vor Abschluss der speziellen Relativitätstheorie auf Machs Kritik (der absoluten Zeit und Gleichzeitigkeit)⁵⁷ und dessen Konzepte verwiesen⁵⁸.

(Wenn wir Einsteins Rede und zusätzlichen Quellen vertrauen, wird es im Mai 1905 gewesen sein.)⁵⁹ Einstein hatte also guten Grund, die Werke von Mach oder die Werke, die sich mit

Machs Konzepten auseinandersetzen, zu untersuchen. Föppl reichte (am 5. November)

1904 eine Arbeit mit dem Titel „Über absolute und relative Bewegung“ (Föppl, 1904b) ein.

(Diese sollte spätestens Anfang 1905 veröffentlicht worden sein.) Dass jenes Werk und sein Titel aus vielen Gründen für Einstein von Interesse gewesen sein müssen, ist selbsterklärend.

Lassen Sie uns sehen, wie Föppl seine Arbeit „Über absolute und relative Bewegung“ beginnt:

„Die treffendsten Ausführungen über die physikalische Bedeutung des Trägheitsgesetzes und den damit zusammenhängenden Begriff der absoluten Bewegung

⁵⁵ Mit elektrischen Kräften ist das elektrische Feld gemeint – denken wir hier an (Eichenwald, 1904b, pp. 938-939): $E = E_0$.

⁵⁶ Siehe dazu Eichenwalds Erklärung zu experimentellen Resultaten erster Ordnung (Eichenwald, 1904b, pp. 938-939, 943) und den Abschnitt „4.4.2.2. Thema II: Der Widerspruch [16]-[25]“.

⁵⁷ Siehe Abschnitt „4.4.2.3.1 Die Neudefinition der Zeit: Cohns und Machs möglicher Einfluss“.

⁵⁸ Siehe Abschnitt „2.1.1. Das O von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“.

⁵⁹ Siehe Abschnitt „4.4.2.3. Thema III: Die Lösung des Widerspruchs (durch die Neudefinition der Zeit) [26]-[39]“.

rühren von Mach her. Nach ihm ist auch in der Mechanik, wie schon in der Geometrie ohnehin, die Annahme eines absoluten Raumes und hiermit einer absoluten Bewegung im eigentlichen Sinne unzulässig. Jede Bewegung ist nur als eine relative verständlich und was man gewöhnlich absolute Bewegung nennt, ist lediglich die Bewegung relativ zu einem Bezugssysteme, einem sogenannten Inertialsysteme, das von dem Trägheitsgesetze gefordert wird und das auf irgend eine gesetzmässige Weise durch die Massen des Weltsystems seine Orientierung erhält. Mit dieser Anschauung stimmen heute die meisten Autoren im wesentlichen überein, so aus der neuesten Zeit besonders Voss und Poincaré.“
(Föppl, 1904b, p. 383)

Bevor wir fortfahren, schauen wir uns diese Passage genauer an. In einer Fußnote zum Namen „Poincaré“ erkennen wir, auf welches Werk Föppl sich bezieht:

„H. Poincaré, *Wissenschaft und Hypothese*. Deutsch von F. und L. Lindemann, Leipzig 1904.“
(Föppl, 1904b, pp. 384, fn. 2)

Die deutsche Übersetzung des Buches von Poincaré erschien 1904. Damals hatte Mach auf Poincaré wohl einen großen Einfluss – im Buch selbst blieb Mach jedoch unerwähnt. Ferdinand von Lindemann hat das wohl bemerkt und in der deutschen Ausgabe von *Wissenschaft und Hypothese. Autorisierte deutsche Ausgabe mit erläuternden Anmerkungen von F. und L. Lindemann* (Poincare, 1904, p. 338) mit Hinweisen auf Mach nicht gespart. Versuchen wir uns nun erneut wieder in den jungen Einstein hineinzusetzen – was würden wir tun? Da wir davon ausgehen, dass Einstein (unter anderem) in Zusammenhang mit Mach sich für Föppls und in weiterer Folge für Poincarés Buch interessiert haben könnte, wäre es sehr ratsam, sich das Register anzusehen. In *Wissenschaft und Hypothese* von Poincare lesen wir:

„Mach, Mechanik 284, 286, 291⁶⁰, 294⁶¹, 295⁶², Ökonomie der Forschung 308⁶³, Wärmelehre 308⁶⁴.“ (Poincare, 1904, p. 338)

Bei Themen, wie die Wissenschaft nach Einfachheit streben sollte (Poincare, 1904, p. 308), wo man eine historisch-kritische Reflexion des mechanischen Trägheitsgesetzes von Newton finden könnte (Poincare, 1904, p. 291); oder ganz allgemein bei den Diskussionen zur Mechanik (Poincare, 1904, p. 295) und zur Wärmelehre (Poincare, 1904, p. 308) wird stets auf Mach verwiesen – alles Themen die Einstein damals interessierten. Zudem wissen wir aus dem Brief von Einstein an Besso, dass er gerade die *Mechanik* und die *Wärmelehre* von Mach gut kannte und diese auf ihn einen großen Einfluss hatte. Doch gehen wir die Angaben im Register einfach durch, wie es wohl auch Einstein getan hätte.

- Auf Seite 81 kommentiert Poincare den absoluten Raum Newtons mit den Worten:

„[...] ich kann diese Anschauungsweise durchaus nicht teilen, im dritten Teile werde ich erklären warum³⁹).“ (Poincare, 1904, p. 81)

Diese Seite gehört zum Abschnitt „Das Gesetz der Relativität“ (Poincare, 1904, pp. 78-81) (, was verständlich macht, weshalb es für Einstein von Interesse gewesen sein dürfte. Die Anmerkung 39 ist von Lindemann und lautet:

⁶⁰ Auf Seite 291 heißt es: „Inbetreff der Entdeckung und Formulierung des Trägheitsgesetzes durch *Galilei* sei auf das erwähnte Werk von *Mach* verwiesen (p. 130).“ (Poincare, 1904, pp. 291, fn. 45)
An dieser Stelle sei nur kurz angemerkt, dass Mach das Trägheitsgesetz von Newton detailliert analysiert, kritisiert und umgedeutet hat.

⁶¹ Dort steht:

„Das Prinzip der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung hat *Newton* an die Spitze der Mechanik gestellt; vgl. die Erörterungen darüber sowie über die Begriffe von Kraft und Kausalität bei *Volkmann* a. a. O. p. 36 ff. und Wiedemanns Annalen Bd. 66, 1898, sowie *Mach* a. a. o. p. 185.“
(Poincare, 1904, p. 194)

⁶² Bei diesem Vermerk auf Mach geht es um die Diskussion der Hertzschen Mechanik (Poincare, 1904, pp. 295, fn. 51).

⁶³ Es heißt:

„Die zu fordernde *Einfachheit* ist besonders durch *Kirchhoff* am Beginne seiner Vorlesungen über Mechanik betont: ‚Als Aufgabe der Mechanik bezeichnen wir, die in der Natur vor sich gehenden Bewegungen *vollständig* und auf die *einfachste Weise* zu beschreiben‘ (vgl. auch *J. S. Mills* Induktive Logik). Diese Forderung wird ergänzt durch die von *Mach* betonte Forderung der *Ökonomie* (Die ökonomische Natur der physikalischen Forschung, 1882; Populäre Vorlesungen, Wien 1896). – Unterscheiden muß man zwischen der Einfachheit der zur Beschreibung dienenden Gesetze und der Einfachheit der Naturerscheinungen selbst. Es können sehr verwickelte Erscheinungen durchschnittlich richtig durch sehr einfache Gesetze beherrscht werden; vgl. unten S. 147.“

(Poincare, 1904, pp. 308-309, fn. 63)

⁶⁴ Beim Thema Thermodynamik wird der an der Geschichte der Entwicklung der Wärmelehre interessierte Leser auf Machs Buch *Die Prinzipien der Wärmelehre* verwiesen (Poincare, 1904, pp. 308, fn. 62).

„39) S. 81. Die betreffenden Darlegungen *Newtons* findet man z.B. bei *Mach* wiedergegeben (Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt, 2. Aufl., Leipzig 1889, S. 211 ff.) [...]“ (Poincare, 1904, pp. 283-284, fn. 39)

Dass man hier zurecht auf die wichtige Kritik von Mach am absoluten Raum Newtons hinweist, ist nicht überraschend. Für Einsteins Spezielle Relativitätstheorie, welche das Relativitätsprinzip an den ersten Platz stellt (Einstein, 1905r, p. 895), waren Machs und Poincares Auseinandersetzungen wahrscheinlich sehr fördernd.

- Auf Seite 91 schreibt Poincare:

„1. Es gibt keinen absoluten Raum, und wir begreifen nur relative Bewegungen; trotzdem spricht man die mechanischen Tatsachen öfters so aus, als ob es einen absoluten Raum gäbe, auf den man sie beziehen könnte.

2. Es gibt keine absolute Zeit; wenn man sagt, daß zwei Zeiten gleich sind, so wäre das eine Behauptung, welche an sich keinen Sinn hat und welche einen solchen nur durch Übereinkommen erhalten kann.

3. Wir haben nicht nur keinerlei direkte Anschauung von der Gleichheit zweier Zeiten, sondern wir haben nicht einmal diejenige von der Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse, welche auf verschiedenen Schauplätzen vor sich gehen; das habe ich in meinem Aufsätze unter dem Titel: la Mesure du temps*) dargelegt.⁴³⁾

4. Endlich ist unsere Euklidische Geometrie selbst nur eine Art von Übereinkommen für unsere Ausdrucksweise: wir könnten die mechanischen Tatsachen aussprechen, indem wir sie auf einen nicht-Euklidischen Raum übertragen; [...]“ (Poincare, 1904, pp. 92-93)

Wer diese Zeilen von Poincare liest, wird darin sehr stark die Ansätze der SRT wiedererkennen können. Die Anmerkung 43 (in Punkt 3.) ist abermals von Lindemann, wo er erklärt:

„43) S. 92. In der citierten Abhandlung kommt *Poincaré* zu folgenden Schlüssen:

„Wir haben keine direkte Anschauung von der Gleichzeitigkeit zweier Zeitdauern, ebensowenig von der Gleichheit. – Wir behelfen uns mit gewissen Regeln, die wir beständig anwenden, ohne uns davon Rechenschaft zu geben. – Es handelt sich dabei um eine Menge kleiner Regeln, die jedem einzelnen Falle angepaßt sind, nicht um eine allgemeine und strenge Regel. – Man könnte dieselben auch durch andere ersetzen, aber man würde dadurch das Aussprechen der Gesetze in der Physik, Mechanik und Astronomie außerordentlich umständlich machen. – Wir wählen also diese Regeln nicht, weil sie wahr, sondern weil sie bequem sind, und wir können sie in folgendem Satze zusammenfassen: Die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse oder die Ordnung ihrer Aufeinanderfolge und die Gleichheit zweier Zeitdauern müssen so definiert werden, daß der Ausspruch der Naturgesetze möglichst einfach wird; mit anderen Worten: All diese Regeln und Definitionen sind nur die Frucht eines bewußten Opportunismus.“

Newton (dessen Anschauung man z.B. bei *Mach* reproduziert findet: Die Mechanik in ihrer Entwicklung, 2. Aufl., Leipzig 1889, S. 207) setzte die Existenz einer ‚absoluten Zeit‘ voraus; [...]“ (Poincare, 1904, p. 286)

Lindemann verweist somit auf Mach, bei welchem die absolute Zeit (und somit auch die absolute Gleichzeitigkeit) kritisiert werden.

Aus diesen Erläuterungen wird ersichtlich, wie sehr die Lektüre von Poincare für Einstein wichtig gewesen ist. Weiters sehen wir, wie Lindemann und Föppl klar erkannt haben, dass diese Überlegungen bereits bei Mach vorhanden waren, die Einstein bereits eifrig studiert hatte. (Es ist daher möglich, dass auch Poincare⁶⁵, wie Duhem⁶⁶, sich mit Machs Konzepten auseinandergesetzt hat.) Jedenfalls haben wir dadurch einen sehr guten Hinweis darauf, weshalb Einstein wohl über die Gleichzeitigkeit nachzudenken begann. Doch kommen wir nun zu Einsteins Gedankenexperiment mit Magnet und Leiter wieder zurück...

Wenn Einstein Föppls Arbeit „Über absolute und relative Bewegung“ (1904) gelesen hat – und in Folge Poincares und Machs Werke wieder reflektierte –, wird es verständlich, dass er sich auch eingehender mit *Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität* (Föppl, 1894) auseinandergesetzt hat. In diesem Buch gibt es nämlich einen fünften Abschnitt „Die Elektrodynamik bewegter Leiter“ (Föppl, 1894, pp. 307-355). Dort diskutiert Föppl gleich zu Beginn „§ 114. Relative und absolute Bewegung im Raume“ (Föppl, 1894, pp. 307-311) und erklärt seine Gedanken zur Relativbewegung zwischen Magnet und Leiter. Der aufmerksame Leser wird die Parallelen zwischen diesen Titeln

„Über absolute und relative Bewegung“ (Föppl, 1904b)

und

„§ 114. Relative und absolute Bewegung im Raume“ (Föppl, 1894, pp. 307-311)

⁶⁵ Siehe dazu (Stadler, 2019b, p. 12) (Staley, 2019, p. 350).

⁶⁶ Es gibt nicht nur biographische Parallelen zwischen Duhem und Mach (Hentschel, 1988, pp. 74-75), sondern auch eine freundschaftliche Beziehung zwischen den beiden Physikern und Wissenschaftstheoretikern. So wird Duhem von Mach beispielsweise nicht nur im Vorwort zur 5. Auflage seines Buches der *Mechanik* (Hentschel, 1988, p. 75) und zur 2. Auflage von *Erkenntnis und Irrtum* (Hentschel, 1988, p. 80) erwähnt. Erst durch seinen Einsatz bzw. seine Empfehlung wird das Hauptwerk *Ziel und Struktur der physikalischen Theorien* von Duhem ins Deutsche übersetzt und veröffentlicht – und zwar mit einem Vorwort von Mach selbst, was zur positiven und breiten Rezeption im deutschsprachigen Raum wesentlich beitrug (Hentschel, 1988, pp. 79, fn. 20; 86). So hat Duhem auch nicht nur die *Mechanik* von Mach gelesen (Moulines, 2008, pp. 36-37) und ergänzende Bemerkungen (Hentschel, 1988, p. 73) geschrieben, sondern auch eine ausführliche Rezension dazu (Hentschel, 1988, pp. 76, 88). Um mehr über die Beziehung zwischen Mach und Duhem und ihren Konzepten in Erfahrung zu bringen, siehe auch (Brenner, 2019) (Buzzoni, 2019).

sicherlich nicht übersehen haben. Wenn Einstein Föppls Werk „Über absolute und relative Bewegung“ (Föppl, 1904b) gelesen hat, hat er auch erkannt, dass man die Relativbewegung von Leiter und Magnet noch einmal überdenken muss. Dieses Vorgehen wird in der vorliegenden Arbeit angenommen. Dafür sprechen auch zwei Gründe:

1) In „§ 114. Relative und absolute Bewegung im Raume“ (Föppl, 1894, pp. 307-311) tendiert Föppl zu einem mit Äther ausgefülltem absoluten Raum:

„§ 114. Relative und absolute Bewegung im Raume.

Den Untersuchungen der Kinematik, der allgemeinen Bewegungslehre, liegt meistens das Axiom zu Grunde, dass es bei den Beziehungen der Körper zu einander nur auf die Relativbewegungen ankomme. Von einer absoluten Bewegung im Raume könne gar keine Rede sein, da jedes Mittel fehle, eine solche Bewegung zu konstatiren, wenn kein Vergleichskörper vorhanden wäre, von dem aus sich die Bewegung beobachten und ausmessen liesse.

Bei der Aufstellung dieses Axioms stützt man sich auf den Begriff des leeren Raumes, wie er in den geometrischen Betrachtungen aufgefasst wird und der zweifellos als eine Abstraction aus der Erfahrung anzusehen ist. Ich sage ‚zweifellos‘, indem ich dabei an die Ueberzeugung denke, die der Physiker gewinnt, wenn er Umschau darüber hält, wie die scheinbar unerschütterlich begründeten Anschauungen über die Körperwelt doch immer in stetiger Weiterbildung und Umbildung begriffen sind, nicht an den Philosophen, nach dessen Ueberzeugung der Raumbegriff schon a priori vorhanden sein muss, um die Erfahrungen über die sich im Räume abspielenden Ereignisse erst zu ermöglichen.

Sehen wir den Raum als vollständig leer an, so ist das angeführte Axiom der Bewegungslehre in der That eine selbstverständliche und unerlässliche Forderung unserer heutigen Raumvorstellungen. Sowohl nach der Maxwell'schen Theorie als nach den Lehren der Optik kommen aber ‚leere‘ Räume in der Wirklichkeit überhaupt nicht vor. Auch das sogenannte Vacuum ist noch mit einem Medium, dem Aether, angefüllt. Sobald wir dies beachten, wird aber der Begriff der absoluten Bewegung sofort verständlich: es ist die relative Bewegung zu dem den Raum ausfallenden Medium.

Hier ist jedoch noch eine weitere Bemerkung einzuschalten. *Bis jetzt ist es nämlich noch zweifelhaft, ob wir uns vorzustellen haben, dass ein sich bewegnender Körper den Aether in seinem Innern und theilweise auch den in seiner Nachbarschaft bei der Bewegung mit sich führt oder ob der Aether an den Bewegungen der Materie ganz unbetheiligt ist.* Im letzten Falle würde man zu dem Schlusse geführt, dass das Vorhandensein des Aethers den Raum überhaupt erst bedingt, dass die Vorstellung eines Raumes ohne diesen Inhalt einen Widerspruch bedeutete, etwa wie wenn man sich einen Wald ohne Bäume denken wollte.*)“
(Föppl, 1894, pp. 307-308)

In der Fußnote „*)“ erklärt er:

„*) Zum mindesten ist zu schliessen, dass ein Raum ohne Aetherinhalt ebensogut vierdimensional als dreidimensional sein könnte, denn die Annahme der vierten Dimension verstösst an sich, wie die Anläufe zu einer mehrdimensionalen Geometrie beweisen, nicht gegen die Denkgesetze. Wenn ein Raum von vier Dimensionen irgendwo physikalische Existenz hätte, würde sich, wie hiernach anzunehmen ist, der menschliche Verstand auch in diesem ebenso wie jetzt in dem dreidimensionalen zurecht zu finden wissen, — endgültig freilich nur mit Zuhülfenahme der Anschauung, also der Erfahrung. — Die Eigenschaft der

dreifachen Ausdehnung des Raumes ist eine Erfahrungstatsache, die nur aus der Beobachtung in dem uns erreichbaren physikalisch existirenden, äthererfüllten Raume entnommen ist und daher keineswegs auf einen fingierten leeren Raum mit Nothwendigkeit übertragen werden muss.“ (Föppl, 1894, pp. 308, fn. *)⁶⁷

Es ist somit deutlich herauszulesen, dass Föppl früher am Konzept eines Äthers festhielt und die „absolute Bewegung“ (Föppl, 1894, p. 308) damit begründete. Diese Sichtweise konnte für Einstein und somit für die Spezielle Relativitätstheorie nicht dienlich gewesen sein.

Interessant ist aber, dass Föppl (ähnlich wie Mach) betont, dass unsere physikalischen Begriffe nicht a priori seien, sondern aus der Erfahrung gewonnen werden sollten. Dabei sind theoretischen Modellen gar keine Grenzen gesetzt, solange sie anhand der Erfahrung überprüfbar bleiben. In einer Fußnote schließt Föppl daher nicht einmal aus, dass man in der Physik ebenso gut vier Dimensionen verwenden könnte usw. Diese Überlegungen wiederum waren für Einstein sicherlich sehr hilfreich, um Längen und Zeiten in der Physik neu zu interpretieren. Doch für das Relativitätsprinzip Einsteins waren Föppls damalige Erläuterungen sicher nicht wegweisend. So erklärt er weiter:

„Wenn wir im Folgenden von den Sätzen der Kinematik über die Relativbewegungen Gebrauch machen wollen, müssen wir bei dieser Sachlage mit Vorsicht verfahren. Wir dürfen es nicht a priori als feststehend ansehen, dass es z. B. gleichgültig ist, ob ein Magnet sich in der Nähe eines ruhenden elektrischen Stromkreises oder ob dieser sich bewegt, während der Magnet ruht, falls nur in beiden Fällen die Relativbewegung die gleiche ist.“ (Föppl, 1894, p. 309)

Er war offensichtlich für den Äther, die absolute Bewegung und gegen das Relativitätsprinzip. Das überrascht auch wenig, weil er damals wohl kein Machianer (im engsten Sinne) war – sondern er folgte den Überlegungen von C. Neumann:

„Zu der Anschauung, dass es absolute Bewegungen im Räume geben muss, werden wir übrigens, worauf von C. Neumann längst hingewiesen wurde, mit Notwendigkeit durch das Gesetz der Trägheit geführt. Auch die Gültigkeit des Energieprinzips ist davon abhängig. Von dem Gesetze der Trägheit erkennt man dies sofort, wenn man die Bewegung eines materiellen Punktes, der ganz sich selbst überlassen ist, relativ zu einem selbst in beliebiger Bewegung begriffenen Räume betrachtet. In der That gilt ja z. B. für den irdischen Raum, wie aus der Ablenkung des Foucault'schen Pendels u. s. w. bekannt ist, das Trägheitsgesetz überhaupt nicht streng; es gilt nur für den durch die Kopernikanischen Vorstellungen über die Bewegungsvorgänge im Sonnensysteme definierten Raum. Bis auf Weiteres müssen wir daher als absolute Bewegungen jene relativ zu diesem Kopernikanischen Räume ansehen.“ (Föppl, 1894, p. 309)

⁶⁷ Ähnliche Formulierungen finden sich auch in (Föppl, 1904, p. 435).

Auf Neumanns Ansichten wollen wir an dieser Stelle nicht weiter eingehen und verweisen den Leser auf Machs Kritik an Neumann (Mach, 2012, pp. 267, 306, 309-310).

Jedenfalls lässt sich deutlich zeigen, dass Föppl früher am absoluten Raum noch festhielt (Föppl, 1894); er sich jedoch später von Machs Überlegungen leiten ließ, den absoluten Raum aufgab und das Relativitätsprinzip unterstützte (Föppl, 1904b, p. 383).⁶⁸ Es ist gut möglich, dass Einstein sich von diesem Wandel (1904/1905) hat mitreißen lassen.

2) Ein anderer Grund, weshalb Einstein sich 1904/1905 für die relative Bewegung von Magnet und Leiter und somit für „§ 114. Relative und absolute Bewegung im Raume“ (Föppl, 1894, pp. 307-311) zu interessieren begann, ist sehr einfach zu erklären. Wir haben im Abschnitt „2.1.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“ bereits besprochen, dass Einstein von der Diskussion im Jahre 1904 zwischen Wilhelm Wien und Max Abraham stark profitiert hat. Umso interessanter wird es nun, da Max Abraham das Buch *Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität* (Föppl, 1894) von Föppl im Jahre 1904 in überarbeiteter Form in zweiter Auflage herausgeben hat – siehe dazu Max Abrahams Vorwort zur zweiten Auflage (Föppl, 1904, pp. XII-XIV). Unten in der Abbildung 1 ist das Titelblatt der zweiten Auflage (Föppl, 1904) zu sehen.

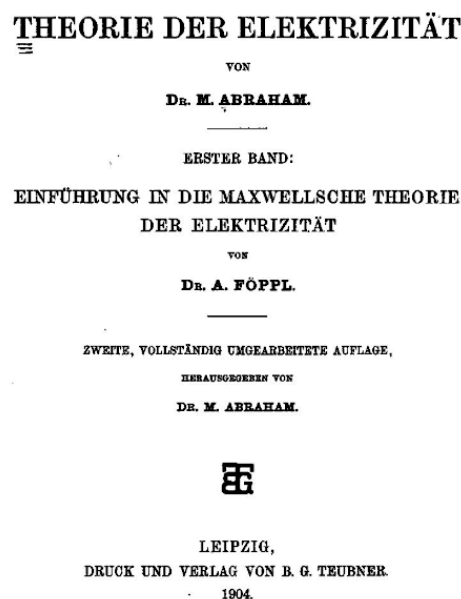


Abbildung 1: Quelle: <https://archive.org/details/theoriederelekt05fpgoog> [Zugriff am 22. August 2020].

⁶⁸ Es wäre wünschenswert, wenn zukünftige Arbeiten diesen Wechsel von Föppl genauer erläutern könnten.

Wenn wir nun mit unseren folgenden drei Annahmen, nämlich:

1. Die Arbeiten von Eichenwald (Eichenwald, 1903a) (Eichenwald, 1903b) und vor allem dessen letzte Arbeit „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1904b) führten Einstein letztendlich dazu elektrische und magnetische Felder (von Magnet und Leiter) nur auf Relativbewegungen zurückzuführen und wie Cohn auf das Konzept eines Äthers zu verzichten. (Womöglich studierte Einstein auf Grund der Schrift „Ueber das innere Feld der Elektronen“ (Eichenwald, 1904a) auch intensiver Abrahams Ansichten...)
2. Einstein interessierte sich – womöglich angeregt durch das Gespräch mit Besso (Ende) Mai 1905 und/oder durch Föppls Arbeit (Föppl, 1904b) – um 1904/1905 für das Gedankenexperiment zu Magnet und Leiter.
3. Unter anderem die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien und Abraham im Jahre 1904 ebnete für Einstein den Weg zur Speziellen Relativitätstheorie,

richtig liegen, dann muss gerade in der zweiten, von Max Abraham überarbeiteten, Auflage (Föppl, 1904) von Föppls Buch die Relativbewegung bzw. das Relativitätsprinzip hervorgehoben worden sein. Im letzten Abschnitt des Buches „§ 91. Relative und absolute Bewegung“ lesen wir:

„Gleichzeitig wird der Hertzschen Theorie das mechanische Axiom von der Relativbewegung zugrunde gelegt; es werden die elektromagnetischen Wechselwirkungen der Körper nur von ihrer relativen Bewegung abhängig gemacht. Diese Auffassung kann sich darauf berufen, daß für die elektromagnetischen Wechselwirkungen von Körpern, die sich mit der Erde bewegen, der Satz der Relativbewegung tatsächlich gilt, wie schon aus dem Umstande zu ersehen ist, daß diese Wechselwirkungen bisher keinen Anhaltspunkt für die Bestimmung der absoluten Bewegung der Erde ergeben haben. Die Hertzsche Theorie ordnet die Elektrodynamik im wesentlichen in den Gedankenkreis der alten Mechanik ein, nur daß sie an Stelle der dort zugelassenen Fernwirkungen stets Nahwirkungen im Äther setzt; die Axiome der Newtonschen Mechanik, insbesondere das Axiom der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung, und dasjenige der Relativbewegung, werden auch bei Mitwirkung elektromagnetischer Kräfte als gültig angesehen.“ (Föppl, 1904, p. 431)

In diesen Zeilen stellt Max Abraham klar, dass die Relativbewegung und somit das Relativitätsprinzip nicht nur für die Mechanik, sondern auch für die Elektrodynamik als gültig angesehen werden könnte. Erst in den nächsten Seiten wird Abraham wieder Föppls Darstellung der absoluten Bewegung übernehmen (Föppl, 1904, pp. 433-434). Wenn Einstein nun gleich zu Beginn seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r)

die Gültigkeit des Relativitätsprinzips anhand der Relativbewegung zwischen Magnet und Leiter vor Augen führt (Einstein, 1905r, p. 891), dann dürfte er dazu durch Föppls Äußerungen (Föppl, 1894, pp. 307-308) und Abrahams überarbeitete Diskussion (Föppl, 1904, p. 431) motiviert worden sein.

Damit schließt sich wieder ein Gedankenkreis: Einstein dankt seinem guten Freund Besso am Ende seiner Arbeit. Wie wir aus Bessos Brief an Einstein sehen werden, betrachtet dieser seinen Beitrag im Allgemeinen als Hinweis auf Machs Überlegungen. Einsteins Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) beginnt mit Reflexionen über Magnete und den Leiter, auf die er wahrscheinlich durch seine Forschungen zu Mach aufmerksam wurde. Der Anfang⁶⁹ und das Ende⁷⁰ von Einsteins Arbeit schließen somit den Inhalt ein: Machs Überlegungen physikalisch zu untersuchen und sie in den Stand der Forschung zu integrieren. Ernst Mach war Experimentalphysiker und zu dieser Zeit (1905) bereits sehr alt und krank. Ein junger, begabter, theoretischer Physiker, wie Einstein es war, konnte die Ideen der Relativität von Zeit, Raum und Trägheit zumindest als ersten Schritt für die Trägheitssysteme ausarbeiten und somit die Mechanik mit der Elektrodynamik vereinen. Wie Einstein aber aus Machs, (und Föppls) Arbeiten erahnen konnte, war das Programm noch nicht abgeschlossen...Es bedurfte noch der „Allgemeinen“ Relativitätstheorie...

⁶⁹ Siehe dazu Abschnitt „2.1.2. Das A von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“ und die dazu gehörigen Unterabschnitte.

⁷⁰ Siehe dazu Abschnitt „2.1.1. Das O von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“.

2.2. Zusammenfassung der Ergebnisse und die daraus resultierenden Forschungsfragen für die nächsten Abschnitte

2.2.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Sexl hat deutlich ausgesprochen, dass die Frage, welche Quellen Einstein für seine Arbeit (Einstein, 1905r) herangezogen hat, größtenteils noch unbeantwortet ist (Sexl, 1985, p. 35) – und somit verständlicherweise auch die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie. Der Grund dafür liegt vor allem darin, dass Einstein in „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) gar keine Quellen angibt – was an sich viele Fragen aufwirft.

Sexl erläutert jedoch einige Hinweise, mithilfe derer man die weitere Einstein-Forschung ansetzen könnte. Er verweist auf die Parallelität zwischen Wiens (Wien, 1904b) und Einsteins (Einstein, 1905r) Arbeit, und zugleich auch auf Cohns und Abrahams Beiträge (Sexl, 1985, pp. 36-37) – dass hier Zusammenhänge gesehen wurden, verdanken wir daher vor allem Sexl.

Doch gerade bei den Untersuchungen von Sexl wird sichtbar, dass Cohns Beiträge aufgrund des Forschungsstandes nicht ganz richtig eingeschätzt wurden. So schreibt Sexl: „Auch als Wien im nächsten Band der *Annalen der Physik* in eine *Polemik* mit E. Cohn [...] verwickelt wird, [...]“ (Sexl, 1985, p. 36)

In eine „Polemik“ war Wien nicht mit Cohn, sondern mit Abraham verwickelt, wie wir deutlich zeigen konnten. Bei Sexl wird es eher umgekehrt dargestellt (Sexl, 1985, pp. 36-37), wobei er auf gar keine Schriften von Cohn hinweist. Aus diesem Grund war es wichtig auf die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien, Cohn und Abraham genauer einzugehen, was wir in dieser Arbeit (in den Abschnitten „2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“ und „2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“) unternommen haben.

Zusätzlich haben wir anhand der Quellen Argumente erbracht, die nahelegen, dass Einstein über diese wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien, Cohn und Abraham in Kenntnis war – einige seien an dieser Stelle punktuell zusammengefasst:

1. Einstein hat sich bereits sehr früh für Wiens Arbeit (Wien, 1898) interessiert und mit ihm Kontakt aufgenommen. Seine früheren Überlegungen zu einem Experiment mit Spiegeln dürften davon inspiriert gewesen sein.
2. In der *Festschrift* (Meyer, 1904) zu Boltzmanns Ehren erscheint ein Buch, in welchem Aufsätze, unter anderem von Wien (Wien, 1904a) und Abraham (Abraham, 1904a), zu finden sind. Aufgrund der Tatsache, dass Einstein sich für die Optik bewegter Körper (bzw. Spiegel) interessierte (siehe Punkt 1) – aber sich auch allgemein mit der Thermodynamik/Strahlung befasste – liegt es nahe, dass er auch über diese Werke in Kenntnis war. Was sich jedenfalls belegen lässt, ist, dass Einstein das Buch *Festschrift* (Meyer, 1904) kannte, da er die Aufgabe hatte, drei der Beiträge selbst zu überprüfen.
3. Im Jahr 1904 werden die Schriften (Wien, 1904b) (Wien, 1904c) (Wien, 1904d), (Wien, 1904f) (Wien, 1904e) von Wien in *Annalen der Physik* veröffentlicht, welche zu einer wissenschaftlichen Diskussion zwischen Wien, Cohn (Cohn, 1904) und Abraham (Abraham, 1904b) (Abraham, 1904c) in der genannten Zeitschrift führen werden. Allgemein gibt es einige Gründe dafür anzunehmen, dass Einstein die wichtigsten Beiträge in den *Annalen der Physik* 1903-1905 studierte, um sich auf dem Forschungsstand zu halten, da er auch selber darin publizierte (Einstein, 1901) (Einstein, 1902a) (Einstein, 1902b) (Einstein, 1903) (Einstein, 1904). Argumente, weshalb Einstein gerade von der wissenschaftlichen Diskussion zwischen Wien, Cohn und Abraham in Kenntnis war, wären:
 - a. Wien-Einstein: Aufgrund der Punkte 1-2 können wir annehmen, dass Einstein wohl auch an Wiens Arbeiten (Wien, 1904a) (Wien, 1904b) (Wien, 1904c) (Wien, 1904d) interessiert war.
 - b. Wien-Cohn: Darüber hinaus weisen die erste Seite von Wien (Wien, 1904b), Cohn (Cohn, 1904a) und Einstein (Einstein, 1905r) Parallelen auf; aber auch inhaltlich haben die Arbeiten einige Gemeinsamkeiten. Auf Cohns Arbeiten wird Einstein später selber hinweisen; ebenso werden wir sehen, dass er eine Kopie von (Cohn, 1904a) aufbewahrte.
 - c. Wien-Abraham: Dass Einstein diese Diskussion ebenfalls verfolgte, ist auf Grund der Punkte 1-2 sehr wahrscheinlich. Vor allem weil eine Erwiderung von Abraham (Abraham, 1904b) im selben Band erschien, wie eine Arbeit von Einstein (Einstein,

1904). (Einsteins damalige Arbeit zur Wärme und Strahlung passt auch inhaltlich gut zu dieser Diskussion.)

- d. (Abraham-Cohn-Einstein: Sowohl Abraham als auch Cohn waren, wie Einstein, deutsch-jüdische theoretische Physiker. Da eine Wissenschaft stets auch eine soziale Dimension hat, könnte dieser Punkt ebenfalls von Bedeutung sein. Dies mögen weitere Arbeiten genauer analysieren. Allgemein lässt sich vermuten, dass Einstein sich in seinen Studien vor allem auch die Werke deutsch-jüdischer theoretischer Physiker ansah, da er sich dadurch an erfolgreichen Karrieren orientieren konnte.)

Aufgrund der oben angegebenen Punkte (1-3) können wir annehmen, dass Einstein wohl die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien, Abraham und Cohn verfolgte.

Im Abschnitt „2.1.2.2.3. Der Diskurs und seine experimentelle Ebene: Magnet und Leiter“ sind wir auch auf Einsteins Gedankenexperiment über die „Relativbewegung von Leiter und Magnet“ (Einstein, 1905r, p. 891) eingegangen, das sich (ebenfalls) auf der ersten Seite seiner Arbeit befindet. Wie in *The Collected Papers of Einstein* erkannt wurde (CPAE 2; 23; p. 306, fn. 1), hat Einstein wahrscheinlich dieses Gedankenexperiment aus dem Buch *Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität* (Föppl, 1894) von Föppl übernommen und analysiert. Wir sind darauf eingegangen, dass Föppl damals zu einem mit Äther ausgefüllten absoluten Raum tendierte (Föppl, 1894, pp. 307-308) und damit versuchte die „absolute Bewegung“ (Föppl, 1894, p. 308) zu begründen, weshalb er skeptisch gegenüber dem Relativitätsprinzip und somit der Relativbewegung von Magnet und Leiter stand (Föppl, 1894, p. 309) – diese Ansichten waren für Einstein sicher nicht wegweisend. Womöglich könnte man jenen Standpunkt von Föppl darauf zurückführen, dass er damals kein Machianer (im engsten Sinne) war (Föppl, 1894, p. 309). Ähnlich wie Mach betonte aber auch er, dass unsere physikalischen Begriffe nicht a priori gegeben seien, sondern aus der Erfahrung gewonnen werden sollten (Föppl, 1894, pp. 307-308). Zudem erklärt Föppl, dass man in der Physik vier Dimensionen verwenden könnte (Föppl, 1894, pp. 308, fn. *) usw., die für Einstein sicherlich hilfreich gewesen sein könnten.

Jedoch konnten wir auch hier zeigen, dass den veröffentlichten Schriften in den *Annalen der Physik* ebenfalls eine besondere Rolle zukam, um das Gedankenexperiment besser in die

Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie einordnen zu können. In den *Annalen* (der ganzen Reihe 316. Band; Folge 5) erschien nämlich Einsteins Arbeit „Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik“ (Einstein, 1903) – im selben Band (und derselben Folge) ist auch die Schrift „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1903a) von Alexander Eichenwald⁷¹ zu finden, wo er gleich zu Beginn auf bewegte Leiter eingeht – siehe Abschnitt „I. Bewegte Leiter“ (Eichenwald, 1903a, pp. 1-4); er wird auch eine weitere Arbeit mit demselben Titel (Eichenwald, 1903b) in den *Annalen* veröffentlichen. Eichenwalds Experimente sprachen für einen überall ruhenden Äther – ein solcher ist aber von einer Physik ohne Äther kaum zu unterscheiden. Im selben Band (und Folge), wo die Werke (Wien, 1904b) (Wien, 1904c) von Wilhelm Wien erschienen, die für eine wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien, Cohn und Abraham sorgten, finden wir auch eine weitere Arbeit „Ueber das innere Feld der Elektronen“ (Eichenwald, 1904a), wo Eichenwald, anhand von Max Abrahams Elektronentheorie, das innere Feld des Elektrons beschreibt (Eichenwald, 1904a, pp. 770, 776-777, 782). Im selben Band (der ganzen Reihe 318. Band, Folge 5) ist auch eine weitere Schrift von ihm gegeben – diese trägt wieder den Titel „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1904b). Gerade diese Arbeit dürfte für Einstein von enormer Wichtigkeit gewesen sein. Gleich zu Beginn verweist Eichenwald darauf, dass ihn Emil Cohn auf einen Fehler (in (Eichenwald, 1903b)) hingewiesen hat, wofür er sich bei ihm bedankt (Eichenwald, 1904b, p. 919). Einige Seiten später vergleicht er die Theorien von Hertz, Lorentz und Cohn anhand seiner eigenen experimentellen Resultate (Eichenwald, 1904b, p. 938) und kommt zum Schluss, dass die Theorien von Lorentz und Cohn nach seinen experimentellen Ergebnissen – die eine Genauigkeit von erster Ordnung $\left(\frac{u}{v} = \frac{v}{c}\right)$ erreichen (Eichenwald, 1904b, pp. 938-939) – beide gleich gültig sind und die Hertzsche eher als widerlegt angesehen werden sollte (Eichenwald,

⁷¹ Wir sind darauf eingegangen, dass Arthur I. Miller in seinem Buch nur auf diese Arbeit (Eichenwald, 1903a) von Eichenwald mehrmals hinweist (Miller, 1998, pp. 14, 149-150, 168), aber diese mit Einsteins Werk (Einstein, 1905r) nicht direkt in Verbindung bringt. Ebenso geht Miller auf die späteren Arbeiten von Eichenwald nicht ein. In anderen Schriften zur Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie wird Eichenwald gar nicht erwähnt, z.B.: (French, 1985) (Stachel, 2002) (Norton, 2004) (Janssen & Stachel, 2004), woraus folgt, dass wir einen Fortschritt in der Forschung erzielen konnten.

In *The Collected Papers of Albert Einstein* finden wir einige Seiten zu Eichenwald. Beispielsweise geht Einstein in seinem Manuskript zur Speziellen Relativitätstheorie, welches er zwischen 1912-1914 fertigte, zuerst auf Magnet und Leiter ein (CPAE 4; 1; p. 15-27) und in diesem und weiterem Zusammenhang verweist er auch auf die Arbeit(en) von Eichenwald (CPAE 4; 1; p. 17).

1904b, pp. 939-941). Einstein dürfte spätestens da klar geworden sein, dass man auf einen Äther, ähnlich wie Mach und Cohn, verzichten konnte, wodurch die Möglichkeit gegeben war, das magnetische und das elektrische Feld anhand der Relativbewegungen zu untersuchen. Wichtig ist zudem, dass Eichenwald am Schluss betont, dass auch das Experiment von Fizeau, das von Michelson und Morley wiederholt wurde, ebenso (nur) eine Genauigkeit von erster Ordnung hat und somit nicht zwischen Lorentz und Cohn unterscheiden bzw. entscheiden kann (Eichenwald, 1904b, p. 943) – den Interferenzversuch von Michelson erwähnt Eichenwald nicht. Ziehen wir nun Eichenwalds Arbeit (Eichenwald, 1904b) heran, so werden die Zeilen von Einstein verständlich (Einstein, 1905r, p. 891), wo er ebenfalls nur auf Experimente hinweist, die eine Genauigkeit von erster Ordnung haben. Zudem wird auch klar, weshalb Einstein später (gegenüber Shankland) betonte, dass der Michelson-Morley Interferenzversuch für ihn nicht wichtig war und er ihn sonst in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) erwähnt hätte – sondern das Experiment von Fizeau für ihn ausschlaggebend war (Shankland, 1963, p. 48). Einstein hat sich zum Schluss wohl an Eichenwald orientiert und dieser hatte nur auf das Experiment von Fizeau hingewiesen. Schließlich sind wir auch darauf eingegangen, dass Föppl später in seiner Arbeit „Über absolute und relative Bewegung“ (Föppl, 1904b) Machs Ansichten übernommen hat und in diesem Zusammenhang auch auf das Buch *Wissenschaft und Hypothese* (Poincare, 1904) von Poincare hingewiesen hat (Föppl, 1904b, p. 383). Gerade die Hinweise von Ferdinand von Lindemann in der deutschen Ausgabe zeigen, wie nah sich Machs und Poincares Ansichten (zum Teil) standen⁷² (Poincare, 1904, pp. 283-284, fn. 39; 286, 291, 295, 308). Es ist daher gut möglich, dass, ähnlich wie Duhem, auch Poincare sich mit Machs Konzepten auseinandersetzte. Insgesamt dürfen wir davon ausgehen, dass für Einstein die Lektüre von Poincare wichtig gewesen ist. Wenn wir (auf Grund der vielen Zusammenhänge) annehmen, dass Einstein (zumindest einige) der Arbeiten von Eichenwald (Eichenwald, 1904a) (Eichenwald, 1904b), Föppl (Föppl, 1904b) und Poincare (Poincare, 1904) gelesen hat und sich von diesem Wandel in der Forschung zum Relativitätsprinzip im Jahre 1904 mitreißen ließ, dann wird es verständlich, weshalb er sich anschließend eingehender mit Föppls früheren (veralteten) Ansichten zur Relativbewegung zwischen Magnet und Leiter (Föppl, 1894, pp. 307-311) auseinandersetzte und diese überdachte – ein

⁷² Für die weitere Forschung wäre die Korrespondenz zwischen Lindemann und Poincare sicher allgemein interessant.

weiterer wichtiger Grund, dies zu tun, lag sicher darin, dass Max Abraham das Buch (Föppl, 1894) von Föppl im Jahre 1904 in überarbeiteter Form in zweiter Auflage herausgeben hat (Föppl, 1904, pp. XII-XIV). In diesem ist deutlich zu sehen, dass Abraham nun die Gültigkeit der Relativbewegung und somit das Relativitätsprinzip nicht nur für die Mechanik, sondern auch für die Elektrodynamik hervorgehoben hat (Föppl, 1904, p. 431). Da Einstein gleich zu Beginn seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) die Gültigkeit des Relativitätsprinzips anhand der Relativbewegung zwischen Magnet und Leiter vor Augen führt (Einstein, 1905r, p. 891), dürften ihn dazu Föppls frühere Äußerungen (Föppl, 1894, pp. 307-308) und Abrahams überarbeitete Diskussion (Föppl, 1904, p. 431) dazu motiviert haben.

Zusammenfassend können wir uns die Frage stellen: Sind diese Erkenntnisse von irgendwelchem Wert für die Einstein-Forschung? Ja, denn sie erlauben uns anzunehmen, dass Einstein die Arbeiten von Wien, Cohn, Abraham und Eichenwald kannte. Dadurch können wir auch Zusammenhänge zwischen den Arbeiten erkennen, welche uns helfen auf bereits zu Beginn gestellte wichtige Fragen eine einfache und schlüssige Antwort zu geben:

1. Frage: Weshalb veröffentlichte Einstein seine Arbeit erst im Jahre 1905 in den *Annalen der Physik*?

Antwort: Einsteins Arbeit (Einstein, 1905r) kann als eine Reaktion auf die wissenschaftliche Diskussion (im Jahre 1904) zwischen Wilhelm Wien, Emil Cohn und Max Abraham angesehen werden, ebenso wie auf die experimentellen Ergebnisse, die Eichenwald in diesem Zusammenhang besprach.

2. Frage: Weshalb lautet der Titel von Einsteins Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“?

Antwort: Da der Titel eine Anlehnung an die Titel Wiens („Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper“) (Wien, 1904b) und Cohns („Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“) (Cohn, 1904a) darstellt.

3. Frage: Weshalb ging Einstein auf der ersten Seite seiner Arbeit nicht genauer auf die Experimente von Fizeau und Michelson ein?

Antwort: Weil W. Wien (Wien, 1904b) bereits in seiner Schrift darauf genügend einging, weshalb auch E. Cohn (Cohn, 1904a) darauf nicht mehr hinwies. Da Wiens Arbeit erst relativ kurz vor Einsteins in den *Annalen der Physik* erschien, sah Letztgenannter dafür wahrscheinlich keine Notwendigkeit mehr. Weshalb Einstein später betonte, dass der Interferenzversuch von Michelson für ihn damals keine große Rolle spielte, liegt daran, dass Eichenwald (Eichenwald, 1904b) auf diesen ebenfalls nicht einging.

4. Frage: Einstein teilt seine Arbeit in zwei Teilbereiche: „Kinematik“ und „Elektrodynamik“ – gibt es wissenschaftsgeschichtlich eine Erklärung für dieses Vorgehen?

Antwort:

„I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907): Der erste Teil seiner Arbeit ist als eine Antwort auf die Diskussion zwischen Wien und Cohn anzusehen, da die Arbeiten inhaltlich einige Gemeinsamkeiten haben. Eine nähere Analyse zeigt, dass Einstein wohl vom wissenschaftlichen Dialog zwischen den zwei Physikern profitierte, indem er ökonomisch wie Cohn auf das Konzept eines Äthers verzichtete und Raum und Zeit als physikalische Größen betrachtete. Die Diskussion zwischen Wien und Cohn dürfte daher für den ersten Teil von Einsteins Arbeit sehr wichtig gewesen sein.

„II. Elektrodynamischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 907-921): Teil zwei von Einsteins Arbeit kann als eine Antwort auf die Diskussion zwischen Wien und Abraham verstanden werden. Einstein räumt alle Missverständnisse zum Lichtdruck zu idealen Spiegeln aus dem Weg und zeigt zudem die Unmöglichkeit der Überlichtgeschwindigkeit der Elektronen auf.

Wir konnten somit darlegen, dass Sexls mögliche Intuition, dass die wissenschaftlichen Diskussionen zwischen Wilhelm Wien, Max Abraham und Emil Cohn auf Einsteins „Zur

Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) einen Einfluss hatten, sich als richtig erwiesen hat. Damit sind wir jedoch mit unserer Forschung noch nicht ans Ende gelangt.

2.2.2. Die aus den Ergebnissen resultierenden Forschungsfragen für die nächsten Abschnitte
Aufgrund dieser neuen Erkenntnisse drängen nun folgende Fragestellungen zu einer
Aufklärung:

2.2.2.1. 1. Frage

Welcher dieser Abschnitte

„I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907)

„II. Elektrodynamischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 907-921)

war bei der Findung der Speziellen Relativitätstheorie von essentieller Bedeutung? Oder anders gefragt: In welchem dieser Kapitel liegt der Schlüssel, der in Einsteins Denken den Wendepunkt darstellte, um zur Speziellen Relativitätstheorie zu gelangen?

Da beide Teile in „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) vorkommen, können wir annehmen, dass das Studium beider Teile für Einstein wichtig waren. Aufgrund dieser Tatsache lässt sich die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie auf mindestens zwei recht unterschiedlichen Wegen rekonstruieren, wobei man den Schwerpunkt entweder auf die Reinterpretation der Mechanik legt, wodurch die Zusammenführung der Mechanik und der Elektrodynamik (in „I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907)) gelingen konnte; oder man mehr die Ansicht vertritt, dass gerade das intensive Studium zur Elektrodynamik und Strahlung („II. Elektrodynamischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 907-921)) zur Speziellen Relativitätstheorie führte.

Wir werden in dieser Arbeit die erste Ansicht vertreten⁷³, dass nämlich erst die Reinterpretation der Mechanik zu ihrer Zusammenführung mit der Elektrodynamik führte,

⁷³ Siehe dazu Abschnitt „4.4.2.3. Thema III: Die Lösung des Widerspruchs (durch die Neudefinition der Zeit) [26]-[39]“.

die Einstein schließlich zur Speziellen Relativitätstheorie brachte. Darin liegt nach unserer Ansicht die Essenz der SRT in „I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907) der Arbeit. Argumente dafür sind folgende:

- I.) Einstein sieht selbst die SRT als eine Zusammenführung der Mechanik mit der Elektrodynamik (CPAE 7; 31; p. 245).
- II.) Mehrmals verweist Einstein darauf, dass die Interpretation der Zeit bzw. der Gleichzeitigkeit das zentrale Element war, mithilfe dessen er alle Probleme lösen konnte. Die Gleichzeitigkeit wird im ersten Abschnitt („I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907)), genauer auf den Seiten (Einstein, 1905r, pp. 892-895) behandelt.
- III.) Um die Mechanik mit der Elektrodynamik zu verbinden, mussten einige (dogmatische) Konzepte, wie der „absolute Raum“ (Mechanik), die „absolute Zeit“ (Mechanik) und der „Äther“ (Elektrodynamik) aufgegeben werden. Die physikalisch-philosophischen bzw. erkenntnistheoretischen Untersuchungen zu Raum und Zeit finden sich ebenfalls im ersten Teil seiner Arbeit (Einstein, 1905r, pp. 895-905).
- IV.) Auch würde dadurch die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) besser verständlich werden: In der ART behält Einstein die aus dem kinematischen Teil errungenen Erkenntnisse grundsätzlich bei und erweitert diese unter dem Aspekt der gravitativen Wechselwirkung.)

Dass der „I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907) von Einsteins Arbeit die wichtigsten Punkte der SRT enthält, haben bereits andere Einstein-Forscher klar erkannt. An dieser Stelle sei abermals Silvio Bergias Artikel „Einstein und die Geburt der speziellen Relativität“ (Bergia, 1985) wiedergegeben, wo er im Abschnitt „Die Einsteinsche Revolution“ (Bergia, 1985, pp. 163-169) klar herausstreicht:

„Heute weiß natürlich jeder“, fährt Einstein fort, „daß alle Versuche, dies Paradoxon befriedigend aufzuklären, zum Scheitern verurteilt waren, solange das Axiom des absoluten Charakters der Zeit bzw. der Gleichzeitigkeit unerkannt im Unbewußten verankert war. Dies Axiom und sein Willkür klar erkennen bedeutet eigentlich schon die Lösung des Problems. Das kritische Denken, dessen es zur Auffindung dieses zentralen Punktes bedurfte, wurde bei mir entscheidend gefordert insbesondere durch die Lektüre von David Humes und Ernst Machs philosophischen Schriften.“ Zu diesem letzten Punkt sind zwei Bemerkungen angebracht. Als erstes muß die Bedeutung des Stadiums in den schöpferischen Momenten der Wissenschaft hervorgehoben werden, in dem die bloße Existenz eines Problems erkannt wird. Im vorliegenden Fall war es von äußerster Wichtigkeit, überhaupt zu erkennen, daß *die*

Frage nach dem Wesen der Zeit gestellt werden konnte. Erst danach wurde es möglich, die Willkür des Konzepts der absoluten Zeit zu erkennen. Kaum war die Natur des Problems klar, wurde eine Analyse der Raum-Zeit Begriffe, die den eventuell eingeschlichenen Vorurteilen Einhalt gebot, notwendig. In diesem Stadium ist eine operationale Analyse der Begriffe tatsächlich von eminenter Bedeutung. Wie Bridgman in *The Logic of Modern Physics* betont hat, ist diese Analyse an sich gar nicht so revolutionär. Die eigentliche Bedeutung liegt vielmehr in der Tatsache, daß niemand vor Einstein sie jemals konstruktiv durchgeführt hat. Das bringt uns zur zweiten Bemerkung. Wie Einstein selbst zugegeben hat, verdankt er Ernst Mach auch in dieser Hinsicht einiges. Gleichzeitig erleben wir jedoch Einsteins einmalige Fähigkeit, einen Schritt weiter zu gehen, den vom rein wissenschaftlichen Standpunkt aus wichtigsten Schritt überhaupt. So erscheint eine Anmerkung von Philipp Frank ganz besonders zutreffend: Er meinte, die Kritik der mechanistischen Philosophie habe ‚den Grund gepflügt, auf den Einstein den Samen werfen konnte.‘

Nachdem er die Relativität der Längen und Zeiten im 3. Abschnitt seiner Arbeit dargelegt hat, geht Einstein daran, die Transformationsgleichungen zwischen zwei Koordinatensystemen im Zustand der relativen gleichförmigen und geradlinigen Bewegung aufgrund der Hypothese der Gültigkeit der beiden Postulate der Theorie abzuleiten und kommt auf diese Weise unabhängig von Lorentz zu den gleichen formalen Schlüssen wie dieser. Wir brauchen uns jedoch nur der unterschiedlichen Grundlagen (und Methoden), von denen aus diese Ableitung jeweils erreicht wird, und der völlig unterschiedlichen Bedeutung, die sie in beiden Theorien hat, zu erinnern: Für Lorentz sind es Transformationsgleichungen, die die Gleichungen der Elektronentheorie kovariant machen; bei Einstein dagegen handelt es sich um Ausdrücke der allgemeinen Eigenschaften von Raum und Zeit.

In der Schrift Einsteins aus dem Jahre 1905 folgen dann zwei kurze kinematische Abschnitte. Im ersten wird eine ‚eigentümliche Konsequenz‘ der Lorentz-Transformationen erörtert, nämlich die beobachtbare Zeitverschiebung zwischen zwei synchrongehenden Uhren, die durch die Bewegung hervorgerufen wird, d. h. es geht um jene Erscheinung, die später als ‚Zwillings-Paradoxon‘ bekannt wurde. Im zweiten Abschnitt wird das Additionstheorem der Geschwindigkeiten abgeleitet. [...]“ (Bergia, 1985, pp. 166-167)

Es war für die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie daher besonders wichtig, dass Einstein physikalische Fragen nach dem Wesen der Zeit stellen konnte und somit die Vorstellung von absoluter Gleichzeitigkeit, absoluter Längen und absoluter Zeiten verneinen sollte. Mehrmals wird von ihm selbst und von anderen Autoren dabei erwähnt, dass in diesem Kontext Machs Kritik eine wichtige Rolle gespielt hat.

Nach unseren Ergebnissen könnte jedoch Machs Rolle für die Spezielle Relativitätstheorie größer gewesen sein, als in der Forschung allgemein bereits angenommen. Wenn nämlich den physikalisch-philosophischen bzw. erkenntnistheoretischen Untersuchungen in „I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907) eine hohe Bedeutung zukommt, dann gewinnen die Vorarbeiten von Cohn und somit wiederum jene von Mach mehr an Gewicht. In Bergias Artikel (Bergia, 1985) wird E. Cohn jedoch nicht ein einziges Mal erwähnt. Aber

nicht nur in Bergias Schrift, sondern in der gesamten deutschen Ausgabe (French, 1985) wird E. Cohn nur einmal erwähnt, nämlich nur kurz von Sexl (Sexl, 1985, p. 36).

Dagegen finden wir in Arthur I. Millers Buch *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation* (Miller, 1998) oft Hinweise auf Cohn – auf den Seiten (Miller, 1998, pp. 170-171) bespricht er beispielsweise dessen Elektrodynamik und erklärt:

„Einstein could well have been intrigued by Cohn's [(1900), (1902)] assertions on the superfluosity of an ether, as well as Cohn's Machian presuppositions. Had Einstein read Cohn's (1904a, b) he would have been struck by Cohn's epistemological analysis of Lorentz's space and time transformations of 1904, especially Cohn's suggestion of using ideal measuring rods and clocks for investigating the difference between Lorentz's ideal and real coordinates. In addition, critiques of Cohn by Lorentz, Wien and Gans (1905) may have underscored for Einstein the limits of an inductive approach toward theory construction.“
(Miller, 1998, p. 171)

Miller betont, dass Einstein von Cohns Arbeiten zur Elektrodynamik, die von Mach beeinflusst waren, in Bezug auf den Äther, den Raum und die Zeit hätte profitieren können. Jedoch spricht Miller im Konjunktiv. Wir haben oben mehrere Argumente angegeben, weshalb es sehr wahrscheinlich ist, dass Einstein tatsächlich dessen Arbeiten kannte – somit wäre Cohns (und indirekt Machs) Einfluss auf Einstein nicht nur möglich, sondern sehr wahrscheinlich. Dieser Punkt ist außerordentlich wichtig, da er das Verständnis der Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie grundsätzlich verändern könnte – denn Miller betont:

„From Lorentz's *Versuch* Einstein knew that the spatial coordinate x very likely required a transformation other than the Galilean one (recall Lorentz's use of two sets of transformations in 1895); from Einstein's own testimony in (1907e), he had realized that a version of the local time should be the physical time. Lorentz's plausibility argument in the *Versuch* for the hypothesis of contraction could have been useful to Einstein because it was based partly on the spatial transformation $x' = \gamma x_r$. But there was no such exact mathematical comparison for Einstein's time coordinate. Although Lorentz's (1904c) version of the local time was discussed in the scientific literature by Cohn (1904a) — see Chapter 3, footnote 42, there is no extant documentation that Einstein was aware of Cohn's (1904a) previous to writing the relativity paper.“ (Miller, 1998, p. 202)

Mit der Annahme, dass Einstein Cohns Arbeit kannte, wäre somit ein wichtiger Hinweis gegeben, wie Einstein zu seiner Neuinterpretation der Zeit kam, was ein Schlüsselmoment für die Entstehung der Speziellen Relativitätstheorie darstellt. Sogleich führt es uns zu unseren nächsten Fragestellungen...

2.2.2.2. 2. und 3. Frage

- Gibt es irgendein direktes Indiz, dass Einstein Cohns Arbeiten kannte und wertschätzte?
- Gibt es einen direkten Beweis, dass Cohn die Spezielle Relativitätstheorie von Einstein akzeptierte?

Diese zwei Fragen sind für unseren Kontext essentiell. Wie wir oben beschrieben haben, hat das gefälschte Vorwort E. Mach als einen Relativitätstheorie-Gegner dargestellt. Ob Cohn nun die Relativitätstheorie akzeptiert hat oder nicht, kann womöglich viel zur Aufklärung der Frage beitragen, ob die Relativitätstheorie von Einstein mit den Ansichten von Mach vereinbar ist oder nicht. Wir finden bei Miller nun mehrere Hinweise:

„In his (1907e) Einstein wrote that he thought highly of Cohn’s ‘competent works,’ [...]. Evidently by 1913 Cohn accepted the special relativity theory because Einstein’s (1915b) referred to Cohn’s (1913) as ‘an excellent presentation of the subject matter’ (i.e., special relativity theory); the unusually critical Pauli (1958) referred to Cohn’s (1913) book as a useful reference. See Hirose (1966) for a survey of Cohn’s electrodynamics.“

(Miller, 1998, p. 171)

Um Antworten auf unsere Fragen zu kommen, werden wir uns nun die Schrift „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) von Einstein und Cohns Buch *Physikalisches über Raum und Zeit* (1913) genauer ansehen – denn trotz Erwähnung geht Miller auf den Inhalt des Buches nicht mehr näher ein. In „THE OPTICS AND ELECTRODYNAMICS OF MOVING BODIES*“ (Janssen & Stachel, 2004) von Michel Janssen und John Stachel fehlt der Hinweis auf das oben genannte Buch von Cohn sogar gänzlich, obwohl sie seine Theorien in ihrem Artikel besprechen. Hier ist daher eine weitere Forschungslücke vorhanden.

3.) Kapitel: Von Mach über Cohn zur Einsteins SRT

3. 3. Hypothese: Von Mach, über Cohn zu Einsteins Spezieller Relativitätstheorie

Wie wir oben durch unsere Untersuchungen gezeigt haben, war Einsteins Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) höchstwahrscheinlich eine Antwort auf die wissenschaftliche Diskussion zwischen W. Wien, E. Cohn und M. Abraham. Umso wichtiger ist es zu wissen, ob diese Wissenschaftler die Spezielle Relativitätstheorie akzeptiert haben oder nicht.

Wien stand bereits früher mit Einstein in Kontakt und war zu dem ein Verfechter der Lorentzschen Theorie. So verwundert es kaum, dass es keine Dokumente gibt, die darauf hinweisen, dass Wien die Spezielle Relativitätstheorie später prinzipiell ablehnte – im Gegenteil: Wien hat Einstein sogar selbst für den Nobelpreis vorgeschlagen.⁷⁴

Von Max Abraham ist jedoch bekannt, dass er bis zum Schluss an seiner eigenen Theorie festhielt und die Relativitätstheorie nicht akzeptierte – Unterstützung fand er dabei vor allem vom Experimentalphysiker Walter Kaufmann; siehe (Miller, 1998, pp. xxx, 214-221, 233 usw.).

Für unsere Arbeit ist jedoch zentral, ob Emil Cohn die Relativitätstheorie akzeptierte oder nicht. Da Machs Gedanken einen starken Einfluss auf Cohn hatten, ist zuvor jedoch die folgende Frage zu klären: Wie stand eigentlich E. Mach zur Relativitätstheorie?

⁷⁴ An dieser Stelle sei kurz darauf hingewiesen, dass Wien mit einigen Methoden von Einstein, wie der Verwendung von Gedankenexperimenten usw., nicht ganz einverstanden war – siehe beispielsweise (CPAE 7; _ ; p. 113).

3.1. E. Machs publizierte Äußerungen zu Einsteins Relativitätstheorie

Nach dem gefälschten Vorwort im Buch *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921), welches im Namen von E. Mach nach seinem Tod publiziert wurde, bestand in der Mach-Einstein-Forschung ein Konsens, dass Mach die Relativitätstheorie abgelehnt hatte.

Die Aufdeckung der Fälschung des Vorworts ist Gereon Wolters zu verdanken, wie Dieter Hoffmann in der „Ernst Mach Studienausgabe“ der *Die Prinzipien der physikalischen Optik* von Mach erläutert (Hoffmann, 2020, pp. XI, XVII-XVIII). Ebenso war es Wolters, der klarstellte, was E. Mach tatsächlich über die Relativitätstheorie publizierte (Wolters, 1987, pp. 167-171), sagte und dachte (Wolters, 1987, pp. 172-202). An dieser Stelle werden allgemein die Ansichten von Mach kurz erläutert, um dem Leser einen Überblick zu verschaffen:

Ernst Mach war ein strenger Kritiker des mechanischen Weltbildes, jedoch hatte er methodologisch keine Einwände gegen das elektromagnetische Weltbild (Wolters, 1987, pp. 31-35, 168). Ebenso war es nicht seine Intention, der die Wissenschaft lediglich die Aufgabe zuzuschreiben, die Erfahrungen in eine funktionale Beziehung zu setzen, wie es von Planck interpretiert wurde (Wolters, 1987, p. 112). (Diese Meinung von Planck über Mach hat Einstein später übernommen.) Wissenschaft war für Mach vor allem orientierungsgebend und von praktischer Bedeutung – sie brauche keine metaphysischen Bedürfnisse zu erfüllen (Wolters, 1987, pp. 116-117), sondern die Erfahrung im Sinne der Denkökonomie so einfach wie möglich zu strukturieren und wiederzugeben.

Doch stellte die Relativitätstheorie Einsteins für Mach einen solchen theoretischen Fortschritt in der Physik dar? Dazu müssen wir uns genauer ansehen, was Mach zu Lebzeiten dazu publizierte – denn dies war seine Ansicht, die er offenbar der wissenschaftlichen Gesellschaft mitteilen wollte. Er hat sich in drei seiner Publikationen zur Relativitätstheorie geäußert:

3.1.1. (I) Machs erste Äußerung in: *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit* (1909)

Die erste publizierte Erwähnung der Relativitätstheorie bei Mach finden wir in der zweiten Auflage seines Buches *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*

(Mach, 1909). Doch bevor wir jene Stelle zitieren, wollen wir uns kurz die Entstehungsgeschichte jenes Buches (Mach, 1909) genauer ansehen.

Die erste Ausgabe (von *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*) erscheint im Jahre 1872 (Mach, 1872) – der Inhalt geht auf einen gleichnamigen Vortrag von ihm zurück, den er in Prag im Jahre 1871 gehalten hat. Dieses Buch ist überaus bedeutend, wie Res Jost⁷⁵ erklärt:

„Überhaupt enthält das Buch die Keimzellen der späteren Hauptwerke, etwa die wunderbar lebendig geschriebene Diskussion über das Trägheitsgesetz von Newton als Vorstufe dessen, was man heute vage das Machsche Prinzip nennt, die Kritik an Archimedes' Beweis des Hebelgesetzes, vieles über Wärmelehre und besonders aber die Überzeugung, dass die Grundlage der Naturwissenschaft die Gedanken-Ökonomie sei, dass eine ökonomische *Beschreibung* der physikalischen Vorgänge durch einfache Naturgesetze erstrebenswert und notwendig, eine *Naturerklärung* aber unmöglich sei.“ (Jost, 1995, p. 59)

Aufgrund seines Postulats der erwähnten Gedanken-Ökonomie wurde Mach zu einem Gegner der Metaphysik – dabei versucht er der Empirie bzw. der Erfahrung den Vorrang zu geben: „Metaphysisch pflegen wir diejenigen Begriffe zu nennen, von welchen wir vergessen haben, wie wir dazu gelangt sind.“ (Mach, 1872, p. 2), erläutert er. Es gilt ihm zufolge demnach stets wachsam zu bleiben und die physikalische Definition stets in Frage zu stellen, zu kritisieren und neu zu definieren. Ein Paradebeispiel für solch eine Definition finden wir dort ebenso – in der Fußnote 2, erklärt er, dass sein Artikel über die Definition der Masse in den *Annalen* nicht veröffentlicht wurde:

„2) Ich darf vielleicht bei dieser Gelegenheit erwähnen, daß ich versucht habe, mich mit Hilfe des Princip's vom ausgeschlossenen perpetuum mobile über den Begriff der Masse zu orientieren. Meine darauf bezügliche Notiz wurde von Herrn *Poggendorff*, nachdem sie etwa ein Jahr bei ihm gelegen hatte, als unbrauchbar zurückgesendet und erschien später in Carl's Repertorium im 4. Band. Diese Zurückweisung ist auch der Grund, warum ich meine Untersuchungen über das Trägheitsgesetz nicht publiziert habe. Wenn ich mit einer so einfachen und klaren Sache schon anstieß, was hatte ich erst in einer schwierigeren Frage zu erwarten.

Die *Annalen* enthalten oft bogenlange Fehlschlussreihen über das *Torricelli'sche* Theorem und die Morgenröthe, freilich in der ‚Sprache der Physik‘ geschrieben. Es würde aber die *Annalen* offenbar sehr in der Achtung des Publicums herabsetzen, wenn sie einmal eine kurze Notiz enthielten, die nur etwas vom Jargon abweicht.

Ich setze die betreffende Notiz vollständig hieher.“ (Mach, 1872, p. 50)

⁷⁵ An dieser Stelle sei erwähnt, dass CPAE 5 ihm gewidmet wurde.

Durch einen operationalen Zugang gelang es ihm zum ersten Mal, die Definition der Masse⁷⁶ als einen (relationalen) Messwert anzugeben – mehr dazu ist in *Die Mechanik in ihrer Entwicklung* zu finden (Mach, 2012, pp. 223-224, 249). Seinen Leitgedanken dazu fasste er dort mit den Worten zusammen:

„Meine Definition entspringt dem Streben, die *Abhängigkeit der Erscheinungen voneinander* zu ermitteln und alle metaphysische Unklarheit zu beseitigen, ohne darum weniger zu leisten als irgendeine andere bisher übliche Definition.“ (Mach, 2012, p. 246)

Heutzutage erscheinen uns seine Überlegungen allzu selbstverständlich und wir finden sie in Lehrbüchern für Physikstudenten wieder (z.B.: bei (Tipler & Mosca, 2012, p. 105) oder (Fließbach, 2007, pp. 10-11)) usw. Dass sie von Mach stammen und welche Schwierigkeiten ihm dabei im Wege standen, sei an dieser Stelle deshalb kurz erinnert.

Eine Postulierung der Masse, wie die Definition von Newton es tat, war nach seiner Ansicht daher nicht mehr notwendig (Mach, 2012, pp. 221-223, 248-249, 276-277). In seinen Erläuterungen wird das Verständnis für Materie relativiert (Mach, 2012, p. 223) und in diesem Zusammenhang auch die Masse und die Trägheit.

Dass Johann Christian Poggendorff, der damals die *Annalen* herausgab, die Schrift „Ueber die Definition der Masse“ abgelehnt hat, dürfte für Mach ziemlich bitter gewesen sein. Für Mach muss Plancks Angriff – wo Planck E. Mach vorwarf, dass seine Gedanken in der neueren Physik nicht gefruchtet haben – nun womöglich wie ein Déjàvu gewesen sein. Max Planck war nämlich bereits seit 1895 für die *Annalen* tätig und seit 1906 gemeinsam mit Wilhelm Wien der Herausgeber – siehe dazu (Hoffmann, 2010, pp. 13-14)). Mach musste daher wieder um eine Anerkennung seiner Ansicht kämpfen. So schreibt er im Vorwort der zweiten Auflage des Werks *Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit* (1909), die er aufgrund von Planck herausbrachte:

„Daß die vor 37 Jahren erschienene, seit 12 Jahren vergriffene Schrift hier mit ihren Mängeln in einem unveränderten Abdruck erscheint, um sie den wiederholt danach Fragenden doch bieten zu können, wird man wohl begründet finden. Sanguinische Hoffnungen in bezug auf den Erfolg der Schrift konnte ich von vornherein nicht hegen. Hatte doch schon mehrere Jahre vorher meiner kurzen Ausführung über die Definition der Masse, die jetzt wohl allgemein angenommen ist, der alte Herr Poggendorff⁷⁷ die Aufnahme in die

⁷⁶ Das Konzept der Definition der Masse von Mach hat Einstein stark beeinflusst – siehe dazu (CPAE 3; 1; p. 11) (CPAE 4; 1; p. 9 und 102, fn. 2).

⁷⁷ Poggendorff lebte 1769-1877 und war somit bereits verstorben.

Annalen verweigert. Als M. Planck 15 Jahre nach mir über die ‚Erhaltung der Energie‘ schrieb, hatte er nur eine abweisende Bemerkung gegen meiner Einzelausführungen vorzubringen, ohne welche man hätte annehmen müssen, daß er meine Schrift gar nicht gesehen hat.“
(Mach, 1909, p. 1*)

In diesem Buch finden wir daher Machs erste Stellungnahme auf Plancks Angriff. Es ist schwer zu sagen, ob Mach das („hatte er nur eine abweisende Bemerkung gegen meiner Einzelausführungen vorzubringen, ohne welche man hätte annehmen müssen, daß er meine Schrift gar nicht gesehen hat“) wortwörtlich meint, oder eher sarkastisch – siehe dazu (Jost, 1995, p. 63). Interessant ist, dass Mach den Titel von Plancks Arbeit nicht richtig wiedergibt. So gelten auch die nächsten und vor allem die letzten Sätze in Richtung Planck, wo Mach seine Erwiderung ankündigt:

„Ich kann [...] durchaus nicht die Besorgnis teilen, welche aus Äußerungen, wie jenen M. Plancks (Die Einheit des physikalischen Weltbildes. Leipzig 1909, S. 31-38) hervorzugehen scheint, daß die orthodoxe Physik eine kräftig abwehrende Verteidigungsrede nötig hat. Vielmehr befürchte ich, daß mit und ohne solche Reden die einfachen, natürlichen, ja unvermeidlichen Überlegungen, die ich angeregt habe, spät, recht spät zu ihrem Recht gelangen werden. [...] Der Unter Leitung einer Arbeitshypothese denkende Physiker rektifiziert seine Begriffe meist genügend durch genaue Vergleichung der Theorie mit der Beobachtung, und hat wenig Anlaß, sich um Erkenntnispsychologie zu kümmern. Wer aber eine Erkenntnistheorie kritisieren oder gar andere über diese belehren will, muß sie doch kennen und durchdacht haben. Dies kann ich meinem physikalischen Kritiker nicht zugestehn, wie ich nötigenfalls am geeigneten Orte ohne Schwierigkeiten zeigen werde.
Wien, Mai 1909. E. Mach.“
(Mach, 1909, p. iv)

In diesem Zusammenhang stehen auch seine Bemerkungen in der zweiten Auflage des Buches *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit* (Mach, 1909). Er weist unter anderem hin, dass er in seiner *Mechanik* das Trägheitsgesetz noch behandelt hat und verweist auf J. Petzoldts Arbeit „Die Geschichte der absoluten und relativen Bewegung“. ⁷⁸ Zudem erklärt er, dass er bereits in diesem Buch auf das *Prinzip der*

⁷⁸ Nach Ernst Machs Tod schrieb Joseph Petzoldt das pro-relativistische Vorwort für die achte Auflage von Machs *Mechanik* – siehe (Mach, 2012, p. 548):

„Die ‚Mechanik‘ hat aber nicht nur – in ihrem ganzen Umfang – klassische Bedeutung, sondern auch – in dem Abschnitt über Newton – höchst aktuelle. Dieser enthält die erste Relativitätstheorie und ist die Quelle der gegenwärtigen.“ (Mach, 2012, p. 550)

In einem eigenen Anhang mit dem Titel „Das Verhältnis der Machschen Gedankenwelt zur Relativitätstheorie“ (Mach, 2012, pp. 551-580) ist Petzoldt detailliert aufs Machs wegweisenden Gedanken zur Relativitätstheorie eingegangen.

Relativität losgesteuert ist, und verweist auf Minkowskis Arbeit über *Raum und Zeit*, was seine Interesse an der speziellen Relativitätstheorie bekundet:

„Bemerkungen zum zweiten Abdruck 1909.

[...]

Zu S. 10. u. 47. Die Frage des Trägheitssatzes wurde noch ausführlich behandelt in des Verfassers ‚Mechanik‘ 1883, wo die ganze Literatur des Gegenstandes berücksichtigt ist. Die letzte mir bekannte wichtige Arbeit ist J. Petzoldt, ‚Die Geschichte der absoluten und relativen Bewegung‘ (Ostwalds Annalen der Naturphilosophie VII, S. 29.)

[...]

Zu S. 31 u. 55. Das Prinzip der Denkökonomie ist in meinen späteren Schriften im einzelnen durchgeführt.

Zu S. 32. Den Gedanken, daß die Grundlage der Physik auch eine thermische oder elektrische sein könnte, habe ich noch wiederholt in ‚Mechanik‘ und ‚Analyse der Empfindungen‘ ausgesprochen. Er scheint sich zu verwirklichen.

Zu S. 34-37 u. 56-57. Raum und Zeit werden nicht als selbstständige Wesen, sondern als Formen der Abhängigkeit der Phänomene voneinander aufgefaßt. Ich steuere also auf das *Prinzip der Relativität* los, welches auch in ‚Mechanik‘ und ‚Wärmelehre‘ festgehalten wird. Vgl. ‚Zeit und Raum physikalisch betrachtet‘ in ‚Erkenntnis und Irrtum‘ 1905. Vgl. H. Minkowski ‚Raum und Zeit‘ 1909.

[...]

Zu S. 57-58. Die allgemeine Anmerkung deutet auf den sensualistischen Standpunkt hin, welchen ich durch sinnes-physiologische Studien erlangt habe. Weitere Ausführungen in ‚Bewegungsempfindungen‘ 1875, ‚Analyse der Empfindungen‘ und in ‚Erkenntnis und Irrtum‘. Dasselbst ist auch deutlich gezeigt, daß die ängstlichen, subjektivistischen Besorgnisse, welche manche Physiker für die Physik der Marsmenschen (!!) hegen, ganz hinfällig sind.“⁷⁹

(Mach 1909, p. 59-60)

Seine Anmerkung über die „ängstlichen, subjektivistischen Besorgnisse, welche manche Physiker für die Physik der Marsmenschen (!!) hegen“ ist natürlich in Richtung Plancks gerichtet. Und die Zeilen:

„Raum und Zeit werden nicht als selbstständige Wesen, sondern als Formen der Abhängigkeit der Phänomene voneinander aufgefaßt. Ich steuere also auf das *Prinzip der Relativität* los, welches auch in ‚Mechanik‘ und ‚Wärmelehre‘ festgehalten wird. Vgl. ‚Raum und Zeit physikalisch betrachtet‘ in ‚Erkenntnis und Irrtum‘ 1905. Vgl. H. Minkowski ‚Raum und Zeit‘ 1909.“ (Mach, 1909, pp. 59-60)

zeigen deutlich, dass er auf die Spezielle Relativitätstheorie verweist, und zwar sowohl auf das „Prinzip der Relativität“ als auch auf die Arbeit „Raum und Zeit“ von Minkowski. Somit

⁷⁹ „Am 9. Dezember 1908 stand Planck vor den Leidener Studenten und legte ihnen *seine* Wissenschaftsphilosophie vor, die sich weit ins Romantische von der Machschen biederer ökonomischen Betrachtung abhob. Die Physik wird jetzt im Prinzip aus aller menschlichen Tätigkeit herausgehoben in eine Angelegenheit ‘überhaupt aller in unserer Natur vorhandenen Intelligenzen, z.B. auch der Marsbewohner’.“ (Jost 1995, p. 63)

unterstützt er den Forschungsstand nicht nur, sondern sieht sich selbst als einen Wegbereiter. Dass er hierbei Einstein nicht erwähnt, überrascht womöglich ein wenig – doch dass Mach dabei an Einsteins Theorie denkt, zeigt seine Korrespondenz. Bevor er ihn persönlich kontaktiert, schreibt er in diesem Zusammenhang zuvor (am 26. Juli, 1909) einen Brief an Friedrich Adler:

„Sie erhalten diese Tage einen neuen unveränderten Abdruck von „Erhaltung d Arbeit“. Die Sache mit Planck ist mir doch zu dumm geworden. Ich habe ihm im Vorwort nur gesagt, dass man doch wenigstens kennen muss, was man zur Belehrung anderer kritisieren will. Vielleicht findet er, dass meine Ansichten von 1872 etwas moderner sind, als er sich vorgestellt hat.
Ist Einstein noch in Bern? Ich möchte ihm auch ein Exemplar senden.“

(Blackmore & Hentschel, 1985, p. 58)

Dieser Brief von Mach zeigt ganz klar, weshalb er mit Einstein in Kontakt treten wollte: Aufgrund des Angriffs von Planck versuchte er aufzuzeigen, dass seine früheren Ideen sich in der modernen Physik als fruchtbar erwiesen haben. Doch warum kontaktiert er gerade Friedrich Adler? F. Adler war ein sehr guter Studienkollege von Einstein aus seiner Zeit in Zürich. Der Brief von Mach an Einstein existiert leider nicht mehr. Doch die Briefe von Einstein an Mach sind noch erhalten. Sehen wir uns nun das erste Schreiben von Einstein an Mach (9.9.1909) etwas genauer an:

„Hoch geehrter Herr Professor!

Ich danke Ihnen bestens für den mir übersandten Vortrag über das Gesetz von der Erhaltung der Arbeit, den ich bereits mit Sorgfalt durchgelesen habe. Im übrigen kenne ich natürlich Ihre Hauptwerke recht gut, von denen ich dasjenige über die Mechanik am meisten bewundere. Sie haben auf die erkenntnistheoretischen Auffassungen der jüngeren Physiker-Generation einen solchen Einfluß gehabt, daß sogar Ihre heutigen Gegner wie z. B. Herr Planck, von einem der Physiker, wie sie vor einigen Jahrzehnten im Ganzen waren, ohne Zweifel für ‚Machianer‘ erklärt würden.

Weil ich nicht weiß, wie ich mich Ihnen sonst dankbar zeigen soll, schicke ich Ihnen einige meiner Abhandlungen. Besonders möchte ich Sie bitten, sich das über die Brown'sche Bewegung kurz anzusehen, weil hier eine Bewegung vorliegt, die man als ‚Wärmebewegung‘ deuten zu müssen glaubt.

Mit aller Hochachtung Ihr ganz ergebener

A. Einstein.“

(CPAE 5; 174; p. 204) (Wolters, 1987, p. 149)

Wir möchten an dieser Stelle sogleich gänzlich die Analyse von Wolters wiedergeben:

„Aus diesem Brief ist folgendes ersichtlich: (1) Es ist *Mach* gewesen, der den Kontakt mit Einstein durch Zusendung von EA. aufgenommen hat. (2) Einstein nimmt Mach gegen Plancks Einwände in Schutz. (3) Einstein betont Machs erkenntnistheoretischen Einfluß auf die jungen Physiker. (4) Einstein versucht, ‚wenn auch mit einer auffallend vorsichtigen Interpretation‘ (Herneck (1966), 6), Mach die kinetische Theorie nahezubringen.“

(Wolters, 1987, pp. 149-150)

Ad 1 und 2): Mach nimmt mit Einstein Kontakt auf, weil er ihm seine Arbeit *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes der Erhaltung der Arbeit* sendet und diese ist in ihrer Neuerscheinung zugleich als eine Antwort auf Planck zu verstehen.

Die Briefe zeigen insgesamt ganz klar, weshalb Mach mit Einstein in Kontakt treten wollte: Aufgrund des Angriffs von Planck versuchte Mach verständlich zu machen, dass seine früheren Ideen in der modernen Physik sich als fruchtbar erwiesen haben. Einstein versichert im Brief, dass Mach auf die jüngere Physiker-Generation erkenntnistheoretisch einen Einfluss hatte und dass sogar seine Gegner, wie Planck, früher Machianer waren.

3.1.2. (II) Machs zweite Äußerung in „Die Leitgedanken meiner naturwissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen“ (1910)

Aufgrund der ersten Äußerung zur SRT wird ersichtlich, wo Mach erneut auf Einsteins Arbeiten hinweisen wird: Bei seiner Verteidigung („Die Leitgedanken meiner naturwissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen“) gegenüber Plancks Schrift. Dort heißt es:

„[...] Würde das kinetische physikalische Weltbild, welches ich allerdings für hypothetisch halte, ohne es deshalb degradieren zu wollen, auch *alle* physikalischen Erscheinungen ‚erklären‘, so würde ich die Mannigfaltigkeit der Welt hiermit nicht für erschöpft halten, denn für mich sind eben *Materie, Zeit und Raum* auch noch *Probleme*, welchen übrigens die Physiker (Lorentz, Einstein, Minkowski) allmählich auch näher rücken. [...]“

(Mach, 1910a, p. 605)

Erkennbar ist, dass Mach die Fortschritte in der Physik, die von Lorentz, Einstein und Minkowski geleistet wurden, unmissverständlich würdigt.

3.1.3. (III) Machs dritte Äußerung in „Sinnliche Elemente und naturwissenschaftliche Begriffe“ (1910)

In seinem Artikel „Sinnliche Elemente und naturwissenschaftliche Begriffe“ (Mach, 1910b) erklärt Mach, wie wir Elemente nach seiner Ansicht räumlich und zeitlich bestimmen (Mach, 1910b, pp. 264-265) können und fügt in einer Fußnote hinzu:

„[...] Die ursprüngliche Raumauffassung des Menschen ist durch den Organismus der Sinne gegeben. Zur Geometrie führen gemeinschaftliche idealisierte metrische Erfahrungen der Menschen. [...]

Ähnlich wird man zwischen dem metrischen und dem physikalischen (die Zeit mit enthaltendem) Raum zu unterscheiden haben, wie dies schon in meiner Schrift ‚Erhaltung der Arbeit‘ 1872, S. 35, 56 angedeutet, in ‚Erkenntnis und Irrtum‘ 1906, S. 434 ff. teilweise ausgeführt worden ist, in welcher Richtung durch die Arbeiten von A. *Einstein* und H. *Minkowski* wesentliche Fortschritte begründet worden sind.“ (Mach, 1910b, pp. 264, fn. 1)

Interessanterweise wird hier nun nicht mehr auf Lorentz hingewiesen. Bei dieser dritten Äußerung wird klar, dass er den Fortschritt (zu Raum und Zeit) tatsächlich in Einsteins Spezieller Relativitätstheorie sieht. Ähnlich wie Einstein und Minkowski scheint auch Mach davon ausgegangen zu sein, dass man Raum und Zeit nicht getrennt, sondern stets gemeinsam betrachten sollte.

Nach seiner Analyse der drei publizierten Beiträge von Mach, schließt Wolters daher zurecht mit den Worten:

„Machs publizierte Äußerungen zur Relativitätstheorie zeigen somit das Bestreben, seinen Namen mit einer in seinen Augen fortschrittlichen Theorie in historische Verbindung zu bringen, was bis dahin noch nicht geschehen war. Daß dieser Hinweis nur sehr cursorisch erfolgen konnte, ist klar, da der 72jährige das mathematische Rüstzeug für ein detailliertes Verständnis der Theorie und wohl auch die nötigen Detailkenntnisse aus Elektrodynamik und Elektronentheorie nicht besaß. Selbst wenn er sie besessen hätte und wenn er die Kraft gehabt hätte, die weitläufigen Diskussionen zu verfolgen, wäre ihm wegen seiner vielfältigen anderen Aktivitäten (cf. die Bibliographie in Thiele (1963)) in diesen Jahren und insbesondere wegen seiner vielen Erkrankungen wohl kaum die Zeit dazu geblieben (cf. dazu § 36, 277 ff.).

Außer diesen drei kurzen Äußerungen aus den Jahren 1909/1910 hat Mach zur Relativitätstheorie nichts publiziert.“ (Wolters, 1987, pp. 168-170)

Da wir nun wissen, dass Mach sich stets positiv (in seinen Publikationen) zur Speziellen Relativitätstheorie geäußert hat, ergeben sich folgende Fragestellungen: Hat Cohn, der von Ernst Mach stark beeinflusst wurde, die Spezielle Relativitätstheorie je akzeptiert? Aber auch die Frage, ob Einstein die Arbeiten von Cohn tatsächlich kannte?

3.2. Entstehungsgeschichte der SRT: Einstein erwähnt Cohn

Wie oben beschrieben, hatte Emil Cohn auf Einstein womöglich einen starken Einfluss, da Einsteins Arbeit als eine Antwort auf Wiens und Cohns Schrift betrachtet werden kann – allein der Titel als auch die erste Seite von Einsteins Arbeit deuten darauf hin. Da Cohn in seiner Darstellung der Elektrodynamik auf das Konzept des Äthers verzichtet, kann er diesbezüglich als Wegbereiter der Speziellen Relativitätstheorie angesehen werden. Die Frage, die wir nun zu beantworten haben, lautet: Gibt es einen Hinweis darauf, dass Einstein Cohns Arbeit tatsächlich kannte? Da Erstgenannter in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) auf gar keine Quellen eingeht, kommen dafür nur seine Schriften erst nach 1905 in Betracht.

Hier könnte die Arbeit „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) von Einstein wegweisend werden, welche zugleich die erste die detaillierte Zusammenfassung Einsteins zur SRT darstellt und auch einen Einblick in die Entstehungsgeschichte gewährt. Es ist interessant, dass genau dieser Artikel (Einstein, 1907j) in einer Karte (17.8.1909) von Einstein an Mach erwähnt wird:

„Hoch geehrter Herr Professor!

Ihr freundlicher Brief hat mich ungemein gefreut und nicht minder die Abhandlung. [...]. Ich bewundere Ihre grosse Energie. [...] Es freut mich sehr, dass Sie Vergnügen an der Relativitätstheorie haben. Leider habe ich keine Exemplare mehr von der zusammenfassenden Arbeit, die ich im Jahrbuch für Radioaktivität & Elektronik darüber publiziert habe.

Indem ich Ihnen nochmals herzlich danke für Ihren freundlichen Brief verbleibe ich Ihr Sie verehrender Schüler

A. Einstein.⁸⁰
(CPAE 5; 175; p. 205)

Aus dieser Korrespondenz geht deutlich hervor, dass Mach offensichtlich „Vergnügen an der Relativitätstheorie“ hatte und Einstein um eine zusammenfassende Arbeit darüber bat. Einstein erläutert, dass er „leider“ keine Exemplare der Schrift „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j), welche im „Jahrbuch für Radioaktivität & Elektronik“ (1907) erschien, mehr hatte – das ist auch verständlich, da seit der Publikation bereits zwei Jahre vergangen waren. Ernst Mach erkannte den wichtigen Hinweis von Einstein und notierte sich die Arbeit in seinem Notizbuch (CPAE 5; 175; p. 205, fn. 5).

⁸⁰ Siehe zur Analyse der Karte auch (Wolters, 1987, p. 150).

In seiner Einschätzung, dass diese Arbeit (Einstein, 1907j) für Mach interessant sein könnte, dürfte Einstein richtig gelegen sein. Denn in diesem Artikel (Einstein, 1907j) wird die wichtige Rolle des Dopplerschen Prinzips und der Aberration hervorgehoben: Anders als in Einsteins ursprünglicher Arbeit zur „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) wird nun der Doppler-Effekt und die Aberration nicht mehr im Gebiet der Elektrodynamik behandelt, sondern im kinematischen Teil (Cassini & Levinas, 2019, p. 63), wie Einstein selber erklärt:

„In dem ersten Abschnitt, in dem ausschließlich die kinematischen Grundlagen der Theorie angewendet worden sind, habe ich auch einige optische Probleme (*Dopplersches* Prinzip, Aberration, Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper) behandelt; auf die Möglichkeit einer derartigen Behandlungsweise wurde ich durch eine mündliche Mitteilung und eine Arbeit (Ann. d. Phys. 23, 989, 1907) von Herrn M. Laue, und durch eine (allerdings korrekturbedürftige) Arbeit von Herrn J. Laub (Ann. d. Phys. 32, 1907) aufmerksam.“
(Einstein, 1907j, pp. 413-414) / (CPAE 2; 47; p. 435-436)⁸¹

Einsteins Überzeugung von Max von Laues Arbeit lag womöglich auch daran, weil Einstein bei seiner Forschung, die zur Speziellen Relativitätstheorie geführt hat, mit dem Doppler-Effekt und der Aberration sich lange beschäftigt hatte. Dass man die SRT nun auf diesem Wege aufbaut scheint ihn daher nicht zu stören – im Gegenteil: offensichtlich hat er diese Darstellung favorisiert, sonst hätte er mit den Jahren nicht zunehmend auf das Experiment von Fizeau hingewiesen.

Schauen wir uns nun die Vorgeschichte der Arbeit „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) etwas genauer an. Physiker Johannes Stark – der später (1919) den Nobelpreis für Physik bekommen hat und leider auch zu einem starken Anhänger der nationalsozialistischen Deutschen Physik wurde – bittet Einstein einen Beitrag zur Relativitätstheorie zu schreiben – worauf Einstein (am 25.9.1907) antwortet:

„Ich bin gerne bereit, den von Ihnen gewünschten Bericht für das Jahrbuch zu liefern, und bitte Sie nur um die freundl. Mitteilung, wann Sie denselben ungefähr zu erhalten wünschen. Auch muss ich bemerken, dass ich leider nicht in der Lage bin, mich über alles in der Sache Erschienene zu orientieren, weil in meiner freien Zeit die Bibliothek geschlossen ist. Ausser meinen eigenen Arbeiten ist mir eine Arbeit von H. A. Lorentz (1904), eine von E. Kohn⁸², eine von Mosengeil sowie zwei von Planck bekannt. Andere die Sache betreffende theoretische Arbeiten sind mir nicht bekannt geworden.“ (CPAE 5; 58; p. 74)

⁸¹ Interessant ist, dass Einstein auf der vorherigen Seite auf das Experiment von Michelson und Morley (1887) aufmerksam macht (Einstein, 1907j, pp. 412-413, 416), was er in seiner Originalarbeit (Einstein, 1905r) nicht tut.

⁸² Gemeint ist Emil Cohn.

Welche Gedanken Einstein zu dieser Arbeit motivierten, wird aus einem weiteren Brief (am 1.11.1907) von Einstein an Stark klar:

„Ich habe die Arbeit so angelegt, dass sich an Hand derselben jeder relativ leicht in die Relativitätstheorie und deren bisherige Anwendungen einführen kann. An die Klarlegung der benutzten Annahmen habe ich viel Sorgfalt verwendet, indem ich – soweit es anging – jene Annahmen einzeln einführte und der Reihe nach ihre Konsequenzen verfolgte. Auch habe ich mehr Gewicht gelegt auf Anschaulichkeit und Einfachheit der mathematischen Entwicklungen, als auf Einheitlichkeit der Darstellung, indem ich hoffte, dass die Arbeit so anregender wirke.“ (CPAE 5; 63; p. 77-78)

Es war Einstein somit wichtig „die Klarlegung der benutzten Annahmen“ mit „viel Sorgfalt“ dem Leser näher zu bringen, wobei er „mehr Gewicht [...] auf Anschaulichkeit und Einfachheit der mathematischen Entwicklungen“ „gelegt“ hat. In dieser Schrift geht Einstein ebenfalls mehr auf die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie ein, die man daher auch als eine historisch-kritische Darstellung ansehen kann, wie man sie von Machs Schriften gewöhnt ist. Den Wendepunkt, der zur Speziellen Relativitätstheorie geführt hat, erläutert Einstein folgendermaßen:

„Es bedurfte nur der Erkenntnis, daß man eine von *H. A. Lorentz* eingeführte Hilfsgröße, welche er ‚Ortszeit‘⁸³ nannte, als ‚Zeit‘ schlechthin definieren kann. Hält man an der angedeuteten Definition der Zeit fest, so entsprechen die Grundgleichungen der *Lorentz*schen Theorie dem Relativitätsprinzip, wenn man nur die obigen Transformationsgleichungen durch solche ersetzt, welche dem neuen Zeitbegriff entsprechen. Die Hypothese von *H. A. Lorentz* und *Fitzgerald* erscheint dann als eine zwingende Konsequenz der Theorie. Nur die Vorstellung eines Lichtäthers als des Trägers der elektrischen und magnetischen Kräfte paßt nicht in die hier dargelegte Theorie hinein; elektromagnetische Felder erscheinen nämlich hier nicht als Zustände irgendeiner Materie, sondern als selbständig existierende Dinge, die der ponderablen Materie gleichartig sind und mit ihr das Merkmal der Trägheit gemeinsam haben.

Im folgenden ist nun der Versuch gemacht, die Arbeiten zu einem Ganzen zusammenzufassen, welche bisher aus der Vereinigung von *H. A. Lorentz*scher Theorie und Relativitätsprinzip hervorgegangen sind.

In den ersten beiden Teilen der Arbeit sind die kinematischen Grundlagen sowie deren Anwendung auf die Grundgleichungen der *Maxwell – Lorentz*schen Theorie behandelt; dabei hielt ich mich an Arbeiten⁸⁴ von *H. A. Lorentz* (Versl. Kon. Akad. v. Wet., Amsterdam 1904) und *A. Einstein* (Ann. d. Phys. 16, 1905).

In dem ersten Abschnitt, in dem ausschließlich die kinematischen Grundlagen der Theorie angewendet worden sind, habe ich auch einige optische Probleme (Dopplersches Prinzip, Aberration, Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper) behandelt; [...]“

(Einstein, 1907j, pp. 413-414) (CPAE 2; 47; p. 435-436)

⁸³ Für eine kurze Einführung in Lorentz „Ortszeit“ siehe (Bergia, 1985, p. 158).

⁸⁴ In einer Fußnote schreibt er an dieser Stelle: „Es kommen auch noch die einschlägigen Arbeiten von *E. Cohn* in Betracht, von welchen ich aber hier keinen Gebrauch gemacht habe.“ (CPAE 2; 47; p. 435, fn. 1)

Wie bereits oben erläutert, war es für Einstein das Verständnis des Dopplerschen Prinzips und die Aberration wohl von besonderer Wichtigkeit. Interessant ist, dass er bei Anwendungen der Grundgleichungen in einer Fußnote auf die Arbeiten von Cohn hinweist, genauer: auf die „die einschlägigen Arbeiten von E. Cohn“ (CPAE 2; 47; p. 435, fn. 1). Einstein betrachtet dessen Arbeiten hierzu also mindestens zugehörig und kennt sie. Welche genau gibt er zwar nicht an – doch nach dem oben erläuterten, dürften damit zumindest Cohns Arbeiten „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“ (Cohn, 1904a) und „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme. II.“ (Cohn, 1904b) gemeint sein. *The Collected Papers of Einstein* fügt eine Fußnote zu der genannten Fußnote als Erläuterung hinzu:

„See Cohn 1900, 1902, 1904a, 1904b. A copy of Cohn 1904a is in Einstein’s collection of reprints, now in IsReW.“ (CPAE 2; 47; p. 485, fn. 8)

Einstein war also im Besitz einer Kopie der Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“ (Cohn, 1904a) von Cohn und hat sie sein weiteres Leben lang aufbewahrt. Im *Volume 5* der *The Collected Papers of Einstein* findet sich jedoch kein Briefwechsel zwischen Einstein und Cohn – ebenfalls wird Cohn in keiner anderen Korrespondenz von Einstein erwähnt. Es ist daher wahrscheinlich, dass Einstein auf Cohns Arbeit nicht hingewiesen wurde, und er diese selbst bereits kannte. Wenn Einstein die Kopie des ersten Teils aufbewahrte, dann wird er verständlicherweise auch den zweiten Teil gelesen haben, welcher im selben Buch abgedruckt wurde.⁸⁵ Einsteins Interesse an Cohns Arbeit ist jedoch nicht nur aufgrund seiner Untersuchungen zur Elektrodynamik verständlich, sondern weil Cohn und Einstein einiges gemeinsam haben – unter anderem sind beide vom Machschen Denken stark beeinflusst worden. Wenn wir Cohns Arbeit lesen, dann erkennen wir viele von Machs Ideen wieder – wie John Stachel und Michel Janssen am Ende ihrer Arbeit „THE OPTICS AND ELECTRODYNAMICS OF MOVING BODIES*“ (Janssen & Stachel, 2004) auf den Punkt bringen:

„The challenge facing Cohn was that of constructing a theory that could account both for the Fizeau experiment and the Michelson-Morley experiment. As an adherent of Ernst Mach’s (1838–1916) philosophical viewpoint, which taught skepticism about all concepts not directly accessible to experience, it was presumably easier for Cohn than some others to take what must have seemed to him a logically necessary step: if an electromagnetic theory employing the ether concept must make contradictory assumptions about the motion of the ether

⁸⁵ Beide Werke („Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“ (Cohn, 1904a) und „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme. II.“ (Cohn, 1904b)) wurden in „Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften. Jahrgang 1904. Zweiter Halbband. Juli bis Dezember. Berlin: Verlag der königlichen Akademie der Wissenschaften, 1904“ veröffentlicht. (Cohn, 1904a) auf Seite 1294-1303 und (Cohn, 1904b) auf Seite 1404-1416.

inside matter to explain different experiments, one must eliminate the ether concept from electromagnetic theory. Cohn was well aware that Lorentz's macroscopic theory accounted for all first-order electrodynamic and optical effects without the introduction of the contraction hypothesis. (Lorentz, of course, derived these macroscopic equations from a microscopic model, but as a good Machian Cohn was at pains to eliminate all atomistic hypotheses as well.) Lorentz's 1895 explanation of these effects, as we have seen, was based on the invariance of Lorentz's equations to first order under an embryonic version of the Lorentz transformation that does not involve the contraction factor $\sqrt{1 - v^2/c^2}$.

So Cohn looked for, and found (1900), a second-order modification of Lorentz's macroscopic equations that is exactly invariant under the 1895 version of the Lorentz transformations for the space-time coordinates and the fields. Again in the spirit of Mach, he interpreted the velocity v of matter as referring to motion not with respect to the ether but with respect to the fixed stars; so Cohn's theory still employs a preferred state of rest, but now an empirically observable one. Using these equations, Cohn could account for the result of Fizeau's experiment formally in much the same way as did Lorentz (but without reference to the ether, of course). But now, Lorentz's proof that motion through the ether had no first-order effect on terrestrial optical phenomena could be turned into an exact proof that motion with respect to the fixed stars had no effect on these phenomena, thus explaining the negative result of the Michelson-Morley experiment as well.

In a later development (1904) of his theory, Cohn interpreted the local time as the time given by terrestrial clocks if they are synchronized by optical signals, but suggesting that mechanical methods of synchronization would still give the absolute time. Many criticisms of Cohn's theory were offered, including its paradoxical prediction that, under certain circumstances, the velocity of light in a moving medium could exceed c in both the forward and backward directions. With the advent of Einstein's solution to the problems of the electrodynamics and optics of moving bodies by a reinterpretation of Lorentz's theory, Cohn's theory quickly faded from physicists' horizon." (Janssen & Stachel, 2004, p. 32)

Janssen und Stachel weisen hier auf vier wichtige Punkte hin:

- 1.) Cohn war ein Anhänger Machs und versuchte daher eine physikalische Theorie aufzustellen, die einen Äther nicht benötigte, da dieser der Erfahrung nicht zugänglich war.
- 2.) Wie Mach versuchte er daher die Bewegung nicht auf den Äther, sondern auf die Fixsterne zu beziehen.
- 3.) Es war die Idee von Cohn die Ortszeit von Lorentz als eine physikalische Zeit zu verstehen, welche durch optische Signale miteinander synchronisiert werden.
- 4.) Nach Einsteins Spezieller Relativitätstheorie geriet Cohns Theorie und seine Vorarbeiten bald in Vergessenheit.

Punkt 2) ist aus zweifacher Hinsicht wichtig: (I) Die theoretischen Überlegungen und die experimentellen Resultate über die Aberration des Lichtes, welches von den (Fix)Sternen kam, spielten bei der Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie eine wichtige Rolle – durch die Aberration der Sternenlichter wurde nämlich klar, dass die Konstanz der

Lichtgeschwindigkeit eine universelle sein müsste. (II) Die Fixsterne als Bezugssysteme anzunehmen, könnte direkt oder indirekt bei der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie eine Rolle gespielt haben (Stichwort: Machsches Prinzip), worauf wir hier nicht näher eingehen werden.

Überaus interessant ist Punkt 4): Die Vorarbeiten und Konzepte von Cohn gerieten bald in Vergessenheit. Dabei zeigen vor allem Punkt 1) und 3), dass seine Theorie für die Entstehungsgeschichte der SRT von Bedeutung gewesen sein dürfte, da auch Einstein auf das Konzept des Äthers verzichtete und die Ortszeit von Lorentz als eine physikalische Zeit interpretierte, die man mit Lichtsignalen synchronisieren konnte. Cohn gelang dieser erkenntnistheoretische „Sprung“ in Punkt 1) und 3) dadurch, dass er dem Prinzip der Denk-Ökonomie folgt. So beginnt Cohn den zweiten Teil seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper. II.“ (Cohn, 1904b) mit den Worten:

„Vor einigen Jahren habe ich eine Erweiterung der MAXWELL'schen Gleichungen für bewegte Körper angegeben, welche mit allen damals bekannten Thatsachen in Übereinstimmung war.⁸⁶ Dieser auf inductivem Wege gewonnene Ansatz⁸⁷ hat sich auch gegenüber den später hinzugekommenen Erfahrungen bewährt. Die entscheidenden Proben betreffen den Fall gleichförmiger Translationsgeschwindigkeit; die specielle Form der Gleichungen, welche diesem Fall entspricht, scheint mir ausser Frage gestellt. Die allgemeinen Gleichungen sind einer gleich scharfen experimentellen Prüfung bisher nicht unterworfen worden. Bei ihrer Aufstellung habe ich mich durch das Princip der >>wissenschaftlichen Ökonomie<< leiten lassen⁸⁸; es mag sein, dass sich gleichwohl ein einfacherer Ansatz finden lässt, der den Thatsachen ebenfalls gerecht wird. Inzwischen möge mir gestattet sein, die charakteristischen Züge derjenigen Elektrodynamik, die aus meinen Gleichungen folgt, hier zu entwickeln.“ (Cohn, 1904b, p. 1404)

Die Denkökonomie war für Mach ein ganz wichtiges Prinzip⁸⁹, welches er in mehreren Werken besprochen hat (Stadler, 2019a, pp. 7-11) – andere Wissenschaftler aus verschiedenen Gebieten haben seine Gedanken dazu übernommen und weiter ausgearbeitet (Stadler, 2019a, p. 13). Das Prinzip der Denkökonomie von Mach lässt sich folgenderweise zusammenfassen: Die Tätigkeit eines Wissenschaftlers kann allgemein als ein

⁸⁶ In einer Fußnote verweist er auf seine Arbeit: „Göttinger Nachrichten 1901, Heft 1; Ann. Der Physik 7. S. 29, 1902.“ (Cohn, 1904b, pp. 1404, fn. 1)

⁸⁷ „1895“ „übernahm“ „Ernst Mach“ „den für ihn neu geschaffenen Lehrstuhl für ‚Philosophie, insbesondere Geschichte und Theorie der induktiven Wissenschaften‘ an der Universität Wien“ (Stadler, 2019a, p. 1). Cohn könnte daher indirekt darauf anspielen. An dieser Stelle sei jedoch darauf hingewiesen, dass Mach methodologisch von der Induktion, Abduktion und Deduktion Gebrauch machte (Stadler, 2019a, p. 17).

⁸⁸ In einer Fußnote verweist er an dieser Stelle auf seine eigene Arbeit (Cohn, 1904a): „Vergl. Sitzungsber. 1904, 46, S. 1300 f.“ Und zwar kritisiert Cohn dort das Ortszeit-Konzept von Lorentz (Cohn, 1904a, p. 1300) und erklärt, dass wir Längen und Zeiten als physikalische Messungen betrachten sollten, usw.

⁸⁹ Siehe dazu (Mach, 2012, pp. 2, 16-17, 76, 88-89, 209, 279, 296, 380, 491, 503-518).

ökonomischer Prozess betrachtet werden, wodurch beobachtbare Ereignisse in Gesetze und Prinzipien zusammengefasst werden.

Dass es einen „einfacheren Ansatz“ in Zukunft noch geben könnte, schließt Cohn dezidiert nicht aus. Cohn gibt sich Mühe den Ansatz von Mach, so gut er kann, in die Elektrodynamik einzubauen: Auf einen Äther als Konzept wird gänzlich verzichtet und ebenso auf die Vorstellung eines absoluten Raumes. Statt des absoluten Raums versucht er die Fixsterne als Referenz-System anzugeben:

„Es folgt aus unseren Gleichungen u. a., dass sich für $u = 0$ die Strahlung nach allen Richtungen mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreitet. Sie setzen also ein Bezugssystem voraus, für welchen diess thatsächlich zutrifft. Dass ein solches in den Fixsternen existiert, steht ausser Frage. Inwieweit es durch unsere Gleichungen bestimmt ist, soll später erörtert werden.“ (Cohn, 1904b, p. 1405)

Er versucht eine Theorie aufzubauen, die die experimentellen Ergebnisse möglichst ökonomisch (im Machschen Sinne) erklärt. Er ersetzt den absoluten Raum durch die Fixsterne als Bezugssystem, wie es Mach vertreten hat – dadurch wird auch das Konzept des Äthers nicht mehr benötigt. Jedoch wird das Fixsterne-Bezugssystem nach dem Konzept von Cohn zu einem Bezugssystem, wo die allgemeine Zeit der Mechanik gilt, weshalb das Relativitätsprinzip für die Mechanik und die Elektrodynamik nicht gleichermaßen für alle Inertialsysteme zum Einsatz kommen kann (Cohn, 1904b, p. 1405).⁹⁰ Hier bestand also ein Problem, welches es noch zu lösen galt, um zu einer noch einfacheren Theorie zu gelangen. Cohn betont es „mag sein, dass sich gleichwohl ein einfacherer Ansatz finden lässt, der den Thatsachen ebenfalls gerecht wird“, und möchte damit weiteren Entwicklungen nicht im Wege stehen. Die Frage, die sich daher stellt, ist diese: Hat Cohn später die Einsteinsche Spezielle Relativitätstheorie akzeptiert und sah er diese Theorie im Sinne von Mach? Die Antwort ist unmissverständlich ein Ja, wie wir im Folgenden sehen werden:

Wohl unter anderem auf Grund der Mach-Planck Debatte entschloss sich auch Emil Cohn dazu, 1911 ein kleines Buch *Physikalisches über Raum und Zeit* (1911) zu veröffentlichen, auf welches wir näher eingehen werden. Da bei (Janssen & Stachel, 2004) dieses Buch nicht

⁹⁰ Beispielsweise schreibt er: „Auch dieses Verfahren hat natürlich nur einen Sinn, sobald wir sicher sein können, daß die Gesetze der Mechanik für die >>allgemeine Zeit<< streng richtig sind.“ (Cohn, 1904b, p. 1410; fn. 1)

besprochen wird, könnte das Hinzuziehen des Werkes einen kleinen Beitrag zur Einstein-Forschung leisten. Der Inhalt dieses Buches, welches eine Verteidigung der SRT und somit der Lorentz-Einsteinschen Theorie darstellt, ist nämlich überaus bedeutsam, weil es in Zürich im Jahre 1911 in Anwesenheit Einsteins eine Diskussion darüber gab, was genau nun die Theorie von Einstein, Lorentz und Cohn voneinander unterschied (CPAE 3; 18; p. 445).

3.3. Entstehungsgeschichte der SRT: Cohns Verteidigung der SRT als Andenken an Mach

Das bereits erwähnte Büchlein *Physikalisches über Raum und Zeit* (1911) von Emil Cohn erschien bereits nach ca. zehn Jahren in vierter Auflage (Cohn, 1920). Der Inhalt des Buches scheint wissenschaftsgeschichtlich betrachtet, von äußerster Wichtigkeit zu sein – beispielsweise gibt Einstein in seiner Schrift „Die Relativitätstheorie“ (1915), nachdem er die Spezielle Relativitätstheorie besprochen hat, nur eine einzige Literaturquelle zu diesem Thema an, wo die Leser noch mehr in Erfahrung bringen können:

„Eine vorzügliche Darstellung des Gegenstandes enthält: *Physikalisches über Raum und Zeit* von E. COHN, 2. Aufl. B. G. Teubner. 1913.“ (CPAE 4; 21; p. 546)

In gewissem Sinne steht also diese Darstellung der Entstehungsgeschichte der SRT von Cohn für Einstein also konkurrenzlos dar. Weshalb Einstein hier allein auf Cohns Buch hinweist, wird rückblickend klar: Er möchte auf die wichtige Rolle Machs hinweisen und ihn ebenfalls würdigen. Dass das keine gewagte These ist, wird uns womöglich klar, wenn wir uns ansehen, was Einstein im Zeitungsartikel „Vom Relativitäts-Prinzip“ (April 1914) schrieb:

„Wer ihre genauere Begründung und Rechtfertigung ohne schwierige mathematische Ableitungen kennen zu lernen wünscht, findet in der Schrift von C. Cohn ‚*Physikalisches über Raum und Zeit*‘ sowie in dem Aufsatz von Jos. Petzoldt ‚*Die Relativitätstheorie der Physik*‘ im neuen Hefte der ‚*Zeitschrift für positivistische Philosophie*‘ ausreichende Belehrung.“
(CPAE 6; 1; p. 4)

Dabei verwies er also auf die zwei Verteidiger Machs: Cohn und Petzoldt.⁹¹ Im Jahre 1921 erschien das gefälschte Vorwort in *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921), in welchem Ernst Mach als Relativitätstheorie-Gegner präsentiert wurde – weshalb es, wie wir auf den nächsten Seiten sehen werden, keine fünfte Auflage von Cohns Buch (Cohn, 1920) gab. Bereits an der Geschichte dieses Buches *Physikalisches über Raum und Zeit* (Cohn, 1920) ist erkennbar, wie die Erkenntniskultur, die Machs Gedanken mit der Relativitätstheorie in Verbindung zu bringen versuchte, begann allmählich zu verklingen. Das Vermächtnis von Mach geriet schließlich immer mehr in Vergessenheit. Sehen wir uns dieses Werk von Cohn daher etwas genauer an. Im Vorsatz des Buches erläutert der Verlag *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH* über den Inhalt Folgendes:

⁹¹ Petzoldts Erläuterungen waren physikalisch nicht immer ganz korrekt – siehe (CPAE 6; 1; p. 5, fn. 2) (CPAE 9; 9; p. 15).

„In gemeinverständlicherweise wird dargelegt, welche wissenschaftlichen Erfahrungen zur Aufstellung der Relativitätstheorie geführt haben, und welche Bedeutung dieses neue Prinzip für unsere physikalische Auffassung von Raum und Zeit hat. Die vorliegende Schrift ist ständig bemüht, scharf hervortreten zu lassen, was beobachtbare Tatsache, was willkürliche Festsetzung und was notwendige Folgerung ist.“

(Cohn, 1920, p. 0 (Vorsatz))

Der interessierte Leser kann über das Internet dieses Buch (in der vierten Auflage) selbstverständlich beim *Springer Vieweg* Verlag immer noch in digitalisierter Form als eBook erwerben – dort steht „Über dieses Buch“ (Springer Online, kein Datum):

„Dieser Buchtitel ist Teil des Digitalisierungsprojekts Springer Book Archives mit Publikationen, die seit den Anfängen des Verlags von 1842 erschienen sind. Der Verlag stellt mit diesem Archiv Quellen für die historische wie auch die disziplingeschichtliche Forschung zur Verfügung, die jeweils im historischen Kontext betrachtet werden müssen. Dieser Titel erschien in der Zeit vor 1945 und wird daher in seiner zeittypischen politisch-ideologischen Ausrichtung vom Verlag nicht beworben.“ (Springer Online, kein Datum)

Cohn war ein Wegbereiter der Speziellen Relativitätstheorie und hat in diesem Buch Einstein und dessen Theorie verteidigt. Im Anhang, in welchem er auf die Berechnungen näher eingeht, erklärt er:

„Zum folgenden siehe vor allem A. Einstein, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, Band. 4, 1907.“ (Cohn, 1920, pp. 27, fn. 1)

Cohn verweist somit auf Einsteins Beitrag zur SRT, wo Letzterer ebenfalls in einer Fußnote Cohn erwähnt hatte. (Auf diesen Artikel hat Einstein ebenso auch Ernst Mach hingewiesen.) Cohn, der mit der Elektrodynamik gut vertraut ist und ebenso Einsteins eigene Erläuterungen dazu kennt, kann wohl als eine Bereicherung für die Wissenschaftsgeschichte angesehen werden – weshalb der Verlag aktuell meint, dass dieser Titel wegen „seiner zeittypischen politisch-ideologischen Ausrichtung vom Verlag nicht beworben“ wird, weil es „in der Zeit vor 1945“ „erschien“, ist nicht ganz verständlich. Das Buch ist vom deutschen theoretischen Physiker Emil Cohn, mit jüdischer Abstammung, der nicht nur ein Wegbereiter der Speziellen Relativitätstheorie war, sondern sie in diesem Buch verteidigt hat. Im Gegenteil: Cohns Buch scheint für die Wissenschaftsgeschichte äußerst interessant zu sein. Vor allem, weil Einstein selbst dieses Buch als „[e]ine vorzügliche Darstellung des

Gegenstandes“ (CPAE 4; 21; p. 546) bezeichnet hat. Schauen wir uns deshalb den Inhalt⁹² des Buches etwas genauer an. Auf dem Vorsatz der zweiten Auflage lesen wir:

„ERNST MACH
DEM FORSCHER UND DEM LEHRER

IN VEREHRUNG UND DANKBARKEIT“
(Cohn, 1913, p. 0 (Vorsatz))

Nach Machs Tod (1916) steht in der vierten Auflage:

„DEM ANDENKEN
ERNST MACHS“
(Cohn, 1920, p. 3)

Das Buch ist also Ernst Mach gewidmet. Offensichtlich sieht Cohn zwischen Machs Ansichten und der SRT keinen Widerspruch – man könnte sogar sagen: die kritisch-historische Erarbeitung der SRT dient dem Andenken Machs. Dessen Einfluss wird auch klar ersichtlich, wenn Cohn mit den Worten beginnt:

„Wissenschaftlich Physik treiben, heißt: in den Naturvorgängen quantitative Beziehungen auffinden und diese auf den einfachsten Ausdruck bringen. Das eine ist das Werk des Experimentators, das andere das Werk des Theoretikers. Alle Vorgänge verlaufen im Raum und in der Zeit. Wie sie in Raum und Zeit verlaufen, wie die Größen, durch die wir sie beschreiben, nach Ort und Zeit ihre Werte ändern, das haben wir zu untersuchen. Ort und Zeit sind die ‚unabhängigen Veränderlichen‘, alle anderen suchen wir darzustellen als

⁹² Der Inhalt des Buches war ein Vortrag von Emil Cohn, den er am 11. Februar 1910 im naturwissenschaftlich-medizinischen Verein zu Strassburg gehalten hat (Cohn, 1920, p. 2). Die Erstveröffentlichung war bereits 1911. Zu dieser Zeit gab es die Allgemeine Relativitätstheorie noch nicht, weshalb sie im Buch auch nicht besprochen wird. Auch in den späteren Auflagen (3. und 4. Auflage) hat er das Buch diesbezüglich nicht mehr erweitert. E. Cohn hat die Allgemeine Relativitätstheorie geschätzt und über ihre experimentelle Bestätigung war er erfreut, weshalb er zur vierten Auflage erläutert:

„Die Aufforderung des Verlags, den Text für die vierte Auflage bereitzustellen, trifft mich in dem Moment, wo die Einsteinsche allgemeine Relativitäts- und Gravitationstheorie ihre glänzendste Bestätigung gefunden hat. Von neuem tritt damit die Frage an mich heran, ob ich den Inhalt dieser Schrift über die *spezielle* Relativitätstheorie hinaus ausdehnen soll. Dieser Teil der Theorie war das *Ganze*, als die Schrift zum erstenmal erschien. Er bildet heute nur ein Grenzgebiet des unabsehbaren Neulands, das uns eröffnet wurde. Aber er ist der *zugänglichste* Bezirk geblieben, – und der einzige, der allseitig scharfe Grenzen besitzt. Eine Grenzüberschreitung würde nicht möglich sein, ohne die Einheitlichkeit der Darstellung zu zerstören. So habe ich für das kleine Werk den ursprünglichen Rahmen beibehalten. Dem unveränderten Abdruck der dritten Auflage wurden nur wenige Zeilen angefügt, die durch Datierung kenntlich gemacht sind.“ (Cohn, 1920, p. 4)

Funktionen von diesen. Wenn also Physik als Wissenschaft möglich sein soll, so ist die erste Bedingung, daß wir Raum und Zeit selbst quantitativ erfassen können. Daß dies ausführbar sei, – daß man jeder Strecke einen bestimmten Wert in Metern, jedem Zeitintervall einen bestimmten Wert in Sekunden *eindeutig* zuschreiben könne, – erscheint selbstverständlich. Wir haben lernen müssen, daß dem nicht so ist, und mit dieser Erkenntnis hat unser Raum- und Zeitbegriff sich gewandelt. Diese Wandlung möchte ich darlegen.“ (Cohn, 1920, p. 5)

Physik zu betreiben, bedeutet nach Cohn also die Naturvorgänge in eine quantitative Beziehung zu bringen – das ist die Aufgabe des Experimentators – und anschließend den Ergebnissen den einfachsten Ausdruck geben – das wiederum ist die Aufgabe des theoretischen Physikers. Die Vorstellung, dass die experimentellen Ergebnisse in einer ökonomischen Form zu bringen sind, ist von Mach übernommen. (Aber nicht nur Cohn, sondern auch Einstein war von diesem Leitgedanken inspiriert.) Weiters erläutert Cohn, was die Erkenntnis der Speziellen Relativitätstheorie war:

„Wir haben lernen müssen, daß dem nicht so ist, und mit dieser Erkenntnis hat unser Raum- und Zeitbegriff sich gewandelt.“ (Cohn, 1920, p. 5)

Die wichtige Erkenntnis der Speziellen Relativitätstheorie lag nach Cohn darin, zu zeigen, dass unser Verständnis von Raum und Zeit (nach der klassischen Physik) nicht stimmte. Wir wollen nun Cohns Erläuterungen zusammenfassen.

3.3.1. Das Relativitätsprinzip der Mechanik und das Machsche Forschungsprogramm
Wie wir bereits besprochen haben, können wir nach Ernst Mach die Fixsterne als Bezugssysteme annehmen – die Bewegung und die Beschleunigung eines Körpers ist somit relativ zu diesem System. Eine Zusammenfassung dessen, finden wir im Kapitel „**Das Relativitätsprinzip der Mechanik.** (Galilei-Newton.)“ (Cohn, 1920, p. 5):

„Eine Kugel rollt auf dem Schiffsdeck. Welches ist ihre Geschwindigkeit? Die gegen das Schiff? Das Schiff bewegt sich ja selbst! Also die gegen die Erde? Aber auch die Erde bewegt sich! Also die gegen die Sonne? – gegen die Fixsterne? – gegen ein x , gegen das die Fixsterne selbst sich bewegen und von dem wir keine Kunde haben? *Diese* Geschwindigkeit hat keinen Sinn, jede der übrigen hat einen bestimmten Sinn.“ (Cohn, 1920, p. 5)

Cohn stellt daher fest, dass es wenig Sinn (nach der Erfahrung) macht, wenn wir annehmen, dass das ganze Universum (bzw. Fixsterne) sich bewegt – denn in Bezug worauf sollte es sich bewegen? Ruhe und beschleunigte Bewegung sind relative bzw. relationale Konzepte. Dass einzelne Teilchen sich relativ zu anderen Körpern bewegen, können wir aber aus der Erfahrung ableiten. (Wenn wir diese Fixsternengruppe auf ein Koordinatensystem setzen

und diesem Koordinatensystem den Begriff Raum zuweisen, dann stellt das schließlich eine Abstrahierung des Gegebenen dar.) Nun fährt Cohn fort:

„Die Geschwindigkeit der Kugel‘ ist etwas Bestimmtes, sobald wir festgelegt haben, auf welches System wir sie beziehen wollen. Ist nun ein ‚Bezugssystem‘ und damit eine bestimmte Geschwindigkeit ausgezeichnet? Das ist eine Frage an die Erfahrung. Die Erfahrung antwortet: nicht ein System, sondern eine ganze Gruppe von Systemen.“
(Cohn, 1920, p. 5)

Nach Cohn erlernen wir aus der Erfahrung, dass gewisse physikalische Systeme uns erlauben, die Gesetze in einer einfachen Form anzugeben. Diese Systeme werden heute als Inertialsysteme bezeichnet – und charakterisieren sich dadurch, dass sie unbeschleunigte Systeme darstellen:

„In anderer Fassung: ein Beobachter, der mit dem Versuchskörper zusammen in eine Hülle eingeschlossen ist, wird von der gleichförmigen Bewegung nichts wahrnehmen, wohl aber von der beschleunigten. Das gleiche gilt von den Wahrnehmungen, die er an sich selbst macht: er spürt die Bewegung im Karussell, er spürt das Anfahren und das Anhalten des Fahrstuhls, aber er bemerkt nichts von der gleichförmigen Bewegung des Fahrstuhls. Es gilt *ganz allgemein*: denken Sie einen Beobachter, der in seiner irgendwie begrenzten Welt beliebig viele mechanische Erfahrungen sammelt. Er soll einschlafen, seine ‚Welt‘, die bisher ruhte gegen eine gewisse weitere Umgebung, soll in Bewegung gesetzt werden, und er soll aufwachen, nachdem die Bewegung gleichförmig geworden ist: Seine neuen Erfahrungen werden den alten gleichen, er wird von dem, was ihm im Schlaf geschehen ist, nie etwas wissen können. Ist er aber in beschleunigte Bewegung, etwa in Rotation, versetzt worden, so merkt er, daß eine Veränderung vorgegangen ist.“ (Cohn, 1920, p. 6)

In diesen Beispielen erklärt Cohn, dass uns die Erfahrung lehrt, dass wir (Inertial)Systeme, die entweder in Ruhe oder in geradlinig gleichförmiger Bewegung sind, voneinander nicht unterscheiden können. Solche Bewegungen sind daher relativ bzw. relational. Interessant ist, dass er auch auf die gleichförmige Bewegung des Fahrstuhls hinweist – ein ähnliches Gedankenexperiment werden wir sowohl bei Mach als auch bei Einstein wiederfinden. Es stellt sich jedoch die Frage wie es sich in beschleunigten Systemen verhält, welche eben keine Inertialsysteme sind. Beispielsweise erkennen wir in einem rotierenden System, dass wir beschleunigt werden – doch in Relation bzw. relativ wozu werden wir nun beschleunigt? (Machs und) Cohns Vorschlag dazu wäre: die Beschleunigung ist stets nur eine Beschleunigung zur Außenwelt:

„Geben wir ihm den Blick frei auf die Außenwelt, so wird er seine Erfahrungen dahin zusammenfassen, daß die Physik seiner eigenen Welt die gleiche ist für alle Bewegungszustände, die sich nur durch eine konstante geradlinige, im übrigen willkürliche Geschwindigkeit gegen die Außenwelt voneinander unterscheiden, daß sie aber verschieden

ausfällt bei verschiedenen beschleunigten Bewegungen, insbesondere bei verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten gegen die Außenwelt. Auch hier wird er nicht entscheiden können, ob seine Welt sich dreht gegen die ruhende Außenwelt, oder ob die Außenwelt in entgegen- gesetztem Sinne um die seine kreist. Diese Frage hat keine Antwort, weil sie keinen Sinn hat. Aber seine Beobachtungen werden sich verschieden *aussprechen*, je nachdem er die eine oder die andere Welt als das Ruhende betrachtet, und es kann sehr wohl sein, daß eine bestimmte Vorstellung ausgezeichnet ist durch die *Einfachheit*, welche sie dem zusammenfassenden Ausdruck der Erfahrungen, den physikalischen ‚Gesetzen‘ verleiht. In diesem Sinne können wir ‚absolute‘ Drehbewegung definieren. Diesen Sinn hat es, wenn wir den Fixsternhimmel als ruhend und die Erde als gleichförmig um ihre Achse rotierend betrachten: nur dieser Ansatz gibt uns eine praktisch durchführbare Mechanik. Absolute *gleichförmige Translationsbewegung* aber können wir in keiner Weise definieren. Zwei sich gleichförmig gegeneinander bewegende Bezugssysteme sind mechanisch vollkommen äquivalent: es sind Aussagen von vollkommen gleichem Inhalt, wenn wir einmal *A* als ruhend, *B* als bewegt ansprechen, ein andermal *B* als ruhend, *A* als bewegt. Im besonderen also: mechanisch ausgezeichnet ist nicht das Fixsternsystem für sich allein, sondern mit ihm die ganze Gruppe aller der Systeme, welche gegen die Fixsterne eine gleichförmige Bewegung besitzen, die ganze Fixsterngruppe, wie wir sie nennen wollen. Hiermit ist das ‚Relativitätsprinzip‘ der Mechanik ausgesprochen, das auf Galilei und Newton zurückgeht.“ (Cohn, 1920, pp. 6-7)

Nehmen wir die Fixsterne als ruhend an, dann können wir die Drehung dazu als „absolut“ ansehen, wie Cohn erklärt. Wir müssen aber die Fixsterne nicht als ruhend annehmen – es gebietet nur die Einfachheit, dies zu tun. Bewegt sich nun ein System geradlinig, gleichförmig gegenüber dem Fixsternsystem, so ist sie unbeschleunigt. Das ist das klassische Relativitätsprinzip.

Diese Überlegungen von Cohn sind auch nicht weit hergeholt, sondern zeigen sich bereits aus der Physik- bzw. Astronomiegeschichte: Es ist allgemein bekannt, dass zwischen den Vertretern des geozentrischen und des heliozentrischen Weltbildes gestritten wurde. Durch das Relativitätsprinzip wird nun das Problem klar: Wenn wir kurz die gravitative Wechselwirkung außer Acht lassen, dann haben wir nach dem geozentrischen Weltbild eine Erde, die sich in Ruhe befindet und nach dem heliozentrischen Weltbild eine Erde, die (näherungsweise) ein Inertialsystem darstellt. Da aufgrund des Relativitätsprinzips zwischen Ruhe und gleichförmiger Bewegung nicht unterscheidbar ist, war es schwierig zwischen diesen Weltbildern zu unterscheiden, sie waren äquivalent. Das Relativitätsprinzip war für das heliozentrische Weltbild sogar wichtig, da dieses Modell erst erklären musste, weshalb wir auf der Erde von deren Bewegung nichts mitbekommen, obwohl sie sich weiterbewegt. Silvio Bergia fasst jene Entwicklungen in seinem Artikel „Einstein und die Geburt der Speziellen Relativitätstheorie“ folgendermaßen zusammen:

„In einem berühmten Passus aus dem *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme* [...] untersuchte Galilei, was mit verschiedenen physikalischen Phänomenen geschehen würde, die ‚in der Hauptkabine unter Deck irgendeines großen Schiffs‘ vorkommen, wobei sich das Schiff ‚mit welcher Geschwindigkeit auch immer‘ vorwärtsbewegt, vorausgesetzt, die ‚Bewegung ist gleichförmig und schwankt nicht in die eine oder andere Richtung‘. Seine Schlußfolgerung war, ‚daß nicht die geringste Veränderung in allen genannten Wirkungen‘ eintreten würde und daß von ‚keiner gesagt werden könne, ob sich das Schiff dabei bewege oder nicht‘. Mit diesem Passus wollte Galilei einen Einwand gegen die Idee der Erdbewegung widerlegen: Die Gegner dieser Vorstellung behaupteten nämlich, daß auf der Erdoberfläche liegende Gegenstände während der Bewegung zurückgelassen würden. Auch wenn diese Idee selbst bereits Vorläufer gehabt hat, so kann sie doch, symbolisch, den Beginn jener langen Zeit der ‚Schwangerschaft‘ der Relativitätstheorie markieren. [...]

Descartes akzeptierte dieses Prinzip mit Sicherheit (1644), obwohl er sich vorsichtig ausdrückte, um die absolute Ruhe der Erde, wie sie die Heilige Schrift verlangte, nicht leugnen zu müssen. In einem seiner Briefe findet sich eine Formulierung, die den relativen Charakter des Galileischen Prinzips betont: ‚... von zwei Menschen bewegt sich der eine mit einem Schiff, und der andere steht am Ufer ... Es ist in der Bewegung des ersteren nichts Wirklicheres als in der Ruhe des letzteren.‘

Newton widmete dem Thema in seinen *Principia* einen einzigen Zusatz: ‚Die relativen Bewegungen zweier Körper in einem gegebenen Raum sind identisch, gleichgültig ob sich dieser Raum im Zustand der Ruhe befindet oder ob er sich gleichförmig in einer geraden Linie ohne Kreisbewegung bewegt.‘ Wie Mach in seinem Buch *Die Mechanik in ihrer Entwicklung* darlegt, ist dieser Zusatz für Newton jedoch wichtig, um zu betonen, daß seine Gesetze der Mechanik in einem sich in bezug auf die Fixsterne gleichförmig und geradlinig bewegenden Bezugssystem gelten. Newtons Aussage bestätigt also die Gültigkeit des Relativitätsprinzips. Dennoch blieb er – wie Mach bedauernd vermerkt – nicht beim ‚Faktischen, Gegebenen‘, sondern postulierte die Existenz eines absoluten Raumes. Das entscheidende Problem der speziellen Relativität lag freilich auch nie im Mittelpunkt seiner Interessen; ihm ging es vielmehr darum zu zeigen – wie bei seinem berühmten Experiment über die Einwärtskrümmung der Wasseroberfläche in einem rotierenden Eimer –, daß Kreisbewegungen absolut sind. [...]“ (Bergia, 1985, pp. 140-141)

(Ob nun aber auch die beschleunigten Bewegungen, wie die Rotation, relativ bzw. relational zum Fixsternhimmel anzusehen sind, lässt sich natürlich schwer entgültig beantworten. Doch die Erfahrung zeigt, dass eine solche Vorstellung mit der Beobachtung nicht in Widerspruch ist.)

3.3.2. Die Widersprüche in den Experimenten vor der Speziellen Relativitätstheorie

Das Relativitätsprinzip, welches wir aus der Mechanik schlussfolgern können, war aber in der Theorie der Elektrodynamik nicht gegeben, wie Cohn aufmerksam macht (Cohn, 1920, p. 7). Denken wir dabei an Lichtwellen, welche transversale Eigenschaften haben. Transversale Wellen werden auch als Querwellen bezeichnet, weil die Schwingungsrichtung senkrecht zum Ausbreitungsvektor steht. Klassische Querwellen wie Seilwellen, Saitenschwingungen

oder Wasserwellen benötigen stets ein Medium, worin sie sich ausbreiten können. (Bei Wasserwellen ist das Medium zum Beispiel das Wasser.) Bei Lichtwellen nahm man daher auch ein Medium Äther an, welches das ganze Universum ausfüllt, damit das Licht von den Sternen zu uns auf die Erde gelangen kann. Um mehr über die Natur des hypothetischen Äthers zu verstehen, erdachte man sich unterschiedliche Experimente...

3.3.2.1. Experiment von Fizeau⁹³ – wiederholt von Michelson und Morley

Cohn betrachtet das Experiment von Fizeau⁹⁴ ohne einen hypothetischen Äther:

⁹³ Zu Einsteins Erklärung des Fizeauschen Experiments siehe beispielsweise (CPAE 4; 1; p. 27-28) und (CPAE 4; 1; p. 103, fn. 36).

⁹⁴ Ein wichtiges Projekt in der Geschichte der Physik war die Eigenschaften des Äthers zu verstehen. Dazu musste verstanden werden, wie die Wechselwirkung zwischen dem Äther und der Materie vor sich ging – beispielsweise versuchte man die Relativbewegung zwischen dem Äther und der Materie anzugeben. Dies war notwendig, um die Aberration des Lichtes beschreiben zu können. Nach der Theorie von Augustin Jean Fresnel (1818), wurde der Äther teilweise von Körpern mitgeführt, wodurch er das Problem der Aberration damals lösen konnte. Doch eine experimentelle Überprüfung der Theorie stand noch aus. Fizeau hat nun im Jahre 1851 mit seinem Experiment getestet, ob der Äther in einem strömenden Wasser mitgeführt wird oder nicht.

Nehmen wir an,

a) dass der Äther beim strömenden Wasser gänzlich mitgenommen wird, dann hätten wir für die Lichtgeschwindigkeit c_{Wasser} im strömenden Wasser:

$$c_{Wasser} = \frac{c}{n}$$

wobei n den Brechungsindex des Wassers angibt und c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

b) Im Falle, dass der Äther gar nicht vom Wasser mitgenommen wird, hätten wir

$$c_{Wasser} = \frac{c}{n} + v$$

wobei v die Geschwindigkeit des Wassers wiedergibt.

c) Nach Fresnels Theorie wird der Äther aber nur teilweise mitgeführt

$$c_{Wasser} = \frac{c}{n} + v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

Mit dem Ergebnis des Fizeauschen Experiments war nur c) in Übereinstimmung.

Einstein erkannte daraus – wenn man das Konzept des Äthers gar nicht anwendet und auf die Richtigkeit des Relativitätsprinzips vertraut –, dass dann die Geschwindigkeitsaddition in der Physik zu verändern ist und davon die Ergebnisse vom Fizeauschen-Experiment abgeleitet werden können. Das wollen wir kurz demonstrieren:

Nehmen wir an, das Wasser fließe von links nach rechts entlang der x' -Achse. Für das System S' des fließenden Wassers haben wir dann für die Lichtgeschwindigkeit gegeben:

$$c' = \frac{c}{n}$$

Unser Labor-System S ruht und liegt mit seiner x -Achse parallel zur x' . Wenn wir nun das relativistische Geschwindigkeitsadditionstheorem anwenden, so erhalten wir für die Lichtgeschwindigkeit gemessen im Labor-System:

$$c_{Wasser} = \frac{c' + v}{1 + \frac{c' \cdot v}{c^2}} = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \frac{v}{n \cdot c}}$$

Für kleine Geschwindigkeiten $v \ll \frac{c}{n}$ können wir nun den Nenner in einer Reihe entwickeln und erhalten

$$c_{Wasser} = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \frac{v}{n \cdot c}} \approx \left(\frac{c}{n} + v\right) \cdot \left(1 - \frac{v}{n \cdot c} + \dots\right)$$

$$c_{Wasser} \approx \left(\frac{c}{n} + v\right) \cdot \left(1 - \frac{v}{n \cdot c}\right) = \frac{c}{n} + v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

Durch die relativistische Geschwindigkeitsaddition gelangt man somit zu den Ergebnissen des Fizeauschen Experiments ohne eine Mitführung des Äthers anzunehmen. Glaubt man also nicht an einen hypothetischen

„Der entscheidende Versuch, den Fizeau zuerst angestellt hat, ist dieser: In einer mit gleichförmiger Geschwindigkeit strömenden Flüssigkeit möge sich Licht fortpflanzen in der Richtung der Strömung. Nach dem Relativitätsprinzip müßte ein im Strom treibender Beobachter die gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeit wahrnehmen, wie wenn die Flüssigkeit ruhte. Der außenstehende Beobachter mußte also die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts um die volle Geschwindigkeit der Flüssigkeit vermehrt finden. (Man denke an die Kugel, die auf dem Schiffsdeck rollt.) Das aber ist nicht der Fall: es kommt nur ein bestimmter *Bruchteil* der Strömungsgeschwindigkeit hinzu. Dieser Bruchteil hängt vom Brechungsexponenten der Flüssigkeit ab. Den Extremfall, mit dem wir uns im folgenden

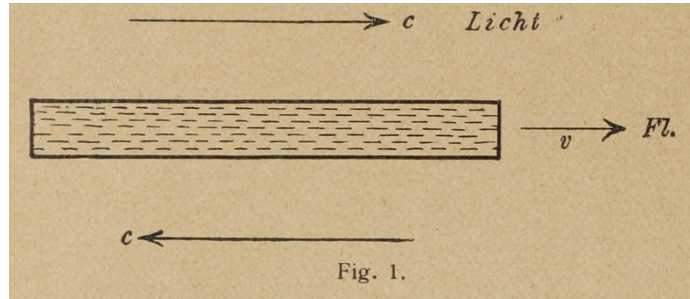


Figure 1: Quelle:

<https://archive.org/details/physikalischesub00cohn/page/8/mode/2up> [Zugriff am 26. September 2020].

allein eingehender beschäftigen wollen, haben wir, wenn es sich um ein Gas handelt, das sich vom leeren Raum optisch kaum unterscheidet: da kommt gar nichts hinzu: der außenstehende Beobachter stellt fest, daß sich für ihn das Licht genau so fortpflanzt, wie wenn das Gas ruhte. Oder genauer, im engeren Anschluß an das Experiment: es pflanzt sich für ihn genau so schnell fort in der Richtung der Gasströmung wie in der entgegengesetzten. Er muss also schließen, daß für einen *gedachten* Beobachter, der die Bewegung des Gases teilt, die Geschwindigkeit des Lichts sich um den vollen Betrag seiner eigenen Geschwindigkeit vermindert, wenn beide gleichgerichtet sind, und um den gleichen Betrag vermehrt, wenn sie einander entgegengerichtet sind. (Fig. 1.)“ (Cohn, 1913, p. 7) (Cohn, 1920, pp. 7-8)

Cohns Erläuterungen könnten einen Hinweis darauf geben, wie Einstein wohl gedacht haben mag. Sowohl Cohn als auch Mach verzichteten in ihren Untersuchungen auf den Äther, weil er etwas Hypothetisches war, das niemand direkt beobachtet hatte und die theoretischen Untersuchungen nur noch mehr verkomplizierte. Aufgrund der Einfachheit war es also geboten, auf den Äther zu verzichten. Wenn man nun wie Cohn und Mach annimmt, dass man für die oben gemachten Zusammenhänge den Äther nicht benötigt, dann muss das Ergebnis, welches Fizeau experimentell feststellte, etwas mit der Geschwindigkeitsaddition des Lichtes zu tun haben. Um dem Leser diesen Punkt bewusst zu machen, wechselt Cohn vom Wasser zu Gasen über, um zur Erdatmosphäre zu gelangen – also zu einem Beispiel, welches unserer Erfahrungswelt bzw. unserem Alltag näherkommt. Die Atmosphäre der Erde bzw. die Luft konnte man in guter Näherung vernachlässigen, weshalb das Experiment von Fizeau wohl nichts über die Mitschleppung des Äthers aussagte, sondern darüber, dass mit den klassischen Transformationsgleichungen etwas nicht stimmte. Dafür musste man jedoch wiederum ein anderes Experiment zur Rate ziehen, welches genau jene Phänomene

Äther, muss man erkennen, dass auf Grunde des hypothetischen Äthers die klassische Geschwindigkeitsaddition zu verändern ist. Dazu benötigt Einstein jedoch zuvor noch die relativistischen Transformationsgleichungen. Er musste daher allmählich zu einem relativen Verständnis von Längen und Zeiten gelangen, um anschließend die zwei Prinzipien der SRT zu postulieren.

(Ausbreitungseigenschaften des Lichtes aufgrund der relativen Bewegung der Erde) untersuchte: das Michelson-Experiment.

3.3.2.2. Experiment von Michelson – wiederholt von Michelson und Morley⁹⁵

Im Zusammenhang mit dem Experiment von Fizeau wendet sich Cohn nun auch dem Experiment von Michelson:

„In dem Fall dieses hier nur gedachten mitbewegten Beobachters im bewegten Luftmeer sind wir nun aber andauernd. Die Erde bewegt sich im Jahreslauf um die Sonne mit einer Geschwindigkeit, die wir in jedem Moment als gleichförmig betrachten dürfen, und die ziemlich genau ein Zehntausendstel der Lichtgeschwindigkeit beträgt. Also müßten wir an optischen (allgemein an elektrischen) Vorgängen, die sich an der Erdoberfläche abspielen, die Bewegung der Erde erkennen können. Denken Sie (Fig. 2) einen Lichtstrahl, der in der Richtung der Erdbewegung von A nach B läuft: er durchläuft im Weltraum einen längeren Weg und braucht entsprechend mehr Zeit. Er werde in B gespiegelt und kehre nach A zurück. Jetzt ist der Weg kürzer als BA; aber der Gesamtweg ist, wie eine einfache Rechnung zeigt, durch die Erdbewegung verlängert.⁹⁶ Ein zweiter Strahl laufe (Fig. 3), senkrecht zur Erdbewegung, von A nach C und werde ebenfalls nach A reflektiert. Auch sein

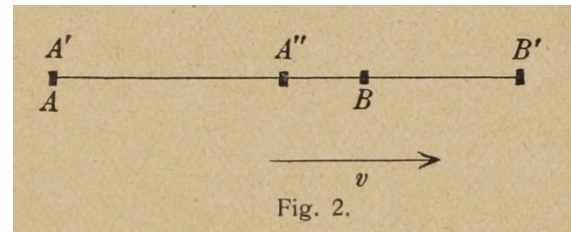


Figure 2: Quelle:

<https://ia800805.us.archive.org/35/items/physikalischesub00cohn/physikalischesub00cohn.pdf> [Zugriff am 26. September 2020].

⁹⁵ Siehe zu Einsteins Erklärung des Relativitätsprinzips und des Michelson Morley Versuchs (CPAE 4; 1; p. 30-32).

⁹⁶ Eine kurze mathematische Erklärung des Beispiels: Das Licht muss die Strecke $AB = \text{Strecke} = s$ zurücklegen. Nun bewegt sich die Erde mit der Geschwindigkeit v . Das Licht muss für den Hinweg die Strecke von A nach B' zurücklegen und beim Rückweg B' nach A'' - daher insgesamt den Weg A B' A''. Die Zeit, die er dafür benötigt ist

$$t_{AB'A''} = t_{\text{hin}} + t_{\text{zurück}} = \frac{s}{c+v} + \frac{s}{c-v}$$

Mit Hilfe der binomischen Formel $(c+v) \cdot (c-v) = c^2 - v^2$ können wir diese auf einen gemeinsamen Nenner bringen und erhalten

$$\begin{aligned} t_{AB'A''} &= \frac{s}{c+v} + \frac{s}{c-v} = \frac{(c-v) \cdot s}{(c+v) \cdot (c-v)} + \frac{(c+v) \cdot s}{(c-v) \cdot (c+v)} = \frac{(c-v) \cdot s + (c+v) \cdot s}{c^2 - v^2} = \\ \frac{(c-v) \cdot s + (c+v) \cdot s}{c^2 - v^2} &= \frac{c \cdot s \cdot ((1-v) + (1+v))}{c^2 - v^2} = \frac{c \cdot s \cdot 2}{c^2 - v^2} = \frac{2 \cdot s}{\frac{c^2}{c} - \frac{v^2}{c}} = \frac{2 \cdot s}{c - \frac{v^2}{c}} = \frac{2 \cdot s}{c - \frac{c \cdot v^2}{c^2}} = \frac{2 \cdot s}{c - \frac{c \cdot v^2}{c^2}} \\ &= \frac{2 \cdot s}{c \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{2 \cdot s}{c} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{2 \cdot s}{c} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)} \end{aligned}$$

$$t_{AB'A''} = \frac{2 \cdot s}{c} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

Würde die Erde ruhen ($v = 0$), dann hätten wir:

$$t_{\text{Ruhe}} = \frac{s}{c} + \frac{s}{c} = \frac{2 \cdot s}{c}$$

Das heißt, um den Betrag $\frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$ ist $t_{AB'A''}$ größer als t_{Ruhe} .

Weg ist verlängert, aber, wie aus der Rechnung folgt, *weniger* als der Strahl ABA .⁹⁷ Im Ganzen also: wenn die Strahlen nach B und C gleichzeitig von A ausgehen, und wenn AB und AC genau gleich lang sind, so kommt doch der erste Strahl später nach A zurück als der zweite. Jetzt werde der ganze Apparat um 90 Grad gedreht, so daß nun der Arm AC in der Richtung der Erdbewegung liegt, AB senkrecht dazu. Nun ist der Strahl AC in der Ankunft verspätet. Die Drehung möchte also eine Veränderung der beobachteten Erscheinung (des

⁹⁷ Eine kurze mathematische Erklärung des Beispiels: Das Licht muss die Strecke $AC = Strecke = s$ zurücklegen. Nun bewegt sich die Erde mit der Geschwindigkeit v . Das Licht muss für den Hinweg die Strecke von A bzw. A' nach C' zurücklegen und beim Rückweg C' nach A'' – daher insgesamt den Weg $A C' A''$. Die Strecke für AC' bzw. $C' A''$ bezeichnen wir als l ($AC' = C' A'' = l$), wobei natürlich die Strecke l größer ist als s ($l > s$). Dabei erhalten wir geometrisch ein gleichschenkliges Dreieck mit zwei gleichen Seiten (AC' und $C' A''$) und eine Basis mit $v \cdot t$. Die Zeit $t_{AC' A''}$, die das Licht für die Strecke $A C' A''$ benötigt, ist:

$$t_{AC' A''} = t_{hin} + t_{zurück} = t = \frac{2 \cdot l}{c}$$

Wenn wir das gleichschenklige Dreieck entlang der Höhe ($h = s$) in zwei teilen, erhalten wir zwei rechtwinklige Dreiecke, wodurch der pythagoräische Satz in Anwendung kommt:

$$l^2 = \left(\frac{v \cdot t}{2}\right)^2 + h^2 \rightarrow l = \sqrt{\left(\frac{v \cdot t}{2}\right)^2 + h^2}$$

Setzen wir nun l für $t_{AC' A''}$ ein, dann erhalten wir:

$$\begin{aligned} t &= \frac{2 \cdot l}{c} = \frac{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{v \cdot t}{2}\right)^2 + h^2}}{c} && / \cdot c \\ c \cdot t &= 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{v \cdot t}{2}\right)^2 + h^2} && / ^2 \\ c^2 \cdot t^2 &= 4 \cdot \left(\frac{v \cdot t}{2}\right)^2 + h^2 = (v \cdot t)^2 + (2 \cdot h)^2 && / - (v \cdot t)^2 \\ (c^2 \cdot t^2) - (v \cdot t)^2 &= (2 \cdot h)^2 \rightarrow t^2(c^2 - v^2) = (2 \cdot h)^2 && / \div (c^2 - v^2) \\ t^2 &= \frac{(2 \cdot h)^2}{(c^2 - v^2)} && / \sqrt{} \\ t &= \frac{2 \cdot h}{\sqrt{(c^2 - v^2)}} = \frac{2 \cdot h}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{c^2 - v^2}{c^2}\right)}} = \frac{2 \cdot h}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2 \cdot h}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{2 \cdot s}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \end{aligned}$$

Von unserer Berechnung (siehe vorherige Fußnote) wissen wir, dass $t_{AB' A''} = \frac{2 \cdot s}{c} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$ gilt – nun haben wir für

$t_{AC' A''} = \frac{2 \cdot s}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ erhalten. Vergleichen wir beide Zeiten miteinander, dann erhalten wir

$$t_{AC' A''} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = t_{AB' A''}$$

Für die Fälle $v < c$ gilt $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} < 1$, woraus $\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} > 1$ folgt, weshalb wir zu $t_{AC' A''} < t_{AB' A''}$ gelangen. Wie

also Cohn richtig bemerkt, ist der Weg $A C' A''$ kürzer als $A B' A''$. Ob man nun von einem Äther ausgeht oder nicht – wie in unserer Untersuchung – müsste es zu Interferenzerscheinungen des Lichtes kommen, da das Licht unterschiedlich lange Wege bestreitet.

Nach der Theorie müssten die Resultate $t_{AC' A''} < t_{AB' A''}$ sein; die Experimente zeigten jedoch $t_{AC' A''} = t_{AB' A''}$, weshalb sich natürlich die Frage stellt, wo der Faktor $\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ geblieben ist. Also musste im klassischen

Verständnis der Zeit ein Problem vorliegen. Würde die Erde ruhen ($v = 0$), dann hätten wir für $A C' A''$:

$$t_{Ruhe} = \frac{s}{c} + \frac{s}{c} = \frac{2 \cdot s}{c}$$

Das heißt, um den Betrag $\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ ist $t_{AB' A''}$ größer als t_{Ruhe} bzw. $t_{AC' A''} = \frac{t_{Ruhe}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$, was zugleich die Formel für die Zeitdilatation darstellt.

Interferenzbildes) hervorrufen (F.ig.4).⁹⁸ Der Versuch ist zum erstenmal ausgeführt worden von Michelson. In den neuesten Versuchen waren die Längen so bemessen, daß die Drehung ebenso wirken mußte wie eine Verlängerung des einen Lichtwegs um rund ein tausendstel Millimeter. Gemessen werden konnten mit aller Sicherheit Verlängerungen um ein Hundertstel dieses Betrages; aber auch dieses Hundertstel war nicht vorhanden. – Nach diesem sind noch eine Reihe anderer optischer und elektrischer Versuche angestellt worden, die an irdischen Vorgängen einen Einfluß der Translationsbewegung der Erde nachweisen sollten. Ausnahmslos war das Ergebnis negativ, obgleich der zu erwartende Effekt der Beobachtung nicht hätte entgehen können.“ (Cohn, 1920, pp. 8-9) (Cohn, 1913, pp. 7-8)

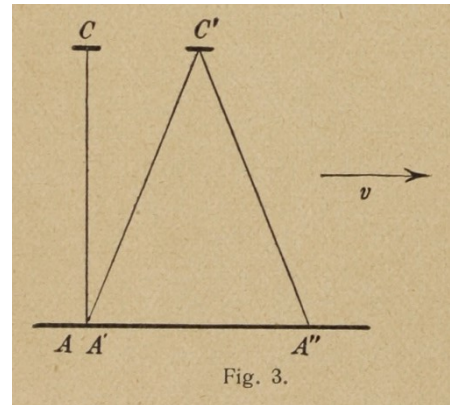


Figure 3: Quelle:

<https://ia800805.us.archive.org/35/items/physikalischesub00cohn/physikalischesub00cohn.pdf> [Zugriff am 26. September 2020].

Aus diesem Experiment von Michelson lassen sich im Grunde folgende Punkte schlussfolgern:

1. Das Nullresultat des Michelson-Experiments zeigt, dass man auf den Äther verzichten kann. (Da keine Effekte diesbezüglich gemessen wurden.)
2. Da die Drehung der Arme beim Michelson-Experiment gar keine Verschiebung der Interferenzerscheinungen gezeigt hat, ist offensichtlich zwischen (relativer) Ruhe und relativer Bewegung nicht unterscheidbar, wodurch das Relativitätsprinzip gilt. (Schließlich würden die Resultate gerade für eine ruhende Erde sprechen. Da die Erde sich aber unter anderem relativ zur Sonne bewegt, ist offensichtlich zwischen ruhender und unbeschleunigter Bewegung allgemein nicht unterscheidbar.)
3. Da die Wege des Lichts, aufgrund der relativen Bewegung der Erde, eigentlich verschieden lang sind, es sich aber keine Phänomene diesbezüglich zeigen, lässt sich vermuten, dass die Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen eine Konstante ist.

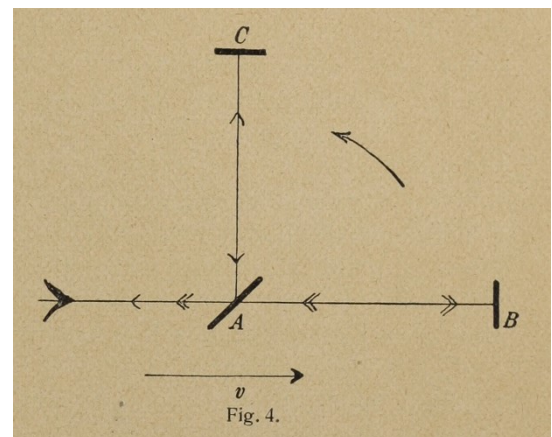


Figure 4: Quelle:

<https://ia800805.us.archive.org/35/items/physikalischesub00cohn/physikalischesub00cohn.pdf> [Zugriff am 26. September 2020].

⁹⁸ In einer Fußnote schreibt Cohn an dieser Stelle: „1) Bei A befindet sich eine Glasplatte, die den ankommenden Strahl nach B und C teilt und die reflektierten Strahlen wieder vereinigt.“ (Cohn, 1920, pp. 8, fn. 1)

4. Da die Zeiten, die das Licht für die verschiedenen Wege zurücklegt, nach der klassischen Physik unterschiedlich sein müssten, kann das klassische Verständnis der Zeit nicht richtig sein.
5. Aufgrund der Punkte 3 und 4 kann die Transformation der klassischen Physik (Galilei-Transformation) nicht ganz stimmen – (bzw. besitzt sie nur eine Gültigkeit für die Fälle $v \ll c$).

3.3.2.3. *Widerspruch zwischen den Experimenten von Fizeau und Michelson*

Zusammengefasst haben wir zwei wichtige Experimente bzw. Erfahrungen, die zur SRT führten:

1. Das Experiment von Fizeau – und später von Michelson und Morley wiederholt – schien dem Relativitätsprinzip zu widersprechen.
2. Das Ergebnis des Experimentes von Michelson – und später gemeinsam mit Morley – verhielt sich so, als ob sich die Erde sich in Ruhe befände. Dieses Experiment bestätigte das Relativitätsprinzip: Ruhe und (unbeschleunigte) Bewegung sind gleichwertig und können physikalisch voneinander nicht unterschieden werden.

Anschließend an das Michelson-Experiment weist Cohn deswegen darauf hin, an welcher Stelle das Problem genau lag:

„Alle diese Versuche verliefen also so, als ob das Relativitätsprinzip der Mechanik auch in der Elektrodynamik gälte, - während es nach dem Fizeausehen Versuch nicht gilt. Hier liegt ein Widerspruch vor, der unlösbar scheint.“ (Cohn, 1920, p. 9)

Wir werden später sehen, dass Einstein in seiner Rede ebenfalls genau auf diesen Widerspruch aufmerksam machen wird! Hierin ist also Einsteins „struggle“ zu finden. Dieser Knoten lässt sich entwirren, wenn man, auf Grund des Michelson-Experiments, am Relativitätsprinzip festhält und diesem eine noch fundamentalere Rolle zuweist, nämlich dass auch unser Verständnis von Raum, Zeit und Gleichzeitigkeit ebenso relativiert bzw. relationalisiert werden sollte. „Die Lösung“, erklärt Cohn daher weiter,

„, welche gegenwärtig die herrschende Arbeitshypothese der Physiker bildet⁹⁹, lautet: Das Relativitätsprinzip gilt tatsächlich auch optisch-elektrisch. Der mitbewegte Beobachter kann in keiner Weise seine gleichförmige Bewegung feststellen. Auch optisch-elektrisch also existiert kein ausgezeichnetes Bezugssystem, mittels dessen ‚absolute Bewegung‘ und ‚absolute Ruhe‘ definierbar wäre. Wenn der nichtmitbewegte Beobachter einen Einfluß der Bewegung für den mitbewegten Beobachter festzustellen vermeint, den dieser selbst nicht wahrnimmt, so liegt das daran, daß beide Beobachter mit verschiedenem Maß messen, daß es verschiedene Dinge sind, die sie als identische Zeiten, gleiche Zeitintervalle und gleiche Längen ansprechen. Dieses Relativitätsprinzip der Elektrodynamik, das als ‚Lorentz-Einsteinsches‘ bezeichnet wird, wollen wir jetzt entwickeln.“ (Cohn, 1920, p. 9)

3.3.2.3.1. Der Weg zur SRT: Synchronisieren der Zeit

Die Lichtausbreitung soll nach dem Michelson-Experiment und somit nach dem Relativitätsprinzip:

„[...] für den einen wie für den andern Beobachter gleichförmig nach allen Richtungen erfolgen und für beide Beobachter mit derselben Geschwindigkeit. Da erhebt sich zunächst die Frage: wie messen wir denn eine Geschwindigkeit? Wie messen wir die Zeitdauer eines Vorganges, der sich über ein auch räumlich ausgedehntes Gebiet erstreckt? Ein Schütze möge etwa die Zeit zu bestimmen haben zwischen dem Abfeuern und dem Einschlagen des Geschosses. Beurteilt er das Einschlagen nach dem Gehör, so muß er die Zeit berücksichtigen, die der Schall braucht; andernfalls würde er einen vollständig falschen Wert für die Flugdauer seines Geschosses erhalten. Das Ideal wäre ein zeitloses, unendlich schnell sich fortpflanzendes Signal. Aber das existiert nicht. Die schnellsten Signale, die wir kennen, sind Lichtsignale im leeren Raum, – praktisch gleich auch in der Luft. Und so haben wir denn auch kein genaueres Verfahren, Zeitwerte von Ort zu Ort mitzuteilen, als Lichtsignale.“
(Cohn, 1920, pp. 9-10)

Cohn fragt sich, wie wir Zeit anhand von physikalischen Signalen feststellen können.

Interessant ist, dass er hier die Schallwellen und die Lichtwellen miteinander vergleicht. Die Analogie zwischen Schall- und Lichtwellen zu verstehen und zu erklären, wo sie zu weit gehen, scheint ein wichtiger Zugang zur Speziellen Relativitätstheorie gewesen zu sein. Wie wir später noch sehen werden, war womöglich gerade das Dopplersche Prinzip für die

⁹⁹ In einer Fußnote fügt er hinzu: „Eine kurze Besprechung anderer denkbarer Lösungen s. S. 201f.“ (Cohn, 1920, pp. 9, fn. 1). Auf Seite 20 und 21 geht er verschiedene Möglichkeiten durch und fasst schließlich zusammen:

„Die in der Physik herrschende Anschauung gesteht keiner der hier erwähnten Annahmen Berechtigung zu. Dann aber bleibt kein Ausweg, als den Satz IV als richtig anzuerkennen. Aus ihm aber folgt alles das, was wir an unserem Modell erläutert haben und es folgt weiter als die allein mögliche Art, unsere optisch-elektrischen Erfahrungen einheitlich darzustellen, das Lorentz-Einsteinsche Relativitätsprinzip so, wie wir es in Satz II formuliert haben.“ (Cohn, 1920, p. 21)

Die verschiedenen Möglichkeiten geht Cohn deshalb durch, um zu zeigen, dass die Spezielle Relativitätstheorie als die einzige richtige Alternative zu betrachten ist.

Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie von außerordentlicher Bedeutung; weshalb die Geschichte der SRT mit jener des Dopplerschen Prinzips zusammenhängt.

Anschließend geht Cohn detaillierter ein, wie zwei Beobachter *A* und *B* durch Lichtsignale die Zeit synchronisieren können:

„Die Lichtgeschwindigkeit wird auf der Erde so bestimmt: Ein Lichtsignal wird von *A* nach *B* gesandt, in *B* gespiegelt und nach *A* zurückgesandt; die Gesamtzeit wird in *A* beobachtet und in die doppelte Entfernung *AB* dividiert. Es sind also Zeiten nur an einem Ort zu beobachten. Auf solche Weise konnte – das wurde soeben besprochen – mit äußerster Genauigkeit festgestellt werden, daß die Zeit für Hin- und Rückweg, oder mit andern Worten die mittlere Geschwindigkeit für Hin- und Rückweg unabhängig ist von der Richtung der durchlaufenen Strecke.“ (Cohn, 1920, p. 10)

Damit referiert Cohn allgemein auf das Michelson-Experiment, welches zeigte, dass das Licht, ob waagrecht oder senkrecht, dieselbe Zeit hin und zurück benötigte und somit den Anschein erweckte, dass die Erde in völliger Ruhe wäre. Da die Erde sich relativ bewegt und somit das Relativitätsprinzip gilt, ist es notwendig diese Erfahrung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit auf alle Inertialsysteme zu verallgemeinern:

„Wenn wir aber etwas aussagen wollen über die Geschwindigkeit auf dem Wege *AB*, so müssen wir eine Voraussetzung machen: daß das Licht sich mit der gleichen Geschwindigkeit von *A* nach *B* und von *B* nach *A* fortpflanzt. Diese Voraussetzung machen wir nun tatsächlich stets, ohne sie der Erwähnung wert zu halten: wir nehmen ganz allgemein an, das Licht pflanze sich nach allen Richtungen gleichförmig fort. Sobald wir das tun, haben wir aber auch sofort eine Methode von größter Genauigkeit, um Zeiten an verschiedenen Orten aufeinander zu beziehen: Der Synchronismus einer Straßburger und einer Kehler Uhr, die vorher auf gleichen Gang geprüft seien, kann und soll so hergestellt werden. Straßburg sendet zur Zeit 0 ein Lichtsignal nach Kehl, das dort gespiegelt wird; es sei zur Zeit 2 nach Straßburg zurückgekehrt. Die Uhr in Kehl geht dann richtig, wenn sie im Moment der Signalankunft die Zeit 1 zeigte, und ist andernfalls um die Differenz zu korrigieren.“

(Cohn, 1920, pp. 10-11)

Cohn zeigt mit diesen Worten, wie sehr die SRT eigentlich auf die Erfahrung zurückgreift. Wenn wir annehmen, dass das Licht von den Sternen – nämlich von Sternen, die eigentlich rein relativ bzw. relational zueinander und zur Erde stehen – sich in alle Richtungen gleichförmig ausbreitet und somit die relative Bewegung des Sterns auf die Geschwindigkeit des Lichtes keine Auswirkungen hat, dann gehen wir im Grunde davon aus, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant ist. Mit dieser Erfahrung lassen sich die Uhren synchronisieren. Anschließend bespricht er didaktisch die Phänomene der Zeitdilatation, der Längenkontraktion und der relativen Gleichzeitigkeit, indem er das Sonnen-System (bzw.

„Sonnenmenschen“) mit dem Erd-System (bzw. „Erdenmenschen“) vergleicht (Cohn, 1920, pp. 11-18).¹⁰⁰

3.3.2.3.2. Die SRT als eine theoretische Antwort auf die experimentellen Ergebnisse
Die SRT beruht auf zwei Prinzipien, die Einstein im Abschnitt „§ 2. Über die Relativität von Längen und Zeiten“ in folgender Form angibt:

„1. Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Translationsbewegung befindlichen Koordinatensysteme diese Zustandsänderungen bezogen werden.

2. Jeder Lichtstrahl bewegt sich im ‚ruhenden‘ Koordinatensystem mit der bestimmten Geschwindigkeit V , unabhängig davon, ob dieser Lichtstrahl von einem ruhenden oder bewegten Körper emittiert ist.“ (Einstein 1905, S. 895)

Die Ergebnisse der Experimente von Fizeau und Michelson lassen sich mit Hilfe dieser Prinzipien am einfachsten erklären und somit eine Brücke zwischen der Mechanik und der Elektrodynamik schlagen. Hypothesen, wie Äther usw., werden dazu nicht mehr benötigt. Diese zwei Prinzipien kann man auch als einen Satz zusammenfassen, in welchem man die Längen- und Zeitmessung sogleich miteinbezieht:

„„Ein Vorgang, der von S aus als gleichförmige Ausbreitung irgendeines Zustandes nach allen Richtungen mit der bestimmten Geschwindigkeit c erscheint, erscheint genau ebenso von S' aus; – und keines der beiden Systeme ist dem andern gegenüber bezüglich seiner Raum- und Zeitmessung ausgezeichnet.“ (Satz I.)“ (Cohn, 1920, p. 17)

Unsere einfache Vorstellung, dass das Licht sich von den Fixsternen in alle Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit ausbreitet, meint Cohn, können wir aufgrund des Relativitätsprinzips auch für unsere Erde annehmen, wodurch Raum- und Zeitmessungen sowie die Gleichzeitigkeit relativiert werden. Wenn wir also Längen und Zeiten messen, dann sind sie abhängig von dem System, in welchem wir uns bewegen. Durch die Relation bzw. relative Geschwindigkeit zu einem anderen System können wir auch verstehen, wie sie in ein anderes System übersetzt werden können. Cohn versucht nun den physikalischen Inhalt dieses Satzes (Satz I.) zu ergründen:

„„Es gibt ein System – das der Erde –, für welches die Lichtausbreitung im leeren Raum erfahrungsmäßig gleichförmig ist, sobald man nur identische Zeiten an verschiedenen Orten in geeigneter Weise definiert. Nach Satz I können wir fordern und erzwingen, daß der gleiche Vorgang auch in jedem andern System der Fixsterngruppe als gleichförmige Ausbreitung mit

¹⁰⁰ Bereits in (Cohn, 1904b, pp. 1411-1412) spricht er von himmlischer und irdischer Zeit.

der gleichen Geschwindigkeit c erscheint. Das kann aber nur so geschehen, daß Zeiten und Längen in den verschiedenen Systemen verschiedenes Maß haben, daß Gleichzeitigkeit und gleiche Längen in einem System nicht auch Gleichzeitigkeit und gleiche Längen in den anderen Systemen bedeuten. Die Beziehungen zwischen den Zeiten und Längen aller Systeme sind durch die Forderung völlig festgelegt. *Und sofern nun jeder Beobachter mit den Uhren und Maßstäben seines Systems mißt, verlaufen alle elektrischen – und im besonderen also alle optischen – Vorgänge so, daß kein Unterschied zwischen den verschiedenen Systemen merkbar wird.* (Satz II.)“ (Cohn, 1920, pp. 17-18)

Beispielsweise kann (aufgrund der Aberration des Lichtes) die Erdbewegung relativ zur Sonne oder relativ zum Fixsternsystem betrachtet werden, weshalb Cohn von einer Fixsterngruppe spricht und kommentiert den *Satz II* folgendermaßen:

„Die Prüfung dieser Behauptung gestaltet sich folgendermaßen: Alle unsere Erfahrungen beruhen auf Beobachtungen, die von einem bestimmten System der Fixsterngruppe aus gemacht sind, – von der Erde. Zu diesem System gehören *unsere* Maßstäbe, *unsere* Uhren. Mit diesen Maßstäben und Uhren legen wir zunächst fest, wie optischelektrische Erscheinungen in gegen die Erde ruhenden Körpern quantitativ beschaffen sind. Unser Prinzip nun behauptet: genau dieselben Gesetze findet der Bewohner eines anderen Systems für die Erscheinungen in *seinem* System, sofern er mit *seinen* Maßstäben und Uhren wertet, und es gibt uns zugleich an, wie wir umzuwerten haben, um zu erfahren, wie uns diese Erscheinungen entgentreten müssen.“ (Cohn, 1920, p. 18)

Das Relativitätsprinzip besagt deshalb nach Cohn, dass unbeschleunigte Systeme zu den Fixsternen gleichwertig sind – ob ein System in Ruhe oder in unbeschleunigter Bewegung ist, kann stets nur relativ gelten bzw. in Relation zu einem anderen System der Fixsterngruppe. Da die Physik auf Erfahrungstatsachen gründet, die man auch experimentell überprüfen muss, sollten sich auch physikalische Systeme letztendlich auf Erfahrungen beziehen. Das Michelson-Experiment hat deutlich gezeigt, dass für das System Erde das Relativitätsprinzip gilt, oder wie Cohn es ausdrückt:

„Trotz der Bewegung der Erde ist für irdische Vorgänge die Lichtausbreitung mit aller Genauigkeit gleichförmig für den Bewohner der Erde,‘ Oder, wie wir sagen wollen: ‚Für irdische Vorgänge ist die Erde ein ausgezeichnetes Bezugssystem,‘ (Satz III.)“
(Cohn, 1920, p. 19)

Cohn betont: „Dieses ist die Tatsache.“ (Cohn, 1920, p. 19) fügt aber zugleich hinzu:

„Alles Weitere ergibt sich erst, sobald wir folgenden Satz zugeben müssen:
,Dieselbe Lichtausbreitung im Vakuum, die gleichförmig relativ zur Erde ist, ist auch gleichförmig relativ zu den Fixsternen.‘ Oder allgemeiner: ‚Jede Lichtausbreitung im Vakuum, gleichgültig, welches ihre Quelle ist, ist gleichförmig relativ zu jedem System der Fixsterngruppe.‘ (Satz IV.)
Müssen wir ihn zugeben?“ (Cohn, 1920, pp. 19-20)

Da zusätzlich zu dem Michelson-Experiment auch die Aberration des Lichtes und das Experiment von Fizeau mit der SRT erklärbar sind, kann die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und somit eines der zwei Prinzipien der SRT, nach experimentellen Ergebnissen, ebenso universell angenommen werden:

„Die in der Physik herrschende Anschauung gesteht keiner der hier erwähnten Annahmen Berechtigung zu. Dann aber bleibt kein Ausweg, als den Satz IV als richtig anzuerkennen. Aus ihm aber folgt alles das, was wir an unserem Modell erläutert haben und es folgt weiter als die allein mögliche Art, unsere optisch-elektrischen Erfahrungen einheitlich darzustellen, das Lorentz-Einsteinsche Relativitätsprinzip so, wie wir es in Satz II formuliert haben.“ (Cohn, 1920, p. 21)

Die neue theoretische Physik, wie die SRT, hat sich daher, auf den Erfahrungen bzw. Ergebnissen der experimentellen Physik aufbauend, weiterentwickelt. Die SRT hat lediglich versucht den Widerspruch zwischen den Experimenten auf eine einfache Weise zu lösen, um die klassische Mechanik mit der Elektrodynamik zu vereinen.

Die Fundamente der SRT beruhen daher auf experimentellen Resultaten, wie beispielsweise auf jenen, welche die Frage der relationalen Bewegung der Erde zu den (Fix)Sternen zu beantworten versuchten:

„Ein Beispiel: Wir wissen, daß das Licht von einer (gegen uns) ruhenden, im Vakuum befindlichen Lichtquelle sich nach allen Richtungen gleichförmig mit der Geschwindigkeit $c = 300000 \text{ km/sec}$ fortpflanzt. Genau so muß also die Lichtausbreitung von einem Fixstern vor sich gehen für einen Bewohner des Fixsterns. Dann ergibt die Umwertung nach dem oben Gesagten: auch für uns erfolgt sie gleichförmig mit der Geschwindigkeit c . Aber sie ergibt weiter: die Richtung der Strahlung, die zu uns gelangt, fällt nicht in die Verbindungslinie Stern-Erde. Der Fixstern erscheint uns also nicht an seinem wahren Ort, sondern seitlich verschoben, und zwar gerade in der Richtung und in dem Betrage wie es die sogenannte Aberration uns tatsächlich zeigt.“ (Cohn, 1920, p. 18)

Es war die wissenschaftliche Diskussion über die Theorie der Aberration, die zum Fizeauschen-Experiment geführt hatte und genau das Experiment von Fizeau hat Einstein stets als das *Experiment Crucis* für die SRT betont. (Wie wir später sehen werden, spielen der Doppler-Effekt und die Aberration in Einsteins Arbeit eine wichtige Rolle.)

Aus diesem Grund wollen wir hier kurz das Thema Aberration besprechen. Wenn wir theoretisch annehmen, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum universell gilt und somit nicht abhängig von einem Inertialsystem ist, benötigen wir ein Experiment, in dem sich Sender (z.B. Fixsterne) und Empfänger (z.B. Erde) relativ zueinander bewegen. Hierzu ist es

notwendig, die Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie in eine mathematische Form zu bringen – Cohn macht das im Anhang, wobei er auf Einsteins Erläuterungen hinweist:

„Das Lorentz-Einsteinsche Relativitätsprinzip fordert bezüglich der Lichtausbreitung im leeren Raum:

1. daß diese Ausbreitung der *gleiche* Vorgang sei, – nämlich eine Ausbreitung in *Kugelwellen* mit der *bestimmten* Geschwindigkeit $c = 300\,000\text{ km/sek}$, – für alle Systeme der Fixsterngruppe.¹⁰¹

2. daß unter allen Systemen der Fixsterngruppe keines ausgezeichnet sei, daß man also mit völlig gleichem Recht einerseits das System S' betrachten dürfe als mit der Geschwindigkeit v gegen das System S in bestimmter Richtung bewegt, – andererseits das System S als mit der Geschwindigkeit v gegen das System S' in der entgegengesetzten Richtung bewegt.¹⁰²

Die mathematische Formulierung lautet¹⁰³: wenn $txyz$ Zeit und Koordinaten im System S , $t'x'y'z'$ Zeit und Koordinaten im System S' bedeuten, und S' gegen S die Geschwindigkeit v in der Richtung der wachsenden x und x' besitzt, wobei die y -Achse zur y' -Achse, die z -Achse zur z' -Achse parallel sein soll, dann muß

1. Die Gleichung $x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$ identisch sein mit der Gleichung $x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2$, und es müssen
2. die Gleichungen, welche $t'x'y'z'$ durch $txyz$ ausdrücken, sich verwandeln in die Gleichungen, welche $txyz$ durch $t'x'y'z'$ ausdrücken, sobald v mit $-v$ vertauscht wird.

Die Lösung dieser Aufgabe, die leicht zu verifizieren ist, lautet:

$$\begin{array}{ll} (a) \ t' = k \left(t - \frac{v}{c^2} x \right) & (b) \ t = k \left(t' + \frac{v}{c^2} x' \right) \\ (c) \ x' = k(x - vt) & (d) \ x = k(x' + vt') \\ y = y & \end{array}$$

wo

$$k^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2} \text{.} \text{'' (Cohn, 1920, p. 27)}^{104}$$

¹⁰¹ Das bedeutet, dass die Lichtgeschwindigkeit sich in allen Inertialsystemen den konstanten Wert c hat und sich isotrop bzw. in allen Richtungen gleichförmig ausbreitet. Cohn betrachtet für sein Beispiel zwei Systeme: S und S' . Für eine beliebige Kugelwelle, bei der die Lichtquelle im Zentrum ist, gilt:

$$\begin{array}{l} S: x^2 + y^2 + z^2 = c^2 \cdot t^2 \\ S': x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 \cdot t'^2 \end{array}$$

¹⁰² Die Bahnkurve (= Weltlinie) eines Körpers bzw. eines Inertialsystems in der Raumzeit ist stets linear, da es sich unbeschleunigt bewegt. Die Transformationen müssen natürlich die geradlinige gleichförmige Bewegung des eines Systems S in das S' übersetzen können. Das Relativitätsprinzip erfordert deshalb, dass die Transformation zwischen S und S' ebenfalls linear sein muss. Für den Fall $\vec{v} = (v, 0, 0)$, wie es Cohn weiter bespricht, ergibt sich der Ansatz:

$$x' = A \cdot x + B \cdot t, \ y' = y, \ z' = z, \ t' = C \cdot x + D \cdot t$$

Dabei sind A, B, C und D die Koeffizienten, die nur von der Relativgeschwindigkeit v abhängen können. Zudem ist ersichtlich, dass t nicht als eine Invariante der Transformation angenommen werden kann. Beispielsweise gilt in der Galilei-Transformation $t' = t$, weshalb die Zeit in der (Newtonschen) Mechanik eine absolute Größe darstellt hat, die nicht vom Beobachter abhängt. In der SRT ist das nicht mehr der Fall.

¹⁰³ Zur mathematischen Formulierung braucht man noch zwei Vorbedingungen:

- a) Die Nullpunkte der beiden Systeme für die Raumzeit sollen identisch sein.
- b) Eine Abstimmung der Richtungen: Wenn t wächst, soll auch t' wachsen, wenn x auf einer Strecke bei konstantem t wächst, dann soll auch x' wachsen.

Ohne diese Voraussetzungen gäbe es noch andere Lösungen der Gleichungen.

(Diese Anmerkung verdanke ich Bernhard Baumgartner.)

¹⁰⁴ Wir wollen hier ebenso versuchen, Cohn's Überlegungen in einer alternativen Weise zu erläutern – es gilt:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 \cdot t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 \cdot t^2$$

Anhand dieser Gleichungen erklärt Cohn weiter, weshalb die konstante Lichtgeschwindigkeit physikalisch dazu führt, dass der Sonnenmensch im Gegensatz zum Erdenmensch zu unterschiedlichen Längen und Zeiten gelangt (Cohn, 1920, pp. 27-28). In seiner Erklärung sind daher in der Relativitätstheorie stets relationale bzw. sich zueinander relativ bewegend Systeme von Interesse – das lässt sich natürlich auch im geschichtlichen Zusammenhang so verstehen:

Setzen wir nun in diese Gleichung x', y', z' und t' ein, dann können wir die Bedingungsgleichungen für A, B, C und D lösen – siehe die vorherige Fußnote. Aufgrund der relationalen Geschwindigkeit v von S' zu S haben wir für den Koordinatenursprung S' ($x' = 0$) und S ($x = v \cdot t$) und erhalten:

$$0 = A \cdot v \cdot t + B \cdot t$$

$$B = -A \cdot v$$

Unser Ansatz lautet daher:

$$x' = A \cdot (x - v \cdot t)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = C \cdot x + D \cdot t$$

Aufgrund der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gilt:

$$x'^2 - c^2 \cdot t'^2 = x^2 - c^2 \cdot t^2$$

$$(A \cdot x + B \cdot t)^2 - c^2 (C \cdot x + D \cdot t)^2 = x^2 - c^2 \cdot t^2$$

$$0 = x^2 (A^2 - c^2 \cdot C^2 - 1) + 2 \cdot x \cdot t \cdot (A \cdot B - c^2 \cdot C \cdot D) + t^2 \cdot (B^2 - c^2 \cdot D^2 + c^2)$$

Da die Transformationsgleichung für beliebige Orte (x) und Zeiten (t) gelten müssen, erhalten wir daher drei Gleichungen für drei Unbekannte A, C und D :

$$A^2 - c^2 \cdot C^2 - 1 = 0$$

$$A \cdot B - c^2 \cdot C \cdot D = 0$$

$$B^2 - c^2 \cdot D^2 + c^2 = 0$$

Die Auflösung ergibt:

$$A = \gamma \quad C = -\frac{\beta}{c} \cdot \gamma \quad D = \gamma$$

, wobei $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ und $\beta = \frac{v}{c}$ darstellen.

Cohn gibt für γ die folgende Definition $k^2 = \frac{c^2}{c^2-v^2}$ an – formen wir sie um in

$$k^2 = \frac{c^2}{c^2-v^2} = \frac{c^2}{c^2 - \frac{c^2 \cdot v^2}{c^2}} = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{1-\beta^2} \quad \rightarrow \quad k = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

dann sehen wir, dass wir zum selben Resultat gelangen. Die relativistischen Transformationsgleichungen für die Raum und die Zeit ergeben daher:

$$x' = \gamma \cdot (x - v \cdot t)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma \cdot \left(-\frac{\beta}{c} \cdot x + t\right)$$

Einen alternativen didaktischen Weg, wie man zu diesen Lorentzgleichungen gelangen kann, bietet Franz Embacher, wo er auch auf die Definition der Gleichzeitigkeit eingeht (Embacher, kein Datum).

Aus den relativistischen Transformationsgleichungen ist ersichtlich, dass, wenn $v \ll c$, dann $\beta \rightarrow 0$ und $\gamma \rightarrow 1$ gehen, wir zu den Galileitransformationen (der klassischen Mechanik) gelangen würden. Die relativistischen Transformationen sind daher die einfachste Vorgehensweise die Transformationen so zu erweitern, dass sie einerseits die Erfahrungen der Galileitransformationen als auch die neuen Phänomene miteinschließen: Sie zeigen nämlich, dass $\beta \leq 1$ gelten muss, da ansonsten γ imaginär werden würde – das bedeutet, dass Geschwindigkeiten (von Inertialsystemen), die größer wären als die Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum), physikalisch keinen Sinn ergeben bzw. der experimentellen Erfahrung (gegenwärtig) widersprechen. (Auf das theoretische Konzept der Tachyonen, die experimentell bis jetzt nicht bestätigt werden konnten, sind wir an dieser Stelle nicht mehr eingegangen.)

Wie bereits besprochen, war es eigentlich die Beziehung der Fixsterne zur Erde, die beantwortet werden musste. Genauer musste die Aberration des Lichtes von den Sternen verstanden werden. Fresnels Theorie des teilweise mitgeschleppten Äthers, welche die Aberration erklären konnte, fand durch das Experiment von Fizeau eine Unterstützung. Gerade dieses Experiment hat Einstein zeitlebens als Experiment Crucis für die Spezielle Relativitätstheorie betont und dessen Einfluss auf ihn. So gesehen überrascht es nicht, dass Cohn genau mit der Erklärung dieses Experiments sein Buch schließt, um das Relativitätsprinzip dem Leser näher zu bringen. Dabei beginnt er damit (1.) die Aberration des Lichtes zu erklären, um anschließend (2.) das Fizeausche Experiment näher zu betrachten:

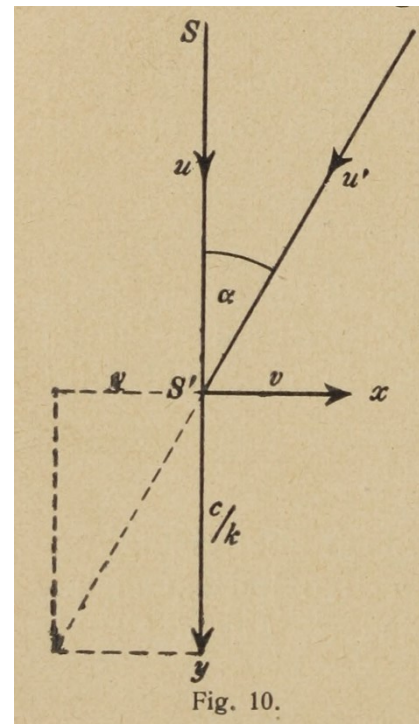


Figure 5: Quelle:

<https://ia800805.us.archive.org/35/items/physikalischesub00cohn/physikalischesub00cohn.pdf> [Zugriff am 26. September 2020]

„1. (Fig. 10.) Gegen einen strahlenden Fixstern (S) bewege sich die Erde (S') mit der Geschwindigkeit v in der Richtung x senkrecht zur Verbindungslinie y .¹⁰⁵ Wir fragen nach der Geschwindigkeit und Richtung der Strahlung, die der Erdbewohner beobachtet. Für den Fixsternbewohner ist $u_x = 0$, $u_y = c$, $u_z = 0$. Daraus $u'_x = -v$, $u'_y = \frac{c}{k}$, $u'_z = 0$.

Also $u'^2 = v^2 + \frac{c^2}{k^2} = c^2$, oder $u' = c = u$. Aber (s. Fig. 10) $\tan \alpha = \frac{u'_x}{u'_y} = k \frac{v}{c}$.

α , Aberrationswinkel, ergibt sich in der *elementaren* Darstellung aus $\tan \alpha = \frac{v}{c}$. Die Beobachtung kann zwischen den beiden Werten nicht entscheiden.“ (Cohn, 1913, p. 24) (Cohn, 1920, p. 29)

In Cohns Beispiel haben wir zwei Bezugssysteme: S und S' . Da die Erde sich mit der Geschwindigkeit v senkrecht zur Verbindungslinie (y) – zwischen dem Bezugssystem Fixstern (S) und dem Beobachter auf der Erde (S') – bewegt, ist die (stellare) Aberration am größten. Sehen wir uns zuerst den oberen Teil der Zeichnung an. Für den Winkel Tangens erhalten wir:

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}} = \frac{v}{c}$$

¹⁰⁵ Hier erklärt Cohn in einer Fußnote:

„Auf diesen Fall wollen wir uns beschränken, und wir wollen zugleich, zur Vereinfachung der Darstellung, von der Bewegung des ganzen Sonnensystems gegen den Fixstern absehen; v bedeutet dann die Geschwindigkeit der Erde in der Bahn um die Sonne.“ (Cohn, 1920, p. 29; fn. 1)

Nun betrachten wir den unteren Teil der Zeichnung, wo die Beobachtung von dem Bezugssystem der Erde (S') aus beschrieben wird. Wenn wir annehmen, dass das Licht sich (vom Fixstern) in alle Richtungen mit der konstanten Geschwindigkeit c ausbreitet, dann wissen wir, dass $u' = c = u$ gilt. u' ist daher die Hypotenuse. Aufgrund des Pythagoräischen Lehrsatzes ($Hypotenuse^2 = Gegenkathete^2 + Ankathete^2$) erhalten wir:

$$c^2 = v^2 + \frac{c^2}{k^2}$$

Insofern wird ersichtlich, weshalb für die Ankathete $\frac{c}{k}$ gegeben ist. (Da die Hypotenuse größer sein muss als die Ankathete, ist auch verständlich, dass $u' = c > \frac{c}{k}$ gilt; wobei k eine dimensionslose Größe sein muss, da sonst die Dimension (Geschwindigkeit) nicht mehr stimmen würde. Formen wir nun die Gleichung nach k um, dann erhalten wir:

$$\begin{aligned} c^2 &= v^2 + \frac{c^2}{k^2} && / -v^2 \\ c^2 - v^2 &= \frac{c^2}{k^2} && / \cdot k^2 \\ k^2 \cdot (c^2 - v^2) &= c^2 && / \div (c^2 - v^2) \\ k^2 &= \frac{c^2}{(c^2 - v^2)} = \frac{c^2}{c^2 - \frac{c^2 \cdot v^2}{c^2}} = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = \frac{1}{1 - \beta^2} && / \sqrt{} \\ k &= \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma \end{aligned}$$

k ist somit der dimensionslose Lorentz- bzw. der Gammafaktor (γ), den wir mit Hilfe von Cohn einfach einsehen konnten. Der Winkel Tangens für das Bezugssystem (S') ist deshalb gegeben durch:

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}} = \frac{v}{\frac{c}{k}} = k \cdot \frac{v}{c}$$

Für den Fall, dass $c \gg v$, erhalten wir $\beta \rightarrow 0$ und somit $k \approx \frac{1}{\sqrt{1-0}} = \frac{1}{\sqrt{1}} = 1$ bzw. $k \rightarrow 1$, wodurch wir in gute Näherung zu

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}} = k \cdot \frac{v}{c} \approx 1 \cdot \frac{v}{c} \approx \frac{v}{c}$$

gelangen, da die Geschwindigkeit der Erde tatsächlich um viele Größenordnungen kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit. Insofern wird Cohns Äußerung „Die Beobachtung kann zwischen den beiden Werten nicht entscheiden.“ (Cohn, 1913, p. 24) verständlich. Bereits einige Seiten zuvor geht er auf das Thema Aberration ein (Cohn, 1913, p. 16) und erläutert:

„Eine andere Frage aber ist, wie weit das Prinzip [= Relativitätsprinzip, Anmerkung von E.S.] durch unsere Erfahrungen *bewiesen* ist. Da ist zu bemerken: die Umwertung enthält zwei Schritte, erstens die von Punkt zu Punkt wechselnde *Verschiebung* der Zeitskalen, zweitens die Veränderung der *Zeitintervalle* und *Maßstäbe*. Aber diese beiden Schritte wirken in sehr verschiedenem Maß zum Resultat mit. Das hängt so zusammen: Das Verhältnis der

Körpergeschwindigkeit w zur Lichtgeschwindigkeit c ist stets ein sehr kleiner Bruch, – etwa $\frac{1}{10\,000}$ im Fall der Aberration, und weniger als $\frac{1}{30\,000\,000}$ im Fall des strömenden Wassers. Mit diesem Bruch vergleichbar – ‚von dieser Größenordnung‘ – sind die verhältnismäßigen Abweichungen, die die *Zeitverschiebung* hervorruft; sie sind mit den feinsten optischen Hilfsmitteln noch meßbar. Die *Intervall-* und *Maßstabsänderungen* aber haben nur Abweichungen von der Ordnung $(w/c)^2$, also $\frac{1}{100\,000\,000}$ bzw. $\frac{1}{900\,000\,000}$ zur Folge, und diese entziehen sich jeder Wahrnehmung.“ (Cohn, 1913, p. 16)

Wie wir bereits lesen konnten, erklärt Cohn ebenso, dass sich $\tan(\alpha) = \frac{v}{c}$ von der „elementaren Darstellung“ aus „ergibt“ (Cohn, 1913, p. 24) – gemeint ist wahrscheinlich die *Elementargeometrie* bzw. die euklidische Geometrie. Detailreich (und didaktisch) erklärt (Cohn, 1913, pp. 11-15) und berechnet (Cohn, 1913, pp. 22-23) er die Angaben der Uhren und Längen vom „himmlischen“ Bezugssystem ins „irdische“ und umgekehrt. Obwohl die euklidische Geometrie in einem Bezugssystem (nach der Speziellen Relativitätstheorie) elementar ist und somit gilt, sind es sozusagen die physikalischen Uhren und Längenmessungen, welche die physikalischen Zeitintervalle und Maßstäbe angeben und somit auch die Definition der Winkel.

Cohn zeigt auf diese Weise, wie man anhand der relationalen bzw. relativen Beziehung zwischen Erde und Sonne zur relativistischen Aberration gelangt, welche im Grenzfall ebenso mit den experimentellen Daten in Übereinstimmung ist.¹⁰⁶ Dazu ist aber die Annahme eines Äthers, der nach der Hypothese von Fresnel teilweise vom Teleskop mitgeschleppt wird usw., eben gar nicht nötig¹⁰⁷ – wichtig ist nur, dass aufgrund der relativistischen

¹⁰⁶ Eine knappe Darstellung von Cohns Erläuterung:

Aufgrund der relativistischen Transformation können wir zur relativistischen Geschwindigkeitsaddition jener Koordinaten gelangen:

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - v \cdot dt}{dt - v \cdot \frac{dx}{u_x}} = \frac{\frac{dx}{dt} - v}{1 - v \cdot \frac{dx}{dt}} = \frac{u_x - v}{1 - v \cdot u_x}$$

$$u'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{dt - v \cdot \frac{dx}{u_x}} = \frac{\frac{dy}{dt} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - v \cdot \frac{dx}{dt}} = \frac{u_y \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - v \cdot u_x} = \frac{u_y}{\gamma \cdot (1 - v \cdot u_x)}$$

Der Winkel α ist nun gegeben durch:

$$\tan(\alpha) = -\frac{u'_x}{u'_y} = -\frac{\frac{u_x - v}{1 - v \cdot u_x}}{\frac{u_y}{\gamma \cdot (1 - v \cdot u_x)}} = -\frac{\gamma \cdot (1 - v \cdot u_x) \cdot (u_x - v)}{(1 - v \cdot u_x) \cdot u_y} = -\frac{\gamma \cdot (u_x - v)}{u_y}$$

Da (nach dem Sonnensystem) $u_x = 0$ und $u_y = c$ gilt, erhalten wir:

$$\tan(\alpha) = -\frac{\gamma \cdot (u_x - v)}{u_y} = \gamma \frac{v}{c}$$

Für den Fall, dass $v \ll c$ kommen wir in den klassischen Fall:

$$\tan(\alpha) = \frac{v}{c}$$

¹⁰⁷ Im Abschnitt „**Die Optik und die Frage der absoluten Bewegung der Erde**“ (Bergia, 1985, pp. 142-156) geht Silvio Bergia detailliert auf die Entwicklungen in der Physikgeschichte ein – nur ein paar Punkte seien hier aufgezählt:

Transformation eine relativistische Geschwindigkeitsaddition erfolgt. Mit dieser Erkenntnis lässt sich der Widerspruch zwischen dem Experiment von Fizeau und dem Michelson-Experiment lösen. Auch beim Fizeau-Experiment spielt nicht der Äther eine Rolle, sondern die relativistische Geschwindigkeitsaddition, wie Cohn erklärt:

„2. Durch eine in der Richtung x mit der Geschwindigkeit w strömende Flüssigkeit (S) werde Licht in gleicher Richtung gesandt. Seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist in S : $u_x = q = \frac{c}{n}$, wo n der Brechungsindex: $u_y = u_z = 0$. Folglich für den ruhenden Beobachter in S' : ($v = -w$)

$$q' = u'_x = \frac{q + w}{1 + \frac{w \cdot q}{c^2}}$$

oder da $\frac{w}{c}$ sehr klein ist, auch

$$q' = q + w - w \frac{q^2}{c^2} = q + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) w.$$

Dies ist aber das Ergebnis der Fizeauschen Versuche.“ (Cohn, 1920, pp. 29-30)

Das Problem lag also darin zur relativistischen Transformationsgleichung zu gelangen. Dafür musste unser klassisches Verständnis der Raum- und Zeitmessung dem relativistischen weichen. Von der relativistischen Transformation gelangte man anschließend zu der relativistischen Geschwindigkeitsaddition, womit man die theoretischen Widersprüche in den Experimenten in einer einfachen Form auflösen konnte.

-
- 18. Jhdt.: Man versuchte mit der Korpuskel-Theorie des Lichtes die stellare Aberration des Lichtes zu erklären (Bergia, 1985, p. 143).
 - 19. Jhdt.: Fresnel stellte seine Theorie auf, dass der Äther (zum Teil) von Körpern mitgeschleppt wurde und führte den Mitführungskoeffizienten ein: $f = 1 - \frac{1}{n^2}$.
Damit konnte er die Aberration des Lichtes von den Sternen ebenfalls erklären. Da aber nach dieser Theorie die Erde den Äther ebenso mitschleppen würde, entstand nun eine Diskussion, über die Möglichkeit / Unmöglichkeit der Messung der *absoluten* Bewegung der Erde gegenüber dem Äther (Bergia, 1985, pp. 146-147).
 - 19. Jhdt.: Die Ergebnisse vom Experiment von Fizeau (1851) und Michelson und Morley (1886) stimmten mit den Voraussagen von Fresnel überein (Bergia, 1985, p. 149).
 - 19. Jhdt.: Maxwell (1879) schlug ein Experiment vor, womit man die Geschwindigkeit des Sonnensystems gegenüber dem Äther feststellen könnte (Bergia, 1985, pp. 150-151).
 - 19. Jhdt.: Michelson 1881 erdachte ein Experiment, wie man den Ätherwind messen und somit die absolute Bewegung der Erde gegenüber dem Äther feststellen könnte – das Experiment brachte ein negatives Resultat: ein Ätherwind war nicht messbar. Das Experiment wurde mehrmals wiederholt. (Michelson selbst schloss aus den Experimenten jedoch, dass damit vor allem Fresnels Theorie widerlegt worden sei und nicht das Konzept des Äthers an sich.) (Bergia, 1985, pp. 151-155)

3.4. Zusammenfassung der Ergebnisse und die daraus resultierenden Forschungsfragen für die nächsten Abschnitte

3.4.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

3.4.1.1. E. Machs publizierte Äußerungen zu Einsteins Relativitätstheorie

Wie bereits Gereon Wolters feststellen konnte (Wolters, 1987, pp. 167-171), hat sich Mach drei Mal in seinen Publikationen zur Relativitätstheorie geäußert, und zwar in dem Zeitraum zwischen 1909 und 1910:

Die erste publizierte Äußerung Machs zur Relativitätstheorie finden wir in der zweiten Auflage seines Buches *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit* (Mach, 1909). Bereits in der ersten Auflage (Mach, 1872) sind die einflussreichen Konzepte von Mach, wie die Definition der Masse, die Denkökonomie usw. zu finden – siehe (Jost, 1995, p. 59). Aus dem Vorwort zur zweiten Auflage ist deutlich zu erkennen, dass Mach sie aufgrund der Angriffe von Planck herausgab (Mach, 1909, p. 1*) – siehe auch (Mach, 1909, p. iv). Zudem erklärt er, dass er bereits in diesem Buch auf das *Prinzip der Relativität* losgesteuert ist, und verweist auf Minkowskis Arbeit über *Raum und Zeit* (Mach, 1909, pp. 59-60), was sein Interesse an der speziellen Relativitätstheorie klar hervorhebt. Mach unterstützt somit den Forschungsstand nicht nur, sondern sieht sich selbst als einen Wegbereiter. Dass er eine besondere Sympathie für Einstein und seine Theorie hegte, zeigt auch der Umstand, dass er Einstein die zweite Auflage (Mach, 1910a) persönlich gesendet hat, wodurch eine freundliche Korrespondenz zwischen ihnen begann. Einstein versichert Mach in seinem Brief, dass Mach auf die jüngere Physiker-Generation erkenntnistheoretisch einen Einfluss hatte und dass sogar seine Gegner, wie Planck, früher Machianer waren.

Die zweite publizierte Äußerung ist in Machs Stellungnahme „Die Leitgedanken meiner naturwissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen“ (Mach, 1910a) (als Bezugnahme auf Plancks Angriff) zu finden. Nun wird er deutlicher und würdigt, dass man durch die Arbeiten von „Lorentz, Einstein, Minkowski“ bei den Problemen zur „*Materie, Zeit und Raum*“ (Mach, 1910a, p. 605) in der Physik weitergekommen ist.

Bei seiner dritten Äußerung in „Sinnliche Elemente und naturwissenschaftliche Begriffe“ (1910) erklärt er, dass bezüglich des Verständnisses von Raum und Zeit „die Arbeiten von A. Einstein und H. Minkowski wesentliche Fortschritte“ (Mach, 1910b, pp. 264, fn. 1) erzielt haben. Bei dieser letzten, noch zu Lebzeiten publizierten, Äußerung wird unmissverständlich klar, dass er den Fortschritt tatsächlich in Einsteins Spezieller Relativitätstheorie sieht.

3.4.1.2. *Einsteins Erwähnung von E. Cohn*

Mit Machs Ansichten – wie dem Ignorieren des Äther-Konzeptes, der Denkökonomie und der Kritik an der Mechanik – hatte er einen Einfluss (unter anderem) auf den theoretischen Physiker (deutsch-jüdischer Abstammung) Emil Cohn. Obwohl wir im entsprechenden Abschnitt aufgrund unserer Vergleiche und Analysen gezeigt haben, dass Einstein Cohns Arbeiten wohl kannte und diese ihn in seinen Studien voranbrachten, konnten wir keinen direkten Beleg dafür angeben, dass Einstein Cohns Arbeiten tatsächlich kannte.

Da er in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) auf gar keine Quellen hinweist, konnten wir nur seine Schriften erst nach 1905 in Betracht ziehen. In seiner Schrift „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j), haben wir gesehen, dass Einstein bei Anwendungen der Grundgleichungen in einer Fußnote auf die Arbeiten von Cohn hinweist, genauer: auf „die einschlägigen Arbeiten von E. Cohn“ (CPAE 2; 47; p. 435, fn. 1). (Auch haben wir uns die Vorgeschichte der Arbeit „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) etwas genauer angesehen, wo Einstein in einem Brief (am 25. September 1907) (CPAE 5; 58; p. 74) ebenfalls Cohn erwähnt.)

Zudem wissen wir, dass Einstein eine Kopie der Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“ (Cohn, 1904a) von Cohn in seinem Besitz hatte (CPAE 2; 47; p. 485, fn. 8). Da Einstein damals (1907) in seinen Korrespondenzen auf Cohn hinweist, er jedoch nachweislich auch keinen Kontakt zu Cohn hatte, ist es wahrscheinlich, dass Cohns Arbeit ihm nicht empfohlen wurde, sondern er diese bereits selbst kannte.

Außerdem: wenn Einstein die Kopie des ersten Teils aufbewahrte, dann wird er den zweiten Teil (Cohn, 1904b) ebenfalls gekannt haben, welcher im selben Buch abgedruckt wurde.

3.4.1.3. Cohns Verteidigung der SRT als Andenken an Mach

Einsteins Interesse an Cohns Arbeit ist jedoch nicht nur aufgrund seiner Untersuchungen zur Elektrodynamik verständlich – Cohn und Einstein teilen außerdem einen weiteren Umstand: beide vom Machschen Denken stark beeinflusst. Wenn wir Cohns Arbeit lesen, dann erkennen wir viele von Machs Ideen wieder – siehe (Janssen & Stachel, 2004, p. 32).

Da Mach sich in seinen Publikationen (1909-1910) zu Lebzeiten als Unterstützer der Relativitätstheorie von Einstein positioniert hat und sich selbst als einen Wegbereiter ansah, würde es naheliegen, dass Cohn diese Position übernehmen müsste. Wir konnten zeigen, dass es hier eine Forschungslücke gibt – siehe beispielsweise (Sextl, 1985) (Janssen & Stachel, 2004) (Miller, 1998) usw. – nämlich, dass man sich Cohns Buch *Physikalisches über Raum und Zeit* (Cohn, 1913) (Cohn, 1920) nicht genauer angesehen hat.

Der Inhalt dieses Werks (Cohn, 1913) (Cohn, 1920), legt sowohl eine Verteidigung der Speziellen Relativitätstheorie Einsteins als auch Machs Ansicht dar. Einsteins Wertschätzung Cohns Buch gegenüber ist offensichtlich, da er in seiner Schrift „Die Relativitätstheorie“ (1915) (im Teil, in welchem er die Spezielle Relativitätstheorie bespricht) nur eine einzige Literaturquelle zu diesem Thema angibt:

„Eine vorzügliche Darstellung des Gegenstandes enthält: *Physikalisches über Raum und Zeit* von E. COHN, 2. Aufl. B. G. Teubner. 1913.“ (CPAE 4; 21; p. 546)

In gewissem Sinne ist diese Darstellung von Cohn für Einstein also konkurrenzlos. Der Grund, weshalb Einstein hier nur auf Cohns Buch hinweisen möchte, wird, wenn wir die Gesamtsituation betrachten, vermutlich klarer: Einstein möchte auf die wichtige Rolle Machs hinweisen und ihn ebenfalls würdigen. Dass dies keine gewagte Vermutung ist, bezeugt, dass Einstein im Zeitungsartikel „Vom Relativitäts-Prinzip“ (April 1914) auf zwei Verteidiger Machs hinwies: Cohn und Petzoldt. (Petzoldts Erläuterungen waren physikalisch jedoch nicht ganz richtig.) Das Buch hat Cohn Ernst Mach gewidmet (Cohn, 1913, p. 0 (Vorsatz)) (Cohn, 1920, p. 3) – offensichtlich sieht Cohn zwischen Machs Ansichten und der SRT keinen Widerspruch – man könnte sogar sagen: die kritisch-historische Erarbeitung der SRT dient dem Andenken Machs.

Das Buch ist somit ein sehr wichtiges Dokument für die Wissenschaftsgeschichte, unter anderem deswegen, weil man anhand seiner Geschichte erkennt, wie die Erkenntniskultur, die Machs Gedanken mit der Relativitätstheorie in Verbindung zu bringen versuchte, begann allmählich zu verklingen – das Vermächtnis von Mach ging schließlich immer mehr in Vergessenheit. Da beispielsweise im Jahre 1921 das gefälschte Vorwort *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) erschien, wo Ernst Mach als Relativitätstheorie-Gegner präsentiert wurde, gab es verständlicherweise keine fünfte Auflage des Buches. (Die Folgen davon sind bis heute noch erkennbar – vergleiche die zwei Buchbeschreibungen des Springer Verlags (Cohn, 1920, p. 0 (Vorsatz)) und „Über dieses Buch“ (Springer Online, kein Datum).

3.4.1.4. *Entstehungsgeschichte der SRT nach Cohns Ansicht*

Nach Cohn sollte man die Naturvorgänge in eine quantitative Beziehung bringen – das ist die Aufgabe des Experimentators – und anschließend den Ergebnissen den einfachsten Ausdruck geben – das ist wiederum die Aufgabe des theoretischen Physikers (Cohn, 1920, p. 5). Dabei sollte der theoretische Physiker sich jedoch von der Denkökonomie leiten lassen (Cohn, 1904b, p. 1404) – bereits in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme. II.“ hat er betont: „es mag sein, dass sich gleichwohl ein einfacherer Ansatz finden lässt, der den Tatsachen ebenfalls gerecht wird“ (Cohn, 1904b, p. 1404); gemeint ist einfacher als seine eigene Theorie. Aufgrund von E. Machs Unterstützung der SRT und seiner eigenen Einschätzung ist Cohn offensichtlich zu dem Schluss gekommen, dass Einsteins Theorie eine bessere bzw. einfachere ist, welche die gegenwärtigen Probleme lösen kann und die Tatsachen in Übereinstimmung bringen kann. Dafür mussten jedoch nahezu dogmatische Konzepte (der klassischen Physik) aufgegeben werden. Wie bereits der Titel *Physikalisches über Raum und Zeit* (Cohn, 1913) (Cohn, 1920) seines Buches verrät, sieht Cohn – der den Äther bereits selber in seinen Theorien negierte – die wichtige Veränderung durch die SRT im Verständnis von Raum und Zeit: „Wir haben lernen müssen, daß dem nicht so ist, und mit dieser Erkenntnis hat unser Raum- und Zeitbegriff sich gewandelt.“ (Cohn, 1920, p. 5) Wie wir konzeptionell zu dieser Ansicht gelangen können, legt der Inhalt von Cohns Buch dar.

3.4.1.4.1. Das Relativitätsprinzip der Mechanik und das Machsche Forschungsprogramm

Nach Ernst Mach sind die Fixsterne als Bezugssysteme anzunehmen – die Bewegung und die Beschleunigung eines Körpers sind somit relativ zu diesem System. Deshalb kann man Inertialsysteme als unbeschleunigte Systeme zu den Fixsternen definieren. (Aber auch die beschleunigten Systeme sind beschleunigt zur Außenwelt, wie die Erfahrung zeigt (Cohn, 1920, pp. 6-7).) Diese Inertialsysteme bilden, theoretisch gesehen, eine Gruppe, die Cohn daher als eine Fixsternengruppe bezeichnet – siehe dazu (Cohn, 1920, pp. 5-6) – und erlauben uns, die Gesetze in einer einfachen Form anzugeben. Somit wäre das klassische Relativitätsprinzip nach Cohn anhand der Erfahrung theoretisch erklärt.

Dieses klassische Relativitätsprinzip galt jedoch für die klassische Mechanik – ob dieses Prinzip ebenfalls für die Elektrodynamik gelten konnte, war bis zur SRT nicht klar. Zur Verwirrung trugen vor allem zwei experimentelle Resultate bei, die sich zu widersprechen schienen. Den Widerspruch zwischen diesen beiden Experimenten zu lösen, bringt uns zur SRT, meint Cohn...

3.4.1.4.2. Die Widersprüche in den Experimenten vor der Speziellen Relativitätstheorie

Ob das Relativitätsprinzip aus der Mechanik auch für die Elektrodynamik gilt, war geschichtlich nicht ganz klar (Cohn, 1920, p. 7). Zusammengefasst gab es zwei wichtige Experimente bzw. Erfahrungen, die zu einander in Widerspruch zu stehen schienen:

1. Das Experiment von Fizeau (1851) – und später von Michelson und Morley (1886) wiederholt – schien dem Relativitätsprinzip zu widersprechen.
2. Die Ergebnisse des Experimentes von Michelson (1881) – und später gemeinsam mit Morley (1887) – legten nahe, dass sich die Erde in Ruhe befände. Diese Experimente schienen das Relativitätsprinzip zu bestätigen: Ruhe und (unbeschleunigte) Bewegung (der Erde) sind gleichwertig und können physikalisch voneinander nicht unterschieden werden.

Cohn bringt es daher auf den Punkt: „Hier liegt ein Widerspruch vor, der unlösbar scheint.“ (Cohn, 1920, p. 9)

Er lässt sich lösen, wenn man, auf Grund des Michelson-Morley-Experiments (1887), am Relativitätsprinzip festhält, eine absolute Bewegung oder eine absolute Ruhe negiert und ebenso das Verständnis von Raum, Zeit und Gleichzeitigkeit, die auf ein Inertialsystem bezogen werden, relativiert bzw. relationalisiert (Cohn, 1920, p. 9). Aufgrund des Michelson-Experiments wird klar, dass das Relativitätsprinzip gilt und dass die Lichtgeschwindigkeit für alle Inertialsysteme konstant sein muss. „Dieses ist die Tatsache.“ (Cohn, 1920, p. 19), betont Cohn.

Da zusätzlich zu dem Michelson-Experiment (1881/1887) auch die Aberration des (Sternen)Lichtes und das Experiment von Fizeau (1851) mit der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erklärbar sind, kann ihre universelle bzw. konstante Natur angenommen werden (Cohn, 1920, pp. 19-21). Es stand daher nichts mehr im Wege, die Zeit anhand von Lichtsignalen physikalisch zu synchronisieren (Cohn, 1920, pp. 9-11). Aufgrund dessen werden die relative Gleichzeitigkeit, die Zeitdilatation, die Längenkontraktion verständlich (Cohn, 1920, pp. 11-18).

Die Theorie von Einstein hat sich somit auf den Erfahrungen bzw. den Ergebnissen der experimentellen Physik aufbauend weiterentwickelt. Die SRT hat demnach versucht den Widerspruch zwischen den Experimenten auf eine einfache Weise zu lösen, um die klassische Mechanik mit der Elektrodynamik zu vereinen – eine mathematische Herleitung ist bei (Cohn, 1920, pp. 27-30) zu finden.

Zusammenfassend lag die Lösung darin zu den relativistischen Transformationsgleichungen zu gelangen. Dafür musste unser klassisches Verständnis der Raum- und Zeitmessung dem relativistischen weichen. (Es musste vor allem auf das Verständnis einer absoluten Gleichzeitigkeit verzichtet und eine physikalische Synchronisierung der Zeit definiert werden.) Von diesen relativistischen Transformationen gelangte man anschließend zu den relativistischen Geschwindigkeitsadditionen, womit man die theoretischen Widersprüche in den Experimenten in einer einfachen Form erläutern konnte.

3.4.1.5. Die aus den Ergebnissen resultierenden Forschungsfragen für die nächsten Abschnitte

Die Rekonstruktion von E. Cohn ist rational aufgebaut – er zeigt, wie aufgrund der neueren Erkenntnisse (aus der experimentellen) Physik wiederum ein neues theoretisches Modell entstanden ist, das unsere Erfahrungen in Einklang bringen konnte.

3.4.1.5.1. 4. Frage:

Cohn legt den Schwerpunkt seiner rationalen Rekonstruktion darauf, dass es einen Widerspruch zwischen zwei experimentellen Ergebnissen zu geben schien, nämlich zwischen dem Experiment von Fizeau (1851) und dem Experiment von Michelson (1881) (Cohn, 1920, p. 9). Die Lösung des Widerspruchs führte schließlich zur Einsteins Relativitätstheorie. Daraus ergibt sich folgende die wichtige Forschungsfrage:

Hat es Einstein jemals direkt ausgesprochen, dass das Lösen dieses Widerspruches bei der Entstehung der SRT eine wesentliche Rolle gespielt hat?

3.4.1.5.2. 5. Frage:

Ebenso scheint eine andere Aussage von Cohn sehr interessant zu sein. Er erklärt:

„wie messen wir denn eine Geschwindigkeit? wie messen wir die Zeitdauer eines Vorganges, der sich über ein auch räumlich ausgedehntes Gebiet erstreckt? Ein Schütze möge etwa die Zeit zu bestimmen haben zwischen dem Abfeuern und dem Einschlagen des Geschosses. Beurteilt er das Einschlagen nach dem Gehör, so muß er die Zeit berücksichtigen, die der Schall braucht; andernfalls würde er einen vollständig falschen Wert für die Flugdauer seines Geschosses erhalten. Das Ideal wäre ein zeitloses, unendlich schnell sich fortpflanzendes Signal. Aber das existiert nicht. Die schnellsten Signale, die wir kennen, sind Lichtsignale im leeren Raum, – praktisch gleich auch in der Luft. Und so haben wir denn auch kein genaueres Verfahren, Zeitwerte von Ort zu Ort mitzuteilen, als Lichtsignale.“ (Cohn, 1920, pp. 9-10)

Dieser Vergleich von Cohn zwischen Schall- und Lichtwellen ist überaus interessant. Historisch hat man Schall- und Lichtwellen stets in einer Analogie betrachtet – das Dopplersche Prinzip ist ein gutes Beispiel dafür. Diese Analogien waren sicher auch ein Mitgrund, weshalb man bei Lichtwellen ein Ausbreitungsmedium (Äther) erwartete usw. Zwar geht Cohn nicht näher darauf ein, doch allein der Hinweis zeigt, dass diese Analogie wissenschaftsgeschichtlich interessant sein könnte – vor allem wenn man bedenkt, dass E. Mach sowohl zu Schallwellen als auch zu Untersuchungen des Lichtes Pionierarbeiten geleistet hat – man denke beispielsweise an seine Untersuchungen zu Doppler-Effekt,

Hyperschallgeschwindigkeit, Interferenz und Polarisation des Lichts usw. Eine weitere Fragestellung lautet somit:

War die wissenschaftsgeschichtliche Analogie zwischen Licht- und Schallwellen (insbesondere die Arbeiten von Mach) für Einstein bei der Entstehungsgeschichte der SRT wichtig?

3.4.1.5.3. 6. Frage

An einer anderen Stelle erklärt Cohn:

„In anderer Fassung: ein Beobachter, der mit dem Versuchskörper zusammen in eine Hülle eingeschlossen ist, wird von der gleichförmigen Bewegung nichts wahrnehmen, wohl aber von der beschleunigten. Das gleiche gilt von den Wahrnehmungen, die er an sich selbst macht: er spürt die Bewegung im Karussell, er spürt das Anfahren und das Anhalten des Fahrstuhls, aber er bemerkt nichts von der gleichförmigen Bewegung des Fahrstuhls.“

(Cohn, 1920, p. 6)

Dieses Gedankenexperiment (über die Wahrnehmung im Fahrstuhl) ist überaus interessant, da ein ähnliches Gedankenexperiment sich sowohl bei E. Mach als auch bei Einstein finden lässt – die Fragestellung lautet daher:

Wurde Einstein zu seinem berühmten Gedankenexperiment von Cohn oder von Mach inspiriert?

Aus unseren bisherigen Untersuchungen sind somit wiederum drei neue Fragen entstanden, wobei die ersten zwei vor allem die SRT und die letzte die ART betreffen. Wir benötigen daher eine Quelle, in welcher Einstein auf die Entstehungsgeschichte der Relativitätstheorie eingeht, wobei er ebenfalls auf den Einfluss von Mach hinweist – ist so eine Quelle gegeben? Überraschenderweise ist die Antwort ein Ja. Wir erinnern uns, dass das Buch „*Einstein: A Centenary Volume*“ (French, 1979) im Jahre 1979 herauskam und Sexl deshalb auf eine neue Quelle hinweist:

„Was wußte Einstein? [...] Seit Silvio Bergia seinen in diesem Band enthaltenen Artikel über die Ursprünge der Relativitätstheorie verfaßt hat, wurde eine Ansprache bekannt, die Einstein am 17. Dezember 1922 in Kyoto gehalten hatte. Diese Japan-Tournee hatte Einstein daran gehindert, an der Verleihung des Nobelpreises in Stockholm teilzunehmen.

Die auf deutsch gehaltene Ansprache wurde von Yun Ishiwara ins Japanische übersetzt und 1923 publiziert. 1979 erschienen Teile dieser Rede in englischer Übersetzung in einer

japanischen Zeitschrift für Wissenschaftsgeschichte. Erst seit *Physics Today* im August 1982 die gesamte Rede Einsteins vorlegte, wurde die ‚inoffizielle Nobelpreisrede‘ einer breiteren Öffentlichkeit bekannt.“ (Sexl, 1985, p. 36)

Anhand dieser Rede von Einstein, gelingt es Sexl zu zeigen, dass das Michelson-Experiment für Einstein eine wichtige Rolle gespielt hat. Seit seinen Untersuchungen haben sich sowohl die Einstein-Forschung als auch die Mach-Forschung weiterentwickelt.

Im Sinne Sexls werden wir uns diese „inoffizielle Nobelpreisrede“ Einsteins in Kyoto näher ansehen. Beispielsweise erwähnt Einstein in dieser Kyoto-Rede mehrmals E. Mach – Sexl (aber auch andere Forscher nach ihm) sind auf diesen Punkt nicht näher eingegangen. In diesem Kontext besteht daher eine wichtige Forschungslücke, die wir versuchen werden zu schließen; womöglich werden wir dadurch zugleich Antworten auf die von uns gestellten drei Fragen finden.

4.) Kapitel: Die Rekonstruktion von Einsteins Kyoto-Rede

4. Einsteins Japan-Reise, ihre Vorgeschichte und die Kyoto-Rede

Wir haben im Abschnitt „1. Forschungsstand“ (Unterabschnitt „1.1. 100. Geburtstag von Albert Einstein (1979) – bis jetzt“ auf den Artikel „Der unerschöpfliche Albert Einstein“ (Sextl, 1985) von Roman U. Sextl hingewiesen – von ihm kam der wichtige Hinweis auf Einsteins Kyoto-Rede:

„Seit Silvio Bergia seinen in diesem Band enthaltenen Artikel über die Ursprünge der Relativitätstheorie verfaßt hat, wurde eine Ansprache bekannt, die Einstein am 17. Dezember 1922 in Kyoto gehalten hatte. Diese Japan-Tournee hatte Einstein daran gehindert, an der Verleihung des Nobelpreises in Stockholm teilzunehmen.

Die auf deutsch gehaltene Ansprache wurde von Yun Ishiwara ins Japanische übersetzt und 1923 publiziert. 1979 erschienen Teile dieser Rede in englischer Übersetzung in einer japanischen Zeitschrift für Wissenschaftsgeschichte. Erst seit *Physics Today* im August 1982 die gesamte Rede Einsteins vorlegte, wurde die ‚inoffizielle Nobelpreisrede‘ einer breiteren Öffentlichkeit bekannt. [...]“ (Sextl, 1985, pp. 35-36)

Gerald Holton (1969) und Silvio Bergia (1979) vertraten die Ansicht, dass das Michelson-Experiment für Einstein bei der Entstehungsgeschichte keine wesentliche Rolle gespielt hat (Bergia, 1985, p. 165). Sextl hat infolge dessen auf die Kyoto-Rede von Einstein aufmerksam gemacht, in welcher Einstein selbst betonte, dass das Michelson-Experiment für die Entstehungsgeschichte sehr wohl zentral war (Sextl, 1985, p. 36).

Anschließend erläutert Sextl, was Einstein später als theoretischen Physiker dazu bewogen haben könnte, die wichtige Rolle des Michelson-Morley-Experiments, herunterzuspielen (Sextl, 1985, pp. 37-39).

Ebenso konnten unsere bisherigen Untersuchungen zeigen, dass Michelson-Experiment tatsächlich im Kontext der SRT von Bedeutung war. Da Sextl mit seinem Hinweis hierzu wohl richtig lag, stellt sich die Frage, ob der Inhalt der Kyoto-Rede von Einstein noch andere Hinweise auf die Entstehungsgeschichte der SRT geben könnte – beispielsweise verweist Einstein in seinem Vortrag viele Male auf Mach, worauf bis jetzt wenig Aufmerksamkeit gelenkt wurde.

Wichtig sind daher die Fragestellungen, wie es zu dieser Kyoto-Rede von Einstein kam und ob sie sich anhand der zurzeit zugänglichen Quellen historisch-kritisch rekonstruieren lässt.

4.1. Einsteins Japan-Reise und ihre Vorgeschichte

*Ichigo ichi-e*¹⁰⁸

(Japanisches Sprichwort)

Wie bereits erläutert, erschien im Jahr 1921 posthum das Werk *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) von Ernst Mach, mit einem gefälschten Vorwort, in welchem er als ein Relativitätsgegner dargestellt wurde. Die unter anderem antisemitische Haltung in Deutschland und Einsteins hohe Popularität nach 1919¹⁰⁹ trugen dazu bei, das gefälschte Vorwort zu veröffentlichen.

Ironischerweise bekam Einstein 1922 – rückwirkend für das Jahr 1921 – den Nobelpreis für Physik für seine Beiträge zur Optik. Er war währenddessen auf seiner Asienreise. Dass ihm der Nobelpreis für Physik offiziell verliehen wurde, erfuhr Einstein bei seiner Ankunft in Shanghai am 13. November 1922 (CPAE 13; 379; p. 566, fn. 45).¹¹⁰ Seine anschließende Reise nach Japan – Ankunft am 17. November (CPAE 13; 379; p. 566, fn. 53) – und die Kyoto-Rede (am 14. Dezember) sind unter anderem aus drei Gründen bereits historisch wertvoll:

1.) Die politische Situation nach dem Ersten Weltkrieg in Deutschland, aufgrund derer sich auch der Antisemitismus verstärkte¹¹¹, war für Einstein keine angenehme Zeit – eine Einführung und einen guten Überblick bieten die redaktionellen Abschnitte „Einstein’s Encounters with German Anti-Relativists“ (CPAE 7; _; p. 101-113) und „Einstein and the Jewish Question“ (CPAE 7; _; p. 221-236) in *The Collected Papers of Albert Einstein*. Insofern freute er sich offensichtlich auf eine Auszeit. So schreibt er an Heinrich Zangger (am 18. Juni 1922):

„Heut angeboten, morgen verspöttet oder gar gekreuzigt, das ist das Los der Menschen, deren sich — Gott weiss wieso — die gelangweilte Oeffentlichkeit bemächtigt hat. [...] Aber ich sehne mich unsagbar nach Einsamkeit, und deshalb gehe ich nach Japan (im Oktober) denn das bedeutet 12 Wochen Ruhe auf dem Meer.“ (CPAE 13; 241; p. 370)

¹⁰⁸ Frei übersetzt: „Eine Chance im Leben.“

¹⁰⁹ 1919 konnte Arthur Stanley Eddington zeigen, dass Einsteins Voraussagen mit den Messwerten während der Sonnenfinsternis übereinstimmten. Diese experimentelle Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie machten Einstein anschließend weltberühmt. Für eine kurze Einführung siehe „Einstein, Eddington and the 1919 eclipse“ von Peter Coles (Coles, 2019).

¹¹⁰ Bereits durch einen Brief von Svante Arrhenius (ab 17. September 1922) wusste Einstein, dass er den Nobelpreis für Physik bekommen wird – siehe dazu (CPAE 13; 359; p. 512) und (CPAE 13; _; p. lix).

¹¹¹ Siehe (CPAE 7; _; p. 112) und (CPAE 7; _; p. 221, 224-236).

Am 24. Juni 1922 wurde zudem der jüdisch-deutsche Reichsaußenminister Walther Rathenau bei einem Attentat von Rechtsradikalen ermordet – ab nun begann Einstein aufgrund seiner Popularität um sein eigenes Leben zu fürchten (CPAE 7; _ ; p. 113), weshalb er gerade die Reise nach Japan umso mehr genoss.¹¹² Infolge der angespannten Situation schreibt er an Wilhelm Solf, den deutschen Botschafter in Tokio (am 20. Dezember 1922):

„[...] Menschen, die die Zustände in Deutschland gut übersehen, sind tatsächlich der Meinung, daß für mich eine gewisse Lebensgefahr bestehe. Allerdings habe ich die Situation vor dem Rathenau-Mord nicht so eingeschätzt wie nachher. Zu einem guten Teil war es die Sehnsucht nach dem fernen Osten, welche mich die Einladung nach Japan annehmen ließ, zu einem anderen Teil das Bedürfnis, einige Zeit aus der gespannten Atmosphäre unserer Heimat für einige Zeit herauszukommen, die mich so oft vor schwierige Situationen stellt. Nach dem Rathenau-Mord begrüßte ich es allerdings sehr, daß mir die Gelegenheit einer längeren Abwesenheit aus Deutschland gegeben war, die mich der zeitweilig gesteigerten Gefahr entzog, ohne daß ich irgend etwas hätte tun müssen, was meinen deutschen Freunden und Kollegen hätte unangenehm sein können.“ (CPAE 13; 402; p. 643)

2.) Die Japan-Reise bietet zudem einen guten Einblick darin, wie Einstein ihm fremde bzw. exotische Kulturen wahrgenommen hat. In „Plauderei über meine Eindrücke in Japan“ (CPAE 13; 391; p. 606-611) fasst er einige seiner dort gesammelten Erfahrungen zusammen. Welche Bedeutung diese Reise für ihn hatte, kann man bereits auf der ersten Seite erkennen:

„Nie in meinem Leben bin ich in Berlin mehr und echter beneidet worden wie in dem Augenblicke, als man erfuhr, dass ich nach Japan eingeladen sei. Denn dies Land ist bei uns von einem Schleier des Geheimnisvollen umgeben wie kein anderes.“ (CPAE 13; 391; p. 606)

Für eine detailliertere Beschreibung seines Japanbesuchs sei auf Einsteins Reisetagebuch hingewiesen, welches ebenfalls online öffentlich zugänglich ist (CPAE 13; 379; p. 544-554) – darin sind auch seine Erlebnisse in Kyoto festgehalten (CPAE 13; 379; p. 550-552).

3.) Es ist nicht selbstverständlich, dass Einstein in seiner Kyoto-Rede in Gegenwart dieses Publikums¹¹³ auf Mach hingewiesen hat – vor allem, wenn man das gefälschte Vorwort

¹¹² Für einen Überblick über Einsteins spannende Japans Reise siehe (CPAE 13; _ ; p. xxxiii, xlili-xliv, lvi-lviii, lx-lxiv).

¹¹³ Im Publikum saßen unter anderem Ishiwara und Nishida. Weder Ishiwara (Santone, 1992, pp. 335-337) noch Nishida (Santone, 1992, p. 338) waren Machianer im engsten Sinne – zu Nishidas Philosophie zur Relativitätstheorie siehe auch (Hashi, 2007).

Zu empfehlen ist ebenso der Artikel „Ernst Mach: Science and Buddhism. A Misunderstanding Under Globalization’s Signature“ (Baatz, 2019) von Ursula Baatz, wo erläutert wird, weshalb es nicht passend ist, Mach als einen Buddha der Wissenschaften anzusehen.

mitbedenkt. Es deutet daher einiges darauf hin, dass Einstein bewusst auf die Wegbereiterrolle Machs für die Relativitätstheorie bei seiner Rede aufmerksam machen wollte, wodurch seine Erläuterungen den Angaben im gefälschten Vorwort Machs widersprechen.

4.2. Einsteins-Kyoto Rede und Forschungsstand

Einsteins Rede „How I created the theory of relativity“¹¹⁴ war, seinen eigenen Worten zufolge, ein „Vortrag von mir über Entstehung der Relativitätstheorie (auf Wunsch)“ (CPAE 13; 379; p. 551) von Kitaro Nishida (CPAE 13; 379; p. 573, fn. 148). Diesen hielt er *spontan* am 14. Dezember 1922 an der Universität Kyoto in Japan; er ist aus vielerlei Hinsicht interessant und einzigartig zugleich. Unter anderem gibt es keinerlei Notizen von Einstein zu dieser Rede¹¹⁵ und dennoch ist uns der Inhalt durch die Mitschrift (von Jun Ishiwara)¹¹⁶ erhalten geblieben – jedoch nur auf Japanisch. Die Rede wurde bereits von vielen Forschern¹¹⁷ untersucht, wobei der Fokus auf dem Michelson-Experiment lag, welches Einstein in der Rede erwähnte.¹¹⁸ Es wurden unterschiedliche Übersetzungen aus dem Japanischen verfasst¹¹⁹, von denen manche einander an relevanten Stellen teilweise widersprechen.

[Anmerkung des Verfassers: Diese widersprüchlichen Übersetzungen veranlassten mich dazu, Hisaki Hashi – die nicht nur eine Expertise in Wissenschaftsphilosophie besitzt, sondern japanisch auf Muttersprachenniveau beherrscht – um Rat zu bitten. Sie erklärte (mir), weshalb es so schwierig ist, ostasiatische Texte in westliche Sprachen zu übersetzen.¹²⁰]

¹¹⁴ Oder „How Did I Create the Theory of Relativity?“ – siehe (CPAE 13; 379; p. 573, fn. 148).

¹¹⁵ Dass Einstein keine Notizen zu diesem Vortrag machte, ist aus dreierlei Sichtweise leicht verständlich:

1. Am 19. November hielt er eine Vorlesung zur Speziellen und zur Allgemeinen Relativitätstheorie an der Keio Universität in Japan, welche ebenso die physikalischen bzw. technischen Aspekte der Theorie behandelte. Auch zu diesem Vortrag hatte Einstein sich keine Notizen gemacht. Jeweils nach etwa 15 Minuten machte Einstein stets Pausen, damit Ishiwara für das Publikum übersetzen konnte (CPAE 13; 379; p. 567, fn. 60)
2. Wie auch aus Einsteins eigener Notiz sichtbar, ist diese Rede spontan entstanden.
3. Im gefälschten Vorwort, wo E. Mach als Relativitätsgegner dargestellt wird, heißt es, dass noch ein zweiter Band erscheinen wird, in welchem Mach seine Kritik an der Relativitätstheorie darlegen wird. Es ist vorstellbar, dass Einstein deshalb nie vorhatte seine Rede auch schriftlich irgendwo festzuhalten.

¹¹⁶ Einstein schreibt (zwischen 23. und 29. Dezember 1922) an Jun Ishiwara:

„Meinem lieben Kollegen Ishiwara zum Andenken, mit dem zusammen ich so viele schöne Dinge gesehen, gemeinsame Arbeit gethan und behagliche Stunden verplaudert habe. Er ist einer der Wenigen, mit denen ich gerne viel kameradschaftlich zusammen überlegen und arbeiten möchte denn es besteht bei aller Verschiedenheit der Abstammung und Tradition eine rätselhafte Harmonie zwischen uns.

Albert Einstein
Moji 1922“
(CPAE 13; 405; p. 645)

¹¹⁷ Siehe (Pais, 1982), (Stachel, 1982), (Sextl, 1985, pp. 35-36), (Holton, 1988), (Itagaki, 1999), (Abiko, 2000), (Dongen, 2009) usw.

¹¹⁸ Alejandro Cassini und Marcelo Leonardo Levinas geben einen Überblick darüber, wo das Michelson-Experiment von Einstein erwähnt und diskutiert wird (Cassini & Levinas, 2019, pp. 55, fn. 2).

¹¹⁹ (Ogawa, 1979), Ukawa zitiert in (Stachel, 1982), (Ono, 1982), (Haubold & Yasui, 1986) usw.

¹²⁰ In der japanischen Sprache ist die Kombination von Wörtern wichtig. Diese sind in einem („agglutinierenden“) Kontext miteinander verbunden. Eine Wort-für-Wort-Übersetzung in eine westliche Sprache ist daher im Allgemeinen nicht einfach. Insbesondere im Englischen kann ein einzelnes Wort mehrere

Hisaki Hashi ist der Ansicht, dass zwei Übersetzungen, nämlich jene in *The Collected Papers of Albert Einstein*¹²¹ (CPAE 13; 399; p. 636-639) und jene in „Jun Ishiwaras Text über Albert Einsteins Gastvortrag an der Universität zu Kyoto am 14. Dezember 1922 (Eine Übersetzung aus dem Japanischen)“ (Haubold & Yasui, 1986) von Hans Joachim Haubold und Eiichi Yasui kontextuell korrekt sind. In der vorliegenden Arbeit wird die deutsche Übersetzung (Haubold & Yasui, 1986) herangezogen – Gründe, die diese Übersetzung favorisieren, sind in den Fußnoten angegeben.

Die Kyoto-Rede gibt einen guten Überblick über die Entstehungsgeschichte der (Speziellen und der Allgemeinen) Relativitätstheorie. Selbstverständlich werden wir bei unserer genaueren Analyse und Rekonstruktion auf die eigenen Arbeiten, Briefe, Interviews usw. von Einstein eingehen. Wie wir sehen werden, ist Einsteins Kyoto-Rede im Einklang mit der vorhandenen Quellenlage.¹²²

Bedeutungen haben. Darüber hinaus weisen die chinesischen Schriftzeichen in japanischen Wörtern besondere Merkmale auf, die zu unterschiedlichen Übersetzungen führen können.

¹²¹ Zur Information über die Übersetzer finden wir:

„The English translation presented here was prepared for this volume by the editors in cooperation with Masako Ohnuki on the basis of a draft translation by Ryoichi Itagaki and Michel Janssen.“
(CPAE 13; 399; p. 639, fn. 1)

¹²² Es wäre im Allgemeinen auch überraschend, wenn dem nicht so wäre: Weshalb hätte Ishiwara, ein Physiker und Schüler von Einstein, den Inhalt der Rede erfinden und sie zu Einsteins Lebzeiten veröffentlichen sollen? Zudem waren viele wichtige Personen als Zuhörer bei der Rede anwesend.

4.2.1. Hypothesen zur Kyoto-Rede

Im Abschnitt „1.3. Hypothesen zu den Forschungslücken“ haben wir drei Hypothesen vorgestellt, dabei lautete unsere zweite:

Im Jahre 1921 erschien das gefälschte Vorwort, welches Mach als einen Relativitätsgegner darstellte und ihn damit nicht als Wegbereiter der Relativitätstheorie ansah. Aufgrund der Korrespondenz (1921) zwischen Einstein und Sommerfeld (bezüglich des gefälschten Vorwortes von Ernst Mach), der zeitlichen Nähe und des Inhalts der Kyoto-Rede ist ersichtlich, dass Einsteins Kyoto-Rede als eine Verteidigungsschrift gegenüber dem gefälschten Vorwort zu lesen ist. Dazu ist es jedoch notwendig sowohl auf den sozial-historischen Kontext der Rede einzugehen, als auch darauf, dass sich der Inhalt der Rede aufgrund der Quellen geschichtlich und wissenschaftlich tatsächlich rekonstruieren lässt.

Wir werden in den kommenden Abschnitten daher zuerst auf die Vorgeschichte zu Einsteins Kyoto-Rede eingehen. Anschließend werden wir Einsteins Kyoto-Rede wiedergeben, analysieren und rekonstruieren. Es wird sich dadurch zeigen lassen, dass Einsteins Kyoto-Rede daher als eine Verteidigungsschrift gegenüber dem gefälschten Vorwort lesbar ist. Somit können wir anhand der Quellen Belege für unsere Forschungshypothese geben.

Bezüglich der Speziellen Relativitätstheorie wollen wir jedoch noch eine Zusatzhypothese vorstellen, die sich während der Forschung für diese Arbeit mit der Zeit herauskristallisierte:

Zusatzhypothese: Das Dopplersche Prinzip (und in diesem Zusammenhang die Aberration) hat für Einstein bei der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie eine außerordentlich wichtige Rolle eingenommen. Gerade bei der Neuinterpretation der Zeit, die für Einstein den Wendepunkt darstellte, aber auch beim Verzicht auf das Konzept des Äthers, dürfte der relativistische Doppler-Effekt jenes Gebiet gewesen sein, in welchem er den Unterschied zur klassischen Physik in Gedanken klar ausarbeiten konnte.

Dieser Zugang dürfte auch der Grund dafür gewesen sein, dass er bei der gravitativen Zeitveränderung im homogenen Schwerfeld ebenso den Doppler-Effekt anwendete. Das Dopplersche Prinzip war für ihn somit sowohl bei der Erstellung der SRT als auch der ART¹²³ ein wichtiges Instrument.

¹²³ Siehe Abschnitt „4.4.5.2.3. Gedankenexperiment: Gravitationsbedingte Rotverschiebung“.

(Aus diesem Grund werden wir einerseits die Geschichte des Dopplerschen Prinzips und die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie behandeln und andererseits die Beziehung der Entwicklungen zueinander beleuchten.¹²⁴)

Punkte, die diese Zusatzhypothese nahelegen, seien kurz an dieser Stelle angegeben:

- Physikalische Gründe:¹²⁵

Der Doppler-Effekt spielt in den Bereichen Mechanik und Elektrodynamik eine wichtige Rolle – wollte man diese beiden Gebiete zueinander führen, war der Doppler-Effekt ein unausweichliches Thema. Bevor man zu komplizierteren Bereichen übergehen konnte, musste man verstehen, wo die Analogie zwischen Licht- und Schallwellen zu weit führte.

- Historische Gründe:¹²⁶

Über den Äther als Ausbreitungsmedium des Lichts wurde sehr viel spekuliert. Gerade im Zusammenhang mit dem Doppler-Effekt und der Aberration war es wichtig die Eigenschaften des Äthers zu kennen.

- Einsteins Arbeit „Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik“ (Einstein, 1903) ist in den *Annalen der Physik* (der ganzen Reihe 316.

¹²⁴ Wichtige Einstein-Forscher wie John Stachel (Stachel, 1982) (Stachel, 1998) und John Norton (Norton, 2013) (Norton, 2014) haben gute Argumente für die Rolle der Emissionstheorie (von Walter Ritz) bei der Entstehung der speziellen Relativitätstheorie vorgelegt – nach Einsteins eigener Aussage war dies jedoch nicht der Fall – siehe Einsteins Gedanken zur Emissionstheorie in „Conversations with Albert Einstein“ (Shankland, 1963, pp. 49, 56). In dieser Arbeit wird eine Alternative zu diesem „Dilemma“ angeboten: Der Doppler-Effekt und in diesem Zusammenhang die Aberration waren die Themen, die Einsteins Denken bei der Schaffung der Speziellen Relativitätstheorie begleiteten. Sein Interesse an der Emissionstheorie war unter anderem ein Teil seiner Untersuchung der Aberration (CPAE 6; 7; p. 45 und 49), wie seine Notizen darlegen, die er für seine Vorlesungen in Berlin (1914/1915) angefertigt hat. (Im Dokument 7 sind es die Seiten 2 und 5.) (Für eine Gesamteinschätzung zu Ritz' Theorie siehe aber auch „Einstein on the Theory of Relativity“ (CPAE 2; _; p. 263), „Einstein's Manuscript on the Special Theory of Relativity“ (CPAE 4; _; p. 5) und (CPAE 4; 1; p. 34-35).) Es ist etwas schade, dass sowohl Einsteins „Bemerkungen zu P. Harzers Abhandlung »Über die Mitführung des Lichtes in Glas und die Aberration«“ (Einstein, 1914) als auch seine Vorlesungsunterlagen (siehe CPAE 6; 7; p. 45 und 49) in *The Collected Papers of Albert Einstein* nicht ins Englische übersetzt wurden. Beide würden die Bedeutung des Dopplerschen Prinzips und der Aberration (Einstein, 1914, pp. 9-10) (CPAE 6; 7; p. 45 und 49) deutlich zeigen.

Generell gibt es bereits Simulationen, die die Parallelen zwischen dem Doppler-Effekt und der Emissionstheorie erklären – siehe beispielsweise (Poessel, 2011). Dieses Dilemma ist daher relativ einfach zu lösen.

¹²⁵ Siehe dazu die Abschnitte „4.4.2.3.5.1.4. Historischer Zufall oder konzeptionell notwendig?“ und die „4.4.2.3.5.1.5. Didaktik“.

¹²⁶ Siehe dazu die Abschnitte „2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“, „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“, „4.4.2.3.3. Der Doppler-Effekt als Lösung für die Diskussion zwischen Wien und Abraham“ und die „4.4.2.3.1 Die Neudefinition der Zeit: Cohns und Machs möglicher Einfluss“.

Band) – im selben Band (und in derselben Folge 5)¹²⁷ finden wir ebenso die Schrift „Über ein Integral der Gleichungen für die Wellenbewegung, welches dem Dopplerschen Prinzip entspricht“ (Kohl, 1903a) vom österreichischen Physiker Emil Kohl. Dieser verweist gleich zu Beginn auf die wichtigen Beiträge von Ernst Mach und Woldemar Voigt zum Dopplerschen Prinzip (Kohl, 1903a, pp. 96, fn. 1). Allgemein bietet diese Arbeit (Kohl, 1903a) einen guten Einblick und Überblick darin, wie der Doppler-Effekt bei Relativbewegungen angewendet werden kann und bespricht auch die Aberration (Kohl, 1903a, pp. 102-103). Zudem verwendet er, ähnlich wie Mach, sowohl das Teilchenmodell (Kohl, 1903a, pp. 103, 106, 112-113) als auch das Wellenmodell (Kohl, 1903a, pp. 97-100, 102-104, 110, 112) und Begriffe, wie „Medium“ oder „Äther“, kommen ebenfalls nicht vor. Es liegt nahe, dass Einstein diese Arbeit für seine Recherchen zur Elektrodynamik bewegter Körper studiert hat, weshalb er wohl auch Machs und Voigts Arbeiten dazu kannte.

- Ernst Mach hat sich sowohl mit den Grundlagen des Dopplerschen Prinzips als auch mit den Interferenzerscheinungen auseinandergesetzt.¹²⁸ Dabei war er in diesem Bereich der erste, der die Relativbewegungen hervorhob und eine Physik formulierte, welche den Äther nicht benötigte. Ebenso verwendet er bei der Thematisierung des Doppler Effekts sowohl das Teilchenmodell als auch das Wellenmodell des Lichtes, was als eine Vorstufe der Erklärung des photoelektrischen Effekts durch Einstein angesehen werden kann.
 - Für die Entwicklung der SRT war es zudem wichtig, den absoluten Raum, die absolute Zeit und somit die absolute

¹²⁷ Die erste Ausgabe in diesem Band ist die Arbeit „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1903a) von Alexander Eichenwald, worauf wir im Abschnitt „2.1.2.2.3. Der Diskurs und seine experimentelle Ebene: Magnet und Leiter“ bzw. „2.1.2.2.3.1. Ad 1.:“ näher eingegangen sind.

¹²⁸ Dass Machs Arbeiten zum Doppler-Effekt für die Entstehungsgeschichte der SRT wahrscheinlich von Bedeutung waren, wurde bereits von Susan G. Sterrett in ihrer Arbeit „Sounds Like Light: Einstein’s Special Theory of Relativity and Mach’s Work in Acoustics and Aerodynamics“ (Sterrett, 1998) untersucht.

Gleichzeitigkeit zu kritisieren, was man in Machs Werken *Wärmelehre (Die Prinzipien der Wärmelehre)* und *Mechanik (Die Mechanik in ihrer Entwicklung)* finden kann.

- Es lässt sich durch Fakten belegen, dass die *Wärmelehre* und die *Mechanik* von Mach auf Einstein vor der Entwicklung der SRT einen großen Einfluss hatten und Einstein auch Machs Arbeiten zur Akustik und Optik kannte.
- In Woldemar Voigts Arbeit „Ueber das Doppler’sche Princip“ (Voigt, 1887) zum Dopplerschen Prinzip wurde zum ersten Mal eine Transformation angegeben, welche wichtige Elemente der SRT bereits aufwies. Da Einstein die Transformationen von Lorentz (1904) nicht kannte, ist anzunehmen, dass sowohl Lorentz als auch Einstein sich zuerst an Voigts Arbeit orientierten.¹²⁹ Jedenfalls hat Einstein Voigts Lehrbuch, aber auch die von Voigts Schüler Drude¹³⁰, vor 1905 studiert.
- In der Arbeit von Max Abraham (Abraham, 1904b, p. 244), aber vor allem in der Diskussion zwischen Wilhelm Wien und Max Abraham, ist es ganz eindeutig, welche wichtige Rolle das Dopplersche Prinzip beim Aufbau einer Elektrodynamik spielt.
- Methodische Gründe:¹³¹

Im Zusammenhang mit der SRT bespricht Einstein zwei Gedankenexperimente:

- Experiment mit zwei Spiegeln zur Bestimmung der relativen Geschwindigkeit der Erde zum Äther.
- Dem Licht nachjagen, um zu einem besseren Verständnis der elektromagnetischen Felder zu gelangen.

Wenn man Ernst Machs Einfluss auf Einstein annimmt, dann werden womöglich die geschichtlichen Zusammenhänge zwischen diesen zwei Gedankenexperimenten

¹²⁹ Bereits Lorentz hat auf die wichtige Rolle von Voigt hingewiesen. Der Zusammenhang zwischen Voigts Arbeit und der SRT wurde bereits von einigen Forschern erkannt und untersucht.

¹³⁰ Siehe (CPAE 2; _ ; p. 260) (CPAE 1; 40, p. 213) (CPAE 1; 41, p. 213) (CPAE 1; 131, p. 330).

¹³¹ Siehe dazu die Abschnitte „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“ und „Der Doppler Effekt als Erklärung für Einsteins Gedankenexperiment ‚Chasing the light‘“.

verständlich. Denn dass beide (Mach und Einstein) gern Gedankenexperimente benutzen, lässt sich nachweisen. Beispielsweise schreibt Mach, der als ein Pionier in der Theorie der Gedankenexperimente (Kühne, 1997, p. 3) (Sorensen, 1992, pp. 4, 51) gilt, dazu:¹³²

„Es ist kein Zweifel, dass das Gedankenexperiment die größten Umwandlungen in unserem Denken einleitet, und die bedeutendsten Forschungswege eröffnet.“
(Mach, 1897, p. 2)

Und offensichtlich war auch dieser Weg für Einstein auch der beste Zugang zu neuen Konzepten:

„Diese Gedanken kamen nicht in irgendeiner sprachlichen Formulierung. Ich denke überhaupt sehr selten in Worten. Ein Gedanke kommt, und ich kann hinterher versuchen, ihn in Worten auszudrücken.“ Einstein zitiert nach (Wertheimer, 2019, pp. 248, fn. 7).

¹³² Eine Arbeit, welche die epistemologische und methodologische Rolle von Gedankenexperimenten bei Mach und Einstein allgemein analysiert, wäre sicher wünschenswert. Für eine allgemeine Einführung in das Thema Gedankenexperimente siehe den Artikel „Thought Experiments“ (Brown & Fehige, 2019) von James Robert Brown und Yiftach Fehige; zu Mach und Duhem die Arbeit „Duhem on Thought Experiments. Or: Did Duhem Really Reject Mach’s Thought Experiments?“ (Buzzoni, 2019) von Marco Buzzoni; zu Einstein und Mach siehe die Schrift „Machs Theorie der Forschung und ihre Beziehung zu Einstein“ (Feyerabend, 1988) und den Artikel „On thought experiments: Mach and Einstein (Part I)“, die ich unter anderem als ein Andenken an Einstein, Mach und Rudolf Haller verfasst habe (Simsek, 2020, pp. 51-54).

4.3. 2. Hypothese: Die Vorgeschichte zu Einsteins Kyoto-Rede

Die historischen Hintergründe, wie es zu der Rede von Einstein kam und wie sie publiziert wurde, ist in *The Collected Papers of Albert Einstein*, im Kommentar „Einstein’s Lecture at the University of Kyoto“ (CPAE 13; _ ; pp. 624-638.) zu finden. Die Vorgeschichte, die wir an dieser Stelle erläutern, soll als eine Ergänzung dienen, um den Inhalt der Rede und somit die Motivation und die Intention Einsteins besser nachvollziehen zu können.

Es ist weithin bekannt, dass Planck in seiner stark polemischen Schrift Ernst Mach zu einem „falschen Propheten“ (Planck, 1909, p. 38) erklärt hatte¹³³, was zu Mach-Planck-Debatte führte. Mach, der zu jener Zeit nicht nur seit Jahren schwer krank¹³⁴, sondern auch alt war, hat dieser Vorwurf schwer getroffen – schließlich hatte Mach bereits im zweiten Vorwort seiner *Mechanik* (in positiver Weise) auf Planck hingewiesen (Mach, 1897, p. VIII). An dieser Stelle sollte natürlich nicht unerwähnt bleiben, dass Planck selbst in seiner Jugend ein Machianer war.¹³⁵ Mach sah sich selbst bekanntlich nicht als einen Propheten; weder als einen richtigen, noch einen falschen – im Gegenteil: Er sah sich im Dienste der Aufklärung.¹³⁶

¹³³ Seine polemische Schrift beendet Planck mit den (an Mach gerichteten) Worten:

„[...] untrügliches Kennzeichen die tatsächlichen Propheten von den wahren scheiden lehrt: An ihren Früchten sollt Ihr sie erkennen!“ (Planck, 1909, p. 38)

Wie Planck selber betont, zitiert er am Ende Jesus (siehe dazu Matthäus 7:20). Gereon Wolters bezeichnet dieses Argument von Planck daher als „Jesus-Planck-Criterion“ („JESPLAC“) (Wolters, 2019, p. 373). Wir werden die Rede von Planck aus drei Gründen als „Bergpredigt“ bezeichnen:

1. Planck zitiert aus Jesus’ „Bergpredigt“.
2. Die Berg-Metapher begegnet uns in seinen Schriften öfter: „Vom Relativen zum Absoluten“ (Planck, 2001, p. 117), „Die Physik im Kampf um die Weltanschauung“ (Planck, 2001, p. 131).
3. Plancks Berg-Metapher ist ebenso in moderneren Abhandlungen zu finden: „Scaling Mount Planck I: A View from the Bottom“ (Wilczek, 2001a), „Scaling Mount Planck II: Base Camp“ (Wilczek, 2001b) und „Scaling Mount Planck III: That All These Is?“ (Wilczek, 2002).

¹³⁴ E. Mach hat 1898 einen Schlaganfall erlitten und war seitdem auf seiner rechten Seite gelähmt (Stadler, 1988, p. 24). Andere körperliche Beschwerden kamen mit der Zeit noch hinzu.

¹³⁵ Siehe beispielsweise (Blackmore & Hentschel, 1985, pp. 59, fn. 2).

Ernst Mach argumentierte (unter anderem) in seiner Entgegnung „Die Leitgedanken meiner naturwissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen“ (1910), dass Planck seine Gedanken nicht wirklich verstanden habe (Mach, 1988, pp. 665, 668-669); betont diesen Umstand auch in seinem letzten Satz: „Aber ein Versuch, den Gegner zu verstehen, sollte doch vorausgehen.“ (Mach, 1988, p. 669)

Planck erwiderte in „Zur Machschen Theorie der physikalischen Erkenntnis. Eine Erwiderung“ (1910), dass er selbst ein Anhänger von Machs Philosophie war (Planck, 1988, p. 671). Ob er die Philosophie von Mach verstanden hat, bleibt fraglich – siehe dazu (Stadler, 1988, pp. 23-24; 25, fn. 39) (Feyerabend, 1988, pp. 452-454).

¹³⁶ Mach schreibt an Harald Höffding:

„Mein Ziel und mein Beruf ist nämlich gar nicht, philosophische Probleme zu lösen, sondern nur die naturwissenschaftliche Methodik von alten im Wege liegenden Pseudoproblemen zu befreien. Was ich zu geben versucht habe ist nicht ein *Abschluss*, sondern ein *Anfang*.“

Er war damals unter anderem bekannt als ein hervorragender Experimentalphysiker, der in seinen historisch-kritischen Büchern die Schwachstellen der (Newtonschen) Mechanik erkannte und für diese ebenso Lösungen bzw. Alternativen vorschlug.

Der Angriff von Planck beinhaltete neben seiner, auch fachlich relevanten, Kritik eine wichtige Fragestellung: Inwiefern waren Machs Kritik und Konzepte richtungweisend für die moderne Physik?

Die Antwort auf diese Frage ist, die (heute teilweise vergessene) Mach-Einstein-Koalition.¹³⁷ Die Mach-Einstein-Koalition, wie wir sie in dieser Arbeit bezeichnen, ist durch die Briefe Einsteins an Mach (Wolters, 1987, pp. 148-163), durch Machs Befürwortung von Einsteins Relativitätstheorie als



Abbildung 2: Ernst Mach Büste im Rathauspark

einen Fortschritt seiner eigenen Gedanken (Wolters 2019, §28.5), und durch Einsteins ständigen Hinweis auf Mach in seinen Arbeiten zur Relativitätstheorie sehr gut dokumentiert. Dennoch ist das Bild von Mach in der Öffentlichkeit ein gänzlich anderes. Lediglich ein Beispiel sei hier kurz gegeben, um die Situation sichtbar zu machen: Zehn Jahre (1926) nach E. Machs Tod wurde ihm zu Ehren eine Büste im Rathauspark (Wien) aufgestellt (Abb. 2)¹³⁸. Am selben Tag bemerkte der Physiker Felix Ehrenhaft trefflich – der nebenbei erwähnt, der einzige war, welcher Einstein 1916 für den Nobelpreis nominierte¹³⁹ –, dass sie „allein¹⁴⁰ und isoliert“ steht und „nicht im Arkadenhofe der Universität, wo die

(Blackmore & Hentschel, 1985, p. 44)

¹³⁷ Eine Koalition im Sinne gegenseitiger Unterstützung aufgrund (teilweiser) Überschneidungen von erkenntnistheoretischen Ansichten.

¹³⁸ Das Bild [vom Verfasser fotografiert] ist einer der zehn Finalisten des Wettbewerbs „Meine Forschung in einem Bild“ 2019 gewesen (Fotowettbewerb, 2019).

¹³⁹ Interessanterweise fehlt ein Teil der Korrespondenz zwischen Ehrenhaft und Einstein in *The Collected Papers of Albert Einstein* – siehe dazu „5.2. Anhang II: Die fehlenden Briefe zwischen Felix Ehrenhaft und Albert Einstein in *The Collected Papers of Albert Einstein*“. Die Briefe könnten sowohl für die Einstein-, als auch für die Mach-Forschung wichtig sein.

¹⁴⁰ Im Rathauspark können wir (vom Rathaus aus betrachtet) auf der linken Seite die Büste von Ernst Mach und auf der rechten Seite seinen langjährigen Freund Josef Popper-Lynkeus finden – siehe dazu (Stadler, 2019a, pp.

Büsten vieler seiner berühmten Zeitgenossen“ sind.¹⁴¹ Der Grund dafür war wohl Machs Vorwort in seinem Buch zur Optik (*Die Prinzipien der physikalischen Optik*), welches 1921 posthum erschien. Im Vorwort erklärt er, dass ihm „die Rolle des Wegbereiters der Relativitätslehre zugedacht wird“ (Mach, 1921, p. VIII); er „muß“ „aber“ „mit Entschiedenheit ablehnen“ (Mach, 1921, p. VIII) und vergleicht (unter anderem) die Relativitätstheorie mit einer dogmatischen „Kirche“ (Mach, 1921, p. VIII). (Außerdem verweist er auf einen zweiten Band, wo er seine Kritik noch erläutern wird (Mach, 1921, p. IX). Sich selbst beschreibt er als einen „unbefangene[n] Spaziergänger mit eigenen Gedanken“ (Mach, 1921, p. VIII). Insofern macht die Büste im Park Sinn.

Und dieses Bild wurde in der Mach-Forschung gerne verwendet.¹⁴² Es hat sich aber 1987 durch die Arbeit *Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie. Eine Fälschung und ihre Folgen* von Gereon Wolters (Wolters, 1987) gezeigt, dass das Vorwort eine Fälschung ist (und ein zweiter Band nie existiert hat).¹⁴³ Insofern bleibt das Denkmal zwar am selben Ort, doch das Bild in der Mach-Forschung hat sich seitdem gewandelt.

Denn diese Fälschung hat nämlich einige getäuscht – darunter auch Einstein. Doch lassen Sie uns lesen, wie er zum ersten Mal auf die Fälschung reagiert hat. Arnold Sommerfeld macht Einstein in einem Brief auf das Vorwort aufmerksam (4. Juli 1921):

6, 15). Eine Arbeit, welche sich genauer mit der Geschichte beider Büsten auseinandersetzt, wäre in Zukunft sicher wünschenswert.

¹⁴¹ „Heute wird die Büste E. Machs enthüllt, nicht im Arkadenhofe der Universität, wo die Büsten vieler seiner Berühmten Zeitgenossen stehen, sondern auf einem eigenen Platze, also allein und isoliert.“ (Ehrenhaft, 1926) Der Artikel ist auch in (Stadler, 1988, p. 61) zu finden. Der Text „Ernst Mach und die theoretische Physik“ von Walter Thirring, in dem er auf das gefälschte Vorwort eingeht, ist ebenfalls in (Stadler, 1988, pp. 61-62) zu finden.

¹⁴² Zwei Beispiele:

Blackmore, John T. and Klaus Hentschel. 1985. *Ernst Mach als Aussenseiter* (Blackmore & Hentschel, 1985)
Blackmore, John T. 1989. „Ernst Mach Leaves ‘The Church of Physics’“ (Blackmore, 1989)

¹⁴³ Das Vorwort stammt nicht von Ernst Mach (Wolters, 1987) (Wolters, 2019), sondern von seinem Sohn Ludwig Mach. Zu seinen Lebzeiten hat sich E. Mach stets positiv in seinen Publikationen zur Relativitätstheorie geäußert. Da das Vorwort nicht von E. Mach stammt, sondern lediglich sein Name darunter steht, handelt es sich eindeutig um einen Betrug – es ist eine *Nachahmung*, was synonym zum Begriff *Fälschung* ist. Wie diese schlechte *Nachahmung* bzw. *Fälschung* erfolgt ist, wird in (Wolters, 1987, pp. 328-335) erläutert. E. Mach selbst hat kein Vorwort hinterlassen (Wolters, 1987, p. 331).

Natürlich müssen einige Fragen zu diesem Thema noch geklärt werden. Eine Einführung findet der Leser in (Wilhelm & Hagmann, 2017) (Hagmann, 2019).

„Sehr lustig ist es, dass Mach in seinem sehr schönen nachgelassenen Werk zur Optik *gegen* die Rel. Th. Stellung nimmt (vgl. Einleitung) u. dass Sie nach Ehren-Weiland trotzdem von ihm abgeschrieben¹⁴⁴ haben.“ (CPAE 12; 168; p. 212)

Es ist nicht überraschend, dass Sommerfeld in seinem Brief Paul Weyland (Weiland) erwähnt. Nachdem nämlich Einsteins Vorhersage der Lichtbeugung 1919 experimentell bestätigt wurde und ihn dadurch berühmt machte, suchten einige Relativitätstheorie-Gegner nach Aufmerksamkeit. Weyland war bekanntlich nicht nur ein Antisemit, sondern auch der Vorsitzende der 1920 gegründeten „*Arbeitsgemeinschaft deutscher Naturforscher zur Erhaltung reiner Wissenschaft e.V.*“ (Grundmann, 2004, p. 98).¹⁴⁵ Die Arbeitsgemeinschaft/Verein ist als 'Anti-Einstein-Liga' in die Geschichte eingegangen (Grundmann, 2004, p. 98), welche die Relativitätstheorie und Einstein zu diffamieren versuchten.¹⁴⁶ Einstein und seine Unterstützer (Laue, Rube, Nernst) haben natürlich dagegen protestiert (Grundmann, 2004, pp. 100-102). Jedenfalls war das die Situation, in der *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) mit einem gefälschten Vorwort von Mach publiziert wurde. Mach war aber ein Gegner des Antisemitismus und galt zu Lebzeiten als Wegbereiter der Relativitätstheorie. Deswegen kam seine posthume, angebliche Ablehnung ziemlich überraschend. Wie sehr diese Fälschung die Mach-Forschung im negativen Sinne belastet hat, wurde bereits von Wolters (Wolters, 1987) zur Genüge untersucht.

Wir werden im Laufe dieser Arbeit versuchen zu zeigen, dass diese Fälschung (ähnlich wie Plancks Kritik) ironischerweise auch eine positive Seite hat. Denn Einstein hätte nun natürlich Sommerfeld antworten können, dass seine Theorie mit Machs Gedanken wenig Gemeinsamkeiten hätten – dadurch hätte er sowohl Weylands Kritik des „Abschreibens“ abweisen als auch sich aus dem Schatten von Ernst Mach befreien können. Doch schauen

¹⁴⁴ Siehe dazu „Einstein's Encounters with German Anti-Relativists“ (CPAE 7; _ ; p. 106) – es gab auch schon früher Plagiatsvorwürfe von Ernst Gehrcke an Einstein (CPAE 7; _ ; p. 103-104).

¹⁴⁵ Siehe dazu auch „Einstein's Encounters with German Anti-Relativists“ (CPAE 7; _ ; p. 105-111), die Diskussion in Bad Nauheim (CPAE 7; 46; p. 351-359) und Einsteins Artikel „Meine Antwort. Ueber die anti-relativitätstheoretische G. m. b. H.“ (Einstein, 1920f) (CPAE 7; 45; p. 345-349).

¹⁴⁶ Nach 1945 floh er in die USA:

„[H]e worked for the American occupying forces, later for the CIA. On 11 Jan. 1954, Weyland became a citizen of the United States of America and continued there what he had been doing in Germany during the 1920s: he denounced *Einstein* (this time to the American criminal authorities, the FBI). Thus, Weyland returned to the stage where he had started his political career.“

(Grundmann, 2004, p. 109)

wir uns nun Einsteins Brief an Sommerfeld (13. Juli 1921) an, der, auch Einsteins menschliche Größe widerspiegelt:

„Es wundert mich, dass Mach nicht für die Relativitätstheorie war. Dieser Gedankengang liegt nämlich ganz in seiner Denkrichtung. Ich bin neugierig, wie er zu seinem ablehnenden Standpunkt kommt.“ (CPAE 12; 175; p. 218)

Einstein wunderte sich, weil aufgrund der Mach-Planck-Debatte sich eine Mach-Einstein-Koalition gebildet hatte und er sich als ein Verteidiger Machs verstand.¹⁴⁷ (Planck und Einstein waren sehr gute Freunde – nur in Bezug auf Mach, Lichtquantenhypothese¹⁴⁸ und die Allgemeine Relativitätstheorie hatten sie unterschiedliche Ansichten.)¹⁴⁹

Doch was genau meint Einstein mit „Dieser Gedankengang liegt nämlich ganz in seiner Denkrichtung“? Es ist wohl davon auszugehen, dass Einstein Machs Werke und Ansichten gut kannte – was sich auch auf Grund der Quellen sich einfach zeigen lässt – und dass er selbst der Überzeugung war, dass die Relativitätstheorie nach seiner eigenen Einschätzung mit Machs Gedanken in Einklang stand. Doch hat Einstein seine Überlegungen zu diesem Thema direkt oder indirekt erläutert?

Machs Buch mit dem gefälschten Vorwort erschien, wie bereits erwähnt, 1921. In diesem Jahr wurde der Nobelpreis für Physik nicht vergeben. Einstein bekam 1922

¹⁴⁷ Wie bereits erläutert, war Mach nämlich nach dem Angriff von Planck bemüht, sich mit der modernen Physik auseinanderzusetzen. In einem Brief (23.3.09) an Friedrich Adler schreibt Mach, dass er sich den Vortrag Minkowski (zur Raum-Zeit) bereits bekommen habe (Blackmore & Hentschel, 1985, p. 56). Am 26.7.09 schreibt er wieder an F. Adler:

„Sie erhalten diese Tage einen neuen unveränderten Abdruck von „Erhaltung d Arbeit“. Die Sache mit Planck ist mir doch zu dumm geworden. Ich habe ihm im Vorwort nur gesagt, dass man doch wenigstens kennen muss, was man zur Belehrung anderer kritisieren will. Vielleicht findet er, dass meine Ansichten von 1872 etwas moderner sind, als er sich vorgestellt hat. Ist Einstein noch in Bern? Ich möchte ihm auch ein Exemplar senden.“

(Blackmore & Hentschel, 1985, p. 58)

¹⁴⁸ Siehe dazu „5.4. Anhang IV: Einsteins Unterhaltung mit Ernst Mach über die Atomtheorie – und die Lichtquantenhypothese?“

¹⁴⁹ Einstein schreibt an Heinrich Zangger (20. Januar 1914):

„In Berlin sind die Mittel für die Sonnenfinsternis-Unternehmung schön zusammengefließen. Planck hat sich sehr schön in der Angelegenheit benommen, trotzdem er an die Theorie nicht glaubt, und trotzdem die Sache ihm wegen der Mach-Polemik gegen den Strich gehen muss. Alle Achtung!“

(CPAE 5; 507; p. 595)

„für seine Verdienste um die theoretische Physik, besonders für seine Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effekts“¹⁵⁰ rückwirkend für das Jahr 1921 den Nobelpreis. (Ob das gefälschte Vorwort eine Rolle dabei gespielt hat, ist zurzeit eine von mir gestellte offene Frage.) Er konnte den Nobelpreis nicht persönlich abholen, weil er zu dieser Zeit auf einer Reise nach Japan war. Auf die Bitte des Philosophen Kitaro Nishida hat Einstein spontan eine Rede „How I created the theory of relativity“ (am 14. Dezember 1922 an der Kyoto Universität) gehalten.

Jun Ishiwara, der von 1912 bis 1914 unter anderem bei Sommerfeld und Einstein studierte, hat damals Einsteins deutsche Rede für das Publikum ins japanische übersetzt und seine Notizen auch später (auf japanisch) veröffentlicht.

¹⁵⁰ Auf Englisch: „for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect.“ (The Nobel Prize, [online])

4.4. Einsteins Kyoto-Rede



Gedrängt das Volk, gespitzt die Ohren
Sie sitzen alle wie verloren
In Sinnen tief, verzückt der Blick
Ergeben in ein hart' Geschick.
Der Einstein an der Tafel steht
Die Predigt rasch von Stapel geht
Und Ishiwara flink und fein
Schreibt alles in sein Büchlein ein.

Albert Einstein
1922.

Abbildung 3: Einsteins Zeichnung und die dichterischen Zeilen zu jener Rede. Quelle:
<https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol13-doc/746> [Zugriff am 22. Februar 2020] (CPAE 13; 407; p. 650).¹⁵¹

Einstein hat seine Rede leider nicht dokumentiert oder veröffentlicht. Das ist aber aus mindestens drei Gründen verständlich:

- a) Die Rede fand spontan statt. (Dadurch ist es nicht überraschend, dass Einstein sich vorher dazu keine Notizen gemacht hatte.)
- b) Seine Rede wurde von Yun Ishiwara aufgeschrieben. (Das könnte einer der Gründe sein, weshalb Einstein sich auch nach der Rede keine Notizen darüber machte.)
- c) Eine weitere Erklärung könnte die Vorgeschichte der Rede darstellen: Schließlich war ein zweiter Teil von *Die Prinzipien der physikalischen Optik* noch angekündigt, wo E. Mach angeblich unter anderem die Relativitätstheorie hätte kritisieren wollen. Einstein hat wohl die Gelegenheit genutzt und wenigstens auf einem fernen

¹⁵¹ Das Gedicht ist auch bei (Haubold & Yasui, 1986, p. 271) zu finden.

Kontinent seine Gedanken dazu geäußert.¹⁵² Um Streitigkeiten zu vermeiden, blieb es wohl dabei.

Allgemein sei erwähnt, dass die Übersetzung des japanischen Textes an manchen Stellen wohl einen gewissen Spielraum für verschiedene Interpretationen bietet. Wir werden für unsere Untersuchung die deutsche Übersetzung von Hans Joachim Haubold und Eiichi Yasui (Haubold & Yasui, 1986) wiedergeben. Dabei werden wir die Zeilen nummerieren – mit [1], [2] ... usw. – damit die Analyse gut verfolgbar ist und werden einige Kommentare hinzufügen. Wir geben nun die Übersetzung von Einsteins Kyoto-Rede wieder:

„[1] Es ist keinesfalls so einfach, zu sagen, wie ich zur Relativitätstheorie kam. [...] [2] Lediglich soll versucht werden, unmittelbarste Anhaltspunkte in der gedanklichen Entwicklung kurz zusammengefaßt darzulegen.

[3] Es war ungefähr vor 17 Jahren, als ich auf die Idee kam, Relativitätsprinzipien aufzustellen. [4] Woher sie kam, ist freilich nicht eindeutig festzustellen. [5] Sicher ist nur, daß sie in der Problematik der Optik bewegter Körper enthalten war. [6] Das Licht breitet sich durch das Meer des Äthers aus, und die Erde bewegt sich ebenso durch den Äther. [7] Von der Erde aus gesehen strömt der Äther gegen sie. [8] Im physikalischen Schrifttum jedoch habe ich keinen einzigen Beweis für diesen Ätherdrift finden können.

[9] Daher wollte ich irgendwie diese Strömung des Äthers gegen die Erde, d.h. die Bewegung der Erde gegen den Äther beweisen. [10] Ich zweifelte weder an der Existenz des Äthers noch an der Bewegung der Erde gegen ihn, als ich mir diese Aufgabe stellte. [11] Wenn also ein Lichtstrahl aus einer Lichtquelle mit passender Anordnung von Spiegeln so reflektiert wird, daß er in die Richtung der Erdbewegung und in die umgekehrte Richtung aufgespalten wird, so dürfte es zwischen diesen beiden Anteilen eine energetische Differenz geben, die an Hand zweier Thermoelemente über die unterschiedlichen Wärmemengen

¹⁵² Allgemein sehen wir eine gewisse Entwicklung bei Einsteins Vorlesungen in Japan: Sein Vortrag am 19. November an der Keio Universität zur Relativitätstheorie war eher technischer Natur (CPAE 13; 379; p. 567, fn. 60). In Tokio hielt er einen Vortrag (am 24. November), wo er notiert: „Von 5½–7 und 8–10 zweiter allgemeiner Vortrag mit Ishiwara. Ungeheures Interesse des Publikums.“ (CPAE 13; 379; p. 546). Dieser Vortrag war „Über Raum und Zeit in der Physik“ (CPAE 13; 379; p. 568, fn. 82). Auch in seinen weiteren Vorträgen in Japan behandelt er die vierdimensionale Raum-Zeit (CPAE 13; 379; p. 569, fn. 92, 97), die Allgemeine Relativitätstheorie (CPAE 13; 379; p. 570, fn. 106), die kosmologischen Probleme (CPAE 13; 379; p. 570, fn. 108), das Relativitätsprinzip (CPAE 13; 379; p. 570, fn. 113) (CPAE 13; 379; p. 572, fn. 134 und 138) (CPAE 13; 379; p. 573, fn. 146) bzw. die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (CPAE 13; 379; p. 572, fn. 137) usw.

Nach all diesen Vorträgen, wo er sein Konzept der Relativitätstheorie stets wieder reflektieren konnte, wurde Einstein nun in Kyoto gebeten, ganz spontan eine Rede darüber zu halten, wie er zur Relativitätstheorie kam. Darin verweist er nun immer wieder auf Mach. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass Einstein Machs Einfluss auf die Relativitätstheorie zwar nicht im technischen Bereich sah, aber umso mehr – aufgrund der Diskussion von Raum und Zeit, des kosmologischen Zusammenhanges bzw. des Machschen Prinzips und des Relativitätsprinzips etc., die er in seinen Vorträgen damals öfter besprach – im erkenntnistheoretischen Bereich verortete. Aus Einsteins Kyoto-Rede und anhand der Mach-Einstein-Forschung lässt sich das ebenso rekonstruieren.

Auch später versuchte er in seinen Vorträgen (1923) das Verhältnis der Relativitätstheorie zu philosophischen Fragen zu erläutern, wie beispielsweise zu den Ablehnungen des Absoluten Raumes, zu der absoluten Zeit und somit auch zur Unendlichkeit des kosmischen Raumes (CPAE 13; 379; p. 579, fn. 231) (CPAE 13; 379; p. 583, fn. 257) (CPAE 13; 379; p. 587, fn. 266) usw.

ermittelt werden könnte.¹⁵³ [12] Der Grundgedanke war der gleiche wie bei MICHELSONS Experiment, das mir damals noch nicht hinreichend bekannt war. [13] Ich trug diesen Gedanken in mir bei meinem Studium, und als ich von den interessanten Ergebnissen des MICHELSONschen Experiments erfuhr, erkannte ich intuitiv, daß die Annahme der Erdbewegung gegen den Äther wahrscheinlich falsch wäre, wenn MICHELSON bei seinem Versuch keine Meßfehler begangen haben sollte. [14] Das war der erste Schritt, der mich zu dem führte, was heute das spezielle Relativitätsprinzip genannt wird. [15] Seither bin ich der Meinung, daß sich die Erde um die Sonne bewegt, während diese Bewegung durch ein Experiment mit Licht nicht erkennbar gemacht werden kann.

[16] Dann hatte ich die Gelegenheit, die LORENTZsche Abhandlung von 1895 zu lesen, in der elektrodynamische Probleme erörtert und in der ersten Näherung, d.h. unter Vernachlässigung der Größen von der Ordnung des Quadrats des Verhältnisses der Geschwindigkeit eines sich bewegenden Körpers zur Lichtgeschwindigkeit, restlos gelöst wurden.

[17] Ferner untersuchte ich das FIZEAUSche Experiment und wollte es unter der Voraussetzung diskutieren, daß die LORENTZsche Elektronengleichung auch dann gilt, wenn unser Koordinatensystem auf einen sich bewegenden Körper gelegt wird, statt sich im Vakuum zu befinden. [18] Auf jeden Fall glaubte ich an die Richtigkeit der elektrodynamischen Gleichungen von MAXWELL-LORENTZ, daß sie die Tatsachen exakt wiedergeben. [19] Daß diese Gleichungen auch in einem sich bewegenden Koordinatensystem gelten, zwingt uns zu dem Schluß, daß die Lichtgeschwindigkeit konstant ist. [20] Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit verträgt sich jedoch nicht mit dem Satz über die Zusammensetzung von Geschwindigkeiten, der uns von der Mechanik her bekannt ist.

[21] Warum stehen die beiden Sachen im Widerspruch zueinander? [22] Ich merkte, daß hier ein schwieriges Problem zu lösen war. [23] Fast ein ganzes Jahr lang stellte ich verschiedentliche Überlegungen an – in der Erwartung, daß LORENTZ' Gedanken irgendwie modifiziert werden müßten. [24] Jedoch ohne Erfolg. [25] Ich mußte einsehen, daß dieses Rätsels Lösung so leicht nicht zu finden ist.

[26] Einer meiner Freunde¹⁵⁴, der in Bern (Schweiz) arbeitete, half mir durch einen Zufall. [27] Eines schönen Tages ging ich ihn besuchen und sagte: [28] Ich schlage mich in den letzten Tagen mit einem Problem herum, mit dem ich überhaupt nicht klar komme. [29] Also muss ich es heute mit dir besprechen.

[30] Wir diskutierten miteinander, [31] wobei mir plötzlich etwas einfiel. [32] Am nächsten Tag ging ich nochmals zu ihm und überraschte ihn mit der Bemerkung: [33] Habe Dank, ich habe das Problem gelöst.¹⁵⁵ [34] Bei meiner Lösung handelt es sich um den Zeit-

¹⁵³ Ob Einstein aufgrund seiner begrenzten Ressourcen das gesamte Experiment auch real aufgestellt und durchgeführt hat oder nicht, ist nicht so einfach zu sagen – siehe dazu (Abiko, 2000, pp. 8-13). Aus der Übersetzung und dem Kommentar von Haubold und Yasui (Haubold & Yasui, 1986, pp. 173, fn. 3), geht klar hervor, dass Einstein nur die Idee hatte, ein solches Experiment zu erstellen. Auch unsere Untersuchung im Abschnitt „2.1.2. Das A von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“ hat gezeigt, dass Einstein wohl auf Grund von Wiens Arbeit zu solchen Experimenten inspiriert wurde, aber sie letztendlich nicht realisieren hat können. Aus diesem Grund diskutieren wir in dieser Arbeit seine Ausarbeitungen als Vorstufe des Experiments oder, mit anderen Worten als ein Gedankenexperiment.

¹⁵⁴ An dieser Stelle geben Haubold und Yasui in einer Fußnote an:

„Gemeint ist MICHELE BESSO, mit dem EINSTEIN in den Jahren von 1904-1909 gemeinsam am ‚Eidgenössischen Amt für geistiges Eigentum‘ (Patentamt) arbeitete, der ihm ein wichtiger Diskussionspartner seiner wissenschaftlichen Ideen war und dem er sich Zeit seines Lebens tief verbunden fühlte. (vgl. REISER 1930).“ (Haubold & Yasui, 1986, pp. 274, fn. 7)

¹⁵⁵ Hisaki Hashi bietet die folgende zusätzliche Alternative für die Übersetzung von [33]. (Ich werde versuchen, ihren Vorschlag zu reproduzieren, soweit ich sie verstanden habe.) Anstelle des Wortes „gelöst“ kann man eine Wort-für-Wort-Übersetzung wie folgt verwenden: „(...) interpretiert.“ (Dies geschieht aufgrund von „kaishaku suru“ 釈する. Kaishaku 解釈 bedeutet „Interpretation“ als Substantiv. Wenn man es als Verb verwenden

Begriff. [35] Die Zeit ist nicht absolut definierbar. [36] Es besteht zwischen der Zeit und der Signalgeschwindigkeit ein untrennbarer Zusammenhang. [37] Das war es. [38] Damit konnten die bisherigen Schwierigkeiten endlich voll geklärt werden.¹⁵⁶

[39] Fünf Wochen nach diesem Einfall stand die heutige Spezielle Relativitätstheorie fest.¹⁵⁷ [40] Ich hegte keinen Zweifel daran, dass sie auch vom philosophischen Standpunkt aus richtig ist. [41] Sie stimmt auch mit der MACHschen Theorie überein.¹⁵⁸ [42] Solche Probleme jedoch, die später durch die Allgemeine Relativitätstheorie gelöst wurden, standen nicht direkt mit MACHS Lehre im Zusammenhang. [43] Er hatte aber viele wissenschaftliche Begriffe analysiert und verdeutlicht, unter denen es einige gab, welche man als indirekt mit der Relativitätstheorie zusammenhängend betrachten dürfte.¹⁵⁹

[44] Die Spezielle Relativitätstheorie war nun entstanden.

[45] Der Denkansatz für die Allgemeine Relativitätstheorie ergab sich zwei Jahre darauf, im Jahre 1907. [46] Es geschah in einer merkwürdigen Art.

[47] Die Relativität der Bewegung war ursprünglich auf solche Bewegungen beschränkt, deren Geschwindigkeiten zueinander konstant bleiben, so daß diese Relativität nicht auf beliebige Bewegungen übertragen werden konnte, womit ich nicht zufrieden war. [48] Ständig dachte ich daran, wie diese Einschränkung aufgehoben werden könne.

[49] 1907 bekam ich von Herrn STARK einen Auftrag, für das von ihm geleitete ‚Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik‘ Konsequenzen aus der Speziellen Relativitätstheorie zusammenfassend darzulegen. [50] Bei der Arbeit erkannte ich, daß alle Naturgesetze vom Standpunkt der Speziellen Relativitätstheorie behandelt werden können, während diese Theorie auf das Gravitationsgesetz nicht anwendbar ist. [51] Den Grund dafür ausfindig zu machen – das war mein tiefempfunder Wunsch, der jedoch lange unerfüllt bleiben sollte.

[52] Was mich bei der Arbeit am stärksten störte, war die Tatsache, dass die Spezielle Relativitätstheorie zwar die Relation zwischen der Trägheit und der Energie ausgezeichnet darlegen kann, während die Beziehung der Trägheit zur Schwere, zur Energie im

würde, dann: „kaishaku suru“ 解釈する. Aus diesem Grund klingt die Wort-für-Wort-Übersetzung auf Deutsch (oder Englisch) nicht gut – aber der Übersetzer kann dies in folgende Richtung stilisieren: „Danke. Durch eine bestimmte Interpretation habe ich mein Problem bereits vollständig gelöst.“

¹⁵⁶ In [23]-[38] bespricht Einstein, dass er mit dem theoretischen Konzept von Lorentz nicht ganz einverstanden war und dass vor allem das Verständnis der Zeit ihm zu denken gab. Diese Erzählweise deckt sich auch mit den Äußerungen von Wertheimer (Wertheimer, 2019, pp. 235-236).

¹⁵⁷ Auch Wertheimers Erläuterungen stimmen mit der Kyoto-Rede:

„[...] von dem Augenblick an, wo er dazu kam, den gebräuchlichen Zeitbegriff in Frage zu stellen (siehe siebter Akt), braucht es nur fünf Wochen, um seine Abhandlung Relativität zu schreiben.“
(Wertheimer, 2019, p. 231) – siehe dazu auch (Wertheimer, 2019, pp. 248, fn. 7)

Ebenso heißt es in seiner Kyoto-Rede, dass Einstein seinen Freund (Besso) besuchte, um mit ihm die Zeit zu diskutieren. Anschließend schrieb er in fünf Wochen die Arbeit zur Speziellen Relativitätstheorie. Das Buch von Wertheimer erschien posthum im Jahre 1945 – siehe (Wertheimer, 2019, p. V) –, weshalb Jun Ishiwara davon keine Kenntnis haben konnte.

¹⁵⁸ Einstein hat von Mach aber auch von Hume sicher sehr profitiert. (Allgemein gibt es viele Parallelen zwischen Machs und Humes Gedanken.) Dass Einstein hier nur Mach erwähnt, hat wohl vor allem mit der Vorgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie und der Vorgeschichte der Rede zu tun.

¹⁵⁹ Diese Übersetzung ergibt nach meiner Analyse am meisten Sinn. Mach hat bereits zu Lebzeiten in seinen Publikationen usw. betont, dass seine Überlegungen mit der Speziellen Relativitätstheorie im Einklang sind und das wusste Einstein – siehe (Blackmore & Hentschel, 1985, pp. 58-59). Darüber hinaus nahm Einstein an, dass Mach posthum die Spezielle Relativitätstheorie im gefälschten Vorwort kritisiert hatte (Speziali, 1972, p. 391), was auch erklärt, warum Einstein sich über Machs Vorwort wunderte. Deshalb möchte Einstein in seiner Rede dezidiert darauf hinweisen, dass Machs Ideen mit der Speziellen Relativitätstheorie übereinstimmt. Aus diesem Grund ist es ein Anliegen der vorliegenden Arbeit Machs wissenschaftliches Werk mit der Entwicklung der Theorie der Speziellen Relativitätstheorie zu verbinden.

Gravitationsfeld nämlich, völlig im Dunklen bleiben mußte. [53] Die Erklärung hierfür wäre, so ahnte ich damals, mit der Speziellen Relativitätstheorie nicht herbeizuführen.

[54] Ich saß im Berner Patentamt in einem Sessel, als mir plötzlich ein Gedanke kam: [55] Wenn sich ein Mensch im freien Fall befindet, wird er seine eigene Schwere nicht empfinden können. [56] Mir ging ein Licht auf. [57] Dieser einfache Gedanke beeindruckte mich nachhaltig. [58] Die Begeisterung, die ich da empfand, trieb mich dann zur Gravitationstheorie. [59] Ich überlegte weiter: [60] Fällt ein Mensch, hat er eine Beschleunigung, so daß die Dinge, über die er urteilt, nichts anderes sind als die, die sich in einem System mit einer Beschleunigung ereignen.

[61] Ich hatte mich nun entschlossen, die Relativitätstheorie nicht allein auf die mit einer konstanten Geschwindigkeit sich bewegenden Systeme anzuwenden, sondern auch allgemein auf die beschleunigten Systeme zu erweitern, wobei man erwarten durfte, damit auch das Gravitationsproblem lösen zu können. [62] Denn man kann die Schwerelosigkeit eines fallenden Menschen so interpretieren, daß dort neben der Erdgravitation ein neues, die Schwerkraft der Erde kompensierendes Gravitationsfeld gegeben ist. [63] In einem System mit einer Beschleunigung fordert man nämlich ein neues Gravitationsfeld.

[64] Es war mir jedoch nicht möglich, von da an gleich alle Probleme restlos zu lösen. [65] Noch weitere acht Jahre brauchte ich, bis reale Beziehungen herausgefunden wurden, obwohl einige allgemeine Grundgedanken, die diese Beziehungen implizierten, mir noch vorher faßbar geworden waren.

[66] MACH war derjenige, der behauptete, daß alle Systeme, die Beschleunigung aufweisen, einander gleichwertig seien. [67] Dies steht jedoch im evidenten Widerspruch zu unserer Geometrie. [68] Denn, wenn alle solche Systeme als möglich zugelassen würden, gälte in jedem einzelnen die EUKLIDISCHE Geometrie nicht mehr. [69] Unter Verzicht auf die Geometrie Gesetze aufzuzeichnen, – das gleiche, ohne Worte Gedanken ausdrücken zu wollen. [70] Wir müssen zuerst Worte finden, mit deren Hilfe unsere Gedanken formuliert werden sollen. [71] Was also müssen wir hier suchen, wonach forschen?

[72] Diese Frage blieb mir bis 1912 unbeantwortet, bis mir einfiel, daß die GAUSSsche Oberflächentheorie den Schlüssel zu diesem Geheimnis darstellen könnte. [...]

[73] Als ich aus Prag wieder nach Zürich kam, fand ich dort meinen besten Freund GROSSMANN, der in der Mathematik zu Hause war. [...] [74] Das Ergebnis wurde 1913 in einer Arbeit vorgelegt, die ich mit ihm zusammen veröffentlichte. [75] Wir konnten hier jedoch noch keine richtige Gravitationsgleichung aufstellen. [76] Mein Studium der RIEMANNschen Gleichungen ging weiter, lieferte mir jedoch immer weitere Gründe, daß die gesuchten Ergebnisse hierdurch unmöglich erhalten werden würden.

[77] Darauf folgten zwei mühevollen Jahre. [78] Erst dann erkannte ich, daß in meiner früheren Berechnung Fehler steckten. [79] So wandte ich mich noch einmal an die Invarianten-Theorie, um eine richtige Gravitationsgleichung zu gewinnen, die zwei Wochen danach Gestalt annahm.

[80] Aus den Arbeiten, die nach 1915 geleistet wurden, sei lediglich das kosmologische Problem erwähnt¹⁶⁰. [81] Es handelt sich dabei um die Chronometrie und die Geometrie des Alls. [82] Ihnen zugrunde gelegt sind die Behandlung der Grenzbedingungen in der Allgemeinen Relativitätstheorie und auch die MACHschen Überlegungen über die

¹⁶⁰ An dieser Stelle geben Haubold und Yasui in einer Fußnote an:

„Mit EINSTEINS Arbeit ‚Kosmologische Betrachtungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie‘ in den Sitzungsberichten der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin VI (1917) 142 begründete er die relativistische Kosmologie und versuchte erstmals, auf der Grundlage der Relativitätstheorie Aussagen über die Geometrie des Universums als Ganzem zu gewinnen. Er nutzte dabei aber nicht die von ihm 1915 entdeckten Gravitationsgleichungen aus, sondern führte darin noch ein kosmologisches Korrekturglied ein mit dem Ziel, mit diesen Gleichungen einen statischen Kosmos zu beschreiben. EINSTEIN verlangte zu dieser Zeit die Erfüllung des MACHschen Prinzips.“

(Haubold & Yasui, 1986, pp. 278, fn. 17)

Trägheit. [83] Ich wußte allerdings nicht konkret, wie weit MACH sich des relativistischen Wesens der Trägheit bewußt war. [84] Es steht jedoch fest, daß der geistige Einfluß, den ich von ihm empfangen hatte, für mich eine entscheidende Größe darstellte.

[85] Die Grenzbedingungen für die Gravitationsgleichung sollten invariant gehalten werden. [86] Zu diesem Zweck betrachtete ich die Welt als einen geschlossenen Raum und konnte so die Grenzen beseitigen, wodurch die Lösung des kosmologischen Problems ermöglicht wurde. [87] Infolgedessen erscheint die Trägheit nunmehr nur als Eigenschaft zwischen den Körpern, so daß die Trägheit der Körper auch verschwinden muß, wenn keine relativ gegeneinanderstehende Materie vorhanden ist. [88] Durch diesen Schluß, so glaube ich, erlangte die Allgemeine Relativitätstheorie auch die erkenntnistheoretische Vollständigkeit.

[89] In diesem kurzen historischen Rückblick habe ich versucht, Ihnen zu zeigen, wie die Hauptpunkte der Relativitätstheorie aufgestellt worden sind.“

(Haubold & Yasui, 1986, pp. 272-278)

4.4.1. Die Analyse von Einsteins Rede: Teil I

Die Rede von Einstein wurde bereits von einigen Wissenschaftsphilosophen untersucht – dabei lag der Fokus bei der Fragestellung darauf ob und wie Einstein vom Michelson-Experiment beeinflusst wurde. Aus der Vorgeschichte als auch vom Inhalt der Rede ist jedoch ist jedoch einfach erkennbar, dass es vor allem zur Mach-Einstein-Forschung einiges beitragen kann – was die nachfolgende Analyse auch zeigen wird.

Zuallererst fällt bei der Rede die größere Struktur auf – sie besteht aus zwei Teilen (I und II): Im ersteren [3]-[44] erklärt Einstein, wie er zur Speziellen Relativitätstheorie kam und im zweiten [45]-[89] spricht er über die Allgemeine Relativitätstheorie.

Weiters kann man den Abschnitt über die Spezielle Relativitätstheorie wiederum in unterschiedliche Themen unterteilen:

- Thema I: Das spezielle Relativitätsprinzip [1]-[15]
- Thema II: Der Widerspruch [16]-[25]
- Thema III: Die Lösung des Widerspruchs (durch die Neudefinition der Zeit) [26]-[39]
- Thema IV: Die erkenntnistheoretische Ebene der SRT [40]-[44]

Anhand des vierten Themas, in welchem er die erkenntnistheoretische Ebene erwähnt, wird Einsteins Intention dadurch klarer: die Relativitätstheorie ist mit den Machschen Gedanken kompatibel. Im Zusammenhang mit der Vorgeschichte ist das auch verständlich. Wenn aber Machs erkenntnistheoretische Überlegungen zur Speziellen Relativitätstheorie nicht in Widerspruch stehen, dann könnten sie ebenso für die anderen Themen (I-III) eine Rolle gespielt haben, weshalb eine historisch-kritische Rekonstruktion der Kyoto-Rede dienlich erscheint.

4.4.2. Teil I der Kyoto-Rede: Spezielle Relativitätstheorie [3]-[44]

4.4.2.1. Thema I: Das spezielle Relativitätsprinzip [3]-[15]

In seiner Rede sagt Einstein, dass ihm „ungefähr vor 17 Jahren“ „die Idee kam“, „Relativitätsprinzipien aufzustellen“ [3] und [5] „daß sie in der Problematik der Optik bewegter Körper enthalten war [5]“.¹⁶¹ Nach Einsteins Darstellung ist er erst im Jahre 1905¹⁶² auf die Idee der zwei Prinzipien der Speziellen Relativitätstheorie gekommen. Diese Äußerung deckt sich auch mit unserer Forschung im Abschnitt „2.1.2.2. Das A: Wissenschaftlicher Dialog zwischen E. Cohn, W. Wien und A. Einstein“: Denn ein Jahr zuvor (1904) werden die Schriften (Wien, 1904b) (Wien, 1904c) (Wien, 1904d), (Wien, 1904f) (Wien, 1904e) von Wien in *Annalen der Physik* veröffentlicht, die zu einer wissenschaftlichen Diskussion zwischen Wilhelm Wien, Emil Cohn (Cohn, 1904) und Max Abraham (Abraham, 1904b) (Abraham, 1904c) in der genannten Zeitschrift führten. Unter anderem, weil Einstein selber in den *Annalen der Physik* publizierte (Einstein, 1901) (Einstein, 1902a) (Einstein, 1902b) (Einstein, 1903) (Einstein, 1904) und sich sicher am Forschungsstand orientieren wollte, können wir annehmen, dass er diese Diskussion wohl verfolgte. Aufgrund dessen konnten wir beantworten, weshalb Einstein, wahrscheinlich von der Uneinigkeit inspiriert, als eine Antwort auf die Diskussion seine Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) gerade im Jahre 1905 in den *Annalen der Physik* veröffentlichte usw. In den Sätzen [6]-[11] ist deutlich zu lesen, dass Einstein sich mit den Eigenschaften des Lichtes und seiner Fortpflanzung auseinandersetzte. Dazu überlegte er Experimente und wusste noch nicht von Michelsons Experiment. Diese Aussagen decken sich mit der Zusammenfassung des Gesprächs zwischen Einstein und Wertheimer (Wertheimer, 2019, pp. 231-232).

Anhand der Quellen konnten wir im Abschnitt „2.1.2. Das A von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“ Folgendes rekonstruieren: Einstein schreibt in einem Brief (am 10. September 1899) an Mileva Marić, dass er sich „Bücher von Helmholtz Boltzmann & Mach“ (CPAE 1; 54; p. 230) bestellt habe, und weiter:

„In Aarau ist mir eine gute Idee gekommen zur Untersuchung, welchen Einfluß die Relativbewegung der Körper gegen den Lichtäther auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des

¹⁶¹ Wie wir bereits im Abschnitt „2.1.2. Das A von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“ hingewiesen haben, war zu Beginn eine Arbeit von Wilhelm Wien (Wien, 1898) für Einstein sehr wichtig. Die Sätze [4] bis [11] von Einstein sind unter diesem Blickwinkel gut verständlich.

¹⁶² Das Jahr, in welchem Einstein die Rede hielt war 1922. Ziehen wir nun 17 Jahre ab, kommen wir auf 1905.

Lichtes in durchsichtigen Körpern hat. Auch ist mir eine Theorie in den Sinn gekommen über diese Sache, die mir große Wahrscheinlichkeit zu besitzen scheint.“ (CPAE 1; 54; p. 230)

Auf diese Idee brachte ihn die Schrift „Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen“ (Wien, 1898) von Wilhelm Wien, wo Wien erklärt, dass ein Experiment von solcher Art für die weitere Forschung wichtig wäre (Wien, 1898, p. XVII). Dass Einstein diese Arbeit von W. Wien kannte steht außer Zweifel, da in seinem nächsten Brief an Marić ein paar Wochen später (am 28. September 1899) erläutert, dass er die Abhandlung (Wien, 1898) von Wien interessant findet; Wilhelm Wien bereits kontaktiert hat usw. (CPAE 1; 57; p. 233-234). Diese Arbeit Wiens stellte eine gute Einführung in die Forschungslage der Physik bezüglich des Äthers dar. Wir können daher davon ausgehen, dass sie für Einstein eine der ersten Anregungen bei der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie und wegweisend zugleich war. In Wiens Arbeit ist beispielsweise zu finden, welche experimentellen Versuche, nach den damaligen physikalischen Konzepten, ein positives Ergebnis lieferten (Wien, 1898, p. XIII) und welche nicht (Wien, 1898, pp. XIV-XVI). Bei den Versuchen mit einem negativen Resultat, ist für die Physikgeschichte vor allem der von Wien als letzter genannte für die Physikgeschichte interessant, nämlich der Interferenzversuch von Michelson und Morley mit einem negativen Ergebnis (Wien, 1898, pp. XIV-XVI). Wenn Einstein also in der Kyoto-Rede sagt: „[12] Der Grundgedanke war der gleiche wie bei MICHELSONS Experiment, das mir damals noch nicht hinreichend bekannt war.“, dann kann damit nur gemeint sein, dass Einstein das Experiment von Michelson und Morley zwar kannte, aber nicht wusste, wie er es einordnen sollte. Jedenfalls erklärt er weiter [13]-[15] dass das Michelson-Morley Experiment für ihn eine wesentliche Rolle bei der Findung des Relativitätsprinzips spielte. Doch wie kam er nun genau auf den Gedanken, „daß die Annahme der Erdbewegung gegen den Äther wahrscheinlich falsch wäre“ [13]? Der denkbar einfachste Zugang ist, dass man davon ausgeht, dass ein Äther erst gar nicht existiert – hierbei könnten die Arbeiten von Cohn und Mach eben eine wichtige Rolle gespielt haben, worauf wir im nächsten Abschnitt kurz eingehen werden.

4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss

Im Abschnitt „3.3.1. Das Relativitätsprinzip der Mechanik und das Machsche

Forschungsprogramm“ haben wir anhand von Cohns Erläuterungen die physikalischen Ursprünge des Relativitätsprinzips erläutert – und zwar sind Inertialsysteme jene Systeme, die sich relativ (unbeschleunigt) zu den Fixsternen bewegen (Cohn, 1920, pp. 5-6). Auf diese Weise lässt sich das klassische Relativitätsprinzip nach der Erfahrung definieren.

Weiters haben wir sodann im Abschnitt „3.3.2. Die Widersprüche in den Experimenten vor der Speziellen Relativitätstheorie“ erklärt, dass Cohn richtigerweise betonte, dass es eben nicht ganz klar war, ob das Relativitätsprinzip aus der Mechanik auch für die Elektrodynamik gilt (Cohn, 1920, p. 7). Der Grund war, dass die Ergebnisse des Experimentes von Michelson (1881) – und später gemeinsam mit Morley (1887) – nahelegten, dass sich die Erde in Ruhe befände. Diese Experimente schienen das Relativitätsprinzip zu bestätigen: Ruhe und (unbeschleunigte) Bewegung (der Erde) sind gleichwertig und können physikalisch voneinander nicht unterschieden werden. Das Experiment von Fizeau (1851) – und später von Michelson und Morley (1886) wiederholt – schien jedoch dem Relativitätsprinzip zu widersprechen (Cohn, 1920, p. 9).

Dieser Widerspruch lässt sich lösen, indem man, auf Grund des Michelson-Morley-Experiments (1887), am Relativitätsprinzip festhält und eine absolute Bewegung oder eine absolute Ruhe negiert (Cohn, 1920, p. 9). Dafür muss man sich aber unbedingt vom Konzept des Äthers verabschieden, weshalb Einstein in seiner Kyoto-Rede ausdrücklich sagt:

„[13] Ich trug diesen Gedanken in mir bei meinem Studium, und als ich von den interessanten Ergebnissen des MICHELSONschen Experiments erfuhr, erkannte ich intuitiv, daß die Annahme der Erdbewegung gegen den Äther wahrscheinlich falsch wäre, wenn MICHELSON bei seinem Versuch keine Meßfehler begangen haben sollte. [14] Das war der erste Schritt, der mich zu dem führte, was heute das spezielle Relativitätsprinzip genannt wird.“

(Haubold & Yasui, 1986, pp. 273-274)

Weshalb Einstein nun begann auf das Konzept des Äthers zu verzichten, haben wir im Abschnitt „2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“ genauer erläutert. Aus dieser Diskussion zwischen Cohn (Cohn, 1904, p. 208) und Wien (Wien, 1904d, pp. 632-633) war nämlich zu erkennen, dass man relativistische Transformationsgleichungen und das aus ihnen abgeleitete relativistische

Geschwindigkeitsadditionstheorem benötigt, um die Translationsgeschwindigkeiten (ohne die Annahme eines Äthers) einordnen zu können.

Im „I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907) der Arbeit bespricht Einstein wohl deshalb die wichtigsten physikalischen und erkenntnistheoretischen Aspekte der Speziellen Relativitätstheorie – unter anderem die relativistischen Transformationsgleichungen...

Dieser Teil der Arbeit von Einstein kann daher als eine Antwort auf den wissenschaftlichen Dialog zwischen Wien und Cohn angesehen werden, wobei Einstein einige Sichtweisen (sowohl von Wien und als auch von Cohn) miteinander verbinden konnte. Dabei hat er unter anderem das Konzept, auf einen Äther zu verzichten, wohl von Cohn (Cohn, 1904b, p. 1416) übernommen, um eine ökonomische Theorie zu konstruieren, die die experimentellen Ergebnisse erklären konnte.

Wir haben in unserer Arbeit stets darauf hingewiesen, dass sowohl Cohn als auch Einstein von Ernst Machs Arbeiten stark profitierten. Insofern stellt sich die Frage, ob in den Arbeiten von Mach dieser Schritt, auf das Konzept des Äthers zu verzichten, ebenso zu entdecken ist.

Sehen wir uns dazu den Brief Einstein an Mileva Maric (am 10. September 1899) noch einmal genauer an:

„Gegenwärtig bin ich für eine Woche vollständig bücherlos, da sämtliche Bibliotheken Revision haben, doch kann ich mir bis in einer Woche Bücher von Helmholtz¹⁶³ Boltzmann¹⁶⁴ & Mach nach Mailand aus der Stadtbibliothek kommen lassen. Damit Sie aber das sorgenvolle Stirnlein nicht runzeln, verspreche ich Ihnen gleich feierlich, alles mit Ihnen durchzugehen.

In Aarau ist mir eine gute Idee, die zur Untersuchung gekommen ist, ein Einfluß die Relativbewegung des Körpers gegen die Lichtäther auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts in durchsichtigen Körpern. Auch ist mir eine Theorie in den Sinn gekommen über diese Sache, die mir große Wahrscheinlichkeit zu besitzen gehört. Doch nichts mehr davon! Ihr

¹⁶³ Die Arbeiten von Hermann Helmholtz (1821-1894) und Ernst Mach sind aus vielerlei Hinsicht mit einander verknüpft, da Mach sich bereits sehr früh mit Helmholtz Arbeiten auseinander gesetzt hat – siehe dazu (Mach, 1866), (Stadler, 2019b, pp. 6-7, 12), (Löbe & Hoffmann, 2019, pp. 246, 257), (Staley, 2019, pp. 354-356), (Patton, 2019, pp. 341-342, 344-345), (Couture-Mingheras, 2019, pp. 137-140, 144), (Dahmen, et al., 2019, pp. 147-148) usw.

¹⁶⁴ Das „Wunderjahr“ (1905) Einsteins kann man nur dann gänzlich verstehen, wenn man den Einfluss von Ernst Mach und Ludwig Boltzmann ausarbeitet, denn diese beiden hatten auf unterschiedliche Weisen damals die Grenzen der klassischen Physik aufgezeigt. (Dass Machs und Boltzmanns Konzepte auf Einsteins erkenntnistheoretische Ansichten starken Einfluss hatten, wurde unter anderem bereits von Bernulf Kanitschneider erkannt (Kanitschneider, 1979, pp. 139-140).)

Armes Köpfchen ist voll genug von den Steckenpferdchen der verschiedensten, auf die Sie haben reiten müssen.“ (CPAE 1; 54; p. 230)

In demselben Brief weist er darauf hin, dass er, unter anderem, bereits Machs Werke bestellt hat und dass er Untersuchungen zur Relativbewegung des Lichtes gegenüber dem Äther überlegt hat. Dass er Werke von beiden, nämlich „Boltzmann & Mach“, bestellt hat, überrascht natürlich nicht. Einerseits beschäftigt er sich mit der Wärmelehre und andererseits arbeitete er an der (noch zukünftigen) Relativitätstheorie. Auch das (von ihm erdachte) Experiment, das er in seiner Kyoto-Rede erwähnt, spricht dafür:

„[9] Daher wollte ich irgendwie diese Strömung des Äthers gegen die Erde, d.h. die Bewegung der Erde gegen den Äther beweisen. [10] Ich zweifelte weder an der Existenz des Äthers noch an der Bewegung der Erde gegen ihn, als ich mir diese Aufgabe stellte. [11] Wenn also ein Lichtstrahl aus einer Lichtquelle mit passender Anordnung von Spiegeln so reflektiert wird, daß er in die Richtung der Erdbewegung und in die umgekehrte Richtung aufgespalten wird, so dürfte es zwischen diesen beiden Anteilen eine energetische Differenz geben, die an Hand zweier Thermoelemente über die unterschiedlichen Wärmemengen ermittelt werden könnte.“ (Haubold & Yasui, 1986, p. 273)

Sein Experiment betrifft einerseits die Optik und die Relativbewegungen und andererseits die Wärmelehre (Thermoelemente).

Einstein dürfte sich aber an österreichischen Physikern nicht nur zufällig orientiert haben – er suchte nämlich (Jänner-März) 1901 offenbar in Wien nach einer Arbeit (während auch Mach in Wien war). Seine zukünftige Gattin Mileva Maric aus Österreich-Ungarn schreibt aus Zürich (8 Jänner – 19 März 1901) an eine Freundin (Helene Savić):

„Albert bewarb sich um eine practische Stelle in Wien. Er will sich so, da er sich doch Geld verdienen sollt, weiter in der theoretischen Physik, neben seiner Arbeit, vervollkommen um später Universitätsprofessor zu werden. Wir wissen aber nicht was daraus wird.“
(CPAE 1; 87; p. 274-275)

Und auch damals studierte er eifrig an der Relativitätstheorie, denn ein zwei Wochen/Monate später (27 March 1901) schreibt Einstein an Mileva Marić:

„Wie glücklich und stolz werde ich sein, wenn wir beide zusammen unsere Arbeit über die Relativbewegung siegreich zu Ende geführt haben!“¹⁶⁵ (CPAE 1; 94; p. 282)

¹⁶⁵ Allgemein wären wissenschaftliche Arbeiten, welche die Rolle von Maric genauer untersuchen, für die Einstein-Forschung nicht von Nachteil.

Dass er sich einige Zeit mit den experimentellen Methoden zu Relativbewegungen beschäftigte, ist aus einem weiteren Brief ersichtlich, den er seinem Freund Marcel Großmann einige Monate (6? September 1901) später sandte:

„Ich habe mich in letzter Zeit gründlich mit Boltzmanns Arbeiten über kinetische Gastheorie befaßt & in den letzten Tagen selbst eine kleine Arbeit geschrieben, welche den Schlußstein einer von ihm begonnenen Beweiskette liefert. Sie ist aber zu speziell, als daß sie Dich interessieren könnte. Immerhin werde ich sie wahrscheinlich in den Annalen publizieren. [...]

Zur Erforschung der Relativbewegung der Materie gegen den Lichtäther ist mir nun eine erheblich einfachere Methode in den Sinn gekommen, welche auf gewöhnlichen Interferenzversuchen beruht.“ (CPAE 1; 122; p. 315-316)

Da Einstein sich für „Interferenzversuche“ interessierte, ist es denkbar, dass er sich auch Ernst Machs Studien zu Akustik und Optik ansah, wie *Beiträge zur Doppler'schen Theorie der Ton- und Farbbänderungen durch Bewegung. Gesammelte Abhandlungen* (Mach, 1873a) oder *Optisch-akustische Versuche: die spectrale und stroboskopische Untersuchung tönender Körper* (Mach, 1873b); oder auch die Arbeit „Ein neuer Interferenzrefraktor“ (Mach, 1891) von Ernst Machs Sohn Ludwig Mach. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen¹⁶⁶: Damals (ca. bis September 1901) hinterfragte Einstein das Konzept von Äther offenbar noch nicht. Doch für die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie war es gerade wichtig, sich von diesem Konzept zu verabschieden.

So erklärt Einstein in seinem Artikel „Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt“ (1920):

„<Das spezielle Relativitätsprinzip.> Der Aetherwind. Eine fatale Seite aber schien der Lorentz'schen Theorie anzuhängen – nämlich der ruhende Lichtäther, welcher gewissermassen eine Verkörperung des von Newton eingeführten absoluten Raumes war. Es drängt sich nämlich folgende Überlegung auf. Die Erde bewegt sich auf ihrer Bahn um die Sonne mit einer Geschwindigkeit von 30 km/Sek. Wie also auch der Bewegungszustand der Sonne gegenüber dem Aether sein mochte, sicher musste eine bedeutende Geschwindigkeit der Erde gegenüber dem Lichtmedium mindestens während eines Teils des Jahres vorhanden sein. Man kann dies auch so ausdrücken: der Aether strömt an uns, die wir auf der Erde sitzen, mit einer sehr erheblichen Geschwindigkeit (mindestens 30 km) vorbei bzw. durch uns und durch die Erde hindurch (Aetherwind). War auch das Blasen dieses Windes nicht direkt zu spüren, so sollte er sich doch indirekt bei den elektromagnetischen und optischen Experimenten bemerkbar machen. So möchte man beispielsweise erwarten, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum in der Richtung des Aetherwindes $c + v$, in der entgegengesetzten $c - v$ betrage, wenn v die Geschwindigkeit der Erde gegen den Aether

¹⁶⁶ Siehe dazu Abschnitt: „2.1.2.1. Die zwei Phasen des A und O“.

bedeutet. Allgemein wäre zu erwarten, dass bei optischen und elektromagnetischen Versuchen auf der Erde die Orientierung der Apparatur gegen die Richtung des Aetherwindes von Einfluss wäre.

Die experimentelle Bestätigung der Existenz des Aetherwindes reizte natürlich die Physiker ungeheuer. Die verschiedensten Apparaturen, deren Gesamt-Orientierung relativ zur Richtung des Aetherwindes geändert werden konnte, und sich infolge der Erddrehung im Laufe eines Tages ja auch von selbst ändern musste, wurden untersucht. *Aber niemals konnte ein Effekt nachgewiesen werden, der als die Wirkung des Aetherwindes hätte aufgefasst werden könnte.*“ (CPAE 7; 31; p. 248)

Diese Erläuterungen von Einstein sind mit dem Inhalt seiner Kyoto Rede [5]-[10] völlig im Einklang. Interessant ist, dass Einstein oben sagt:

„Eine fatale Seite aber schien der Lorentz’schen Theorie anzuhaften – nämlich der ruhende Lichtäther, welcher gewissermassen eine Verkörperung des von Newton eingeführten absoluten Raumes war.“ (CPAE 7; 31; p248)

Es zwar zu dieser Zeit allgemein bekannt, wer dem absoluten Raum Newtons ein Ende machte – auch Einstein hat das in aller Klarheit in seinem Nachruf „Ernst Mach“ selbst auf den Punkt gebracht: Es war Ernst Mach (Einstein, 1916c, pp. 102-103). Es ist daher nicht unwahrscheinlich, dass er seine Gedanken mit Hilfe von Emil Cohns (Cohn, 1900a) (Cohn, 1900b) (Cohn, 1901) und Machs Arbeiten (Mach, 1873a)¹⁶⁷ (Mach, 1873b) weiterentwickelte. Sehen wir uns dazu die Arbeiten von Mach etwas genauer an – womöglich lassen sich Verbindungen herstellen, die der weiteren Forschung auf diesem Gebiet weiterhelfen könnte.

Interessant ist beispielsweise, dass wir bei Mach ebenso einen Vorschlag für ein Experiment mit Spiegeln finden (Abb.: 4) (Mach, 1873a, p. 32). Da Einstein hat in einem Brief an Mileva Maric (10. September 1899) (CPAE 1; 54; p. 230) darauf hingewiesen hat, dass er unter

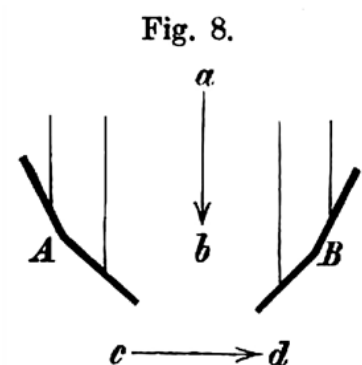


Abbildung 4: Quelle:
https://reader.digitale-sammlungen.de/de/fs1/object/display/bsb11160317_00038.html [Zugriff am 18. September 2020]

¹⁶⁷ Machs Verteidigung (1860) des Doppler’schen Prinzips kann grob in vier Bereiche aufgeteilt werden:

1. Theoretische/mathematische Widerlegung der Kritiker (Mach, 1873a, pp. 5-9).
2. Kritik an experimentellen Physikern, die glauben, Doppler widerlegt zu haben (Mach, 1873a, p. 10).
3. Selbstgebautes Instrument zur empirischen Demonstration des Doppler-Effekts (Mach, 1873a, pp. 11-14).
4. Erklärung und Vorschlag, wie man das Doppler’sche Prinzip für die Astronomie fruchtbar machen kann (Mach, 1873a, pp. 14-21).

Man kann deutlich erkennen, welcher Teil wohl Mach am bedeutsamsten erschienen sein mag: die Konsequenzen für die Astrophysik. (Darüber schreibt er 8 Seiten lang – also die Hälfte seiner Arbeit.)

anderem bereits Machs Werke bestellt hat und dass er Untersuchungen zur Relativbewegung des Lichtes gegenüber dem Äther überlegt hat, ist es möglich, dass er vielleicht von diesem Gedankenexperiment von Mach unter anderem inspiriert worden sein könnte.

Beispielsweise bespricht Einstein die Experimente zum Äther nicht nur in seiner Kyoto Rede von 1922, sondern auch in seinem Buch *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie* (1917)¹⁶⁸ (Einstein, 2009). Dort schreibt er (im Zusammenhang mit dem Michelson-Experiment:

„Man denke sich an einem starren Körper zwei Spiegel angeordnet, welche einander die reflektierende Seite zukehren.“ (Einstein, 2009, p. 35)

Dieser Aufbau des Experimentes entspricht nicht dem von Michelson-Morley – es ist jedoch ähnlich dem Experiment in seiner Kyoto-Rede (wobei die Thermoelemente unerwähnt bleiben). Ein paar Seiten zuvor (Einstein, 2009, p. 33) geht er darauf ein, wie man anhand der Spektrallinien den Doppler-Effekt bestimmen kann. Interessant ist, dass es zuerst Mach war, der den Vorschlag machte (Mach, 1873a, pp. 17-18) wie man mit Spektrallinien den Doppler-Effekt messen könnte. Eine Seite zuvor bespricht Mach in seiner eigenen Arbeit die Machsche Pfeife¹⁶⁹ (Mach, 1873a, p. 31) – ganz analog argumentiert Einstein über den „Ton einer Orgelpfeife“ (Einstein, 2009, p. 10).¹⁷⁰

Doch kommen wir nun zurück zu Machs Experiment mit den Spiegeln... Es macht auf einen Versuch von Fizeau aufmerksam, welcher ihn zu seinem Gedankenexperiment inspiriert hat (Mach, 1873a, pp. 31-32).¹⁷¹ Und zwar wollte Mach mit seinem Experiment den Doppler-Effekt des Lichtes experimentell zeigen. Das Licht kommt dabei von der Richtung *a* nach *b* von der Sonne. Währenddessen bewegt sich die Erde von *c* nach *d*. Aufgrund der Bewegung der Erde sollte nun eine Differenz der Wellenlänge der reflektierten Lichtstrahlen aufgrund

¹⁶⁸ Zur Entstehungsgeschichte des Buches siehe „Einstein’s Popular Book on Relativity“ (CPAE 6; _ ; p. 417-419).

¹⁶⁹ Zur Machschen Pfeife siehe auch (Mathelitsch & Verovnik, 2016) – sie beginnen ihren Artikel mit den Worten: „Die von Ernst Mach entwickelte Pfeife ist kein Musikinstrument, schrieb aber Physikgeschichte zum Doppler-Effekt.“ (Mathelitsch & Verovnik, 2016, p. 238)

¹⁷⁰ Über die Orgelpfeifen spricht Mach vor allem in einer anderen Arbeit (Mach, 1873b).

¹⁷¹ Mach weist darauf hin, dass seine Inspiration für sein Gedankenexperiment von Fizeau kam. Einstein wird später ein anderes Experiment von Fizeau als experimentum crucis für die spezielle Relativitätstheorie bezeichnen. Mach hätte unter anderem Einstein beeinflussen können, um Fizeaus Experimente genauer zu betrachten. Oder Einstein kannte Fizeaus Arbeit bereits ziemlich gut und interessierte sich daher für Machs Experimente. Beide Szenarien sind möglich.

des Doppler-Effekts beim Interferenzspiegel von *A* und *B* sich ergeben, die man hätte messen können (Mach, 1873a, p. 32).¹⁷²

Das Gedankenexperiment hat also die Aufgabe mit Hilfe des Doppler-Effekts die *relative Bewegung der Erde zur Sonne* zu messen – siehe dazu möglichen Parallelen in (Einstein, 2009, p. 36) und [16] in Einsteins Rede.

Bemerkenswerter ist aber vor allem, dass auch Mach bei seiner Argumentation für den Doppler-Effekt aus dem Jahre 1860 (Mach, 1873a) nicht auf den Äther eingeht¹⁷³ und das ist kein Einzelfall.¹⁷⁴ Denn im selben Jahr erschien auch sein Buch *Optisch-akustische Versuche: die spectrale und stroboskopische Untersuchung tönender Körper* (Mach, 1873b) – in diesem Buch verwendet Mach den Begriff „Äther“ nicht ein einziges Mal, obwohl er detailliert auf die Interferenzerscheinungen des Lichtes eingeht (Mach, 1873b, pp. 94-108), da er die Eigenschaften von Licht- und Schallwellen (in Körpern) untersucht – mehr dazu zu diesem Thema erfährt man in „Ernst Mach in Prague and the Dawn of Gas Dynamics“ von Rudolf Dvorak (Dvorak, 2019, pp. 239-242).

Da Mach dem Äther die bedeutende Rolle abspricht, wird er eindeutig zum Wegbereiter für Einsteins Spezieller Relativitätstheorie. Somit kann man Mach zuschreiben, dass er sowohl dem absoluten Raum, der absoluten Zeit, als auch dem Äther „eine Abfuhr erteilte“ und die wichtigsten Puzzlestücke zur Verfügung stellte.

Doch es gibt noch einen weiteren Punkt, welcher einen Hinweis verdient: in *Optisch-akustische Versuche* (Mach, 1873b) geht Mach auf die Molekulartheorie ein (Mach, 1873b, pp. 26-27, 33, 38-39, 43, 51, 53, 55-59) – von einer (absoluten) Gegnerschaft Machs gegenüber der Teilchentheorie bzw. Molekulartheorie, wie es einige Legenden berichten, ist daher nichts zu erkennen. Für ihn ist es offensichtlich kein Problem, die Molekulartheorie

¹⁷² Bei einem anderen Gedankenexperiment verwendet Einstein „zwei um 90° gegeneinander geneigte Spiegel“ (Einstein, 2009, p. 14) um die Relativität der Gleichzeitigkeit anhand von Zügen verständlich zu machen.

¹⁷³ In seiner gesamten Arbeit aus dem Jahre 1860 kommt der Begriff „Äther“ nur ein einziges Mal gegen Ende der Arbeit vor. Und zwar meint er, dass es „wahrscheinlich“ ist, dass man bei „Sternen“, die sich schnell bewegen „auf den Widerstand im Aether Rücksicht nehmen muss.“ (Mach, 1873a, p. 20). Er hielt es also für möglich, dass große Objekte, wie Sterne, vielleicht vom Äther in ihrer Bewegung gebremst werden. (Gutmöglich, dass er hierbei an Dopplers Erläuterungen dachte (Doppler, 2000, pp. 51, 119-120).) Doch *nirgendwo* bringt er den Äther mit dem Doppler-Effekt in Verbindung.

¹⁷⁴ Ganz anders ist es noch bei Christian Doppler. Er widmet ganze Arbeiten dem Thema, wie das Licht – nach seiner Theorie – durch die Mitführung des Äthers an rotierenden (Himmels)körpern ablenkt wird (Doppler, 2000, p. 35) usw.

zusätzlich zur Wellentheorie anzuwenden. In *Beiträge zur Doppler'schen Theorie der Ton- und Farbänderungen durch Bewegung* (Mach, 1873a) verwendet er zudem das Teilchenmodell¹⁷⁵ und das mathematische Wellenmodell. Die Tatsache, dass Mach Lichtteilchen in die Diskussion einbringt, ist ein genialer Trick, der direkt als Vorstufe zu Einsteins Lichtquantenhypothese angesehen werden kann.¹⁷⁶ Kommen wir aber wieder zurück zur Speziellen Relativitätstheorie...

Mach geht in seinen Untersuchungen sowohl beim Doppler-Effekt in der Akustik als auch in der Optik *nur* auf die relativen Bewegungen zwischen Beobachter (= Empfänger) und der Quelle ein. Wenn die Relativgeschwindigkeiten des Beobachters und/oder der Quelle gegenüber der Wellengeschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit bzw. Lichtgeschwindigkeit) wesentlich kleiner sind, dann kann man die Relativgeschwindigkeiten von Beobachter und/oder Quelle näherungsweise vernachlässigen, da sie zur Frequenzänderung wenig beitragen. Die Relativgeschwindigkeiten der Sonne und der Erde sind viele Größenordnungen kleiner als die Lichtgeschwindigkeit. Insofern lässt sich die Arbeit von Mach so lesen, dass alle Systeme, die sich mit einer Relativgeschwindigkeit bewegen bezüglich der physikalischen Gesetze gleichberechtigt sind – wir haben an dieser Stelle daher eine (intuitive) Anwendung des Relativitätsprinzips sowohl in der Akustik als auch in der Optik.

Wenn man aber gerade das Medium bzw. den Äther in seine Untersuchungen einbeziehen möchte, was ja Einstein in seinem Brief an Mileva Maric (10. September 1899) vorhat zu tun, sollte man Machs Konzept und das Experiment weiterentwickeln. Besonders interessant in diesem Zusammenhang wird nun das Mach-Zehnder Interferometer (Mach, 1891). Schauen wir uns dafür die Skizze (Abb. 5) (Mach, 1891, p. 277 (Fig. 2)) von Ludwig Mach an, dem ältesten Sohn von Ernst Mach, welche die Funktionsweise zu erklären versucht. Der

¹⁷⁵ (Mach, 1873a, p. 8). Es sei hier nur angemerkt, dass Mach das Teilchenmodell nicht grundsätzlich (und sein ganzes Leben lang) ablehnte (Wolters, 1988) und es zeitweise sogar selbst verwendete. Ebenso ist es eine hartnäckige Legende, dass Ludwig Boltzmann und Mach wegen der Atomtheorie verfeindet waren. Boltzmann sah sich als Nachfolger von Mach (an der Universität Wien) und stand mit ihm in Korrespondenz – siehe (Thiele, 1978, pp. 44-52). Und wenn man das „Wunderjahr“ von Einstein verstehen will, dann führt der Weg dorthin unter anderem über Ernst Mach und Ludwig Boltzmann.

¹⁷⁶ Siehe dazu auch allgemein: „5.4. Anhang IV: Einsteins Unterhaltung mit Ernst Mach über die Atomtheorie – und die Lichtquantenhypothese?“. Diesen Hinweis verdanke ich Bernhard Baumgartner. Der Titel der Arbeit „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ (Einstein, 1905i) zeigt nach Baumgartner, dass Einstein eine *heuristische Annahme* machen möchte, was als eine Folge des Machschen Programms angesehen werden kann. Ähnlich wie Mach hat auch Einstein hier das Teilchenmodell des Lichtes daher eher als ein Hilfsmittel für seine Untersuchungen angesehen.

Lichtstrahl kommt vom Punkt „O“ (rechts oben) und wird am Strahlteiler A_1 in zwei Teilstrahlen aufgeteilt, die dann senkrecht zueinander verlaufen. Anschließend werden die Teilstrahlen jeweils von den zwei vollständig reflektierenden Spiegeln B_1 und A_2 weitergeleitet, so dass sich ein Strahlengang in Form eines Rechtecks ergibt, der beim Kreuzungspunkt B_2 Ausgang findet, wobei die Strahlen b_1 und a_1 miteinander interferieren können.

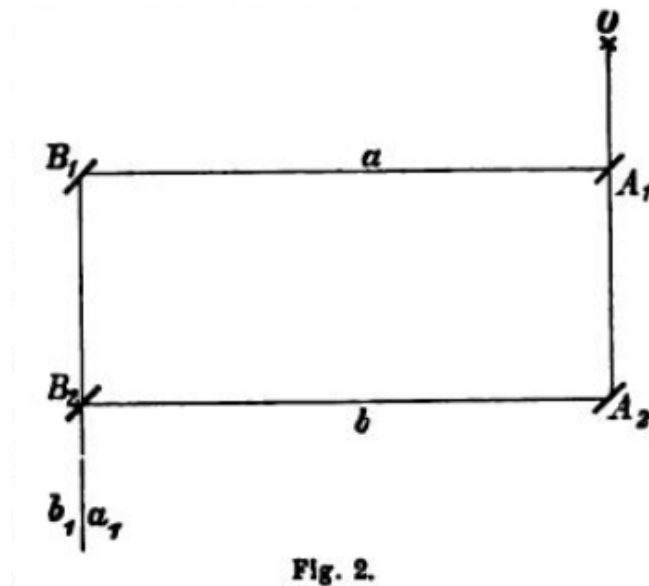


Abbildung 5: Quelle: <https://archive.org/details/zeitschriftfrin11gergoog/page/n291/mode/2up> [Zugriff am 18. September 2020]

In seiner nächsten Veröffentlichung verfeinert Ludwig Mach die Apparatur, in dem er unter anderem ein Prisma beim Ausgang hinzufügt – siehe Abb. 6 (Mach, 1892, p. 92 (Fig. 6)).

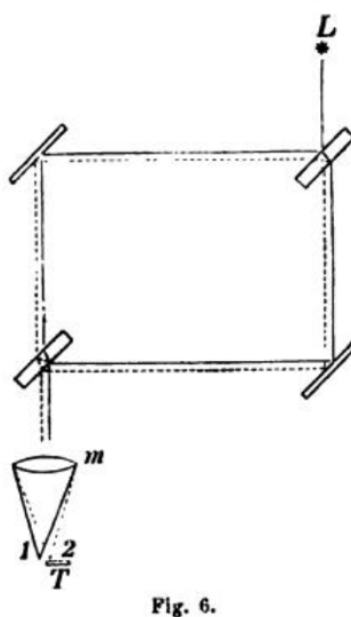


Abbildung 6: Quelle: <https://archive.org/details/zeitschriftfrin14gergoog/page/n107/mode/2up> [Zugriff am 18. September 2020]

Beim Prisma verweist Ludwig Mach (Mach, 1892, pp. 92, fn. 3) auf die Arbeit (Mach, 1873b) seines Vaters Ernst Mach.¹⁷⁷ Wenn Einstein sich also für Interferometer interessierte und Ludwig Machs Arbeiten las, wäre er wieder auf Ernst Machs hingewiesen worden. Um die relative Bewegung der Erde gegenüber dem hypothetischen Äther zu messen, wie es Einstein offensichtlich ab 1889 vorschwebte, wäre eine solche Apparatur sicher interessant gewesen.

In diesem Zusammenhang ist ein weiterer Artikel „Die Relativitätstheorie“ (1915) – erschienen in *Die Kultur der Gegenwart* – von Einstein erwähnenswert, denn in dieser Arbeit verwendet Einstein zum ersten Mal den Begriff „Spezielle Relativitätstheorie“¹⁷⁸. Dort bespricht Einstein das Experiment von Fizeau und erklärt:

„Diese Auffassung führte zu der Frage, wie sich dieser Äther in mechanischer Beziehung zur Materie verhalte. Insbesondere erhebt sich die Frage: Beteiligt sich der Äther an den Bewegungen der ponderablen Materie? Diese Frage führte den genialen Physiker Fizeau zu einem Experiment von fundamentaler Wichtigkeit, das im folgenden kurz schematisch zu besprechen ist.

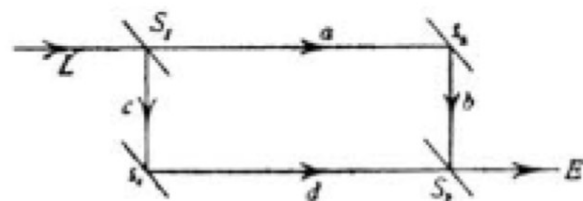


Fig. 1.

Figure 6: Quelle:

<https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol4-doc/558>
[Zugriff am 18. September 2020]

Ein Lichtstrahl L falle auf einen halb durchlässigen Spiegel S_1 und werde hier in zwei Teilstrahlen zerlegt. Der erste Teilstrahl gelange über a und b nach Reflexion an dem Spiegel S_2 und an dem halb durchlässigen Spiegel S_2 nach E . Der zweite Teilstrahl gelange nach Reflexion an S_1 und s_1 über c und d durch S_2 nach E . Bei E gelangen beide Teilstrahlen zur Interferenz; es entstehen Interferenzfransen, deren Abstände von der Justierung des Apparates abhängen. Die Lage dieser Interferenzfransen hängt ab von der Differenz der Zeiten, welche beide Teilstrahlen zum Durchlaufen ihres Weges brauchen.“

(CPAE 4; 21; p. 536)

Auf das Experiment von Fizeau, geht er erst auf der nächsten Seite ein. Was kann uns diese Skizze nun zeigen? Erstens ist erkenntlich, wie sehr der Aufbau des Fizeauschen Experiments

¹⁷⁷ Ebenso verweist Ludwig Mach auf den Schweizer Physiker Ludwig Zehnder, der 1891 eine ähnliche Apparatur entwickelt hat (Mach, 1892, p. 89). Mehr über die Geschichte des Interferometers im Zusammenhang mit der Relativitätstheorie berichtet (Wolters, 2019, pp. 376; 378-379)¹⁷⁷ und Johannes-Geert Hagmann diskutiert Ernst Machs Einfluss auf die Schriften seines Sohnes Ludwig Mach (Mach, 1891) (Mach, 1892) in „Light and Shadow – The Experimental Collaboration Between Ernst Mach and Ludwig Mach, Father and Son“ (Hagmann, 2019).

¹⁷⁸ „In the revised version of this paper (Einstein 1925b) that was published in the second edition of the physics volume of *Die Kultur der Gegenwart*, the text is preceded by the heading ‘I. Spezielle Relativitätstheorie’ (‘I. Special Theory of Relativity’).“ (CPAE 4; 21; p. 550, fn. 2)

dem Mach-Zehnder Interferometer ähnlich ist – zu Aufbau und Funktion des Fizeau'schen Experiments siehe (Cassini & Levinas, 2019, pp. 60, Fig. 1) und Einsteins Zeichnung für seine Vorlesung im Jahre 1914/1915 (CPAE 6; 7; p. 44). Wenn man aber nur die obige Erklärung zu seiner eigenen Skizze liest, würde man auf das Experiment von Fizeau erst gar nicht kommen. Aufgrund seiner Skizze und Einsteins allgemeinem Interesse an Interferenzversuchen, lässt sich vermuten, dass er den Mach-Zehnder-Interferometer kannte.

Kehren wir nun wieder zurück zu Machs Gedankenexperiment mit den Spiegeln. Natürlich stellt sich die Frage, weshalb Mach seine Überlegungen zum Doppler-Effekt nicht weiterverfolgte. Die Antwort auf diese Frage ist dieselbe, wie auf jene, weshalb er nicht selbst versucht hat die Mechanik mit den Maxwell-Gleichungen in Einklang zu bringen (um anschließend den Doppler-Effekt und die Aberration zu untersuchen) ... nämlich: Das Gedankenexperiment von Mach ist aus dem Jahre 1862.

James C. Maxwells wichtiges Werk „A dynamical theory of the electromagnetic field“ in welchem seine Gleichungen zu finden sind, erscheint aber erst 1865. (Zu denen er bereits zwischen 1861-1864 publiziert hat.) Es wird dann noch mehrere Jahrzehnte dauern, bis aus diesen 20 ursprünglichen Gleichungen, Formel in etwa das entsteht, was wir heute als die Maxwell-Gleichungen kennen. Wie Einstein in seiner Schrift „Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt“ (1920) betont:

„Die spezielle Relativitätstheorie ist nichts anderes als eine widerspruchsfreie Verschmelzung der Ergebnisse der Maxwell-Lorentz'schen Elektrodynamik mit denjenigen der klassischen Mechanik.“ (CPAE 7; 31; p. 245)

So gesehen ist es nicht überraschend, dass Ernst Mach als Experimentalphysiker der oben gestellten Frage in seiner Arbeit, wo er sich vor allem auf den experimentellen Nachweis des Doppler-Effekts fokussiert, nicht nachgegangen ist. (In den kommenden Jahren wird er sich dann anderen Aufgaben auf verschiedensten Gebieten widmen.) Auf diese Tatsache scheint Einstein in seinem Nachruf „Ernst Mach“ (1916) hinzuweisen:

„Es ist nicht unwahrscheinlich, daß Mach auf die Relativitätstheorie gekommen wäre, wenn in der Zeit, als er jugendfrischen Geistes war, die Frage nach der Bedeutung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit schon die Physiker bewegt hätte. Beim Fehlen dieser aus der *Maxwell-Lorentz*schen Elektrodynamik fließenden Anregung reichte auch Machs kritisches Bedürfnis

nicht hin, um das Gefühl der Notwendigkeit einer Definition der Gleichzeitigkeit örtlich
distanter Ereignisse zu erwecken.“ (Einstein, 1916c, p. 103) (CPAE 6; 29; p. 280)¹⁷⁹

Einstein selbst betont hier deutlich, was nach seiner Einschätzung bei Mach (aus historischen Gründen) noch gefehlt hat: Eine theoretische Auseinandersetzung mit der Elektrodynamik, die ihn zuerst zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und anschließend zu einer Behandlung der Gleichzeitigkeit geführt hätte. Genau diese Etappen bespricht Einstein in seiner Rede gleich als nächstes.

Wenn wir uns nun in den jungen Einstein hineinversetzen, der über dieses Gedankenexperiment von Mach nachdenkt, lässt sich die Situation einfach nachvollziehen.

Bei seinem Gedankenexperiment setzt Mach die Relativbewegung für die Optik einfach voraus, weil er die relative Bewegung der Erde zur Sonne untersuchen möchte (und die Relativbewegungen zum Medium allgemein vernachlässigbar sind).

Betrachtet man aber dieses Experiment unter dem Blickwinkel und den Problemen der Elektrodynamik, dann stellt sich die Frage, welche Rolle der Äther genau spielt. Was ist nun mit der „absoluten“ Bewegung der Erde gegenüber dem Äther? Um diese Frage klar beantworten zu können, darf man aber als Lichtquelle nicht die Sonne (oder einen anderen Stern) nehmen, da dies stets nur als eine relative Bewegung der Erde zum Stern interpretiert werden könnte. So erklärt H.-J. Treder: „Eine tatsächliche Absolutbestimmung der Bewegung der Erde kann nur mit dem Licht irdischer Quellen arbeiten, [...]“ (Treder, 1982, p. 93). Aus diesem Grund ist es auch verständlich, weshalb Einstein das Gedankenexperiment ummodellieren musste. (Allgemein hat Einstein wahrscheinlich mehrere Variationen des Experiments gedanklich geplant gehabt – siehe (Stachel, 1982, p. 50) (Pais, 1982, p. 133). Bei Einsteins Gedankenexperiment sind die Spiegel anders gestellt und mit Thermoelementen versehen. Dabei kommt das Licht nicht von der Sonne und wird in entgegengesetzte Richtungen gespalten. Einstein fragt sich, ob man mit Hilfe des Doppler-Effekts eine Bewegung der Erde gegenüber dem Äther messen kann [8]-[11]. Spätestens nach dem Ergebnis des Michelson-Experiments dürfte ihm klar gewesen sein, dass das nicht

¹⁷⁹ Im vorherigen Satz heißt es:

„Die zitierten Zeilen zeigen, daß Mach die schwachen Seiten der klassischen Mechanik klar erkannt hat und nicht weit davon entfernt war, eine allgemeine Relativitätstheorie zu fordern, und dies schon vor fast einem halben Jahrhundert!“ (Einstein, 1916c, p. 103) (CPAE 6; 29; p. 280)

In diesem Abschnitt bringt Einstein Machs Konzepte somit unmissverständlich sowohl mit der Speziellen als auch mit der Allgemeinen Relativitätstheorie in Verbindung.

geht und somit das Relativitätsprinzip gilt [13]-[15]. Deshalb bespricht Einstein das Michelson-Experiment in seiner Rede gleich im Zusammenhang mit dem Relativitätsprinzip [14], wo dieser Absatz dann auch endet und daher nicht im Zusammenhang mit der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit steht.

4.4.2.2. *Thema II: Der Widerspruch [16]-[25]*

In den vorherigen Zeilen [3]-[15] erwähnte Einstein, wie er durch das Michelson-Morley Experiment zum Relativitätsprinzip kam. Nun verweist er auf eine Arbeit von Lorentz [16] und bespricht zusätzlich das Experiment von Fizeau [17]. Aufgrund der Maxwell-Lorentzschen Theorie, so erzählt er weiter, ging er von einer Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für Inertialsysteme aus [18]-[19]. Diese Annahme vertrug sich aber nicht mit der Geschwindigkeitsaddition der Mechanik [20]. Hier war also ein „Widerspruch“ [21] gegeben, welcher ihn längere Zeit beschäftigte.

Im Abschnitt „3.3.2. Die Widersprüche in den Experimenten vor der Speziellen Relativitätstheorie“ sind wir bereits darauf eingegangen. Durch Emil Cohns Erläuterungen wissen wir genau, wie dieser Widerspruch zu verstehen war und wie er durch die Spezielle Relativitätstheorie gelöst wurde: Das Experiment von Michelson und Morley zeigte, dass das Relativitätsprinzip gelten musste – das Experiment von Fizeau schien dem jedoch zu widersprechen (Cohn, 1920, p. 9). Die Lösung des Widerspruchs konnte nur gelingen, wenn man die klassische Transformation und die klassische Geschwindigkeitsaddition durch die relativistische Transformation und die Geschwindigkeitsaddition ersetzte. Einstein geht darauf im Abschnitt „§7. Scheinbare Unvereinbarkeit des Prinzips der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit mit dem Relativitätsprinzip.“¹⁸⁰ (CPAE 4; 1; p. 32-36) seines Artikels zur Speziellen Relativitätstheorie (1912-1914) detailliert ein, der leider nie veröffentlicht wurde, und bringt es auf den Punkt:

„Genau genommen haben wir aber nur eingesehen, dass folgende drei Dinge miteinander nicht vereinbar sind

a) das Relativitätsprinzip

¹⁸⁰ Zuerst bespricht Einstein das Fizeausche Experiment (CPAE 4; 1; p. 27-28), anschließend leitet er im Abschnitt „§5. Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ (CPAE 4; 1; p. 29) aus den Maxwellschen Gleichungen bzw. der Lorentzschen Theorie die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ab und im Paragraphen „§6. Das Relativitätsprinzip“ (CPAE 4; 1; p. 30-32) bespricht er das Relativitätsprinzip und den Michelson-Morley Versuch. Die Erläuterungen im Paragraphen „§7“ beziehen sich daher auf diese vorherigen Abschnitte – auf Fizeaus und Michelsons Experiment geht er wieder ein (CPAE 4; 1; p. 33-34).

- b) das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (Lorentz'sche Theorie)
- c) die Transformationsgleichungen (II), bzw. das Gesetz vom Parallelogramm der Geschwindigkeiten

Zu der heute als ‚Relativitätstheorie‘ bezeichneten Theorie gelangt man, indem man a) und b) beibehält, c) aber verwirft.“ (CPAE 4; 1; p. 33)

Wenn die Beschreibung des Problems und die Lösung dessen so einfach ist, weshalb war es dann so schwierig für die Einstein-Forschung es zu erkennen? Wir wollen versuchen hierauf eine Antwort zu geben.

Weshalb in der Forschung lange gezweifelt wurde¹⁸¹, ob das Michelson-Morley Experiment für Einstein eine wichtige Rolle gespielt hat, oder nicht, lässt sich erklären. Dafür gibt es vor allem zwei Gründe:

1.) Wie wir schon erklärt haben, verweist Einstein in „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905) nicht auf andere Arbeiten – den Grund dafür haben wir in den Abschnitten „2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“, „2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“ und „2.1.2.2.3. Der Diskurs und seine experimentelle Ebene: Magnet und Leiter“ bereits erklärt: Einsteins Schrift „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) kann als eine Antwort auf die Diskussion zwischen Wilhelm Wien, Emil Cohn und Max Abraham angesehen werden, die in *den Annalen der Physik* im Jahre 1904 geführt wurde, wo bereits der Forschungsstand zur Genüge genannt wurde.

2.) Sehen wir uns an, welche Hinweise Einstein auf den Forschungsstand gegeben hat, ohne auf die Quellen detailliert einzugehen. Auf der ersten Seite erklärt er:

„Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum ‘Lichtmedium’ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist.“ (Einstein, 1905r, p. 891)

¹⁸¹ Für Argumente, die zeigen, dass Einstein das Michelson-Morley Experiment kannte siehe (Pais, 1982, pp. 116-117), (Sexl, 1985), (Abiko, 2000) und (Dongen, 2009). Für gegen Ansichten siehe (Holton, 1988) und (Stachel, 1982).

Da Einstein auf keine Arbeiten verweist, lässt sich natürlich nicht einordnen, welches Experiment / welche Experimente er hier meint. Bei seiner ersten systematischen Erklärung der Speziellen Relativitätstheorie „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) wird Einstein mit seinen Hinweisen aber konkreter:

„Seit dem Durchdringen jener Theorie mußte man erwarten, daß es gelingen werde, einen Einfluß der Bewegung der Erde relativ zum Lichtäther auf die optischen Erscheinungen nachzuweisen. Lorentz bewies allerdings bekanntlich in jener Arbeit¹⁸², daß nach seinen Grundannahmen eine Beeinflussung des Strahlenganges bei optischen Versuchen durch jene Relativbewegung nicht zu erwarten sei, sofern man sich bei der Rechnung auf die Glieder beschränkt, in denen das Verhältnis $\frac{v}{c}$ jener Relativgeschwindigkeit zur Lichtgeschwindigkeit im Vakuum in der ersten Potenz auftritt. Aber das negative Resultat des Experimentes von Michelson und Morley zeigte, daß in einem bestimmten Falle auch ein Effekt zweiter Ordnung (proportional $\frac{v^2}{c^2}$) nicht vorhanden war, trotzdem er nach den Grundlagen der Lorentzschen Theorie bei dem Versuche sich hätte bemerkbar machen müssen.“
(CPAE 2; 47; p. 434)

Lorentz erklärte (1895) theoretisch, weshalb Effekte erster Ordnung ($\frac{v}{c}$) experimentell nicht nachweisbar sein konnten – im „ABSCHNITT V. Anwendung auf die optischen Erscheinungen“ betont er:

„Ueberhaupt wird nach unserer Theorie die Bewegung der Erde nie einen Einfluss erster Ordnung auf Versuche mit terrestrischen Lichtquellen haben.“ (Lorentz, 1895, p. 91)

Das Michelson-Morley-Experiment schloss jedoch auch die zweiter Ordnung ($\frac{v^2}{c^2}$) aus.

Weshalb er diese Tatsache nicht bereits in seinem Werk „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) ebenso erläuterte, lässt sich einfach erklären, wenn wir annehmen, dass er sich damals an Alexander Eichenwalds Artikel „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1904b, p. 943) orientierte.¹⁸³ Einstein wusste aufgrund des Artikels von Wien (Wien, 1898), durch das Buch von Lorentz und schließlich durch die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien, Cohn und Abraham über die experimentelle Situation im Forschungsstand.

¹⁸² Damit ist Lorentz Werk: „Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern. Leiden 1895.“ gemeint – siehe dazu (CPAE 2; 47; p. 434; fn. 1) und (CPAE 2; 47; p. 485; fn. 2).

¹⁸³ Siehe Abschnitt „2.1.2.2.3.1. Ad 1.:“.

An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass im „ABSCHNITT V. Anwendung auf die optischen Erscheinungen“ von Lorentz der Versuch von Fizeau (1859) (Lorentz, 1895, p. 99)¹⁸⁴ und dessen Wiederholung von Michelson und Morley (1886) (Lorentz, 1895, p. 100)¹⁸⁵ besprochen wird. Im nächsten Abschnitt wird detailliert auf den Interferenzversuch Michelsons (1881) (Lorentz, 1895, pp. 120-125) eingegangen. Allein das Buch (Lorentz, 1895) bot Einstein somit mit Sicherheit einen Überblick über den experimentellen Forschungsstand in der Physik – es hat ihn aber sicher auch theoretisch sehr gefördert. Im „Abschnitt V“ geht Lorentz auch auf die „Ortszeit“¹⁸⁶ (Lorentz, 1895, p. 110) ein, welche Einstein eben später uminterpretiert hat, wie wir bereits oben besprochen haben.¹⁸⁷ Die „Ortszeit“ bespricht Lorentz jedoch bereits im „ABSCHNITT III.: Untersuchung der Schwingungen, welche von oscillirenden Ionen erregt werden“ (Lorentz, 1895, pp. 50-54). Am Ende dieses Kapitels wird in diesem Zusammenhang sogleich das „Das Doppler’sche Gesetz“ (Lorentz, 1895, pp. 56-58) besprochen. Wir werden die wichtige Rolle des Dopplerschen Prinzips bei der Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie in den kommenden Abschnitten:

- „4.4.2.3.1. Die Neudefinition der Zeit: Cohn und Machs möglicher Einfluss“,
- „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“,
- „4.4.2.3.3. Der Doppler-Effekt als Lösung für die Diskussion zwischen Wien und Abraham“ und
- „4.4.2.3.4. Der Doppler-Effekt als Erklärung für Einsteins Gedankenexperiment „Chasing the light““

näher erläutern.

¹⁸⁴ Siehe dazu auch (Lorentz, 1895, pp. 2-3).

¹⁸⁵ Siehe dazu auch (Lorentz, 1895, p. 3).

¹⁸⁶ Siehe dazu auch (Lorentz, 1895, pp. 50-54).

¹⁸⁷ Siehe die Abschnitte: „3.2. Entstehungsgeschichte der SRT: Einstein erwähnt Cohn“ und „2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“.

4.4.2.3. *Thema III: Die Lösung des Widerspruchs (durch die Neudefinition der Zeit) [26]-[39]*

Allgemein bespricht Einstein [23]-[38], dass er mit dem theoretischen Konzept von Lorentz nicht ganz einverstanden war und dass vor allem das Verständnis der Zeit ihm zu denken gab. Diese Erzählweise deckt sich auch mit Wertheimers Äußerungen (Wertheimer, 2019, pp. 235-236).

Wie die Lösung des Widerspruchs gelingen konnte, ließ sich mit Hilfe von Cohn erklären. Im Abschnitt „3.3.2.3.1. Der Weg zur SRT: Synchronisieren der Zeit“ haben wir besprochen, dass man die Zeitwerte miteinander per Lichtsignal synchronisieren sollte (Cohn, 1920, pp. 9-10). Wenn wir die Zeit per Licht definieren, das Licht aber konstant ist, dann erhalten wir, aufgrund des Relativitätsprinzips, eine neue Interpretation der Zeit – sie wird relativ; so auch die Gleichzeitigkeit (Cohn, 1920, pp. 10-18).

Dadurch ist die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie rational nachvollziehbar, wie wir im Abschnitt „3.3.2.3.2. Die SRT als eine theoretische Antwort auf die experimentellen Ergebnisse“ erläutert haben: Mit Hilfe der Speziellen Relativitätstheorie lässt sich einerseits das Ergebnis des Michelson-Experiments erklären (Cohn, 1920, p. 19) und andererseits das Experiment von Fizeau (Cohn, 1920, pp. 29-30).

Wenn wir zusammenfassen, dann erkennen wir, dass Cohns Rekonstruktion ebenso mit dem Inhalt der Kyoto-Rede übereinstimmt:

Nach Cohns Darstellung war es der Wendepunkt, die Zeit physikalisch durch Lichtsignale zu definieren [36]. Dadurch konnte das klassische Verständnis der Zeitdefinition dem relativistischen weichen [35]. Anschließend konnte man zu den relativistischen Transformationsgleichung gelangen und von der relativistischen Transformation wiederum zu der relativistischen Geschwindigkeitsaddition, womit man die theoretischen Widersprüche in den Experimenten in einer einfachen Form auflösen konnte [37]-[39].

Interessant an der Kyoto-Rede ist, dass sie noch eine zusätzliche Information enthält, die in Cohns Darstellung nicht gegeben ist; nämlich, dass Einsteins Freund Besso bei der Lösung

des Problems eine wichtige Rolle gespielt hat [26]-[33].¹⁸⁸ Wir sind auf Bessos Rolle im Abschnitt „2.1.1. Das O von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“ kurz eingegangen – sehen wir sie uns nun etwas genauer an.

Einstein sagt, dass „ungefähr vor 17 Jahren“ ihm „die Idee kam“, „Relativitätsprinzipien aufzustellen“ [3]. Das müsste 1905 (1922 - 17 = 1905) gewesen sein – also in jenem Jahr als seine Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) erschien.¹⁸⁹ Wie wir bereits erklärt haben, war für Einstein die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wilhelm Wien (Wien, 1904c) (Wien, 1904b) (Wien, 1904d) (Wien, 1904f) (Wien, 1904e), Emil Cohn (Cohn, 1904) (Cohn, 1904a) (Cohn, 1904b) und Max Abraham (Abraham, 1904b) (Abraham, 1904c) ganz wichtig¹⁹⁰ – diese Diskussion hat Einsteins Weg zur SRT bereitet.

Aber offensichtlich hatte Einstein im Jahr 1905 einen weiteren wichtigen Durchbruch, um diese Diskussion physikalisch abzuschließen. Er erklärt in seiner Rede, dass er „eines schönen Tages“ seinen Freund (Besso in Bern) besuchte [26]-[27], weil Einstein ein physikalisches Problem hatte [28]-[31]. Am nächsten Tag bedankt er sich bei Besso und sagt ihm, dass er nun das Problem gelöst hat [32]-[33]. Und zwar:

„[34] Bei meiner Lösung handelt es sich um den Zeit-Begriff. [35] Die Zeit ist nicht absolut definierbar. [36] Es besteht zwischen der Zeit und der Signalgeschwindigkeit ein untrennbarer Zusammenhang. [37] Das war es. [38] Damit konnten die bisherigen Schwierigkeiten endlich voll geklärt werden.“ (Haubold & Yasui, 1986, p. 275)

¹⁸⁸ Einstein besuchte Besso (am 6. Oktober 1922) auch vor seiner Asien-Reise (CPAE 13; 379; p. 332).

¹⁸⁹ Das bedeutet, dass Einstein 1905 mindestens einen oder mehrere Hinweise bekam, der ihn nach (sieben) Jahren der Suche zu einem wichtigen Thema Aufschluss gab. Dabei könnten vor allem drei Punkte eine wesentliche Rolle gespielt haben:

1. Die wissenschaftliche Diskussion zwischen Cohn, Wien und Abraham, welche im Jahr 1904 in den *Annalen der Physik* stattfand.
2. Ein bedeutender Hinweis war wohl das Gespräch mit seinem Freund Michel Besso, den er sowohl in seiner Kyoto-Rede als auch in „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905) erwähnte.
3. Ein dritter Grund könnte die Arbeit von Föppl gewesen sein, die 1905 erschien. Siehe Abschnitt „2.1.2.2.3.2. Ad 2.:“.

Interessant ist, dass Cohn, Föppl und Besso vor allem eines gemeinsam haben: Sie waren alle sehr von Machs Werken beeinflusst.

Wir werden beide (Besso und Föppl) diskutieren und versuchen, ihre Beziehung zu Mach zu erklären.

¹⁹⁰ Siehe die Abschnitte: „2.1.2.2. Das A: Wissenschaftlicher Dialog zwischen E. Cohn, W. Wien und A. Einstein“, „Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“ und „2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“.

Die Arbeit von Einstein „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ ist am Freitag, 30. Juni 1905, eingegangen (Einstein, 1905r, p. 921). Wir können grob annehmen, dass Einstein die Arbeit wohl am Montag, 26. Juni, versendet hat. Ziehen wir nun fünf Wochen weg, dann kommen wir auf Ende Mai (z.B.: 29.-31. Mai). Dieses Datum lässt sich auch indirekt bestätigen.

Einstein schreibt (am 18. oder 25. Mai) an seinen guten Freund Conrad Habicht:

„Die vier[te] Arbeit liegt erst im Konzept vor und ist eine Elektrodynamik bewegter Körper unter Benützung einer Modifikation der Lehre von Raum und Zeit der rein kinematische Teil dieser Arbeit wird Sie sicher interessieren.“ (CPAE 5; 27; p. 31)¹⁹¹

Wenn wir uns die Wetterdaten von Bern aus jener Zeit ansehen – siehe Abb. 7 (Fäsi & Beer, 1905, p. 25) –, dann erkennen wir, dass es gerade Ende Mai sehr schöne sonnige Tage gab (nahezu keine Bewölkung und somit gar kein Niederschlag, kein Wind, und Temperaturen ab 22°C.).

— 25 —

Bern.

Mai 1905.
Teilur. Observatorium.

$\lambda = 7^{\circ} 26', \beta = 46^{\circ} 57',$
 $H = 572^m, G = 0.05^m_{\text{m.}}$

Tag	Lufttemperatur					Luftdruck			Relative Feuchtigkeit			Windrichtung und Stärke			Bewölkung			Niederschlag	Witterung			
	7h	1h	9h	$\frac{7+1+9}{3}$	Abw. v. Normal.	7h	1h	9h	7h	1h	9h	7h	1h	9h	7h	1h	9h					
1	12.3	20.0	13.0	15.1	4.8	711.7	710.1	708.8	85	57	100	SE	o	NW	1	NW	o	3	7	2	1.6	a Δ ; K_n $\bullet$ $6^{1/4}-6^{3/4}P$
2	12.5	7.0	5.8	8.4	-2.1	709.6	714.0	715.5	90	93	100	SE	o	W	o	SW	o	8	10	10	21.5	$\bullet$ $11^{1/2}-n$
3	6.1	11.0	8.1	8.4	-2.2	716.1	715.9	715.3	100	67	83	SW	o	W	o	N	o	10	6	4	0.2	$\bullet$ $n-7^{1/2}P$
4	6.4	12.7	8.5	9.2	-1.5	715.1	713.7	712.9	99	66	84	N	o	E	1	NE	1	9	10	10	.	a $\equiv$ III
5	7.4	11.7	10.0	9.7	-1.1	711.8	709.4	707.8	91	82	100	SW	o	NE	1	SE	o	10	10	5	.	$\equiv$ III
6	11.8	13.8	9.8	11.8	0.8	707.5	710.6	711.4	86	67	93	SE	1	SW	1	W	o	8	9	10	4.0	$\bullet$ $7P-n$
7	8.3	14.3	10.0	10.9	-0.2	713.9	713.4	713.7	89	58	83	SW	o	NW	o	N	o	10	7	2	.	$\bullet$ $2^{1/4}-2^{3/4}P$
8	10.5	14.2	10.0	11.6	0.4	713.1	711.6	711.4	83	67	96	NW	o	N	o	NE	o	7	10	10	2.5	$\bullet$ $8P-n$
9	9.2	8.7	6.3	5.1	-3.2	712.6	714.9	717.1	99	96	89	NE	o	NE	o	NE	o	10	10	10	4.0	$\bullet$ $n-6^{1/2}P$
10	6.2	11.9	7.8	8.6	-2.9	716.8	716.7	716.6	82	57	63	NE	2	ENE	3	NE	1	3	4	1	.	$\bullet$ III-n
11	7.2	15.2	11.7	11.4	-0.2	715.7	714.6	714.0	72	45	64	NE	o	NE	2	NE	o	o	1	0	.	Δ I, $\bullet$ II
12	9.9	18.3	14.3	14.2	2.5	712.9	711.6	711.7	80	52	77	E	o	NE	1	W	o	1	2	7	5.1	$\bullet$ $7^{1/2}P$
13	7.4	6.8	4.9	6.4	-5.5	712.1	712.3	711.9	97	86	88	NE	o	NE	1	NE	2	10	10	9	1.9	$\bullet$ $4-6, 7^{1/2}-9^2, 4^{1/2}-5^{1/2}P$
14	4.8	7.0	7.8	6.5	-5.5	709.6	710.4	711.1	96	91	96	NE	1	NE	1	NE	o	10	10	10	0.6	$\bullet$ III-n
15	7.7	8.8	9.2	8.6	-3.5	709.9	709.8	709.4	100	100	100	NE	o	NE	1	NE	1	10	10	10	3.9	$\bullet$
16	8.0	10.3	10.6	9.6	-2.6	706.6	707.9	709.2	100	96	98	NE	o	NE	o	SW	o	10	10	9	3.3	Ψ III
17	9.9	15.2	10.4	11.8	-0.6	711.5	711.4	712.8	100	74	100	SW	o	NW	o	SE	o	10	8	10	32.8	$\bullet$ $4-8^{1/2}P, \Delta^o 3^{1/4}-5^{1/2}P$
18	9.6	14.3	10.5	11.5	-1.0	712.8	712.1	712.6	100	69	98	SE	o	SW	o	SE	o	10	9	8	2.8	$\bullet$ $11-11^{1/2}P, 11-11^{1/2}P, *$
19	11.3	17.4	11.2	13.3	0.7	711.7	710.0	709.9	62	94	8	S	o	SE	o	SE	o	9	9	9	2.4	$K_n \bullet 1^{1/4}-1^{3/4}P, \bullet 8^{1/2}-9P$
20	11.6	17.8	10.7	13.4	0.7	708.8	708.2	708.5	96	60	96	SW	o	SW	1	SW	o	8	8	10	4.1	
21	10.9	15.3	11.2	12.5	-0.4	707.7	707.2	705.8	100	68	100	S	o	W	o	NE	o	9	9	8	1.1	$\bullet$ $n-1, o^{1/4}-o^{1/2}P$
22	10.4	6.4	4.1	7.1	-5.9	704.3	704.1	705.8	97	100	100	E	o	NE	1	NE	1	10	10	10	17.6	$\bullet$ $7^{1/4}P-n$
23	3.8	6.0	4.0	4.5	-8.6	705.0	706.2	706.0	100	90	100	NE	o	NE	1	NE	1	10	10	3	.	$\bullet$ $n-5^{1/2}P, \bullet 7^{1/2}-8^{1/2}P$
24	4.3	6.1	5.8	5.4	-7.8	704.8	706.8	708.7	90	86	90	NE	2	NE	1	NE	o	9	10	10	.	$\bullet$ I, $\bullet$ $1^{1/4}P$
25	7.2	10.8	8.4	8.8	-4.5	710.3	711.4	712.7	86	67	80	NE	1	NE	o	E	o	9	8	1	.	
26	7.8	16.5	11.3	11.9	-1.6	713.3	713.2	714.1	87	51	86	E	o	SW	1	SW	o	3	6	3	.	a Δ
27	11.9	19.3	13.2	14.8	1.2	716.0	716.2	717.1	80	39	69	SW	o	W	o	SE	o	2	3	3	.	a Δ
28	12.2	19.6	14.5	15.4	1.7	717.6	716.6	716.6	82	46	58	SE	o	NE	1	ENE	o	1	1	1	.	
29	12.6	22.4	14.8	16.6	2.8	717.2	716.0	715.9	78	46	67	NE	o	N	o	NE	o	1	1	1	.	a Δ
30	13.7	23.2	15.7	17.5	3.5	716.8	715.1	714.3	78	31	63	NE	o	N	o	NE	o	0	0	1	.	a Δ
31	14.9	24.8	17.5	19.1	5.0	714.2	713.0	713.4	70	34	79	SE	o	NW	o	NW	o	0	5	5	.	a Δ
Mittel	9.3	13.8	10.0	11.0	—	711.8	711.8	712.0	90	68	87							6.8	7.2	6.2	109.4	*) 18. $K_n \bullet 1^{1/4}-2, 3P$

Abbildung 7: Quelle: <https://www.meteoschweiz.admin.ch/product/input/documents/annals/annalen-1905.pdf> [Zugriff am 8. Jänner 2021]

¹⁹¹ Siehe dazu auch (CPAE 5; 27; p. 32, fn. 1 und 8).

Es spricht daher nichts dagegen, dass Einstein „eines schönen Tages“ seinen Freund besuchte [26]-[27], um über die Bedeutung des „Zeit-Begriffes“ zu diskutieren.

Dass die Zeit „nicht absolut definierbar“ ist [35] und „zwischen der Zeit und der Signalgeschwindigkeit ein untrennbarer Zusammenhang“ [36] besteht, wird in „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ im Kapitel „I. Kinematischer Teil“ bzw. im „§ 1. Definition der Gleichzeitigkeit“ (Einstein, 1905r, pp. 892-895) erörtert – somit zu Beginn seiner Analyse. **Das war offensichtlich das letzte Puzzlestück, welches Einstein noch fehlte und zugleich der Schlüssel zu seiner Theorie war.** Diese Tatsache hat Einstein auch selber geäußert. In seiner ersten systematischen Erläuterung zur Relativitätstheorie „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (1907) erklärt er:

„Es ist bekannt, daß jener Widerspruch zwischen Theorie und Experiment durch die Beziehung von *H.A. Lorentz* und *Fitzgerald*, nach dem eigenen Körper in der Richtung ihrer Bewegung eine bestimmte Kontraktion erfahren, formell beseitigt wurde. Diese ad hoc eingeführte Annahme erschien aber doch nur als ein künstliches Mittel, um die Theorie zu retten; der Versuch von Michelson und Morley hatte eben gezeigt, daß Erscheinungen auch da dem Relativitätsprinzip entsprechen, wo dies nach der Lorentzschen Theorie nicht einzusehen war. Es hatte daher den Anschein, als ob die Lorentzsche Theorie wieder verlassen und durch eine Theorie ersetzt werden müsse, deren Grundlagen dem Relativitätsprinzip entsprechen, denn eine solche Theorie ließe das negative Ergebnis des Versuches von Michelson und Morley ohne weiteres voraussehen.

Es zeigte sich aber überraschenderweise, daß es nur nötig war, den Begriff der Zeit genügend scharf zu fassen, um über die soeben dargelegte Schwierigkeit hinweg zu kommen. Es bedurfte nur der Erkenntnis, daß man eine von *H. A. Lorentz* eingeführte Hilfsgröße, welche er ‚Ortszeit‘ nannte, als ‚Zeit‘ schlechthin definieren kann.¹⁹² Hält man an der angedeuteten Definition der Zeit fest, so entsprechen die Grundgleichungen der *Lorentzschen* Theorie dem Relativitätsprinzip, wenn man nur die obigen Transformationsgleichungen durch solche ersetzt, welche dem neuen Zeitbegriff entsprechen. Die Hypothese von *H. A. Lorentz* und *Fitzgerald* erscheint dann als eine zwingende Konsequenz der Theorie. Nur die Vorstellung eines Lichtäthers als des Trägers der elektrischen und magnetischen Kräfte paßt nicht in die hier dargelegte Theorie hinein; elektromagnetische Felder erscheinen nämlich hier nicht als Zustände irgendeiner Materie, sondern als selbständig existierende Dinge, die der ponderablen Materie gleichartig sind und mit ihr das Merkmal der Trägheit gemeinsam haben.“

(Einstein, 1907j, p. 413) (CPAE 2; 47; p. 435)

Er musste also die „Ortszeit“, wie sie *H. A. Lorentz* nannte, als die „Zeit“ schlechthin definieren. Das war der Clou an der ganzen Geschichte.¹⁹³

¹⁹² Mehr zum Begriff Ortszeit von Lorentz im Zusammenhang von Fizeau's Experiment und dem Doppler-Effekt findet der Leser in (Cassini & Levinas, 2019, p. 62).

¹⁹³ Siehe dazu auch (CPAE 4; 1; p. 37-39).

4.4.2.3.1. Die Neudefinition der Zeit: Cohns und Machs möglicher Einfluss

Für den Ansatz, die Zeit stets als etwas Physikalisches zu betrachten, waren die Arbeiten von Emil Cohn (Cohn, 1904a) (Cohn, 1904b) für Einstein wegweisend – das haben wir bereits im Abschnitt „2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“ behandelt. Sowohl Cohn als auch Besso und Einstein waren von Machs Konzepten beeinflusst – es dürfte daher kein Zufall sein, dass genau die drei bei der Neuinterpretation der Zeit in der SRT eine wichtige Rolle gespielt haben.

Dass Besso (unter anderem) für die Entstehungsgeschichte der speziellen Relativitätstheorie sehr relevant war, steht außer Zweifel – so beendet Einstein sein monumentales Werk „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ mit den Worten:

„Zum Schlusse bemerke ich, daß mir beim Arbeiten an dem hier behandelten Probleme mein Freund und Kollege M. Besso treu zur Seite stand und daß ich demselben manche wertvolle Anregung verdanke.
Bern, Juni 1905.“ (Einstein, 1905r, p. 921)

Besso ist der Einzige bei dem sich Einstein bedankt, doch um welche „wertvolle[n] Anregung[en]“ handelte es sich hierbei? Aus seiner Kyoto-Rede [26]-[36] ist deutlich erkennbar, dass das Gespräch, welches Besso mit Einstein führte [26], Einstein dabei half zu verstehen, dass die Zeit nicht als absolut definierbar sei [34] und dass zwischen der Zeit und der Signalgeschwindigkeit ein untrennbarer Zusammenhang bestand [36]. Diese Herangehensweise an die Definition der Zeit ist eher eine praktische bzw. ein experimenteller Zugang – im Grund überrascht es daher nicht, dass der Ingenieur Besso, der von den Ideen des Experimentalphysikers Mach beeinflusst war, Einstein dabei helfen konnte. Mehr darüber, worin Bessos Hilfe unter anderem bestand, erfahren wir aus einem Brief von Besso an Einstein (aus dem Jahre 1947):

„Ich stelle mir vor, mit Folgendem eine Aufgabe zu erfüllen. Bist Du anderer Ansicht ... nimm's dem – immerhin im 75ten stehenden¹⁹⁴ – nicht übel...

Genève, 12.X/4.XI.23.XI/8.XII 1947¹⁹⁵

Mein lieber, bester, alter Freund.

¹⁹⁴ Michele Besso lebte von 1873 bis 1955 und war somit 74 Jahre alt, als er diesen Brief verfasste – daher „im 75ten stehend“ und nicht vollendet. Ernst Mach lebte von 1838 bis 1916. Das gefälschte Vorwort von Ernst Mach ist auf 1913 datiert – insofern wäre Mach im Jahre 1913 genau 75 Jahre alt gewesen. Ob Besso indirekt darauf anspielt, das lässt sich schwer sagen.

¹⁹⁵ Besso hat an diesem Brief beinahe zwei Monate lang geschrieben (12.10.1947 - 8.12.1947) geschrieben, was noch einmal dessen Bedeutung untermauert. (Mir ist kein anderer Brief von Besso an Einstein bekannt, bei dem er sich derart lange Zeit gelassen hat. Der Brief ist daher in mehrerlei Hinsicht einzigartig.)

Du liessest mir sagen, ich solle mir keine Sorgen machen über die irrtümlichen Angaben, die ich über Dich gemacht : mit der Begründung, man habe so viel über Dich gelogen, dass es wirklich nicht darauf ankomme. Es kommt aber eben doch darauf an, dass man möglichst gut darüber orientiert werde, was Thales, Archimedes, Galilei zu den Einsichten vorbereitet hat, die sie – und Du – der denkenden Menschheit geschenkt habt. Aber auch unzutreffende Angaben über persönliche Erlebnisse und Auffassungen, von Menschen, die Deine Stellung vor ihrer Zeit einnehmen, sollten nicht unberechtigt bleiben, gar sobald derjenige, der sie in Umlauf gesetzt hat, eines Besseren belehrt ist.

Was die Geschichte der Wissenschaft betrifft, so liegt, von mir aus gesehen, Mach im Mittelpunkt der Entwicklung der letzten 50 oder 60 Jahre.¹⁹⁶ Stimmt es : – dass ein etwas älterer Ingenieur [gemeint ist Besso selbst, Anmerkung von E.S.], etwa 1897 oder 98, den jungen, brennend wissenschaftlich Interessierten [gemeint ist Einstein, Anmerkung von E.S.], den die Fragen nach der Greifbarkeit des Aethers und der Atome in Spannung hielten, auf Mach hingewiesen hat – auf den der Ingenieur durch den berühmten slowakischen Ingenieurlehrer¹⁹⁷ aufmerksam gemacht worden war ; und : dass dieser Hinweis in einer Entwicklungsphase des jungen Physikers erfolgte, wo die Mach'schen Gedankengänge entscheidend auf das Beobachtbare hinwiesen – vielleicht eben indirekt, auf ,Uhren und Masstäbe'?¹⁹⁸

- *dass die Minkowskische Formulierung der S.R.T., zunächst als ein hübsches Spiel aufgefasst, die notwendige Brücke zur A.R.T. wurde?¹⁹⁹*
- *dass die theoretische, quantitative (Wieder-) Entdeckung der Brownschen Bewegung die exakte experimentelle (incl. Astronomische) Grundlage der Mechanik aufheben musste?*
- *dass die beiden Bohrschen Bedingungen in Deiner Entdeckung des Photons, und in Deiner ,materialisierten' Auffassung des Wirkungsquantums gegeben waren?*

Nun etwas ganz anderes, [...] ²⁰⁰“ (Speziali, 1972, pp. 386-387)

¹⁹⁶ Das würde bedeuten, dass Machs Lehren die Wissenschaft ca. von 1890 bis 1950 beeinflusst haben. In Physik wären das, unter anderem, die Relativitätstheorie und die Quantentheorie.

¹⁹⁷ Mit dem „slowakischen Ingenieurlehrer“ ist Aurel Stodola gemeint (Speziali, 1972, pp. 389, fn. 2). Aurel Stodola (1859-1942) war von 1884 bis 1892 (im Bereich Maschinenbau) in Prag tätig. Spätestens aus dieser Zeit dürfte er wohl die Arbeiten von Mach gekannt haben. Ab 1892 lehrte er in Zürich. Er hat unter anderem zu der Erfassung Dampf- und Gasturbinen wichtige Beiträge geleistet. Siehe für einen kurzen Überblick seiner Biographie: (Chalupecký, 2009, pp. 279-280).

Er stand mit Einstein in Korrespondenz und interessierte sich allgemein für Molekularbewegungen und die Relativitätstheorie – siehe dazu zum Beispiel (CPAE 5; 100; p. 118), (CPAE 5; 106; p. 123), (CPAE 5; 138; p. 158) und (CPAE 4; 27; p. 584), (CPAE 5; 187; p. 218), (CPAE 8; 219; p. 287), (CPAE 10; 124a; p. 33), (CPAE 10; 326a; p. 78), (CPAE 10; 70d; p. 199), CPAE 2; _; p. 217, fn. 74).

Einstein dürfte ihn sehr geschätzt haben – anlässlich des 70. Geburtstags (1929) fand eine Festrede statt, wo Einstein Stodola würdigt (Eichelberg, 1959, p. 301).

¹⁹⁸ Siehe dazu (Einstein, 1983, pp. 20-21) bzw. allgemein den Abschnitt „4.4.2.3.4. Der Doppler-Effekt als Erklärung für Einsteins Gedankenexperiment ,Chasing the light““.

¹⁹⁹ Einstein dürfte sich erst ab Sommer 1910 mit Minkowkis vierdimensionaler Behandlung der Speziellen Relativitätstheorie angefreundet haben – siehe dazu (CPAE 4; 1; p. 105, fn. 63) und (CPAE 4; 1; p. 106, fn. 85).

²⁰⁰ Ab hier geht er auf die Lehre Jesu ein (Speziali, 1972, p. 387). Einsteins Antwort wird darauf sein: „Also bei mir mehr Spinoza als die Propheten.“ (Speziali, 1972, p. 392) Womöglich interessant in diesem Zusammenhang ist, dass Einstein sein Nachruf „Ernst Mach“ mit folgenden Worten einleitet:

„In diesen Tagen schied von uns Ernst Mach, der auf die erkenntnistheoretische Orientierung der Naturforscher unserer Zeit von größtem Einfluß war, ein Mann von seltener Selbständigkeit des Urteils. Bei ihm war die unmittelbare Freude am Sehen und Begreifen, Spinozas amor dei intellectualis, so stark vorherrschend, daß er bis ins hohe Alter hinein mit den neugierigen Augen des Kindes in die Welt guckte, um sich wunschlos am Verstehen der Zusammenhänge zu erfreuen.“

(Einstein, 1916c, p. 101)

Es scheint auf den ersten Blick nicht ganz klar zu sein, ob die drei übrigen Punkte (Minkowski, Brownsche Bewegung und die Lichtquantenhypothese), die Besso aufzählt, ebenso mit Mach in Verbindungen bringen möchte. Doch da Besso gleich zu Beginn meint: „*Was die Geschichte der Wissenschaft betrifft, so liegt, von mir aus gesehen, Mach im Mittelpunkt der Entwicklung der letzten 50 oder 60 Jahre*“, zählt er offensichtlich auch diese Punkte zu Machs Einfluss. Das wird zudem dadurch bestätigt, wie er den nächsten Absatz beginnt: „*Nun etwas ganz anderes*“. Somit kann angenommen werden, dass dieser Bereich Machs Einfluss gewesen ist. Wenn das aber zutrifft, dann müsste:

1. Ernst Mach ein strenger Befürworter der Arbeit von Minkowski (bezüglich der Relativitätstheorie) gewesen sein.²⁰¹
2. In Machs Arbeiten müssten Molekularbewegungen eine Rolle spielen.²⁰²
3. Bei Mach müsste bereits eine Welle-Teilchen Natur des Lichtes zu finden sein.²⁰³

Wir konnten in der vorliegenden Arbeit bereits zeigen, dass diese drei Punkte, die Besso im Buch anspricht, nach den vorhandenen Quellen tatsächlich stimmen.

Doch sehen wir uns zunächst Einsteins Antwort (aus Princeton) an:

„6. Januar 1948

Lieber Michele!

Dein Brief ist recht interessant und gar nicht so einfach zu beantworten. Was mich betrifft, so will ich unterscheiden, wie Mach überhaupt gewirkt hat, und wie er auf mich gewirkt hat. Mach hat bedeutende fachwissenschaftliche Arbeiten (z.B. die Entdeckung der Chok-Wellen, gegründet auf eine wirklich geniale optische Methode)²⁰⁴ ausgeführt. Davon wollen wir aber nicht sprechen, sondern über seinen Einfluss auf die allgemeine Einstellung zu den Grundlagen der Physik. Da sehe ich sein grosses Verdienst darin, dass er den im 18. und 19. Jahrhundert herrschenden Dogmatismus über die Grundlagen der Physik aufgelockert hat. Er hat besonders in der Mechanik²⁰⁵ und Wärmelehre²⁰⁶ aufzuzeigen gesucht, wie die Begriffe aus den Erfahrungen heraus entstanden sind. Er hat überzeugend den Standpunkt vertreten, dass diese Begriffe, auch die fundamentalsten, ihre Berechtigung nur von der Empirie aus erhalten, dass sie in keiner Weise logisch notwendig sind. [...]

Was nun Machs Einfluss auf meine Entwicklung anlangt, so ist er sicher gross gewesen. Ich erinnere mich ganz gut daran, dass Du mich auf seine Mechanik und Wärmelehre hingewiesen hast während meiner ersten Studienjahre, und dass beide Bücher

²⁰¹ Siehe Abschnitt „3.1. E. Machs publizierte Äußerungen zu Einsteins Relativitätstheorie“.

²⁰² Siehe Abschnitt „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“.

²⁰³ Siehe Abschnitt „5.4. Anhang IV: Einsteins Unterhaltung mit Ernst Mach über die Atomtheorie – und die Lichtquantenhypothese?“.

²⁰⁴ Offensicht kannte Einstein Machs Arbeiten zur Akustik und Optik gut. (Welche Arbeiten im Speziellen, lässt sich leider nicht eruieren.)

²⁰⁵ Gemeint ist Ernst Machs Buch: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt*.

²⁰⁶ Gemeint ist Ernst Machs Buch: *Die Prinzipien der Wärmelehre: Historisch-kritisch entwickelt*.

grossen Eindruck auf mich gemacht haben. Wie weit sie auf meine eigene Arbeit gewirkt haben, ist mir offen gestanden nicht klar. Soviel ich mir bewusst werden kann, war der unmittelbare Einfluss von D. Hume auf mich grösser. Ich habe diesen zusammen mit Konrad Habicht und Solovine in Bern gelesen. Aber wie gesagt bin ich nicht imstande, das im unbewussten Denken Verankerte zu analysieren. – Interessant ist übrigens, dass Mach die spez. R. Th. leidenschaftlich ablehnte. (Die allg. R. Th. hat er nicht mehr erlebt.) Die Theorie war ihm unerlaubt spekulativ. [...]

Minkowski's Leistung besteht darin, dass er die vierdimensionale Tensortheorie in die Relativität einführte, ohne welche die mathematische Formulierung der allg. R. Th. nicht ausführbar gewesen wäre. Es war nicht nur ein ‚Spiel‘, sondern ein wichtiger formaler Beitrag.

Es ist nicht richtig, dass die Brown'sche Bewegung die Grundlage der Mechanik aufheben musste. Ich habe sie ja aus der Mechanik abgeleitet (ohne zu wissen, dass so etwas schon beobachtet war). Es ist auch nicht richtig, dass die Bohr'schen Bedingungen für Elektronenbahnen aus meinen Quantenarbeiten folgen. Man kann nur schliessen, dass es beim Festhalten des mechanischen Atombildes solche Regeln geben muss. (Du weisst wohl auch, dass ich die gegenwärtige statistische Quantentheorie trotz ihrer grossen praktischen Erfolge nicht für einen guten Weg halte. Es geht mir wie den Juden mit dem ‚Messias‘). [...]“ (Speziali, 1972, pp. 390-391)

Wir lesen deutlich in Einsteins Antwort: „[...] bin ich nicht imstande, das im unbewussten Denken Verankerte zu analysieren. – Interessant ist übrigens, dass Mach die spez. R. Th. Leidenschaftlich ablehnte. (Die allg. R. Th. hat er nicht mehr erlebt.)“. Offensichtlich dachte Einstein, dass das posthume Vorwort tatsächlich von Ernst Mach stammte. Wir haben hier einen teils gekränkten Menschen vor uns. (Sein Brief ist dadurch stark gefärbt.) Und wer kann es ihm das verübeln? Angegriffen von seinem eigenen Mentor aus dem Grab. Erst mehrere Jahrzehnte mussten vergehen, bis Wolters in seinem Buch (Wolters, 1987) zeigen konnte, dass sie gefälscht waren. Dabei müsste Einstein „bewusst“ oder „unbewusst“ es besser wissen – wir werden in den nächsten Abschnitten noch darauf zurückkommen.

Wir haben bereits erläutert, dass Einstein am Ende seiner Arbeit zur Speziellen Relativitätstheorie noch das Problem der „absoluten Zeit“ Gedanken machte und er offensichtlich das Gespräch mit Besso suchte. Einstein weist in seinem Brief an Besso wiederum auf die bedeutenden Arbeiten von Mach zur Akustik und Optik hin, die er offensichtlich kannte. (Darauf werden noch zurückkommen.) Zentral ist, dass Einstein betont, dass besonders die *Mechanik* und die *Wärmelehre* von Mach auf ihn einen großen Einfluss ausübten. Und tatsächlich werden in Ernst Machs *Prinzipien der Wärmelehre* der „absolute Raum“, die „absolute Zeit“ diskutiert und kritisiert, mit einem Hinweis auf sein Buch *Die Mechanik in ihrer Entwicklung* – siehe (Mach, 2016, p. 71). Eine genauere Auseinandersetzung mit diesem Thema kann der Leser in der Einleitung der „Ernst-Mach-

Studienausgabe“ von *Die Prinzipien der Wärmelehre: Historisch-kritisch entwickelt* (Mach, 2016) von Michael Heidelberger und Wolfgang Reiter finden (Mach, 2016, pp. XXVIII-XXXI), wo sie erläutern, wie Einstein mithilfe von Machs Kritik zu einer physikalischen Definition der Gleichzeitigkeit gelangen konnte (Mach, 2016, p. XXXI).

Dass Machs Kritik der (absoluten) Zeit für die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie eine wichtige Rolle spielte, dürfte früher eher im Bewusstsein der Physiker gewesen sein – mit der Wandlung von Einsteins erkenntnistheoretischem Standpunkt wurde das womöglich immer mehr in den Hintergrund gedrängt, wie ein Gespräch zwischen Einstein und Heisenberg verdeutlicht:

„»Aber Sie glauben doch nicht im Ernst«, entgegnete Einstein, »daß man in eine physikalische Theorie nur beobachtbare Größen aufnehmen kann.«²⁰⁷

»Ich dachte«, fragte ich erstaunt, »daß gerade Sie diesen Gedanken zur Grundlage Ihrer Relativitätstheorie gemacht hätten? Sie hatten doch betont, daß man nicht von absoluter Zeit reden dürfe, da man diese absolute Zeit nicht beobachten kann. Nur die Angaben der Uhren, sei es im bewegten oder im ruhenden Bezugssystem, sind für die Bestimmung der Zeit maßgebend.«

»Vielleicht habe ich diese Art von Philosophie benützt«, antwortete Einstein, »aber sie ist trotzdem Unsinn. [...]«

Mir war diese Einstellung Einsteins sehr überraschend, obwohl mir seine Argumente einleuchteten, und ich fragte daher zurück: »Der Gedanke, daß eine Theorie eigentlich nur die Zusammenfassung der Beobachtungen unter dem Prinzip der Denkökonomie sei, soll doch von dem Physiker und Philosophen Mach stammen; und es wird immer wieder behauptet, daß Sie in der Relativitätstheorie eben von diesem Gedanken Machs entscheidend Gebrauch gemacht hätten. Was Sie jetzt eben gesagt haben, scheint mir aber genau in die entgegengesetzte Richtung zu gehen. Was soll ich nun eigentlich glauben, oder richtiger, was glauben denn Sie selbst in diesem Punkt?«

»Das ist eine sehr lange Geschichte, aber wir können ja ausführlich darüber reden. Dieser Begriff der Denkökonomie bei Mach enthält wahrscheinlich schon einen Teil Wahrheit, aber er ist mir etwas zu banal.« (Heisenberg, 1969, pp. 91-93)²⁰⁸

4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein

Wenn aber die *Mechanik* und die *Wärmelehre* (von Mach) für Einstein wichtig waren, könnten dann nicht auch Machs Arbeiten zur Akustik und Optik ebenfalls von Bedeutung gewesen sein? Schauen wir uns daher die Sachlage etwas genauer an. Besso schreibt, dass er Einstein bereits 1897/98 auf Machs Arbeiten hingewiesen hat. Dass diese Jahresangaben in etwa stimmen, lässt sich anhand der Briefe zeigen – jedenfalls berichtet Einstein an Mileva

²⁰⁷ Der erkenntnistheoretische Standpunkt, dass man eine physikalische Theorie auf messbare Größen aufbauen sollte, war allgemein überaus wichtig bei der Entstehung der modernen Physik (Relativitätstheorie und Quantentheorie) – siehe dazu (Feynman, 2010, pp. 2-16 (§2.6)).

²⁰⁸ Siehe zu Machs wissenschaftstheoretischem Einfluss auf Einstein (Wolters, 1987, pp. 101-120).

Maric (am 10. September 1899) (CPAE 1; 54; p. 230), dass er unter anderem bereits Machs Werke bestellt hat und dass er Untersuchungen zur Relativbewegung des Lichtes gegenüber dem Äther überlegt hat. Später erfahren wir aus einem Brief von Einstein an seinen Freund Marcel Grossmann (6? September 1901) (CPAE 1; 122; p. 315-316), dass er dabei unter anderem an Interferenzversuche dachte.²⁰⁹

Wenn Einstein sich für „gewöhnliche Interferenzversuche“ sich interessierte, so ist daher nicht unwahrscheinlich, dass er sich auch Machs Studien zu Akustik und Optik ansah (Mach, 1873a) (Mach, 1873b) (Mach, 1891) (Mach, 1904) – allein aus dem Brief an Besso ist ersichtlich, dass er dazu wohl einige Arbeiten kannte.²¹⁰

An dieser Stelle sei nochmals festgehalten: Damals (10. September 1899 bzw. September 1901) hinterfragte Einstein das Konzept des Äthers noch nicht. Es ist daher nicht unwahrscheinlich, dass er seine Gedanken mit Hilfe von Machs Arbeit weiterentwickelte. Doch wie könnte dies ausgesehen haben? Eine eindeutige Antwort auf diese Frage lässt sich anhand der Quellen schwer angeben. Doch womöglich bekommen wir einen weiteren Hinweis darauf, wonach wir genau suchen sollten. Einstein berichtet (am 28. November 1901) an Mileva:

„Beinahe jeden Tag mache ich zur Erfrischung einen kleinen Spaziergang, die übrige freie Zeit verwende ich auf das Studium von Voigts theoretischer Physik, aus welchem Buch ich schon manches gelernt habe.“ (CPAE 1; 126; p. 321)

Weshalb Voigt? Hierbei hilft uns die Arbeit „Albert Einstein in seinen Beziehungen zu Mitgliedern der Gesellschaft der Wissenschaften in Göttingen“ (Schröder, 1988) sehr weiter:

„Die Entwicklung der theoretischen Physik in Göttingen wurde wesentlich von WOLDEMAR VOIGT (1850-1919)²¹¹ geprägt. Er fühlte sich seit seiner Königsberger Zeit auch den grundlegenden Fragen der Physik verpflichtet und befaßte sich mit Problemen des atomaren Baus der Materie sowie der Wechselwirkung von Materie und Äther. Damit sind übrigens die Themen angesprochen, denen sich auch sein Assistent EMIL WIECHERT²¹² seit Königsberg verbunden fühlte. Im Jahre 1887 zeigte VOIGT die besondere Invarianz der Wellengleichung des Lichtes

$$-\ddot{\Psi} + A\Psi = 0$$

²⁰⁹ Die erwähnten Briefe (an Maric und Grossmann) haben wir bereits im Abschnitt „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“ besprochen.

²¹⁰ Siehe Abschnitt „4.4.2.3.1. Neudefinition der Zeit: Cohn und Machs möglicher Einfluss“.

²¹¹ „WOLDEMAR VOIGT (1850-1919), Schiller von FRANZ NEUMANN, Professor für theoretische Physik an der Universität Göttingen.“ (Schröder, 1988, pp. 157, fn. 2)

²¹² „EMIL WIECHERT (1861--1928), Assistent von VOIGT; dann Professor für Geophysik an der Universität Göttingen.“ (Schröder, 1988, pp. 157, fn. 3)

gegen die Transformation

$$\begin{aligned}x' &= x - wt, & y' &= y\sqrt{1-w^2}, \\z' &= z\sqrt{1-w^2}, & t' &= t - wx.\end{aligned}$$

Von einem gemeinsamen Faktor abgesehen, war dies bereits die spätere LORENTZ-Transformation. Obwohl LORENTZ selbst immer wieder darauf hinwies, daß er erst 1904 die Transformation

$$x' = l \frac{x-wt}{\sqrt{1-w^2}}, \quad y' = ly, \quad z' = lz, \quad t' = l \frac{t-wx}{\sqrt{1-w^2}}$$

eingeführt hat und stets auf die vorangegangene Arbeit von VOIGT hinwies, blieb dies in der Literatur weitestgehend unbeachtet. Selbst in seinem Brief an WIECHERT vom 5. März 1912 hatte LORENTZ betont, „dass man, wie mir scheint, wohl sagen kann, er (gemeint ist VOIGT, Verf.) habe die Relativitätstransformation angegeben.“ [...]

Es ist sonderbar, daß diese VOIGTsche Arbeit selbst anfänglich LORENTZ verborgen blieb, denn zwischen der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen und den niederländischen Institutionen in Amsterdam, Haarlem und Leiden bestand ein Schriftenaustausch. VOIGTs Arbeit war also in den Niederlanden verfügbar. Mehr noch: Zwischen LORENTZ und VOIGT bestand Brief- und Besuchswechsel. Auch POINCARÉ, obwohl gleichfalls mit VOIGT bekannt sowie zeitweilig später in Göttingen weilend, übergang die VOIGTsche Studie. Ebenso verhielt sich EINSTEIN. [...]

Es ist wiederholt bemerkt worden, daß EINSTEIN die LORENTZsche Arbeit von 1904 nicht kannte. Anders dürfte es sich mit dieser Abhandlung in Göttingen verhalten haben: VOIGT und LORENTZ standen seit längerem in Brief- und Schriftentausch. [...]“

(Schröder, 1988, pp. 157-158)

Wilfried Schröder weist darauf hin, dass Lorentz die Lorentz-Transformation erst 1904 aufstellte. Dieses Werk hat Einstein tatsächlich nicht gekannt – siehe (CPAE 2; 23; p. 307, fn. 3)! Es daher möglich, dass das ursprüngliche Konzept der Transformation von Voigt vielleicht von Einstein und Lorentz, unabhängig voneinander, übernommen wurden. Das wäre auch nicht überraschend, denn Voigt hat mehrere Arbeiten geschrieben, die für Einstein vor der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie interessant gewesen wären – siehe (Schröder, 1988, p. 169).

Aus einem Brief von Einstein an Mileva (am 23 März 1901) geht beispielsweise klar hervor, dass Einstein sich für eine Assistenzstelle bei Eduard Riecke in Göttingen beworben hat (CPAE 1; 93; p. 279; fn. 2):

„Ich bin auf der Reise mit zwei jungen Burschen gereist. Auf einmal stellt sich heraus, daß der eine 4 Semester in Göttingen Mathematik & Physik studiert hat! Du kannst Dir lebhaft denken, wie ich ihn nach den dortigen Verhältnissen ausfragte. Auch fachsimpelten wir viel in Erkenntnistheorie. Er sagte, Riecke sei ein sehr freundlicher jovialer Herr & ich hätte als Assistent bei ihm sehr wenig zu thun wenn wenn Du kennst das Liedchen, das wir schon so oft zusammen gesungen haben.“ (CPAE 1; 93; p. 280-281)

Wenn wir also eins und eins zusammenzählen, dass sich Einstein (am 23 März 1901) für eine Stelle in Göttingen bei Eduard Riecke bewarb, dann überrascht es nicht, dass er auch (28. November 1901) Woldemar Voigts Werke las,²¹³ der sich jahrelang mit den Grundlagen der Optik (Försterling, 1951, pp. 219-220) auseinandersetzte.

Da die Lorentz-Transformation von Lorentz vor 1904 nicht erschienen, liegt es sehr nahe, dass Einstein sich früher wohl mehr an den Transformationen von Voigt orientierte. Es lohnt sich daher Voigts Arbeit genauer anzusehen...

Die Arbeit, in welcher die Transformationen von Voigt vorkommen, trägt den Titel „Ueber das Doppler'sche Princip“ (Voigt, 1887). Es ist die erste Arbeit, welche in mathematischer Formulierung in Richtung relativistische Transformationen geht.²¹⁴ Diese Arbeit „contains several original and fundamental ideas of modern physics“ (Ernst & Hsu, 2001, p. 211), erklären Andreas Ernst and Jong-Ping Hsu in ihrem Artikel „First Proposal of the Universal Speed of Light by Voigt in 1887“ (Ernst & Hsu, 2001). Bei Voigt, ist unter anderem, die Idee der universellen Lichtgeschwindigkeit zu finden, welche die Invarianz der physikalischen Gesetze (Wellen-Gleichung) postuliert, um den Doppler-Effekt abzuleiten und außerdem der Gedanke, dass die Doppler-Frequenzverschiebung mit der Newtonschen absoluten Zeit unvereinbar ist und daher mit einer relativen Zeit im Einklang steht. Ebenso verwendete er als erster eine Art 4-dimensionale Raum-Zeit-Transformation (Ernst & Hsu, 2001, p. 211). Voigt ist heutzutage, trotz seines wichtigen Beitrages, etwas in Vergessenheit geraten,

²¹³ Woldemar Voigt und Eduard Riecke haben 1892 auch eine gemeinsame Arbeit (zu piezo-elektrischen Konstanten) verfasst, die in den *Annalen* veröffentlicht wurde – siehe (Holman, 1909, pp. 160, fn. 2) und (Försterling, 1951, p. 218).

Noch ein anderes Beispiel sei hier gegeben. Einstein erlernt sehr früh (April 1898) die Maxwell-Gleichungen aus einem Werk von Paul Drude – siehe dazu (CPAE 1; 40, p. 213) und (CPAE 1; 41, p. 213). An Mileva schreibt er (am 28. Dez. 1901):

„Michele gab mir ein Buch über die Theorie des Äthers, geschrieben im Jahr 1885. Das kommt einem vor, wie wenn es aus dem Altertum käme, so veraltet sind die Anschauungen. Da sieht man wie schnell jetzt das Wissen sich entwickelt. Ich will mich nun dahinter machen, zu studieren, was Lorentz und Drude über die Elektrodynamik bewegter Körper geschrieben haben.“ (CPAE 1; 131, p. 330).

(Das Buch über den Äther, welches Michele Besso Einstein gab, war von Hoh – siehe (CPAE 1; 131, p. 330, fn. 4). Wir können sehen welche Bedeutung Drudes Arbeiten für Einstein insgesamt hatten. Paul Drudes Doktorvater war wiederum Woldemar Voigt. Dass Einstein sich die Werke von Voigt genauer ansah, ist in der Summe aller Zusammenhänge daher sehr wahrscheinlich.

²¹⁴ Einen Überblick über die Transformationen bietet (CPAE 2; 23; p. 308, fn. 16). Die kurze Notiz (FitzGerald, 1889), wo eine Kontraktionshypothese von FitzGerald vertreten wird, erscheint verständlicherweise erst zwei Jahre nach dem Michelson-Morley-Experiment (1887) und Lorentz wird seine mathematisch ausgearbeitete Kontraktionshypothese im Jahre 1892 veröffentlichen (Lorentz, 1893, pp. 74-79) welche aber noch nicht die Lorentz-Transformation wiedergibt.

obwohl H. A. Lorentz ihn damals selbst mit der Lorentz-Transformation in Verbindung brachte – einen kurzen Überblick bietet hier die Arbeit „Recognition for Waldemar Voigt“ (Doyle, 1988) von William T. Doyle. Das mag sicher auch daran gelegen haben, dass man ihn historisch wenig mit der speziellen Relativitätstheorie in Verbindung bringen konnte, so schreibt Ricardo Heras:

„In the creation of special relativity, we traditionally find the names of Einstein, Poincaré, Lorentz and Larmor. They appear to be the main actors. Voigt is relegated to be a minor player, in the best of cases. But this tradition is not faithful to the history of physics. Although Voigt did not derive the Lorentz transformations, he seems to have been the first in applying the postulates of special relativity to a physical law: he demanded covariance to the homogeneous wave equation with respect to inertial frames and assumed the invariance of the speed of light in these frames, obtaining a set of transformations which introduced the non-absolute time $t' = t - vx/c^2$.

To conclude, we would like to point out that we are in agreement with Rott, who on the centennial of Voigt's 1887 paper, claimed that Voigt was a 'Relativity's forgotten figure.' He wrote: '...this year is also the centennial of a theoretical paper [Voigt's 1887 paper] that is largely forgotten, but has a certain role in the history of the theory of relativity even though it has no documented impact on the actual historical development.'“ (Heras, 2017, pp. 16-17)

Wir haben oben erläutert, dass Einstein Voigts Werke kannte und, wäre dem nicht so, es ansonsten genug Zusammenhänge gibt. Wir können somit Voigts wegweisende Arbeiten dokumentarisch in die Entstehungsgeschichte der Relativitätstheorie einordnen, wie aus physikalischer Hinsicht bereits öfter dargelegt wurde (Ernst & Hsu, 2001) (Heras, 2017). Leider gibt Voigt (wie auch später Lorentz usw.) in seinen Untersuchungen dem Äther eine besondere Rolle. Ebenso wird Einstein, dem unter anderem Voigt nicht fremd war (CPAE 1; 126; p. 321), das Konzept des Äthers einige Zeit nicht aufgeben...

Doch nach der Speziellen Relativitätstheorie war es gerade wichtig, sich von diesem Konzept zu verabschieden. Wir haben bereits im Abschnitt „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“ auf Einsteins Artikel „Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt“ (1920) hingewiesen, wo Einstein den ruhenden Äther in der Lorentzschen Theorie als „eine Verkörperung des von Newton eingeführten absoluten Raumes“ (CPAE 7; 31; p. 248) ansah. Auf Machs Kritik am absoluten Raum Newtons hat Einstein in seinem Nachruf „Ernst Mach“ (Einstein, 1916c, pp. 102-103) hingewiesen.

Wenn es also irgendjemanden zu jener Zeit gegeben hat, der Einstein nun auch aus diesem Dilemma des Äthers helfen konnte, dann kann es nur (neben Cohn auch) Mach gewesen sein – jedenfalls hätte Einstein wohl seine Literatur studiert.

Durch den Brief von Einstein an Besso wissen wir, dass Einstein auch die Arbeiten von Mach zur Optik und Akustik kannte²¹⁵. Zudem konnten wir zeigen, dass Einstein bei seinen experimentellen Überlegungen mit den Spiegeln sich vielleicht auch an Machs Arbeiten zum Dopplerschen Prinzip orientierte²¹⁶. Ebenso konnten wir in der Diskussion zwischen Wien und Abraham sehen, dass das Dopplersche Prinzip eine Rolle in der Weiterentwicklung der theoretischen Konzepte spielte²¹⁷. Schließlich lässt sich zeigen, dass aufgrund von Voigts Arbeit Einstein sich gerade für das Thema „Dopplersches Prinzip“ hätte interessieren müssen.

Es gibt ein weiteres Argument dafür, dass Einstein Machs und Voigts Werke zum Dopplerschen Prinzip hätte kennen müssen. Im Jahre 1903 erscheint nämlich Einsteins Arbeit „Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik“ (Einstein, 1903) in den *Annalen der Physik* (der ganzen Reihe 316. Band) auf den Seiten 170-187. Im selben Band (und in derselben Folge 5)²¹⁸ finden wir ein paar Seiten zuvor (p. 96-113) die Schrift „Über ein Integral der Gleichungen für die Wellenbewegung, welches dem Dopplerschen Prinzip entspricht“ (Kohl, 1903a) vom österreichischen Physiker Emil Kohl.²¹⁹ Dieser beginnt seine Arbeit mit den Worten:

„Die Begründung, welche Doppler¹) dem von ihm aufgestellten Prinzip gegeben hat, gilt im wesentlichen noch heute als grundlegend.“ (Kohl, 1903a, p. 96)

²¹⁵ Siehe dazu auch den Abschnitt „4.4.2.3.1. Die Neudefinition der Zeit: Cohn und Machs möglicher Einfluss“.

²¹⁶ Siehe Abschnitt „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“.

²¹⁷ Siehe Abschnitt „2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“.

²¹⁸ Die erste Ausgabe in diesem Band ist die Arbeit „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1903a) von Alexander Eichenwald, worauf wir im Abschnitt „2.1.2.2.3. Der Diskurs und seine experimentelle Ebene: Magnet und Leiter“ bzw. „2.1.2.2.3.1. Ad 1.:“ näher eingegangen sind.

²¹⁹ Emil Kohl wird in anderen Arbeiten zur Speziellen Relativitätstheorie gar nicht erwähnt, z.B.: (French, 1985) (Miller, 1998) (Norton, 2004) (Janssen & Stachel, 2004). In *The Collected Papers of Albert Einstein* finden wir Kohl in nur in einem Dokument (CPAE 5; 400; p. 470-474). In diesem Dokument bzw. Referat, das von Einstein geschrieben wurde, werden die Kandidaten und ihre Arbeiten, die Einsteins Nachfolge auf dem Sessel der theoretischen Physik in Prag im Jahre 1912 übernehmen sollen, dem Professoren-Kollegium vorgestellt. Die Kandidaten waren Paul Ehrenfest, Philipp Frank und Emil Kohl. (Die Stelle wird Einsteins guter Freund Philipp Frank bekommen, wie in Einsteins Referat auch nahegelegt wird. Siehe dazu auch den Abschnitt: „4.4.5.3. Thema III: Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]“.

In der Fußnote 1 fügt er hinzu:

„1) *Ch. Doppler*, Abhandl. d. Böhm. Gesellsch. d. Wissensch. 5. p. 294-306. 1847.
Besondere theoretische Untersuchungen über dieses Prinzip haben ferner *E. Mach*
(Zeitschr. f. Mathematik u. Physik p. 120-126. 1861), *W. Voigt* (Nachr. d. k. Gesellsch. d.
Wissensch. in Göttingen aus dem Jahre 1887, p. 41-51), *W. Michelson* (Astrophys. Journ. 13.
p. 192 bis 198. 1901) durchgeführt.“ (Kohl, 1903a, pp. 96, fn. 1)

Kohl verweist den Leser auf Machs und Voigts wichtige Beiträge zum Dopplerschen Prinzip. Ein paar Seiten weiter, wird er auch auf das Buch *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern* (Lorentz, 1895) von H. A. Lorentz (Kohl, 1903a, pp. 106, fn. 2) hinweisen, welches Einstein in seiner Kyoto-Rede [17] ebenfalls erwähnt.

In derselben Reihe (316. Band) wird (auf den Seiten 515-528) eine zweite Arbeit mit dem Titel „Über das dem Dopplerschen Prinzip entsprechende Integral der Gleichungen für die Wellenbewegung“ (Kohl, 1903b) erscheinen, worin er gleich zu Beginn auf die frühere Arbeit (Kohl, 1903a) hinweist (Kohl, 1903b, pp. 515, fn. 1).²²⁰

Allgemein bietet diese Arbeit (Kohl, 1903a) von Kohl einen guten Überblick darüber, wie der Doppler-Effekt bei Relativbewegungen angewendet werden kann; er geht auch auf die Aberration (Kohl, 1903a, pp. 102-103) ein; er verwendet in beiden Arbeiten, ähnlich wie Mach, sowohl das Teilchenmodell (Kohl, 1903a, pp. 103, 106, 112-113) (Kohl, 1903b, pp. 523-525, 528) als auch das Wellenmodell (Kohl, 1903a, pp. 97-100, 102-104, 110, 112) (Kohl, 1903b, pp. 515, 516, 522-523) und Begriffe, wie „Medium“ oder „Äther“, kommen nicht vor.²²¹ Einstein könnte diese Arbeit bei seinen Recherchen zur Elektrodynamik bewegter Körper sicher gut gedient haben; dass Einstein Kohls Arbeit (Kohl, 1903a) nicht kannte, ist

²²⁰ Im nächsten Band (der ganzen Reihe 317. Band) erscheint in den *Annalen der Physik* die Schrift „Über die Gültigkeit des Massensatzes von Gauss für bewegte elektrische Massen“ (Kohl, 1903c) von Emil Kohl, wo er auf seine vorherige Arbeit (Kohl, 1903b) verweist (Kohl, 1903c, pp. 842, fn. 1). Auch erscheint eine andere Arbeit „Über die elektromagnetischen Feldgleichungen innerhalb bewegter elektrischer Massen“ (Kohl, 1904) von ihm in *Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstage* (Meyer, 1904), wo er auf seine Arbeiten (Kohl, 1903b) – siehe (Kohl, 1904, pp. 678, fn. 1) – und (Kohl, 1903c) – siehe (Kohl, 1904, pp. 679, fn. 2) – aufmerksam macht. Wir haben gesehen, dass Einstein das Buch *Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstage* (Meyer, 1904) kannte – siehe dazu die Abschnitte „2.1.2.2. Das A: Wissenschaftlicher Dialog zwischen E. Cohn, W. Wien und A. Einstein“ und „2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“.

Alle diese Arbeiten (Kohl, 1903a) (Kohl, 1903b) (Kohl, 1903c) (Kohl, 1904) sind interessant, wenn man sich mit der Elektrodynamik auseinandersetzen will. Dass Einstein Kohls Arbeiten gar nicht kannte, ist daher in Summe sehr unwahrscheinlich.

²²¹ Siehe dazu den Abschnitt „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“.

daher sehr unwahrscheinlich, und somit auch, dass ihm Machs und Voigts Arbeiten zum Doppler-Effekt fremd waren.

Einen anderen Hinweis bekommen wir von Dieter B. Hermann, der sich bereits sehr früh mit der Entstehungsgeschichte des Dopplerschen Prinzip auseinandersetzt. Hermann schreibt in seiner Arbeit „Erkenntnis und Irrtum: CHRISTIAN DOPPLER“ (1964):

„Interessant ist in diesem Zusammenhang die Stellungnahme des großen Wiener Physikers ERNST MACH. Er, der auch zur Vorgeschichte der Relativitätstheorie Beachtliches beigetragen hat, kam von allen Physikern der wirklichen Bedeutung des DOPPLER-Prinzips am nächsten.“ (Herrmann, 2004, p. 50)

Leider ist Herrmann nicht näher darauf eingegangen, wie Mach „zur Vorgeschichte der Relativitätstheorie Beachtliches beigetragen hat“. Wir werden daher versuchen, diesen möglichen Gedanken von Hermann weiterzuentwickeln.

Die meisten Arbeiten von Ernst Mach fallen in das Gebiet (wie bei Einstein) der Grundlagenforschung – so auch bereits sein Experiment im Jahre 1860, das den Doppler-Effekt bestätigte. Heutzutage ist der Doppler-Effekt zwar aus der Welt der Wissenschaft nicht mehr wegzudenken und sogar in der Popkultur angekommenen, doch, wie bei allen neuen Konzepten, waren auch die Gedanken bzw. Argumente von Christian Doppler noch nicht ganz ausgereift und auch an Gegnern hat es nicht gefehlt. Es wird die Aufgabe Machs werden, nach dem Tod von Doppler dessen Gedanken sowohl theoretisch als auch experimentell zu einem Abschluss zu bringen und somit die Diskussion zwischen dem Physiker Doppler und dem Mathematiker Joseph Petzval – zugunsten von Doppler – zu beenden. Aus Platzgründen werden wir die Arbeiten von Doppler und Mach zu diesem Thema nicht genauer besprechen.²²² Sehen wir uns die Arbeiten

- *Beiträge zur Doppler'schen Theorie der Ton- und Farbänderungen durch Bewegung. Gesammelte Abhandlungen*²²³ (Mach, 1873a) und

²²² Für eine Einführung siehe zum Beispiel: (Thiele, 1971) und (Herrmann, 2004).

²²³ In diesem Buch hat Mach seine Beiträge „Ueber die Aenderungen des Tones und der Farbe durch Bewegung.“ (1860) bzw. (Mach, 1873a, pp. 5-21), „Ueber die Controverse zwischen Doppler und Petzval, bezüglich der Aenderung des Tones und der Farbe durch Bewegung.“ (1861) bzw. (Mach, 1873a, pp. 21-29) und „Ueber die Aenderung des Tones und der Farbe durch Bewegung“ (1862) bzw. (Mach, 1873a, pp. 29-33) gesammelt wiedergegeben.

- *Optisch-akustische Versuche: die spectrale und stroboskopische Untersuchung tönender Körper* (Mach, 1873b)

von Ernst Mach nochmals genauer an. Bereits Susan G. Sterrett hat in ihrem Artikel „Sounds Like Light: Einstein’s Special Theory of Relativity and Mach’s Work in Acoustics and Aerodynamics“ (Sterrett, 1998) versucht zu zeigen, dass Einstein von den Arbeiten Machs zur Akustik und Optik womöglich profitierte, obwohl er sie nie zitierte.

Einstein ist aber bekannt dafür, dass er auf die Arbeiten anderer selten hingewiesen hat – in „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) beispielsweise wird auf gar keine andere Literatur referiert, obwohl er die Maxwell-Hertzschen Gleichungen anwendet usw. Das soll uns aber nicht weiter stören.

Einsteins Zeichnung zur Kyoto-Rede zeigt ganz klar einen Zug.²²⁴ Wenn wir uns Machs Arbeit über den Doppler-Effekt (1860) ansehen, dann ist das erste Experiment, das er angibt, jenes von Buys Ballot und M. Scott Russel (Mach, 1873a, p. 11), in welchem ein Zug zentral ist. Der Ton eines ankommenden Zuges ist nämlich höher, und wenn er sich von uns entfernt, wird er tiefer. Dass der Schall *relativ* ist, wird durch die Beobachtung des Beobachters bzw. durch die Messung bestimmt. Wichtig ist der Ton, den Sie an dem Ort messen können, an dem Sie sich befinden. Mach hat sogar Wissenschaftler nach Prag eingeladen, damit sie den ein- und ausfahrenden Zug am Bahnhof hören können – siehe (Motz, 1988, p. 87). Aber nicht nur Christian Doppler und Ernst Mach waren in Prag akademisch aktiv, sondern auch Einstein (1911-1912). Zu dieser Zeit veröffentlichte er seinen Artikel „Die Relativitäts-Theorie“ (Einstein, 1911i). Dieser ist höchst interessant, da oft bereits Begriffe allein ein Abbild der Wissenschaftsgeschichte geben. Mach wurde von Planck zwischen den Jahren 1908 bis 1910 kritisiert. Mach hat sich daraufhin als „Relativist“ verteidigt. Nun können wir uns die Frage stellen, ob die „Relativitätstheorie“ von Einstein mit Mach in Verbindung steht.²²⁵

Einstein wird zum ersten Mal als Prager Professor die Spezielle Relativitätstheorie in seinem Artikel „Die Relativitäts-Theorie“ (1911) als „Relativitätstheorie“ (Einstein, 1911i, p. 1) (CPAE 3; 17; p. 425) bezeichnen – siehe dazu auch (CPAE 3; 17; p. 439, fn. 1). Dabei beginnt er das Relativitätsprinzip gleich zu Beginn mit einem Gedankenexperiment zu erklären – jenes

²²⁴ Siehe Abschnitt „4.4. Einsteins Kyoto-Rede“, Abb. 3.

²²⁵ Zur geschichtlichen Entwicklung des Begriffs der Relativitätstheorie siehe (CPAE 3; 17; 439, fn. 1) (CPAE 6; 30; p. 338, fn. 2) und (Cassini & Levinas, 2019, pp. 55, fn. 1).

befasst sich mit zwei Physikern: der eine steht am offenen Feld und der zweite fährt mit dem Zug (Einstein, 1911i, p. 1) (CPAE 3; 17; p. 425). Auf der nächsten Seite wird Einstein Licht mit Schallwellen vergleichen (Einstein, 1911i, p. 2) (CPAE 3; 17; p. 426). Es zeigen sich bereits Parallelen zu Mach, diese sollten jedoch nicht die einzigen bleiben.²²⁶ Einstein beginnt seine Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ mit der Kritik der Gleichzeitigkeit (Einstein, 1905r, p. §1). (Wir haben bereits oben gesehen, dass für jene Kritik oder die der absoluten Zeit, Einstein von Mach inspiriert wurde.) Interessanterweise ist Einsteins erstes Beispiel in diesem Kapitel ebenfalls ein Zug (Einstein, 1905r, p. 893 (§1)). Der Zug wird ebenso in seinen späteren Erörterungen sein Lieblingsbeispiel bleiben, wenn er den Zeitbegriff und somit die Relativität der Gleichzeitigkeit zu erklären versucht (Einstein, 2009, pp. 16-18).²²⁷ Er betont, dass die Definition der Zeit an einem Ort für das, was wir auf einer Uhr beobachten oder messen, ausreicht (Einstein, 1905r, p. 893 (§1)):

„Eine solche Definition genügt in der Tat, wenn es sich darum handelt, eine Zeit zu definieren ausschließlich für den Ort, an welchem sich die Uhr eben befindet; die Definition genügt aber nicht mehr, sobald es sich darum handelt, an verschiedenen Orten stattfindende Ereignisreihen miteinander zeitlich zu verknüpfen, oder – was auf dasselbe hinausläuft – Ereignisse zeitlich zu werten, welche in von der Uhr entfernten Orten stattfinden.“
(Einstein, 1905r, p. 893 (§1)) (CPAE 2; 23; p. 278)

Eine Lösung wäre laut Einstein (Einstein, 1905r, p. 893 (§1)), dass ein Beobachter seine Uhr mittels Lichtsignale mit dem eines anderen Beobachters synchronisieren könnte – aber das ist mit einem Problem verbunden, wie er betont. Schauen wir uns das Beispiel genauer an, denn in der Aufklärung dieses Problems stecken bereits die Grundprinzipien der Speziellen Relativitätstheorie: Es gibt einen Beobachter A und einen Beobachter B (Einstein, 1905r, p. 894 (§1)), die sich relativ schnell zueinander bewegen. Wenn wir annehmen, dass die Lichtgeschwindigkeit eine Konstante ist, dann braucht das Licht immer die gleiche Zeit für den Abstand von A nach B und von B nach A (Einstein, 1905r, p. 894 (§1)). Angenommen, ein Beobachter (A) hätte eine Uhr mit der Frequenz (f) des Lichts in seinem System mit seiner Uhr synchronisiert. Wenn der Beobachter (A) nun das Licht an einen anderen Beobachter (B) sendet, der eine andere Relativgeschwindigkeit hat, empfängt der Beobachter (B) aufgrund

²²⁶ Siehe dazu auch Abschnitt „4.4.5.3. Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit?“.

²²⁷ Beispiele mit Zügen kommen auch auf anderen Seiten vor (Einstein, 2009, pp. 3, 7-10, 12, 16-20, 27, 39, 46). Man kann daraus schließen, dass er am liebsten Gedankenexperimente mit Zügen anwendet, wenn er die Relativitätstheorie versucht dem Leser didaktisch näher zu bringen.

des Doppler-Effekts ein Licht mit einer anderen Frequenz (f'). Da die Frequenz der Kehrwert der Periodendauer ist²²⁸, wird verständlich, dass sich die Zeit transformiert hat. In

„Autobiographisches“²²⁹ erklärt Einstein:

„Die Voraussetzung von der (prinzipiellen) Existenz (idealer bzw. vollkommener) Maßstäbe und Uhren ist nicht unabhängig voneinander, denn ein Lichtsignal, welches zwischen den Enden eines starren Stabes hin und her reflektiert wird, stellt eine ideale Uhr dar, vorausgesetzt, daß die Voraussetzung von der Konstanz der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit nicht zu Widersprüchen führt.“ (Einstein, 1983, p. 21)

Schauen wir uns das Problem deshalb zur Sicherheit kurz von der physikalisch-mathematischen Seite an. Beobachter (A) hat die Zeit t und Beobachter (B), der sich vom Beobachter (A) mit einer konstanten Geschwindigkeit v sich wegbewegt, die Zeit t' . Nun sendet Beobachter bzw. Quelle (A) N Lichtwellen. Das Licht benötigt – vom Beobachter (B) aus gesehen – dabei für die Strecke $AB = c \cdot \Delta t'$. Währenddessen bewegt sich der Beobachter bzw. Empfänger (B) natürlich weiter und legt ebenso den Weg $v \cdot \Delta t'$ zurück. Für den Beobachter (B) legen daher die Lichtwellen folgenden Weg x' zurück:

$$x' = c \cdot \Delta t' + v \cdot \Delta t'$$

Die Wellenlänge können wir ganz einfach beschreiben:

$$\lambda' = \frac{c \cdot \Delta t' + v \cdot \Delta t'}{N} = \frac{(c + v) \cdot \Delta t'}{N} = \frac{\left(1 + \frac{v}{c}\right) \cdot \Delta t'}{N} = \frac{(1 + \beta) \cdot \Delta t'}{N}$$

Und für die Frequenz $f' = \frac{c}{\lambda} = \frac{N}{\Delta t'}$ erhalten wir somit:

$$f' = \frac{c}{\lambda} = \frac{c \cdot N}{(c + v) \cdot \Delta t'} = \frac{1}{\left(1 + \frac{v}{c}\right)} \cdot \frac{N}{\Delta t'} = \frac{1}{(1 + \beta)} \cdot \frac{N}{\Delta t'}$$

Die Frequenz f beim Beobachter bzw. Sender (A) ist wiederum

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{N}{\Delta t} \rightarrow f \cdot \Delta t = N$$

Die wichtige Frage, die wir nun zu klären haben, ist wie Δt und $\Delta t'$ miteinander verknüpft sind. Wir erkennen hier ganz deutlich welche essentielle und unumgängliche Rolle der Zeitdilatation zukommt.

Möchte man den Doppler-Effekt verstehen, ist genau dieses Problem zu lösen. Insofern wird es verständlich, weshalb sich Einstein wahrscheinlich mit der Arbeit von Voigt

²²⁸ $\text{Frequenz} = \frac{1}{\text{Periodendauer}}$

²²⁹ Siehe dazu auch Abschnitt „4.4.2.3.4. Der Doppler-Effekt als Erklärung für Einsteins Gedankenexperiment ‚Chasing the light‘“.

auseinandersetzte und Probleme mit der „Ortszeit“ von Lorentz hatte. Mit Hilfe der Lorentz-Transformation, kommen wir auf die folgende Beziehung für die Zeit:

$$t' = t \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = t \cdot \sqrt{(1 - \beta^2)} \rightarrow \frac{t'}{t} = \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \sqrt{(1 - \beta^2)}$$

Der Beobachter bzw. Empfänger (B), der sich relativ vom Beobachter (A) wegbewegt, misst daher die Frequenz

$$f' = \frac{1}{\left(1 + \frac{v}{c}\right)} \cdot \frac{N}{\Delta t'} = \frac{1}{(1 + \beta)} \cdot \frac{f \cdot \Delta t}{\Delta t'} = \frac{f}{(1 + \beta)} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t'}$$

Setzen wir nun die Lorentz-Transformation bzw. die Zeitdilatation ein

$$f' = \frac{f}{(1 + \beta)} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{f}{(1 + \beta)} \cdot \sqrt{(1 - \beta^2)} = f \cdot \frac{\sqrt{(1 - \beta^2)}}{(1 + \beta)} = f \cdot \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

kommen wir zum relativistischen Doppler-Effekt (bei Entfernung der Beobachter

voneinander). Aufgrund des Terms $\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$ ist ersichtlich, dass $f > f'$ gilt, das heißt beim

sichtbaren Licht hätten wir eine Rotverschiebung. Wenn nun die Relativgeschwindigkeiten

zwischen den Beobachtern (A) und (B) gegenüber der Lichtgeschwindigkeit c

vernachlässigbar ist ($v \ll c$ und somit $\beta \ll 1$), dann können wir diese Gleichung

$$f' = \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} = f \cdot (1 - \beta)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + \beta)^{\frac{1}{2}}$$

in einer Reihe entwickeln

$$f' = f \cdot \left(1 + \frac{1}{2}\beta + \frac{3}{8}\beta^2 + \dots\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{2}\beta - \frac{3}{8}\beta^2 + \dots\right)$$

Wenn wir die Terme höherer Ordnung aus praktischen Gründen auslassen und

ausmultiplizieren, kommen wir zu der Näherung für den klassischen Doppler-Effekt:

$$\frac{f'}{f} \approx 1 - \beta = 1 - \frac{v}{c}$$

Würden sich die Beobachter einander annähern, so erhalten wir

$$\frac{f'}{f} \approx 1 + \beta = 1 + \frac{v}{c}$$

Hiermit ist auch anhand der physikalisch-mathematischen Methode gezeigt, dass für Einstein das Verständnis der Zeitdilatation unumgänglich wäre, um zum relativistischen Doppler-Effekt zu gelangen. Er musste also die „Ortszeit“ von H. A. Lorentz, als die „Zeit“ schlechthin

definieren. Das war der Clou. Im Kapitel „§ 7. Theorie des *Dopplerschen* Prinzips und der Aberration“ erklärt Einstein, um die Formel für den Doppler-Effekt herleiten zu können:

„Durch Anwendung der in § 6 gefundenen Transformationsgleichungen für die elektrischen und magnetischen Kräfte und der in § 3 gefundenen Transformationsgleichungen für die Koordinaten und die Zeit erhalten wir unmittelbar: [...]“ (Einstein, 1905r, p. 911)

In „§ 6. Transformation der Maxwell-Hertzschen Gleichungen für den leeren Raum. Über die Natur der bei Bewegung in einem Magnetfeld auftretenden elektromotorischen Kräfte.“ (Einstein, 1905r, p. 907 (§6)) geht es um die Transformation der Maxwellschen-Gleichungen im Leeren Raum. (Erinnern wir uns an die Kyoto-Rede, wo es heißt: „[17] Ferner untersuchte ich das FIZEAUSche Experiment und wollte es unter der Voraussetzung diskutieren, daß die LORENTZsche Elektronengleichung auch dann gilt, wenn unser Koordinatensystem auf einen sich bewegenden Körper gelegt wird, statt sich im Vakuum zu befinden.“) Um aber die Maxwell-Gleichungen transformieren zu können, benötigt Einstein aber „die in § 3 entwickelte Transformation“ (Einstein, 1905r, p. 907 (§6)). Im Abschnitt „§ 3. Theorie der Koordinaten- und Zeittransformation von dem ruhenden auf ein relativ zu diesem in gleichförmiger Translationsbewegung befindliches System.“ (Einstein, 1905r, p. 897 (§3)) geht es wiederum um Raum- und Zeittransformation von (Inertial-)Systemen. Um das zu bewerkstelligen wird

„[...] ferner mittels der im ruhenden System befindlichen ruhenden Uhren durch Lichtsignale in der in § 1 angegebenen Weise die Zeit t des ruhenden Systems für alle Punkte des letzteren bestimmt, in denen sich Uhren befinden; ebenso werde die Zeit τ des bewegten Systems für alle Punkte des bewegten Systems, in welchen sich relativ zu letzterem ruhende Uhren befinden, bestimmt durch Anwendung der in § 1 genannten Methode der Lichtsignale zwischen den Punkten, in denen sich die letzteren Uhren befinden.“

(Einstein, 1905r, p. 898 (§3))

Nun stellt sich natürlich die Frage: Worum geht es in „§ 1“? Dieses Kapitel behandelt „§ 1. Definition der Gleichzeitigkeit.“ (Einstein, 1905r, p. 892 (§1)).

Wenn wir unsere Analyse also zusammenfassen, betont Einstein in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905) Folgendes: Um den Doppler-Effekt und die Aberration zu verstehen (§ 7) muss man die Transformation der Maxwellgleichungen verstehen (§ 6) und dafür wiederum sollte man die Raum- und Zeittransformationen kennen

(§ 3) – und dafür ist wiederum die Relativität der Gleichzeitigkeit zu verstehen (§ 1). Wie wir gesehen haben, hat aber die Interpretation der „Ortszeit“ von Lorentz Einstein erst auf die richtige Spur gebracht – dabei hat Einstein wohl vor allem von Cohns, Machs und Voigts Arbeiten profitiert.

Die obige Zusammenfassung verdeutlicht zugleich, weshalb vielen Forschern die wichtige Bedeutung des Dopplerschen Prinzips für die SRT nicht auffiel. Dafür gibt es vor allem zwei Gründe:

1.) Intuitiv geht man höchstwahrscheinlich davon aus, dass die Reihenfolge der Kapitel im Originalwerk „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905) von Einstein der chronologischen Reihenfolge der Entstehung der speziellen Relativitätstheorie entspricht. Wie die meisten Wissenschaftler jedoch aus eigener Erfahrung wissen, wird die Lösung eines Problems nicht am Anfang, sondern am Ende einer Untersuchung gefunden.²³⁰

2.) Der Abschnitt „§ 7. Theorie des *Dopplerschen* Prinzips und der Aberration“ ist im zweiten Kapitel von Einsteins Arbeit zu finden. Darin verweist Einstein jedoch selbst mehrmals auf die Abschnitte (§ 3 und § 1) im ersten Kapitel – das Verständnis des Dopplerschen Prinzips und der Aberration ist daher eng mit dem ersten Kapitel verknüpft. In seiner ersten

²³⁰ Wertheimer trifft es auf den Punkt, wenn schreibt:

„Fest steht, daß Einsteins Denken nicht damit beschäftigt war, gewissermaßen von der Stange bezogene Axiome oder mathematische Formeln zusammenzusetzen. Die Axiome waren nicht der Anfang, sondern das Ergebnis dessen, was da vor sich ging. Bevor sie als formulierte Sätze ins Bild traten, war die Situation hinsichtlich der Lichtgeschwindigkeit und damit zusammenhängender Fragen für ihn schon lange Zeit strukturell fragwürdig gewesen, war in mancher Hinsicht inadäquat geworden, befand sich in einem Übergangsstadium. Die Axiome waren lediglich eine Angelegenheit späterer Formulierungen – nachdem das eigentlich Wirkliche, die entscheidende Entdeckung, schon stattgefunden hatte.“ (Wertheimer, 2019, p. 248).

Die entscheidende Entdeckung war eben der Zeitbegriff bzw. die Relativität der Gleichzeitigkeit (Wertheimer, 2019, pp. 248, fn. 7).

In dieser Arbeit werde ich daher folgenden Vorschlag machen: Für einen einfachen Überblick zur Entstehungsgeschichte der speziellen Relativitätstheorie ist es hilfreich, vom siebten Kapitel (§ 7) auszugehen, wo Einstein das Dopplersche Prinzip abschließt und uns schrittweise zum Anfang bewegen:

Um die Rolle des Äthers zu verstehen, untersuchte Einstein das Thema des Doppler-Prinzips und der Aberration (Einstein, 1905r, p. §7). Dieses Thema hat ihn die ganze Zeit begleitet, weil er sich fragte, wie sich das Licht im luftleeren Raum ausbreiten würde (Einstein, 1905r, p. §6). Dies führte ihn wiederum dazu, die Geschwindigkeitsadditionsformel in der Mechanik zu überdenken (Einstein, 1905r, p. §5). Dafür musste er jedoch zunächst die Transformation von Raum und Zeit physikalisch interpretieren (Einstein, 1905r, pp. §3-4) – Voraussetzung war, dass er die Relativität von Längen und Zeiten (Einstein, 1905r, p. §2) verstand, wofür aber vor allem notwendig ist, der Relativität der Gleichzeitigkeit auf den Grund zu gehen (Einstein, 1905r, p. §1).

systematischen Darstellung (Einstein, 1907j) wird Einstein das Dopplersche Prinzip im Abschnitt Kinematik behandeln, wodurch dessen Platz besser verständlich wird.²³¹

Man könnte nun dennoch meinen – obwohl die obigen physikalischen Gleichungen deutlich das Gegenteil zeigen – dass der Doppler-Effekt nicht so eine wichtige Rolle gespielt haben könnte. In diesem Zusammenhang sei jedoch noch ein weiterer Punkt erwähnt: Es ist interessant, wie sowohl Mach als auch Einstein immer die unterschiedlichen Perspektiven der „Beobachter“ ansprechen. Dass Mach im Doppler-Effekt den Begriff „Beobachter“ (z. B. (Mach, 1873a, pp. 7-8) verwendet, ist verständlich, da der Doppler-Effekt unsere Sinne direkt beeinflusst – wir können ihn entweder hören oder sehen. Es ist nicht selbstverständlich, dass Einstein in seiner Untersuchung der Zeit ebenso vom „Beobachter“ spricht (Einstein, 1905r, pp. 893-894 (§ 1)), obwohl es ausreichen würde, Koordinatensysteme zu erwähnen.²³² Wenn für Einstein nun tatsächlich das Dopplersche Prinzip derart wichtig war, müsste es in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“ (1905) Spuren hinterlassen haben. Wir können möglicherweise eine solche Spur auch erkennen:

In der Einleitung verwendet Einstein den Begriff „Beobachter“ nicht. In § 1 (Thema: „Definition der Gleichzeitigkeit“) verwendet er ihn dreimal. In § 2 (Thema: „Über die Relativität von Längen und Zeiten“), der sich mit der Relativität von Längen und Zeiten nach dem Relativitätsprinzip befasst, wird er ihn viermal verwenden. (Wie ich weiter oben erläutert habe, könnte man gerade das Relativitätsprinzip mit Mach in Verbindung bringen.) In den Kapiteln § 3, § 4, § 5, § 6 verwendet er den Begriff erwartungsgemäß nicht ein einziges Mal! Die nächste Erwähnung ist in § 7 (Thema: „Theorie des *Dopplerschen* Prinzips und der Aberration). Dort verwendet Einstein den Begriff „Beobachter“ sechsmal und damit am häufigsten in seiner Arbeit. (Er wird ihn nur einmal in § 8 erwähnen (Einstein, 1905r, p. 914), nämlich an der Stelle, wo die Transformation der Lichtstrahlen an einem Spiegel erklärt wird – dieses Thema ist mit seinem Gedankenexperiment eng verwandt. In den Kapiteln § 9 und § 10 wird der Begriff nicht erwähnt.)

Diese einfache konzeptionelle Begriffsanalyse zeigt, wie sehr die Kapitel „§ 1. Definition der Gleichzeitigkeit“, „§ 2. Über die Relativität von Längen und Zeiten“ und „§ 7. Theorie des

²³¹ Siehe dazu Abschnitt „3.2. Entstehungsgeschichte der SRT: Einstein erwähnt Cohn“.

²³² Beispielsweise erklärt Einstein in (CPAE 4; 1; p. 37-39) im Jahre 1912-1914 die physikalische Bedeutung der Zeit in der Speziellen Relativitätstheorie mithilfe von Koordinatensystemen, wo er den Begriff „Beobachter“ gar nicht verwendet.

Dopplerschen Prinzips und der Aberration“ in Einsteins Gedanken zusammenhängen. Das kann auch leicht erklärt werden, wenn wir dem Doppler-Effekt bei der Entstehung der Speziellen Relativitätstheorie einen besonderen Platz einräumen.

Mit einigen zusätzlichen Argumenten soll hier die Wichtigkeit des Dopplerschen Prinzips und der Aberration in der Physikgeschichte und in der SRT verdeutlicht werden:

Einstein erklärt in seiner Kyoto-Rede:

„[17] Ferner untersuchte ich das FIZEAUSche Experiment und wollte es unter der Voraussetzung diskutieren, daß die LORENTZsche Elektronengleichung auch dann gilt, wenn unser Koordinatensystem auf einen sich bewegendenden Körper gelegt wird, statt sich im Vakuum zu befinden.“ (Haubold & Yasui, 1986, p. 274)

Das Fizeausche Experiment betraf die Aberration. Für das Verständnis der Aberration geht natürlich das Dopplersche Prinzip voraus, wie auch in der Arbeit von Einstein ersichtlich (Einstein, 1905r, pp. 910-912).²³³ Es liegt daher nicht fern, dass er versuchte herauszufinden, wie der Doppler-Effekt und die Aberration nun zusammenhängen könnten. Das wird auch besonders ersichtlich, wenn wir uns das Buch von Lorentz (Lorentz, 1895) genauer ansehen, welches Einstein in seiner Rede [17] erwähnt. Lorentz untersucht zuerst „*Das Doppler'sche Gesetz*“ (Lorentz, 1895, pp. 56-58) im „ABSCHNITT III“. Einige Seiten weiter bespricht er die „*Die Aberration des Lichtes*“ im „ABSCHNITT V“ (Lorentz, 1895, pp. 88-89), wobei er darin gleich zu Beginn (Lorentz, 1895, p. 88) auf den Teil „*Das Doppler'sche Gesetz*“ (Lorentz, 1895, pp. 56-58) hinweist. Der Grund dafür ist simpel: Dem Verständnis der Aberration geht das Dopplersche Prinzip thematisch voraus.

Außerdem ist für das Verständnis der relativistischen Aberration unbedingt die relativistische Geschwindigkeitsaddition notwendig, was Einstein sicher sehr beschäftigt hat. Aus dem Gespräch zwischen Shankland und Einstein erfahren wir dabei genaueres:

„When I asked him how he had learned of the Michelson-Morley experiment, he told me that he had become aware of it through the writings of H. A. Lorentz, but *only after 1905* had it come to his attention! 'Otherwise,' he said, 'I would have mentioned it in my paper.' He continued to say the experimental results which had influenced him most were the observation on stellar aberration and Fizeau's measurements on the speed of light in moving water. 'They were enough,' he said.“ (Shankland, 1963, p. 48)

²³³ Siehe dazu auch (CPAE 4; 1; p. 50-51).

Später hat Einstein jedoch betont, dass er sich nun erinnert, das Michelson Experiment bereits vor 1905 gekannt zu haben, nämlich durch die Arbeiten von Lorentz (Shankland, 1963, p. 55).²³⁴ (Auch Fizeaus Experiment, welches für Einstein so bedeutend war, wurde von Michelson und Morley wiederholt, worauf Lorentz im „Abschnitt V“ hinweist (Lorentz, 1895, pp. 99-100).)

Dieses Interview von Shankland gibt einen guten Einblick darin, was Einstein in seiner Rede genau meinte, wenn er auf Lorentz und Fizeau hinweist [17]-[19].²³⁵ Aufgrund der Aberration kommt er auf eine Geschwindigkeitsaddition, die aber mit der Mechanik nicht zusammenpasst – es ergibt sich daher ein Widerspruch [20]-[21] und er dachte eine längere Zeit über das Problem nach [22]-[25]. Beispielsweise könnte man versuchen einige Phänomene auf folgende Weise zu erklären: Man geht davon aus, dass der Äther sich mit der Erde mitbewegt – in diesem Fall bleibt aber die (relativistische) Aberration des beobachteten Sternenlichts unerklärt (Cassini & Levinas, 2019, pp. 64-65), die nach der Relativitätstheorie allein aus der relativen Bewegung der Erde und der Lichtquelle (z.B.: Stern) resultiert. In Einsteins „Bemerkung E. Gehreckes Notiz ‚Über den Äther‘“ (Einstein, 1918), die er ausschließlich dem Äther widmet, wird das überaus deutlich:

„In der genannten Notiz wird die Behauptung aufgestellt, daß die Aberration sich aus der Theorie eines mit der Materie bewegten Lichtäthers erklären lasse. [...] Wenn [...] der Äther von den Himmelskörpern mitgenommen wird, so kann der Vektor seiner Geschwindigkeit nicht überall wirbelfrei (und stetig) sein, wie es die [...] Ableitung des Aberrationsgesetzes fordert; es folgt dies aus wohlbekannten Sätzen der Potentialtheorie.

In Wahrheit ist die Hypothese eines mit den Himmelskörpern mitbewegten Äthers mit dem Aberrationsgesetze unvereinbar.“ (Einstein, 1918, p. 261) (CPAE 7; 15; p. 127)

Das Problem liegt daher in der allgemeinen Beantwortung der (relativistischen) Geschwindigkeitsaddition. Dafür war das Experiment von Fizeau sicher wegweisend – siehe dazu Einsteins Erläuterungen (CPAE 2; 47; p. 448-449).

²³⁴ Siehe dazu auch den Abschnitt „4.4.2.2. Thema II: Der Widerspruch [16]-[25]“.

²³⁵ Für eine genauere Auseinandersetzung damit wie die Arbeiten von Lorentz mit dem Fizeau- und dem Michelson-Morley-Experiment zusammenhängt, siehe (Cassini & Levinas, 2019, p. 64). Für eine Einführung darin, ob das Experiment von Fizeau für die Entwicklung der SRT eine Rolle gespielt haben könnte, siehe (Cassini & Levinas, 2019, pp. 57-61). Sie verweisen aber daraufhin, dass Einstein vor der Entwicklung der SRT vom Fizeauschen Experiment womöglich noch nichts Genaues wusste (Cassini & Levinas, 2019, pp. 62-63).

4.4.2.3.3. Der Doppler-Effekt als Lösung für die Diskussion zwischen Wien und Abraham

Wir haben bereits im Abschnitt „2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien:

Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“ darauf hingewiesen, dass das Dopplersche Prinzip gerade in der Diskussion zwischen Wien und Abraham eine wichtige Rolle spielte. Ein weiterer Punkt in der Auseinandersetzung zwischen ihnen war die Frage, ob man die Lichtgeschwindigkeit physikalisch als eine Grenzggeschwindigkeit betrachten sollte und Einsteins SRT zum Teil als eine Antwort darauf angesehen werden konnte.

Allgemein zeigt die Geschichte der Physik, dass der theoretischen Untersuchung des Lichts und dessen Eigenschaft in der (relativen) Ausbreitung eine zentrale Rolle zukam – so auch in der Speziellen Relativitätstheorie; wenn man das Licht physikalisch verstehen wollte, dann musste man, historisch gesehen, mit dem Dopplerschen Prinzip beginnen. Denn man musste sich zunächst die Frage stellen, wie diese Analogie zwischen Licht und Ton zu verstehen ist und ob die Analogie zwischen Luft und Äther gerechtfertigt ist, bevor man zu komplexeren Überlegungen überging. Wenn man auf einen Äther verzichtet, dem Prinzip der Relativität vertraut, dann wird verständlich, dass der (relativistische) Doppler-Effekt ein rein raumzeitlicher Effekt ist, der ausschließlich von der Relativbewegung des Beobachters (= Empfängers) und der Lichtquelle (Sender) abhängt. Möchte man die Elektrodynamik mit der Mechanik verbinden, wird aus diesem Zusammenhang klar, dass die Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum) eine obere Grenzggeschwindigkeit darstellt und die Geschwindigkeitsaddition verändert gehört. Sehen wir uns dazu Einsteins eigenes Beispiel zum Doppler-Effekt und zu der Aberration (Einstein 1905, § 7) in „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905) an:

„Ist ein Beobachter relativ zu einer unendlich fernen Lichtquelle von der Frequenz ν mit der Geschwindigkeit v derart bewegt, daß die Verbindungslinie ‚Lichtquelle-Beobachter‘ mit der auf ein relativ zur Lichtquelle ruhendes Koordinatensystem bezogenen Geschwindigkeit des Beobachters den Winkel φ bildet, so ist die von dem Beobachter wahrgenommene Frequenz ν' des Lichtes durch die Gleichung gegeben:

$$\nu' = \nu \frac{1 - \cos\varphi \frac{v}{V}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}$$

Dies ist das *Dopplersche* Prinzip für beliebige Geschwindigkeiten. Für $\varphi = 0$ nimmt die Gleichung die übersichtliche Form an:

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{V}}{1 + \frac{v}{V}}}$$

Man sieht, daß – im Gegensatz zu der üblichen Auffassung – für $v = -\infty$, $v = \infty$ ist.²³⁶

²³⁶ In *The Collected Papers of Albert Einstein* finden wir hierzu eine Fußnote (28), wo angegeben wird:

Nennt man φ' den Winkel zwischen Wellennormale (Strahlrichtung) im bewegten System und der Verbindungslinie ‚Lichtquelle-Beobachter‘, so nimmt die Gleichung für a' die Form an²³⁷:

$$\cos\varphi' = \frac{\cos\varphi - \frac{v}{V}}{1 - \frac{v}{V}\cos\varphi}.$$

Diese Gleichung drückt das Aberrationsgesetz in seiner allgemeinsten Form aus. Ist $\varphi = \pi/2$, so nimmt die Gleichung die einfache Gestalt an:

$$\cos\varphi' = -\frac{v}{V}.$$

Wir haben nun noch die Amplitude der Wellen, wie dieselbe im bewegten System erscheint, zu suchen. Nennt man A und A' die Amplitude der elektrischen oder magnetischen Kraft im ruhenden bez. im bewegten System gemessen, so erhält man:

$$A'^2 = A^2 \frac{\left(1 - \frac{v}{V}\cos\varphi\right)^2}{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2},$$

welche Gleichung für $\varphi = 0$ in die einfachere übergeht:

$$A'^2 = A^2 \frac{1 - \frac{v}{V}}{1 + \frac{v}{V}}.$$

„In a reprint copy (in Gerald Holton's collection of Einstein's reprints), Einstein corrected this line: 'für $v = -V, v = \infty$.'“ (CPAE 2; 23; p. 309, fn. 28)

Das heißt, Einstein hat später „ $v = -\infty$ “ durch „ $v = -V$ “ korrigiert.

Bernhard Baumgartner hat mich darauf hingewiesen, dass jedoch noch eine Korrektur notwendig wäre – es müsste nämlich $v' = \infty$ heißen.

Diese Ausbesserung ist somit sowohl Einstein (zweimal) als auch den Verfassern von *The Collected Papers of Albert Einstein* entgangen. Das soll an dieser Stelle kurz gezeigt werden:

$$v' = v \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{V}}{1 + \frac{v}{V}}} \quad / \quad v = -V$$

$$v' = v \sqrt{\frac{1 - \frac{-V}{V}}{1 + \frac{-V}{V}}}$$

$$v' = v \sqrt{\frac{1 - \frac{-V}{V}}{1 + \frac{-V}{V}}} = v \sqrt{\frac{1 + 1}{1 - 1}} = v \sqrt{\frac{2}{0}} = \infty$$

$v' = \infty$

Also muss es richtigerweise heißen: „für $v = -V, v' = \infty$ “.

²³⁷ Mit a' ist gemeint:

$$a' = \frac{a - \frac{v}{V}}{1 - a \cdot \frac{v}{V}}$$

(Einstein, 1905r, p. 911)

Es folgt aus den entwickelten Gleichungen, daß für einen Beobachter, der sich mit der Geschwindigkeit V einer Lichtquelle näherte, diese Lichtquelle unendlich intensiv erscheinen müßte.“ (Einstein, 1905r, pp. 911-912)²³⁸

Wenn also ein Beobachter sich mit Lichtgeschwindigkeit auf eine Lichtquelle hinzubewegen würde, dann wären die Frequenz ν und somit die Energie bzw. die Amplitude A , die er messen würde, unendlich groß. Eine unendlich große Frequenz und somit Energie ergibt aber physikalisch keinen Sinn. (So etwas könnte man auch gar nicht messen.) Daher kann ein

²³⁸ Die Relativitätstheorie ist eine Theorie zur Vereinheitlichung von Mechanik und Elektrodynamik. Aus diesem Grund ist nur ein Thema für den Beginn der Forschung naheliegend, welches für beide Bereiche bereits relevant war. Wenn Einstein also von Optik [5] spricht, dann ist der Doppler-Effekt und die Aberration im Prinzip das offensichtlichste Thema, welches ihn beschäftigte. Beispielsweise muss man die Analogie zwischen Licht- und Schallwellen verstehen und studieren, wie der Äther als Ausbreitungsmedium nun zu verstehen ist. Deshalb erwähnt Einstein die hypothetisch relative Bewegung der Erde zu dem Äther [6]-[10]. Als nächstes bespricht er sein Gedankenexperiment mit den Spiegeln [11]. Ein Gebiet, welches sich mit Optik und Spiegeln genauer auseinandersetzt, finden wir auch in Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“, nämlich im Abschnitt „§ 8. Transformation der Energie der Lichtstrahlen. Theorie des auf vollkommene Spiegel ausgeübten Strahlungsdruckes.“ (Einstein, 1905r, pp. 913-915). Am Ende dieses Abschnitts erklärt Einstein:

„Nach der hier benutzten Methode können alle Probleme der Optik bewegter Körper gelöst werden. Das Wesentliche ist, daß die elektrische und magnetische Kraft des Lichtes, welches durch einen bewegten Körper beeinflusst wird, auf ein relativ zu dem Körper ruhendes Koordinatensystem transformiert werden. Dadurch wird jedes Problem der Optik bewegter Körper auf eine Reihe von Problemen der Optik ruhender Körper zurückgeführt.“ (Einstein, 1905r, p. 915)

Im Abschnitt § 8 haben wir daher einen guten Einblick darin, was Einstein mit dem Thema Optik meinte. Natürlich bezieht sich dieser Teil auf den Doppler-Effekt und die Aberration, welche im § 7 besprochen wurden. Ein kurzes Beispiel an dieser Stelle kann das demonstrieren:

In § 8 gibt Einstein die Formel (für die Energie des Lichts) an:

$$\frac{E'}{E} = \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{V}}{1 + \frac{v}{V}}}$$

(Einstein, 1905r, p. 914 (§ 8))

Dabei bezeichnet E die Energie des (Inertial)Systems in Ruhe und E' ist die Energie des zweiten (Inertial)Systems, welches sich vom ersten mit einer relativen Geschwindigkeit fortbewegt. Die Formel ist dieselbe, die Einstein in § 7 bereits für die Frequenz ν beim Doppler-Effekt dargelegt hat

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{V}}{1 + \frac{v}{V}}}$$

(Einstein, 1905r, p. 912 (§ 7))

– er hätte also genau so gut $\frac{\nu'}{\nu}$ schreiben können.

Auf Grund der Formeln ist einfach verständlich, weshalb Abschnitt § 7 (Doppler-Effekt) dem § 8 vorausgeht und weshalb Einstein der Doppler-Effekt und die Aberration bei der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie stets begleitet hatten.

In diesem Zusammenhang wird es verständlich, dass Einstein später direkt oder indirekt die Emissionstheorie ($E = h \cdot f$) untersuchte, um die Beziehung zwischen Energie und Frequenz besser zu verstehen. Insofern kann das Kapitel § 9 (und § 10) mit den Zeilen [17] - [23] mit Einsteins Kyoto-Rede in Verbindung gebracht werden (siehe zum Beispiel (Einstein, 1905r, p. 917 (§ 9))).

Beobachter (mit Masse) sich nicht mit der Lichtgeschwindigkeit bewegen, sondern sich ihr nur annähern. Man spricht heute von einer relativistischen Massenzunahme. Einstein selbst geht darauf bei der Dynamik des beschleunigten Elektrons bzw. allgemein der ponderablen Masse näher darauf ein (Einstein, 1905r, p. 919).

Aus dem relativistischen Dopplerschen Prinzip (und die durch es entwickelte Aberration) allein ist bereits ersichtlich, dass der Doppler-Effekt zu einer Relativität der Raum-Zeit Koordinaten führen muss und die Lichtgeschwindigkeit eine obere Grenze bzw. eine Konstante darstellt, wobei zugleich in aller Deutlichkeit gezeigt wird, dass der Äther nicht benötigt wird. Das Licht bedarf somit nach der Speziellen Relativitätstheorie keines (mechanischen) Ausbreitungsmediums (wie des Äthers), das war eines der wichtigsten Erkenntnisse dieser Theorie und somit Einsteins. (Das Konzept, dass ein Äther nicht benötigt wird, übernahm er wohl von Mach und Cohn.) Hier unterscheidet sich der relativistische Doppler-Effekt explizit vom klassischen Doppler-Effekt.

4.4.2.3.4. Der Doppler-Effekt als Erklärung für Einsteins Gedankenexperiment „Chasing the light“

In diesem Zusammenhang (siehe die oberen Abschnitte) ist auch Einstein's berühmtes Gedankenexperiment „Chasing the light“ verständlich, wo Einstein in Gedanken versucht dem Licht nachzujagen. Und zwar schreibt er in „Autobiographische Skizze“, dass er mit 16 Jahren (1895) (Einstein, 1986, p. 9) auf folgendes Gedankenexperiment kam:

„Während dieses Jahres in Aarau kam mir die Frage: Wenn man einer Lichtwelle mit Lichtgeschwindigkeit nachläuft, so würde man ein zeitunabhängiges Wellenfeld vor sich haben. So etwas scheint es aber doch nicht zu geben! Dies war das erste kindliche Gedanken-Experiment, das mit der speziellen Relativitätstheorie zu tun hat. Das Erfinden ist kein Werk des logischen Denkens, wenn auch das Endprodukt an die logische Gestalt gebunden ist.“
(Einstein, 1986, p. 10)²³⁹

Interessant ist, dass Einstein sagt, dass er in der „Kantonsschule in Aarau“, „wo“ er „nach einjährigem Studium maturierte“ (Einstein, 1986, p. 9) auf das Gedankenexperiment kam (Einstein, 1986, p. 10). Diese Zeilen kommen uns jedoch allzu bekannt vor – wir haben bereits zitiert, dass Einstein in einem Brief (am 10. September 1899) an Mileva Marić

²³⁹ Siehe dazu auch (Norton, 2013, p. 130).

schreibt, dass er sich „Bücher von Helmholtz Boltzmann & Mach“ (CPAE 1; 54; p. 230) bestellt habe, und weiter:

„In Aarau ist mir eine gute Idee gekommen zur Untersuchung, welchen Einfluß die Relativbewegung der Körper gegen den Lichtäther auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in durchsichtigen Körpern hat. Auch ist mir eine Theorie in den Sinn gekommen über diese Sache, die mir große Wahrscheinlichkeit zu besitzen scheint.“ (CPAE 1; 54; p. 230)

Entweder irrt sich Einstein bei der Datierung seines Gedankenexperiments um ca. 4 Jahre²⁴⁰ oder er hatte in Aarau immer wieder neue Gedanken – leider lässt sich das nicht genau sagen. Anhand der Quellen lässt sich jedenfalls belegen, dass Einstein sich bereits mit 16 Jahren mit den Eigenschaften des Äthers und allgemein mit den Problemen der Elektrodynamik beschäftigte. In seiner ersten wissenschaftlichen Arbeit „Über die Untersuchung des Ätherzustandes im magnetischen Felde“ (1895), die er seinem Onkel schickte, denkt er über experimentelle Möglichkeiten nach, mehr über die Eigenschaft des Äthers zu erfahren. Beispielsweise erklärt er darin:

„Jede elastische Veränderung des Äthers an irgend einem (freien) Punkte in einer Richtung muß sich konstatieren lassen aus der Veränderung, welche die Geschwindigkeit einer Ätherwelle an diesem Punkte in dieser Richtung erleidet. Die Geschwindigkeit einer Welle ist proportional der Quadratwurzel der elastischen Kräfte, welche zur Fortpflanzung dienen, und umgekehrt proportional der von diesen Kräften zu bewegendenden Äthermassen. Da jedoch die durch die elastischen Deformationen hervorgerufenen Veränderungen der Dichte meist nur unbedeutend sind, so wird man sie auch in diesem Falle wahrscheinlich vernachlässigen dürfen. Man wird also mit großer Annäherung sagen können: Die Quadratwurzel²⁴¹ aus dem Verhältnis der Veränderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit (Wellenlänge) ist gleich dem Verhältnis der Veränderung der elastischen Kraft.

Was für eine Art von Ätherwellen, ob Licht oder elektrodynamische, und was für eine Methode der Messung der Wellenlänge für die Untersuchung des magnetischen Feldes am geeignetsten sei, wage ich nicht zu entscheiden; im Prinzip ist es ja schließlich gleich.“

(Mehra & Einstein, 1971) (CPAE 1; 5; p. 7-8)

²⁴⁰ Das ist in der Tat nicht so abwegig – Carl Seelig erläutert (als Anmerkung des Herausgebers) in „Einleitende Bemerkungen zur Neuausgabe“:

„ALBERT EINSTEIN: *Autobiographische Skizze*. Diese Erinnerungen wurden als eine der letzten Arbeiten im März 1955 – also ungefähr einen Monat vor der letzten Erkrankung und vor dem Tod – in Princeton geschrieben.“ (Einstein, 1986, p. 165)

Einstein (1879-1955) war somit 76 Jahre alt, als er diesen Text schrieb. Gutmöglich, dass er sich bei der Datierung etwas geirrt hat und die Zusammenhänge durcheinanderbrachte. (Gegen diese Sichtweise sprechen die Notizen von Wertheimer (Wertheimer, 2019, pp. 231-233), worauf wir an dieser Stelle hinweisen möchten.)

²⁴¹ Müsste eigentlich „Das Quadrat“ heißen (CPAE 1; 5; p. 8, fn. 5).

Offensichtlich dachte er damals über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes und somit des elektrodynamischen Feldes bzw. Äthers nach. Dass er damals (und relativ wenig später) irgendwann auch den Gedanken hatte, dem Licht nachzulaufen, könnte möglich sein – scheint aber aus drei Gründen unwahrscheinlich:

1. In der Arbeit findet sich ein solches Gedankenexperiment von Einstein (noch) nicht.
2. Zudem wird die Maxwells Theorie gar nicht erwähnt.²⁴²
3. Einsteins damalige Überlegungen drehen sich mehr um das (statische) Magnetfeld und dessen mögliche Geschwindigkeitsbeeinflussung von elektromagnetischen Wellen.²⁴³

Die sicherste Quelle, wenn wir von Einsteins späteren Erläuterungen absehen, legt daher nahe, dass Einstein die Idee in Aarau wohl eher 1899 hatte... Oder er erweiterte seine Überlegungen von 1895 im Jahre 1899. Allgemein lässt sich auch schwer sagen, wie wichtig dieses Gedankenexperiment für Einstein und somit für die Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie war. (Es ist wohl allen Lesern verständlich, dass mit einem Gedankenexperiment allein sich keine neue Physik aufbauen lässt. Doch im Zusammenhang mit den anderen Entwicklungen in Optik und Elektrodynamik könnte sie immer mehr an Bedeutung erhalten haben.) Wie dem auch sei – in „Autobiographisches“²⁴⁴ sind Einsteins Erläuterungen etwas genauer dargestellt:

„Ein solches Prinzip ergab sich nach zehn Jahren Nachdenkens aus einem Paradoxon, auf das ich schon mit 16 Jahren gestoßen bin: Wenn ich einem Lichtstrahl nacheile mit der Geschwindigkeit c (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum), so sollte ich einen solchen Lichtstrahl als ruhendes, räumlich oszillatorisches, elektromagnetisches Feld wahrnehmen. So etwas scheint es aber nicht zu geben, weder auf Grund der Erfahrung noch gemäß den Maxwellschen Gleichungen. Intuitiv klar schien es mir von vornherein, daß von einem solchen Beobachter aus beurteilt, alles sich nach denselben Gesetzen abspielen müsse wie für einen relativ zur Erde ruhenden Beobachter. Denn wie sollte der erste Beobachter wissen, bzw. konstatieren können, daß er sich im Zustand rascher, gleichförmiger Bewegung befindet?

Man sieht, daß in diesem Paradoxon der Keim zur speziellen Relativitätstheorie schon enthalten ist.²⁴⁵ Heute weiß natürlich jeder, daß alle Versuche, dies Paradoxon befriedigend aufzuklären, zum Scheitern verurteilt waren, solange das Axiom des absoluten Charakters der

²⁴² Siehe dazu auch „Einstein's First Scientific Essay“ (CPAE 1; _; p. 5, fn. 3). Einstein dürfte sich vor allem für Hertz' Experimente dazu interessiert haben (Mehra & Einstein, 1971, p. 388) (CPAE 1; _; p. 5, fn. 3) (CPAE 1; 5; p. 7, fn. 3).

²⁴³ Siehe (CPAE 1; _; p. 5) (Mehra & Einstein, 1971, p. 388) (CPAE 1; 5; p. 7, fn. 2).

²⁴⁴ Einstein schrieb diesen Text mit 67 Jahren (1946) (Einstein, 1983, p. 1).

²⁴⁵ Siehe dazu auch (Norton, 2013, p. 213).

Zeit bzw. der Gleichzeitigkeit unerkannt im Unbewußten verankert war. Dies Axiom und seine Willkür klar erkennen bedeutet eigentlich schon die Lösung des Problems. Das kritische Denken, dessen es zur Auffindung dieses zentralen Punktes bedurfte, wurde bei mir entscheidend gefördert insbesondere durch die Lektüre von David Humes und Ernst Machs philosophischen Schriften.²⁴⁶

Man hatte sich darüber klar zu werden, was die räumlichen Koordinaten und der Zeitwert eines Ereignisses in der Physik bedeuteten. Die physikalische Deutung der räumlichen Koordinaten setzte einen starren Bezugskörper voraus, der noch dazu von mehr oder minder bestimmtem Bewegungszustande (Inertialsystem) sein mußte. Bei gegebenem Inertialsystem bedeuteten die Koordinaten Ergebnisse von bestimmten Messungen mit starren (ruhenden) Stäben. (Daß die Voraussetzung der prinzipiellen Existenz starrer Stäbe eine durch approximative Erfahrung nahegelegte, aber im Prinzip willkürliche Voraussetzung ist, dessen soll man sich stets bewußt sein.) Bei solcher Interpretation der räumlichen Koordinaten wird die Frage der Gültigkeit der euklidischen Geometrie zum physikalischen Problem.

Sucht man nun die Zeit eines Ereignisses analog zu deuten, so braucht man ein Mittel zur Messung der Zeitdifferenz (in sich determinierter periodischer Prozeß, realisiert durch ein System von hinreichend geringer räumlicher Abmessung). Eine relativ zum Inertialsystem ruhend angeordnete Uhr definiert eine Ortszeit. Die Ortszeiten aller räumlichen Punkte zusammengenommen sind die ‚Zeit‘, die zu dem gewählten Inertialsystem gehört, wenn man noch ein Mittel gegeben hat, diese Uhren gegeneinander zu ‚richten‘. Man sieht, daß es *a priori* gar nicht nötig ist, daß die in solcher Weise definierten ‚Zeiten‘ verschiedener Inertialsysteme miteinander übereinstimmen. Man würde dies längst gemerkt haben, wenn nicht für die praktische Erfahrung des Alltags (wegen des hohen Wertes von c) das Licht als Mittel für die Konstatierung absoluter Gleichzeitigkeit erschiene.

Die Voraussetzung von der (prinzipiellen) Existenz (idealer bzw. vollkommener) Maßstäbe und Uhren ist nicht unabhängig voneinander, denn ein Lichtsignal, welches zwischen den Enden eines starren Stabes hin und her reflektiert wird, stellt eine ideale Uhr dar, vorausgesetzt, daß die Voraussetzung von der Konstanz der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit nicht zu Widersprüchen führt.

Das obige Paradoxon läßt sich nun so formulieren. Nach den in der klassischen Physik verwendeten Verknüpfungsregeln von räumlichen Koordinaten und Zeit von Ereignissen beim Übergang von einem Inertialsystem zu einem andern sind die beiden Annahmen

1. Konstanz der Lichtgeschwindigkeit;
2. Unabhängigkeit der Gesetze (also speziell auch des Gesetzes von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit) von der Wahl des Inertialsystems (spezielles Relativitätsprinzip)

miteinander unvereinbar (trotzdem beide einzeln durch die Erfahrung gestützt sind).

Die der speziellen Relativitätstheorie zugrunde liegende Erkenntnis ist: Die Annahmen 1. und 2. sind miteinander vereinbar, wenn für die Umrechnung von Koordinaten und Zeiten der Ereignisse neuartige Beziehungen („Lorentz-Transformation“) zugrunde gelegt werden. Bei der gegebenen physikalischen Interpretation von Koordinaten und Zeit bedeutet dies nicht etwa nur einen konventionellen Schritt, sondern involviert bestimmte Hypothesen über das tatsächliche Verhalten bewegter Maßstäbe und Uhren, die durch Experiment bestätigt bzw. widerlegt werden können.“ (Einstein, 1983, pp. 20-21)

²⁴⁶ Siehe dazu die Abschnitte „4.4.2.3.1 Die Neudefinition der Zeit: Cohns und Machs möglicher Einfluss“ und „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“.

Aus dieser Textstelle wird Einsteins Gedanke nun etwas klarer. Im Alter von 16 Jahren ist er (womöglich) auf ein Paradoxon gestoßen. Wenn man ein Lichtstrahl mit der Geschwindigkeit c (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum) verfolgt, müsste man den Lichtstrahl bzw. das elektromagnetische Feld in Ruhe beobachten können – sozusagen handelt es sich um ein erstarrtes bzw. eingefrorenes elektromagnetisches Feld. Da aber das Relativitätsprinzip für jede beliebige Geschwindigkeit gilt, müsste erklärt werden, weshalb gerade der Lichtgeschwindigkeit eine Sonderrolle zukommt. In diesem Widerspruch steckt tatsächlich der Keim der Speziellen Relativitätstheorie, die wir sogleich erklären werden. Doch sehen wir uns zuvor noch eine zusätzliche Quelle an, die uns bei unserem Verständnis weiterhelfen können wird.

Max Wertheimer, „ein Pionier der Psychologie des 20. Jahrhunderts“ (Wertheimer, 2019, p. V)²⁴⁷, wollte wissen, wie Einstein auf die Relativitätstheorie kam, und hat ihn daher 1916 interviewt – seine Erörterungen dazu sind in seinem Buch *Produktives Wissen* (Wertheimer, 2019) zu finden. Wertheimer selbst wurde in Prag 1880, damals noch Österreich-Ungarn, geboren, weshalb es nicht verwunderlich ist, dass er ebenso Machs Arbeiten kannte (und gegenüber der Relativitätstheorie freundlich gesinnt war) – Machs Forschung (beispielsweise zur Gestalttheorie usw.) hatten daher Einfluss auf Max Wertheimer (Siemsen & Siemsen, 2019, pp. 573, fn. 4; 596), weshalb auch in dem Buch *Produktives Wissen* auf Ernst Machs Arbeiten hingewiesen wird – siehe (Wertheimer, 2019, pp. 212, fn. 1; 221, fn. 2). Jedenfalls hatte Max Wertheimer bezüglich des Kapitels zur Relativitätstheorie noch Fragen und bat Einstein 1943 um eine Stellungnahme, der auch im selben Jahr noch antwortete (Wertheimer, 2019, p. 17) und die Erörterungen von Wertheimer positiv bewertete – siehe (Norton, 2013, pp. 138, fn. 8). Das Buch (Wertheimer, 2019) erschien posthum im Jahre 1945 – siehe (Wertheimer, 2019, p. V). Max Wertheimers Erläuterungen zu diesem Treffen sind im siebten Kapitel „EINSTEIN: DAS DENKEN, DAS ZUR RELATIVITÄTSTHEORIE FÜHRTE“ (Wertheimer, 2019, pp. 230-254) zusammengefasst. Dabei teilt er die Entstehungsgeschichte der Relativitätstheorie in zehn Akte²⁴⁸ und beginnt mit „Erster Akt: Das Problem erhebt sich“ (Wertheimer, 2019, p. 231):

²⁴⁷ Diese Worte stammen von Viktor Sarris, dem Herausgeber des Buches. Er bietet eine kurze Biographie Wertheimers – siehe (Wertheimer, 2019, pp. 2-5).

²⁴⁸ Siehe dazu auch Viktor Sarris Erörterungen (Wertheimer, 2019, pp. 15-17).

„Das Problem erhob sich, als Einstein sechzehn Jahre alt war, ein Gymnasiast (Aarau, Kantonschule). [...] Damals begann das große Problem ihn tatsächlich zu beunruhigen. Er war damit sieben Jahre lang intensiv beschäftigt; aber von dem Augenblick an, wo er dazu kam, den gebräuchlichen Zeitbegriff in Frage zu stellen (siehe siebter Akt), braucht es nur fünf Wochen, um seine Abhandlung Relativität zu schreiben²⁴⁹ – obwohl er zu jener Zeit am Patentamt ganztäglich beschäftigt war.

[...] Erst kamen Fragen wie: Wie wäre es, wenn man hinter einem Lichtstrahl herlief? Wie, wenn man auf ihm ritt? Wenn man einen Lichtstrahl auf seiner Reise verfolgte, würde seine Geschwindigkeit dann abnehmen? Wenn man schnell genug lief, würde er sich dann überhaupt nicht mehr bewegen? . . . Dem jungen Einstein kam dies sonderbar vor.

Derselbe Lichtstrahl würde für einen anderen Mann eine andere Geschwindigkeit haben. Was ist ‚die Lichtgeschwindigkeit‘? Wenn ich sie in Beziehung auf einen Gegenstand kenne, trifft ihr Wert nicht zu in bezug auf einen anderen Gegenstand, der sich selbst in Bewegung befindet. (Ein verwirrender Gedanke, daß unter bestimmten Bedingungen das Licht in der einen Richtung sich schneller fortbewegen sollte, als in einer anderen.) Wenn das zutrifft, dann wären auch gewiss Schlussfolgerungen zu ziehen hinsichtlich der Erde, sofern sie sich bewegt. Es müßte Möglichkeiten geben, durch Experimente mit Licht herauszubringen, ob man sich auf einem bewegten System befindet! Einsteins Interesse wurde hierdurch gefangen genommen; er versuchte Verfahren zu finden, durch die es möglich wäre, die Bewegung der Erde festzustellen oder zu messen – und er erfuhr erst später, daß Physiker schon solche Experimente gemacht hatten. Sein Wunsch, solche Experimente zu entwerfen, war stets begleitet von einigem Zweifel, ob es sich wirklich so verhielt; jedenfalls fühlte er, daß er versuchen müsse zu entscheiden.

Er sagte sich: ‚Ich weiß, was die Geschwindigkeit eines Lichtstrahls in bezug auf ein System ist. Welches die Lage ist, wenn man ein anderes System in Betracht zieht, scheint klar zu sein, aber die Folgerungen sind sehr verwirrend. [...]‘

Als ich ihn fragte, ob er während dieser Zeit schon eine Ahnung von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gehabt habe, unabhängig von der Bewegung des Bezugssystems, antwortete Einstein entschieden: ‚Nein, es war nur Neugier. Daß die Lichtgeschwindigkeit, je nach der Bewegung des Beobachters, verschieden sein könne, kam mir irgendwie zweifelhaft vor. Spätere Entwicklungen verstärkten diesen Zweifel.‘ – Das Licht schien nicht antworten zu wollen, wenn man solche Fragen stellte. Auch das Licht, ganz wie die mechanischen Vorgänge, schien nichts zu wissen von einem Zustand absoluter Bewegung oder absoluter Ruhe. [...]“ (Wertheimer, 2019, pp. 231-233)²⁵⁰

Wir treffen also auch in diesem Gespräch zwischen Einstein und Wertheimer auf das Gedankenexperiment:

„[...] Erst kamen Fragen wie: Wie wäre es, wenn man hinter einem Lichtstrahl herlief? Wie, wenn man auf ihm ritt? Wenn man einen Lichtstrahl auf seiner Reise verfolgte, würde seine Geschwindigkeit dann abnehmen? Wenn man schnell genug lief, würde er sich dann überhaupt nicht mehr bewegen? [...].

²⁴⁹ Dass Einstein fünf Wochen benötigte, wird ein weiteres Mal erwähnt in (Wertheimer, 2019, pp. 248, fn. 7). Dieselbe Angabe finden wir auch in Einsteins Kyoto-Rede: „[39] Fünf Wochen nach diesem Einfall stand die heutige Spezielle Relativitätstheorie fest.“

²⁵⁰ Siehe dazu auch (Norton, 2013, pp. 130-131).

Derselbe Lichtstrahl würde für einen anderen Mann eine andere Geschwindigkeit haben. Was ist ‚die Lichtgeschwindigkeit‘? [...]“ (Wertheimer, 2019, p. 231)

Denken wir an ein ähnliches Beispiel, welches wir bereits oben besprochen haben²⁵¹ – dann wird das Gedankenexperiment von Einstein ganz klar. Ein Beobachter (A) (= Sender) hat einen blauen Laser und ein Beobachter (B) bewegt sich relativ vom Beobachter (A) weg. Aufgrund des Doppler-Effekts kommt es nun zu einer Rotverschiebung: Je nach Höhe der relativen Geschwindigkeit wird der Beobachter (B) das blaue Licht beispielsweise als grün, gelb oder rot erleben. Bei höherer Geschwindigkeit wandert das Licht in den nicht sichtbaren Bereich (Infrarot, Mikrowellen, Rundfunk usw.). Aufgrund des Doppler-Effekts ist daher die relative Geschwindigkeit des Beobachters (B) zum Beobachter (A) einfach anzugeben. Wäre der Beobachter (B) mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum unterwegs, würde ihn nun gar kein Licht mehr vom Beobachter (A) erreichen. Nach der Speziellen Relativitätstheorie ist diese Art der Bewegung aber für einen Beobachter mit Masse eben gar nicht möglich, wie Einstein selbst in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905) erklärt hat²⁵² – wenn also der Doppler-Effekt seinen physikalischen Sinn beibehalten soll, muss man die Geschwindigkeitsaddition der Mechanik in Frage stellen. Nehmen wir nun aber an, der Beobachter (B) hätte keine Masse und wäre nur ein theoretisches Inertialsystem. Nun startet der Beobachter (B) vom Beobachter (A) weg und stellt sich dieselben Fragen wie Einstein: „Wie wäre es, wenn man hinter einem Lichtstrahl herliefe? Wie, wenn man auf ihm ritte? Wenn man einen Lichtstrahl auf seiner Reise verfolgte, würde seine Geschwindigkeit dann abnehmen? Wenn man schnell genug liefe, würde er sich dann überhaupt nicht mehr bewegen?“

Beobachter (B) würde das blaue Licht, wie bereits erläutert, nach Höhe der relativen Geschwindigkeit beispielsweise als grün, gelb oder rot wahrnehmen. Wäre der Beobachter (B) nun mit der Lichtgeschwindigkeit unterwegs, so würde für ihn die Zeit stehen bleiben:

$$t_B = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot t_A$$

²⁵¹ Siehe Abschnitt „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“.

²⁵² Siehe Abschnitt „4.4.2.3.3. Der Doppler-Effekt als Lösung für die Diskussion zwischen Wien und Abraham“.

Für den Fall $v = c$ gilt

$$t_B = \sqrt{1 - \frac{c^2}{c^2}} \cdot t_A = \sqrt{1 - 1} \cdot t_A = 0 \cdot t_A$$

Aus diesem Grund wird ersichtlich, dass der relativistische Doppler-Effekt ein raumzeitliches Phänomen ist. Einsteins Äußerungen, wie

„Wenn man schnell genug liefe, würde er sich dann überhaupt nicht mehr bewegen? [...]. Derselbe Lichtstrahl würde für einen anderen Mann eine andere Geschwindigkeit haben. Was ist ‚die Lichtgeschwindigkeit‘? [...]“ (Wertheimer, 2019, p. 231)

Oder

„Wenn man einer Lichtwelle mit Lichtgeschwindigkeit nachläuft, so würde man ein zeitunabhängiges Wellenfeld vor sich haben. So etwas scheint es aber doch nicht zu geben!“
(Einstein, 1986, p. 10)²⁵³

, bekommen dadurch eine Erklärung: Für einen Beobachter, der sich mit der Lichtgeschwindigkeit bewegt, steht die Zeit still – die Gedanken über ein zeitunabhängiges Wellenfeld haben sich schlussendlich in der Vorstellung der Zeit des Beobachters manifestiert. Da natürlich ein zeitloser Beobachter physikalisch wenig Sinn ergibt, erkannte Einstein, dass die Lichtgeschwindigkeit eigentlich eine obere Grenze angibt, der sich ein Beobachter (mit Masse) stets annähern aber diese nie gänzlich erreichen konnte.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass das Gedankenexperiment gerade im Zusammenhang mit dem Doppler-Effekt verständlich wird.²⁵⁴ Dafür muss man aber Begriffe, wie absolute

²⁵³ Siehe dazu auch (Norton, 2013, p. 130).

²⁵⁴ Der Zusammenhang zwischen dem Doppler-Effekt und Einsteins Gedanken-Experiment wurde offensichtlich von verschiedenen Einstein Forschern nicht gesehen (Norton, 2013, pp. 126-130 ("3. Commentaries")). Auch John Norton scheint diesen Zusammenhang übersehen zu haben. Er vertritt die Ansicht, dass für Einstein die Emissionstheorie bei der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie eine große Rolle gespielt hat (Norton, 2013, pp. 124, 131-133) und meint daher:

„I will propose that Einstein’s ‘Autobiographical Notes’ version of the thought experiment recounts powerful reasons for abandoning emission theories, if in abbreviated form.“

(Norton, 2013, p. 124), siehe dazu auch (Norton, 2013, p. 133)

Ruhe, absolute Zeit oder Äther hinter sich lassen und auf das Relativitätsprinzip vertrauen. Wichtig ist es, sich bewusst zu werden, dass es Phänomene wie absolute Ruhe oder absolute Bewegung, nicht gibt – siehe (Wertheimer, 2019, pp. 232-233). Wertheimer schreibt (im vierten Akt):

„Der berühmte Michelson-Versuch stellte die Physiker vor ein bestürzendes Ergebnis. Wenn man vor einem Körper, der auf einen zueilt, davonläuft, so erwartet man, daß er einen ein wenig später trifft, als wenn man stehen bleibt. Wenn man auf ihn zuläuft, trifft er einen früher. Genau das tat Michelson in Messung der Lichtgeschwindigkeit. [...]“
(Wertheimer, 2019, p. 234)

Und weiter:

„Kein Unterschied wurde gefunden. Der Versuch wurde wiederholt, und das negative Ergebnis wurde klar bestätigt.
Das Ergebnis des Michelson-Versuchs paßte in keiner Weise in die fundamentalen Anschauungen der Physiker. Tatsächlich widersprach dieses Ergebnis allen ihren vernünftigen Erwartungen.
Für Einstein war Michelsons Ergebnis keine alleinstehende Tatsache. Es hatte seinen Platz innerhalb seiner Gedanken, wie sie sich bis dahin entwickelt hatten. Als Einstein von diesen entscheidenden Versuchen der Physiker und den scharfsinnigsten, die von Michelson angestellt worden waren, las, waren ihre Ergebnisse für ihn keine Überraschung, obwohl höchst wichtig und entscheidend. Sie schienen seine Gedanken eher zu bekräftigen als zu untergraben. Wie kommt dieses Ergebnis ganz genau zustande? Einstein war von diesem Problem besessen, obwohl er keinen Weg zu einer positiven Lösung sah.“
(Wertheimer, 2019, p. 235), siehe dazu auch (Wertheimer, 2019, p. 235)

Mit dem Michelson-Morley Versuch dürfte für Einstein klar geworden sein, dass die Hypothese einer absoluten Bewegung gegenüber einem Äther usw. hinfällig wurde – somit wurde der Weg für eine Physik der rein relativen Bewegungen geebnet. (Leider finden sich in den Erörterungen Wertheimers weder das Experiment von Fizeau noch Einsteins

Für Norton ist hierbei das Magnet-Leiter-Experiment wichtig (Norton, 2013, p. 132) – wir haben bereits besprochen, dass die Zusammenhänge womöglich ebenfalls etwas anders interpretierbar sind. (Siehe die Abschnitte „2.1.2.2.3. Der Diskurs und seine experimentelle Ebene: Magnet und Leiter“ und „4.4.2.3.5.3. 3. Grund: Einsteins Gedankenexperiment: Magnet und Leiter“.)

Es steht jedenfalls außer Zweifel, dass Einstein sich mit der Emissionstheorie auseinandergesetzt hat und Nortons Diskussion über elektromagnetische Felder (Norton, 2013, pp. 134-137) ist äußerst lesenswert. Einstein selbst betont jedoch, dass die Emissionstheorie mit der Entwicklung Speziellen Relativitätstheorie nichts zu tun hatte (Shankland, 1963, pp. 49, 56). Man kann Einsteins Aussagen trauen, da in „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) die Emissionstheorie nicht (direkt) vorkommt. Sein Interesse an der Emissionstheorie war unter anderem ein Teil seiner Untersuchung der Aberration (siehe CPAE 6; 7; p. 45 und 49).

Gedankenexperiment zur Messung des Lichtes gegenüber dem Äther – insofern ergänzen sich die Kyoto Rede Einsteins und die Erörterungen Wertheimers.) Ein absolutes Bezugssystem „(den Raum Newtons, den Raum Äthers)“ (Wertheimer, 2019, p. 244) gibt es eben nicht – Bewegungen sind stets relativ auf einen anderen Körper bzw. auf ein Koordinatensystem (Wertheimer, 2019, p. 244). Senden wir in einem (abgeschlossenen) System Licht, ganz gleich in welche Richtung, und es kommt nirgends zu einem Doppler-Effekt, dann ergeben sich auch keine Verschiebungen in den Interferenzen, wenn wir das Licht wieder zusammenführen würden. Ein solches System bildet dann ein Inertialsystem, welches man in Ruhe oder sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegend betrachten kann. Da das Michelson-Experiment in allen diesen Inertialsystemen gilt, hat man natürlich den ersten Hinweis darauf, dass die Geschwindigkeit des Lichtes somit eine Konstante sein müsste und deshalb etwas mit der Definition der Zeit nicht passte, gefunden. Wertheimer erläutert, dass Einstein sich mit der Theorie von Lorentz beschäftigte. Lorentz konnte mit seiner Kontraktionshypothese das Michelson-Experiment erklären – siehe (Wertheimer, 2019, pp. 235-236). Aber:

„Einstein sagte sich: ‚Abgesehen von dem Ergebnis erscheint die gesamte Lage in dem Michelson-Versuch durchaus klar; alle beteiligten Faktoren und ihr Zusammenspiel scheinen klar zu sein. Aber *sind* sie wirklich klar? Verstehe ich wirklich die Struktur der gesamten Situation, vor allem in bezug auf das entscheidende Ergebnis?‘

[...] ‚Sehe ich wirklich klar [...] die Beziehung, die innere Verbindung zwischen den beiden, zwischen der Messung der Zeit und derjenigen der Bewegung? Ist es mir klar, wie es bei der Messung der Zeit in einer solchen Situation hergeht?‘“ (Wertheimer, 2019, p. 236)

Das Problem war die Definition der absoluten Gleichzeitigkeit, wie Einstein Wertheimer erklärte (Wertheimer, 2019, p. 237). Man erkennt in diesem Gespräch, wie sehr Einstein wohl von der Philosophie Machs beeinflusst war. Wenn man einen physikalischen Begriff nämlich nicht physikalisch messen kann, dann ist er physikalisch auch nicht von Bedeutung. Im Zusammenhang mit der Definition der (absoluten) Gleichzeitigkeit erklärt Wertheimer:

„Ich füge nun eine Erläuterung ein, die Einstein in einem Gespräch gab. Angenommen, jemand gebraucht das Wort ‚Buckel‘. Wenn dieser Begriff irgend eine klare Bedeutung haben soll, muß es irgend ein Verfahren geben, um herausfinden, ob ein Mann einen krummen Rücken hat oder nicht. Wenn ich mir keine Möglichkeit ausdenken könnte, solch eine Entscheidung herbeizuführen, hätte das Wort keine wirkliche Bedeutung für mich.“

(Wertheimer, 2019, p. 238)

Aufgrund dessen suchte Einstein nach einer Definition der Zeit und der Relativität der Gleichzeitigkeit, die auch messtechnisch sinnhaft waren. Mithilfe der Lorentz-Transformation wurde es möglich Längen und Zeiten in andere Inertialsysteme zu übersetzen. Dazu war es aber nötig, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zu verstehen. Wie sehr Einstein in seinen Überlegungen von der Analogie zur Akustik begleitet wurde, erkennen wir aus folgenden Erläuterungen Wertheimers:

„[...] In den Gesprächen, die ich im Jahr 1916 mit Einstein führte, stellte ich ihm folgende Frage: ‚Wie kamen Sie dazu, gerade die Lichtgeschwindigkeit als Konstante zu wählen? War das nicht willkürlich?‘

Natürlich war es klar, daß eine wichtige Erwägung von den empirischen Experimenten ausging, die keine Abweichungen in der Lichtgeschwindigkeit gezeigt hatten. ‚Aber wählten Sie diese willkürlich‘, fragte ich, ‚einfach damit es zu diesen Experimenten und zur Lorentz-Transformation paßte?‘ Einsteins erste Erwiderung war, daß wir in der Wahl von Axiomen völlig frei seien. ‚Es gibt keinen solchen Unterschied, wie Sie ihn voraussetzen‘, sagte er, ‚zwischen sinnvollen und willkürlichen Axiomen. Die einzige Tugend von Axiomen ist, daß sie grundlegende Voraussetzungen liefern, aus denen man Schlüsse ziehen kann, die mit den Tatsachen übereinstimmen.‘ Das ist eine Formulierung, die in theoretischen Diskussionen der Gegenwart eine hervorragende spielt, und über die die meisten Theoretiker einig zu sein scheinen. Aber dann ging Einstein lächelnd dazu über, mir ein besonders hübsches Beispiel eines sinnlosen Axioms zu geben: ‚Man könnte natürlich, sagen wir, die Schallgeschwindigkeit anstelle der Lichtgeschwindigkeit wählen. Es wäre indessen vernünftig, nicht gerade die Geschwindigkeit irgend eines Prozesses zu wählen, sondern eines sich irgendwie ‚heraushebenden‘ Prozesses . . .‘ Fragen, wie die folgenden, waren Einstein in den Sinn gekommen: Ist die Lichtgeschwindigkeit vielleicht die größte überhaupt mögliche Geschwindigkeit? Ist es vielleicht unmöglich, irgend eine Bewegung über die Lichtgeschwindigkeit hinaus zu beschleunigen? Wenn die Geschwindigkeit wächst, werden zunehmend größere Kräfte erforderlich, um sie noch weiter zu steigern. Ist vielleicht die Kraft, die erforderlich wäre, um eine Geschwindigkeit über die Lichtgeschwindigkeit hinaus zu steigern, unendlich groß?“ (Wertheimer, 2019, pp. 242-243)²⁵⁵

Wir sind bereits darauf eingegangen, dass die Antwort auf diese Fragen Einstein in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ im Abschnitt „§ 7. Theorie des *Dopplerschen* Prinzips und der Aberration“ behandelt.²⁵⁶ Um aber all das zu erreichen, bedurfte es des Verständnisses der relativen Bewegung:

²⁵⁵ Dafür, dass Einstein schlussendlich auf die Idee einer konstanten Lichtgeschwindigkeit kam, könnte, ähnlich wie bei Planck, die Thermodynamik eine wichtige Rolle gespielt haben. So erklärt Wertheimer:

„Wenn diese Annahmen Klarheit in das System brächten und wenn sie im Experiment bestätigt würden, dann hätte es einen guten Sinn, die Lichtgeschwindigkeit als Grundkonstante zu wählen. (Man vergleiche den absoluten Nullpunkt der Temperatur, der erreicht wird, wenn die Molekularbewegungen in einem idealen Gas Null werden.)“ (Wertheimer, 2019, p. 243)

²⁵⁶ Siehe Abschnitt „4.4.2.3.3. Der Doppler-Effekt als Lösung für die Diskussion zwischen Wien und Abraham“.

„Die letzte Feststellung wirft ein neues Licht auf die Wandlung im Denken, die sich schon in den früheren Schritten zeigte. ‚Unter der Bewegung eines Körpers verstehen wir immer die Änderung seiner Lage in bezug auf einen zweiten Körper‘, auf einen Bezugskörper oder ein Koordinatensystem. Wenn nicht mehr als ein Körper da ist, hat es keinen Sinn, zu fragen oder feststellen zu wollen, ob er sich bewegt oder nicht. Wenn zwei da sind, können wir nur feststellen, ob sie sich einander nähern oder sich von einander entfernen; doch hat es, solange es nur zwei sind, keinen Sinn, zu fragen oder feststellen zu wollen, ob der eine um den anderen läuft; [...]“ (Wertheimer, 2019, p. 244)

4.4.2.3.5. Wieso wurde die bedeutende Rolle des Dopplerschen Prinzips übersehen?

Wenn das Dopplersche Prinzip bei der Entstehungsgeschichte eine wichtige Rolle hatte, stellt sich die Frage, weshalb in der Forschung darauf nicht näher eingegangen wurde. Dafür werden wir versuchen drei Gründe anzugeben.

4.4.2.3.5.1. 1. Grund: Die Geschichte des Dopplerschen Prinzips und der SRT wurden zu wenig erforscht, um Zusammenhänge erkennen zu können.

Um die zentrale Rolle des Dopplerschen Prinzips für die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie zu erkennen, ist es wichtig

- (I) sich die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie genauer anzusehen,
- (II) die Geschichte des Dopplerschen Prinzips zu untersuchen
- (III) und schlussendlich zu erkennen, wie (I) und (II) zusammenhängen könnten.

4.4.2.3.5.1.1. Ad (I):

Die Einstein-Forschung hat im Laufe der Jahre den Schwerpunkt auf die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie gerichtet und dabei die Spezielle Relativitätstheorie etwas vernachlässigt.

4.4.2.3.5.1.2. Ad (II):

Das Dopplersche Prinzip ist wohl eines der wichtigsten Prinzipien der Physik und findet verschiedenste Anwendungen. Seine geschichtliche Entwicklung wurde jedoch selten erforscht. Dadurch sind die Arbeiten von Ernst Mach und Woldemar Voigt etwas in Vergessenheit geraten. Wenn wir jedoch in der Geschichte zurückreisen, zeigt sich folgendes Bild:

a) Lorentz Hinweise auf Machs und Voigts Vorreiterrolle

Für das Verständnis der Speziellen Relativitätstheorie, ist es sehr wichtig, die Analogie zwischen Licht- und Schallwellen zu verstehen, da sich das relativistische Doppler-Prinzip vom klassischen Doppler-Prinzip grundlegend unterscheidet. Wollte man nun etwas über das Dopplersche Prinzip in Erfahrung bringen, waren die Arbeiten von Mach und Voigt sicher empfehlenswert. Der erste, der nun auf Machs und Voigts Vorreiterrolle für die Spezielle Relativitätstheorie in seinen Arbeiten hinweist, scheint Hendrik A. Lorentz gewesen zu sein.

In seiner Arbeit „*Elektromagnetische Erscheinungen in einem System, das sich mit beliebiger, die des Lichtes nicht erreichender Geschwindigkeit bewegt* (1913)“ erklärt er in einer Fußnote:

„Es ist das Verdienst Einsteins, das Relativitätsprinzip zuerst als allgemeines, streng und genau geltendes Gesetz ausgesprochen zu haben.

Ich füge noch in die Bemerkung noch hinzu, daß Voigt bereits im Jahre 1887 (Göttinger Nachrichten S. 41) in einer Arbeit ‚Über das Dopplersche Prinzip‘ auf Gleichungen von der Form

$$\Delta\psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$$

eine Transformation angewandt hat, welche der in den Gleichungen (4) und (5) meiner Arbeit enthaltenen äquivalent ist. (Anmerkung von H. A. LORENTZ, 1912.)“

(Lorentz, 1913, pp. 10, fn *)

Im selben Jahr wird Lorentz, gemeinsam mit W. Julius, Ernst Mach für den Nobelpreis in Physik nominieren. An dieser Stelle möchte ich den Brief zur Gänze wiedergeben:

„An das Nobelpreiskomitee für Physik
der Schwedischen Akademie der Wissenschaften

Wir haben die Ehre, Ihnen Herr H. Kamerlingh Onnes, Prof. an der Universität Leiden, aufgrund seiner Forschung im Bereich der niedrigen Temperaturen, vor allem über die Verflüssigung von Helium im Jahre 1908, für den Nobelpreis für Physik vorzuschlagen. Wir erlauben uns auch, Sie auf die letzten Arbeiten von Herrn Kamerlingh Onnes hinzuweisen, die ebenso sehr wichtig sind. Die Eigenschaften flüssigen Heliums wurden sorgfältig erforscht, und er hat es geschafft, das kritische Stadium dieser Substanz zu beobachten und die kritischen Daten davon zu bestimmen. Außerdem hat ihn ein flüssiges Heliumbad erlaubt, weiter vorzustoßen als bisher möglich, die Erfahrungen über den Effekt der Abkühlung und die Eigenschaften der Substanz. Auf diese Weise ist er dazu gelangt zu zeigen, dass der elektrische Widerstand des Quecksilbers bei einer absoluten Temperatur von 3° praktisch null ist, weniger als der 10-millionste Teil dessen, das es bei 0°C ist.

Zur gleichen Zeit als Herr Kamerlingh Onnes diese bewundernswerten Arbeiten verfolgte, wurden die Ressourcen seines kryogenen Labors Wissenden aller Länder zur Verfügung gestellt, welche nicht verabsäumten, davon weitgehend zu profitieren. Mit seiner Zusammenarbeit hat Herr Jean Becquerel dort die magnetisch-optischen Phänomene in Kristallen, Herr Lenard jene des Leuchtens und die Herren Weiss und Perrier jene des Magnetismus erforscht. Wir glauben dies erwähnen zu müssen, weil Herr Kamerlingh Onnes zu einem großen Teil zu den erhaltenen Resultaten beigetragen hat.

Es gibt jedoch noch einen anderen Physiker, der uns ebenso der hohen Auszeichnung, die Ihre wissenschaftliche Akademie verleiht, würdig erscheint. Das ist Herr E. Mach, der ehemalige Professor der Universität Wien.

Nachdem er vor einem halben Jahrhundert durch schöne Arbeiten, vor allem im Bereich der Akustik und der Optik²⁵⁷, bekannt wurde, widmete sich Herr Mach später mit Vorliebe

²⁵⁷ Wie wir bereits erklärt haben, dürften Machs Arbeiten (Mach, 1873a) (Mach, 1873b), welche das Dopplersche-Prinzip, die Optik und die Akustik behandeln, für Einstein wichtig gewesen sein. Siehe die

allgemeineren und philosophischen Studien. Außerdem war es der philosophische Lehrstuhl, den er zuletzt bekleidete, das Hauptthema seiner Vorlesungen war die Geschichte und Theorie der induktiven Wissenschaften. In unzähligen weltweit verbreiteten Publikationen ist Herr Mach bis zu den Ursprüngen unserer wissenschaftlichen Kenntnisse vorgedrungen und hat Licht in die wahre Bedeutung unserer Theorien gebracht. Alle Physiker kennen diese Bücher: ‚Die Geschichte und die Wurzel des Satzes der Erhaltung der Arbeit‘, ‚Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen‘, ‚Die Mechanik in ihrer Entwicklung, historisch-kritisch dargestellt‘, ‚Die Analyse der Empfindungen und das Verhalten des Physischen zum Psychischen‘, ‚Die Prinzipien der Wärmelehre, historisch-kritisch dargestellt‘, ‚Erkenntnis und Irrtum‘.

Durch diese Schriften hat Mach einen tiefgreifenden und heilsamen Einfluss auf die modernen Ideen gehabt, und viele Physiker ehren ihn als Meister und Führer ihres Denkens.²⁵⁸

Wir sind überzeugt, dass ein Nobelpreis, der diesem illustren und ehrwürdigen Wissenschaftler verliehen wird, eine lebhafte und allgemeine Zufriedenheit in der wissenschaftlichen Welt hervorrufen werde.

H. A. Lorentz

W. H. Julius“

(Ins Deutsche übersetzt von Valerie Marth – als Quelle diente (Blackmore & Hentschel, 1985, pp. 95-96)

Wenn H. A. Lorentz und W. Julius schreiben, dass Mach einen „heilsamen Einfluss auf die modernen Ideen gehabt“ hat „und viele Physiker [...] ihn als Meister und Führer ihres Denkens“ ansehen, dann dachten sie bestimmt auch an Einsteins moderne Theorie der Relativitätstheorie. Aus dieser Perspektive – Würdigung von Mach und Voigt – ist es deshalb auch nicht überraschend, dass H.A. Lorentz die Werke von Christian Doppler, auf den das Dopplersche Prinzip zurück geht, herausgegeben und mit Anmerkungen versehen hat (Doppler, 2000). Es ist jener Wissenschaftler, auf den man die Lorentz-Transformation der Speziellen Relativitätstheorie namentlich zurückführt.

b) Otto Neuraths Briefe an Mach

Nicht nur der Nominierungsbrief betont die wichtige Rolle der Beiträge Machs zu Akustik und Optik, sondern auch dessen Korrespondenz. Ein Beispiel dafür ist die diejenige zwischen Ernst Mach und Otto Neurath (1914-1916).

Zu Beginn bedankt sich Neurath für die „freundlichen Zeilen“ Machs (Haller, 1980, p. 3).

Machs Brief an Neurath ist leider verloren gegangen (Haller, 1980, p. 3). Anschließend

Abschnitte „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“ und „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“.

²⁵⁸ Hier macht Lorentz deutlich, welchen Einfluss Machs Werke auf die damalige moderne Physik, wie beispielsweise die Relativitätstheorie, gehabt hat.

schreibt Neurath, dass er Mach seinen Vortrag „Zur Klassifikation von Hypothesensystemen (Mit der besonderen Berücksichtigung der Optik)“ senden werde (Haller, 1980, pp. 3-4). Der Vortrag wurde von Neurath am 2. März 1914 gehalten (Haller, 1980, p. 3) (Haller & Rutte, 1981, p. 85). Daraufhin formuliert er sein Anliegen:

„Nur zögernd komme ich mit einer Bitte. Ich wäre Ihnen aufrichtig dankbar, wenn Sie mir – falls Sie dadurch keine Bemühungen haben – mitteilen würden, ob und wo der Versuch gemacht wurde die Entwicklung der Optik mit jener der Akustik in Verbindung zu bringen, ich meine natürlich in etwas eingehender Weise. Ich hatte leider bisher nicht Gelegenheit diesem mich sehr interessierenden Problem näher nachzugehen, jenem Wechsel ‘Das Licht etwas, wie der Schall’, ‘Der Schall etwas, wie das Licht.’ Insbesondere das Auftreten der Interferenzlehre in beiden ziemlich gleichzeitig hat mich schon oft gelockt genauer zu analysieren. Ich konnte zwar über die Interferenzlehre des Lichtes ganz gute historische Hinweise finden, abgesehen von den Originalen, die mir zur Hand waren, aber mit der Geschichte der Interferenz in der Akustik in analysierend-kritischer Richtung bin ich übel daran. Ich habe schon oft daran gedacht, diesem Gegenstand mein Augenmerk zuzuwenden, soweit dies eben meine doch nur recht beschränkten wissenschaftlichen Kenntnisse gestatten. Sollten Sie mir mit zwei Worten vielleicht einen Wink geben können, so wäre ich Ihnen aufrichtig dankbar. Ich bitte Sie aber darum wirklich nur unter der Annahme, dass es Ihnen keine irgendwie geartete Mühe macht.

[...] Ich hätte so vieles zu fragen, so vieles, das doch wohl ausser Ihnen wenige wissen können. [...]“ (Haller, 1980, p. 4)

Aus drei Gründen könnte Neurath in seiner Bitte an die Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie gedacht haben:

- (i) Neurath analysierte in seinem Vortrag „Zur Klassifikation von Hypothesensystemen (unter besonderer Berücksichtigung der Optik)“ (Haller & Rutte, 1981, p. 88) die Geschichte der Optik vom Beginn des 17. bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts (Haller & Rutte, 1981, p. 88). Er verwies auf die Analogie zwischen Ton und Licht (Haller & Rutte, 1981, pp. 91, 96-98). (Mach wird in dieser Arbeit mehrfach erwähnt (Haller & Rutte, 1981, pp. 86, 101). Neurath schrieb einen weiteren Brief an Mach:

„Ich erlaube mir, Ihnen mit gleicher Post, meine Arbeit ‚Zur Klassifikation von Hypothesensystemen‘ zu übersenden. Ich habe in derselben versucht an Ideen anzuknüpfen, die Sie mir früh in mein Denken gesenkt haben. Ich wäre froh, wenn Sie ein und das andere freundlich aufnehmen sollten. In diesem Vortrag habe ich die Philosophischen Ergebnisse breiter ausgeführt. Einige der hier angedeuteten Probleme verfolge ich gegenwärtig weiter.“ (Haller, 1980, p. 5)

Es ist daher möglich, dass er beabsichtigte, die Geschichte vom gesamten 19. Jahrhundert bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts zu studieren.

- (ii) Im Brief spielt Neurath auf die Analogie zwischen Licht- und Schallwellen an („‘Das Licht etwas, wie der Schall’, ‘Der Schall etwas, wie das Licht.’“), was für das Dopplersche Prinzip ganz wichtig ist. (Wie wir gesehen haben, hat gerade Mach einen erheblichen Beitrag zur Grundlagenforschung des Dopplerschen Prinzips eingebracht.) Dieses Prinzip spielt ebenso in der Speziellen Relativitätstheorie eine außerordentlich wichtige Rolle. Beispielsweise kann man anhand von Experimenten mit Interferenz zeigen, dass es keinen Ätherwind gibt. Auch hat Mach (gemeinsam mit seinem Sohn) zu Interferenz-Experimenten einiges beigetragen; was erklärt, weshalb Neurath sich gerade für die Interferenzerscheinungen interessiert. Doch ein zusätzliches Indiz stützt die Hypothese: Im selben Brief schreibt Neurath, dass er die Umsetzung von Machs Gedanken in der Allgemeinen Relativitätstheorie mit größtem Interesse verfolgt – siehe (Haller, 1980, p. 4). Offensichtlich war Neurath daher froh darüber, Mach mit der Relativitätstheorie in Verbindung zu bringen.

- (iii) Neurath scheint auch nach seiner Korrespondenz an dessen Ansichten interessiert gewesen zu sein. Deshalb war er wohl auch im Besitz von *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) mit dem gefälschten Vorwort. Auf der ersten Seite des Buches notierte er:

„M. stresses the point, that he is not a forerunner of the theory of relativity, and against the atomistic belief of today p. VIII“. (Abb.: 8)²⁵⁹

Die Tatsache, dass er diese Notiz unterstrichen hat, zeigt deutlich, dass er eine solche Stellungnahme von Mach nicht erwartet hat.

²⁵⁹ Friedrich Stadler machte mich auf Neuraths Notiz aufmerksam, wofür ich ihm sehr dankbar bin.

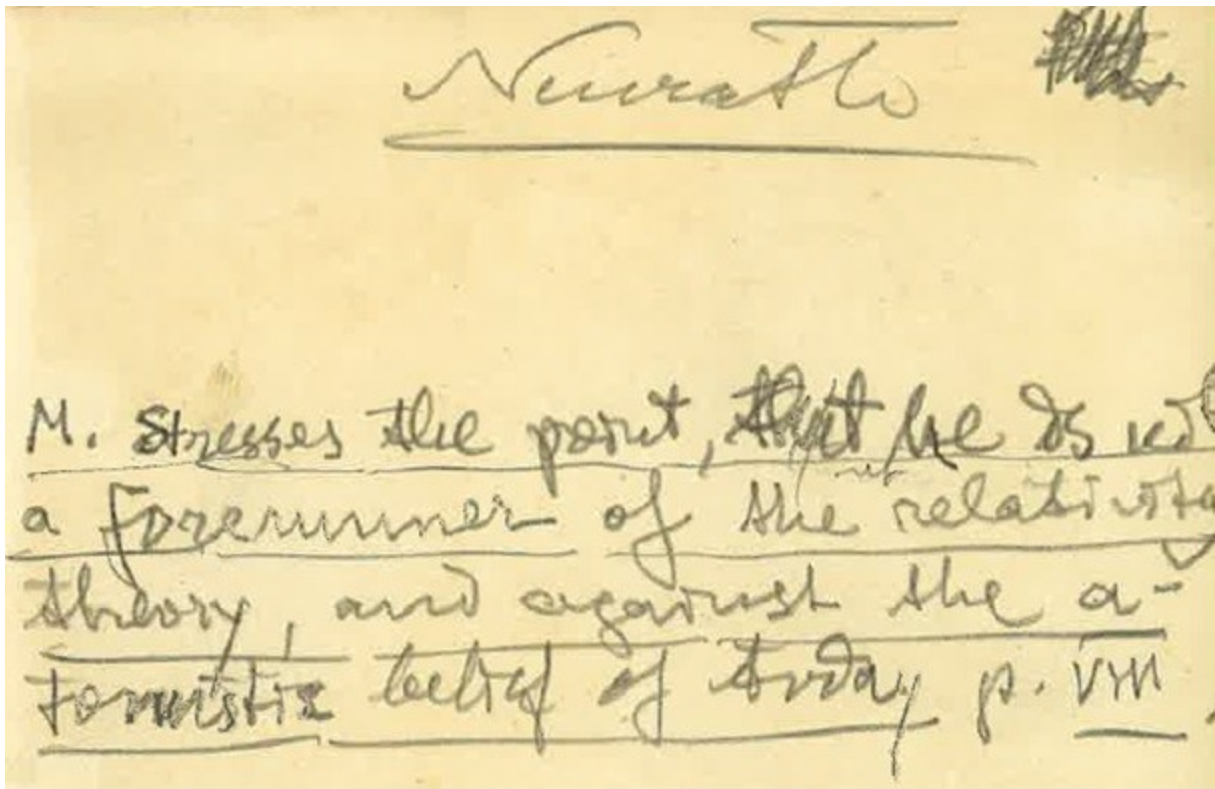


Abbildung 8: Quelle: Exil-Bibliothek Otto Neurath, Wiener Kreis Gesellschaft / Institut Wiener Kreis, Universität Wien, Universitätscampus, Hof 1.

Aufgrund dieser Argumente (i, ii, iii) liegt es sehr nahe, dass Otto Neurath wahrscheinlich erkannt hat, dass es einen Zusammenhang zwischen der Arbeit von Mach und der (Speziellen) Relativitätstheorie gibt. Doch Neurath war vielleicht nicht der einzige, dem das bewusst war.

c) Max von Laue und sein Kommentar zur Vorwort-Fälschung

Max von Laue erkannte sehr früh den engen Zusammenhang zwischen dem Doppler-Effekt und der Speziellen Relativitätstheorie, wie Einstein selber betont hat. Als nun 1921 das gefälschte Vorwort von Ernst Mach erschien, ließ es sich Laue (1921) natürlich nicht nehmen, *Die Prinzipien der physikalischen Optik* von Mach zu kommentieren:

„In this book, a man of undeniable significance speaks perhaps for the last time to his contemporaries ('perhaps' because a continuation is planned which hopefully will also come out)²⁶⁰. One will therefore certainly take it in hand with utmost respect. [...] Though the intent is to place it besides the historical-critical *Mechanik* by the same author, it has nothing

²⁶⁰ Wie wir wissen, kam der angekündigte zweite Teil natürlich nicht heraus. Einen zweiten Teil hat es auch nicht gegeben.

of the originality which that the 30 year old work had overall, and nothing of the scientific insight, that very frequently shows. [...] ²⁶¹

But the preface is nothing short of 'sensational'. ²⁶² The author provisionally – the exact details will follow in the second part – takes a position with respect to the theory of relativity, and indeed, a rough, unfriendly one. [He sees that people] are gradually beginning to think of him as a 'forerunner to the theory of relativity', and he believes that he must reject this [identification] with the same decisiveness with which he has denied 'the atomistic dogma of the current school or church' for his own person. For the author, even relativity theory seems 'dogmatic', and wherever he spots that word, he senses (as can be noticed in more than one place in the book which is before us) an utterly unhistorical, uncritical, horror.

If one were to characterize the situation, it cannot be correct to push skepticism so far that one denies one's own deepest thoughts the moment a person greater than oneself develops it into something positive. And yet the book has rendered a service to the theory of relativity: He never speaks of a palpable 'Aether' and shows how well all of wave optics can be represented without it. ²⁶³ (Laue, 1992, pp. 65-66)

Max von Laues Kritik am Vorwort von *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) ist verständlich – doch wie wir heute wissen, stammten diese Zeilen nicht von Ernst Mach (Wolters, 1987) (Wolters, 2019). Wir haben bereits im Abschnitt „3.2. Entstehungsgeschichte der SRT: Einstein erwähnt Cohn“ darauf hingewiesen, dass es gerade Laue war, der die wichtige Rolle des Doppler-Effekts und der Aberration für die Spezielle Relativitätstheorie erkannte; aus diesem Grund betont er, dass Mach den Äther in seinem Buch (Mach, 1921) nicht behandelt – interessanterweise hat das Mach auch früher nicht getan – leider geht Laue darauf nicht näher ein...

d) Dieter B. Herrmann und Susan Sterrett

Wie wir im Abschnitt „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“ erläutert haben, hat auch Dieter B. Herrmann, der sich mit der Entstehungsgeschichte des Dopplerschen Prinzip auseinandersetzte, einen Zusammenhang gesehen, aber nicht weiter verfolgt (Herrmann, 2004, p. 50). Erst Jahre später hat sich Susan G. Sterrett dem Thema genauer gewidmet (Sterrett, 1998) und konnte Machs Arbeiten, das

²⁶¹ Max von Laue hebt hier offensichtlich die Bedeutung von Machs Buch *Mechanik* hervor.

²⁶² Laue erkennt deutlich, dass das Vorwort Aufmerksamkeit erheischen möchte. Womöglich war das auch tatsächlich der Plan von Ludwig Mach, der selber in finanziellen Schwierigkeiten war und dadurch sich mehr Verkaufszahlen erhoffte und/oder finanzielle Unterstützung durch antisemitische Gruppen.

²⁶³ Er bemerkt richtig, dass Mach in diesem Werk dem Äther keine wichtige Rolle zuschrieb.

Dopplersche Prinzip und die Spezielle Relativitätstheorie in eine Beziehung bringen können.²⁶⁴

4.4.2.3.5.1.3. *Ad (III):*

Aufgrund der Punkte (I) und (II) gab es schlussendlich wenig Möglichkeit die Zusammenhänge zwischen der Entstehungsgeschichte des Dopplerschen Prinzips und der Speziellen Relativitätstheorie zu erkennen.

4.4.2.3.5.1.4. *Historischer Zufall oder konzeptionell notwendig?*

Selbstverständlich könnte man es für einen historischen Zufall halten, dass die Untersuchungen zum Doppler-Effekt bereits vor Einstein zu einer Annäherung an die Spezielle Relativitätstheorie führten, dass das Gedankenexperiment von Mach zum Doppler-Effekt später womöglich Einstein weitergeholfen haben könnte, dass Einsteins Freunde Machianer waren und Einstein selbst Mach intensiv studierte usw.

Doch dürften das womöglich mehr als nur Zufälle gewesen sein. Denn es ist wohl nicht von der Hand zu weisen, dass, wenn jemand zur damaligen Zeit physikalisch das Licht verstehen wollte, er gerade beim Dopplerschen Prinzip ansetzen musste. Schließlich musste man sich zuerst die Frage stellen, wie diese Analogie zwischen Licht und Schall zu verstehen war. Prinzipiell musste man ebenso darüber nachdenken, ob die Analogie zwischen Luft und Äther gerechtfertigt war. Und schließlich war es notwendig (unter anderem durch Gedankenexperimente) zu verstehen, wo diese Analogien zu weit führten.

Allgemein ist die hier nachgezeichnete Entwicklung ebenso in der Physikgeschichte wiederzufinden. Denn, was die Schallwellen von Lichtwellen unterscheidet, ist gerade ihre „Beziehung“ zum Medium, in dem sie sich ausbreiten. Doppler und Mach geben die Formeln für den Dopplerschen Effekt an, welche nur im Bezugssystem des Ausbreitungsmediums gelten. Die *Relativbewegung* zum Medium bzw. zur Luft kann man beim akustischen

²⁶⁴ In ihrer Arbeit (Sterrett, 1998) wird jedoch nicht erwähnt, dass Mach dem Äther keine wichtige Rolle gab und neben dem Teilchenmodell auch das Wellenmodell verwendete. Auch wird in ihrem Artikel auf Woldemar Voigt nur am Rande hingewiesen (Sterrett, 1998, pp. 19, fn. 21), der in diesem Zusammenhang aber höchst wichtig ist. (Leider wurde Voigts wichtiger Beitrag sehr oft gänzlich übersehen, obwohl Lorentz selber darauf hinwies, wie wir gesehen haben.) Ebenso wird in ihrer Arbeit der österreichische Physiker Emil Kohl nicht besprochen. Gerade Kohls Hinweise in seiner Arbeit „Über ein Integral der Gleichungen für die Wellenbewegung, welches dem Dopplerschen Prinzip entspricht“ auf Machs und Voigts Schriften zum Doppler-Effekt (Kohl, 1903a, pp. 96, fn. 1) dürfte Einstein gekannt haben.

Dopplereffekt in der Tat mit gutem Gewissen auslassen. Doch kann man sie nicht prinzipiell auslassen: Schallwellen ergeben im Vakuum keinen Sinn bzw. sind unmöglich. Und wenn beispielsweise ein (starker) Wind weht, dann ist auch die Relativbewegung zur Luft von Bedeutung. Man muss nämlich zur Wellengeschwindigkeit die Windgeschwindigkeit hinzuaddieren oder wegsabziehen. Die Windgeschwindigkeit hat somit eine Auswirkung auf die Frequenzverschiebung.

Nach dem relativistischen Dopplereffekt existiert eben gerade ein solches Medium für Licht nicht. Dadurch ist der (longitudinale) relativistische Doppler-Effekt im Gegensatz zum akustischen, gänzlich symmetrisch. Licht bekommt seine konstante Natur (die Lichtgeschwindigkeit), dort, wo keine Schallwellen existieren, nämlich im Vakuum. Dort weht kein „Ätherwind“, um festzustellen, ob die Quelle sich bewegt oder der Beobachter. Das hat das Michelson-Morley-Experiment gezeigt.²⁶⁵ Alle Inertialsysteme sind gleichwertig.

4.4.2.3.5.1.5. Didaktik

Wollte man die Mechanik und die Elektrodynamik vergleichen oder gar miteinander in Verbindung bringen, war das Dopplersche Prinzip deshalb das (unvermeidbare) Gebiet, welches man genauer untersuchen musste. Einstein (dachte ähnlich wie Mach und) versuchte die Grenzgebiete in verschiedenen Bereichen zu untersuchen und zu verstehen – siehe (Renn, 2007, pp. 30-59). So schreibt Einstein auf der ersten Seite seiner Arbeit:

„Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum ‚Lichtmedium‘ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden ‚Prinzip der Relativität‘ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben [...]“ (Einstein, 1905r, p. 891)

Aus heutiger Sicht ist der Weg nicht ganz so schwer: Man nimmt die mathematische Denkweise von Voigt, FitzGerald, Lorentz oder Poincare usw., folgt Machs kritischen Auseinandersetzungen der absoluten Gleichzeitigkeit und lässt in der physikalischen Diskussion den Äther weg. (Mit etwas Übung ist sodann die konforme Transformation für

²⁶⁵ Diese Schrittfolge spiegelt auch die Erklärungsweise von Max von Laue wider: Zuerst bespricht er den „Dopplereffekt“ (Laue, 1919, pp. 26-27) und anschließend das Michelson-Experiment (Laue, 1919, pp. 27-30). Aus diesem Grund ist es auch verständlich, weshalb Einstein sein Gedankenexperiment mit Michelson-Morley-Experiment in Zusammenhang bringt.

eine Symmetriegruppe in der 4-dimensionalen Raum-Zeit nicht weit entfernt, wo die Maxwellgleichungen unter der Transformation invariant bleiben werden.²⁶⁶ Ist in der Arbeit von Voigt von einer invarianten Wellengleichung und einer universellen Lichtgeschwindigkeit die Rede, werden bei Einstein dann die physikalischen Gesetze invariant und die Lichtgeschwindigkeit eine Konstante (Ernst & Hsu, 2001, p. 225).

Sieht man sich jedoch die didaktischen Entwicklungen, dann hat der Doppler-Effekt mit der Zeit eine wichtigere Position eingenommen.

Beispielsweise wird zuerst der Doppler-Faktor besprochen und erst mit ihrer Hilfe dann die Zeitdilatation hergeleitet und in weiterer Folge die Lorentztransformation aufgestellt (LEIFIphysik (Online), 2021); oder man erklärt anhand des relativistischen Doppler-Effekts sich wiederholende Signale bzw. Impulse zwischen zwei Inertialsystemen, und bringt somit ein besseres Verständnis zur Frequenzverschiebung von Lichtwellen, als auch der relativen Frequenz der Emissionsfolge vor (Poessel, 2011).

Dieser Fortschritt (in der Didaktik) ist auch nicht überraschend, da der Doppler-Effekt den einfachsten physikalischen Zugang darstellt, um zu verstehen, worin die Spezielle Relativitätstheorie sich von den mechanischen Theorien unterscheidet. Es gab nämlich drei wichtige Fragen, die bei der Entstehung der Speziellen Relativitätstheorie beantwortet werden mussten:

1. Kann man eine absolute Bewegung gegenüber dem Äther messen, um beispielsweise die absolute Bewegung der Erde anzugeben? (Diese Frage ist analog zu der Frage der absoluten Bewegung der Erde gegeben über dem absoluten Raum.)
2. Macht die absolute Zeit und somit die absolute Gleichzeitigkeit physikalisch Sinn?
3. War die Analogie zwischen Schall- und Lichtwellen (beim Doppler-Effekt) physikalisch berechtigt bzw. wo führte die Analogie zu weit?

Wie wir gesehen haben, hatte Einstein experimentelle Überlegungen angestellt, um die erste Frage zu beantworten. Beim experimentellen Aufbau hat er sich womöglich von Machs Arbeiten inspirieren lassen. Interessant war, dass Ernst Mach gerade bei seinen

²⁶⁶ Für eine Einführung in das Thema siehe „On the relativistic unification of electricity and magnetism“ (Capria & Manini, 2013) von Marco Mamone Capria und Maria-Grazia Manini.

Untersuchungen zum Doppler-Effekt den Äther ignorierte. Spätestens nach dem Michelson-Morley-Experiment wurde wohl auch für Einstein klar, dass eine absolute Bewegung gegenüber dem Äther nicht messbar war. Theoretische Ansätze, die auf das Konzept des Äthers verzichteten, konnte Einstein dann bei Cohn finden.

4.4.2.3.5.2. 2. Grund: Der Aufbau der „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905)
Ein anderer wichtiger Punkt liegt im Aufbau von Einsteins Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905). Das zweite Kapitel „II. Elektrodynamischer Teil“ (Einstein, 1905r, pp. 907-921) beginnt erst ab ca. der Hälfte der Arbeit – und in diesem Abschnitt ist eben auch „§ 7. Theorie des *Dopplerschen* Prinzips und der Aberration“ (Einstein, 1905r, pp. 910-912) zu finden. Die Vorreiterrolle des Dopplerschen Prinzips für die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie wurde dadurch etwas in den Hintergrund gedrängt. Besser wäre es gewesen, wenn das Dopplersche Prinzip gleich im ersten Abschnitt „I. Kinematischer Teil“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907) aufgenommen worden wäre, um die Zusammenhänge besser zu verstehen. Dieses „Problem“, wenn man das so sagen darf, wurde von Einstein persönlich wieder behoben:

Wie am Titel der Arbeit „Einstein’s reinterpretation of the Fizeau experiment: How it turned out to be crucial for special relativity“ (Cassini & Levinas, 2019) erkennbar, hat Einstein dem Experiment von Fizeau in seinen Erörterungen zur Relativitätstheorie viel Aufmerksamkeit geschenkt; aber erst nachdem die Arbeiten von Jacob Laub „Zur Optik der bewegten Körper“ (Laub, 1907) und „Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip“ (Laue, 1907) von Max von Laue erschienen waren (Cassini & Levinas, 2019, pp. 62-64), wurde seine Rolle für die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie klarer. Max von Laue konnte nämlich in seiner Arbeit korrekt zeigen, dass das Ergebnis des Experimentes von Fizeau, und in diesem Zusammenhang das Fresnelsche Gesetz, einer Näherung der relativistischen Geschwindigkeitsaddition erster Ordnung entsprechen (Cassini & Levinas, 2019, p. 63)²⁶⁷ – das heißt, nur für Geschwindigkeiten $v \ll c$. Um eine solche Näherung zu verstehen, wäre die korrekte relativistische Geschwindigkeitsaddition bereits die Voraussetzung gewesen, was auch verständlich macht, weshalb Einstein in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905) nicht näher darauf eingegangen ist. Da er sich nun auf die Arbeiten von Max von Laue stützen konnte,

²⁶⁷ Voigt und Drudes Arbeiten hatten auch was mit dem Fresnelschen Gesetz zu tun...

gab er wohl dem Dopplerschen Prinzip und der Aberration ihren wichtigen Platz wieder zurück. Hierzu ist die Arbeit „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) von Einstein enorm wichtig, welches zugleich die erste ist, die eine detaillierte Zusammenfassung Einsteins zur SRT darstellt und auch einen Einblick in die Entstehungsgeschichte gewährt. Es ist interessant, dass genau dieser Artikel („Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“) in Einsteins Brief an Mach (1909) erwähnt wird (CPAE 5; 175; p. 205). Das ist auch verständlich, da in diesem Artikel die wichtige Rolle des Dopplerschen Prinzips und der Aberration wieder zurückgegeben wird. Anders als in Einsteins ursprünglicher Arbeit zur „Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905) ist nun der Doppler-Effekt und die Aberration nicht mehr im Gebiet der Elektrodynamik behandelt, sondern im kinematischen Teil (Cassini & Levinas, 2019, p. 63), wie Einstein selber erklärt:

„In dem ersten Abschnitt, in dem ausschließlich die kinematischen Grundlagen der Theorie angewendet worden sind, habe ich auch einige optische Probleme (Dopplersches Prinzip, Aberration, Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper) behandelt; auf die Möglichkeit einer derartigen Behandlungsweise wurde ich durch eine mündliche Mitteilung und eine Arbeit (Ann. d. Phys. 23, 989, 1907) von Herrn M. Laue, und durch eine (allerdings korrekturbedürftige) Arbeit von Herrn J. Laub (Ann. d. Phys. 32, 1907) aufmerksam.“
(Einstein, 1907j, pp. 413-414) (CPAE 2; 47; p. 435-436)

4.4.2.3.5.3. 3. Grund: Einsteins Gedankenexperiment: Magnet und Leiter

In den oben genannten Punkten haben wir erklärt, dass in Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905) die Aufmerksamkeit besonders auf die Elektrodynamik und somit auf die Dynamik der Elektronen gelenkt wurde und dabei die wichtige Rolle des Dopplerschen Prinzips etwas außer Acht gelassen wurde. Deshalb hat man wohl Einsteins Arbeit mit Machs und Voigts herausragenden Beiträgen nicht in Verbindung bringen können. Nach unserer Einschätzung wurde das Gedankenexperiment für Einstein wohl vor allem durch die Arbeiten (Eichenwald, 1904b) (Föppl, 1904b) und Bücher (Poincare, 1904, p. 338) (Föppl, 1904, pp. XII-XIV), die im Jahre 1904 erschienen, interessant – wir sind im Abschnitt „2.1.2.2.3. Der Diskurs und seine experimentelle Ebene: Magnet und Leiter“ („Ad 1:“ und „Ad 2:“) näher darauf eingegangen. Dieses Gedankenexperiment hat Einsteins Vertrauen in das Relativitätsprinzip in der Elektrodynamik sicher gestärkt und war neben dem Doppler-Effekt wahrscheinlich eine weitere Stütze. Dass es jedoch gleich am Anfang der Arbeit als Argument vorgestellt wird, hat eher mit der Aktualität des Themas zur damaligen Zeit zu tun.

4.4.2.3.5.4. 4. Grund: Die Emissionstheorie von Walter Ritz

Ein weiterer Grund könnte sein, dass man der Emissionstheorie (von Walter Ritz) (Stachel, 2002) (Norton, 2004) in der Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie eine wichtige Rolle zugewiesen hat, was nach Einsteins eigener Aussage aber nicht zutrifft (Shankland, 1963, pp. 49, 56). Ebenso könnte aber die Emissionstheorie von Ritz damals dem Dopplerschen Prinzip allgemein im Wege gestanden sein.²⁶⁸ Jedenfalls diene der Doppler Effekt dazu die Theorie von Ritz zu widerlegen, wie Emil Cohn erklärt:

„Man könnte denken: Ausgezeichnet ist jedesmal das Bezugssystem, in dem die *Lichtquelle* und alle etwa sonst beteiligten Körper ruhen. Beim Michelsonschen Versuch ist also die Lichtausbreitung gleichförmig relativ zur Erde; das Fixsternlicht aber breitet sich gleichförmig gegen die Fixsterne aus (Aberration).¹⁾²⁶⁹ Das hieße für den Beobachter auf der Erde: die Lichtgeschwindigkeit ist größer, wenn der Fixstern sich nähert; kleiner, wenn er sich entfernt, – oder nach dem Dopplerschen Prinzip: größer, wenn die Schwingungszahl vergrößert, die Farbe nach Violett verschoben ist; kleiner, wenn die Schwingungszahl verkleinert, die Farbe nach Rot verschoben ist. Dem widerspricht, daß die Doppelsterne in *gleichen* Zeitintervallen ihre Spektrallinien von Rot zu Violett und von Violett zu Rot verschieben.²⁾²⁷⁰“

(Cohn, 1920, pp. 20-21)

Ähnliche Formulierungen finden wir auch in Einsteins Artikel zur Speziellen Relativitätstheorie (1912-1914):

„Erwägt man im Zusammenhange mit solchen Überlegungen, auf wie einfache Weise die Relativitätstheorie Fizeau's Ergebnis deutet (), so wird man sich des Eindrucks kaum erwehren können, dass diese Theorie beim heutigen Stande der physikalischen Erfahrung als die natürlichste anzusehen ist. Im Falle [...] würde die Lichtgeschwindigkeit vom Bewegungszustande der Lichtquelle abhängen.²⁷¹ Es könnten an einem und demselben Orte zu derselben Zeit Lichtstrahlen der verschiedensten Ausbreitungs-Geschwindigkeiten vorhanden sein. Es wären dann die physikalischen Eigenschaften des Lichtes nicht durch die Frequenz allein bestimmt, indem Wellenlänge und Frequenz voneinander unabhängig wären; das Licht, welches von relativ zu uns bewegten Sternen herrührt, würde physikalisch unterscheidbar sein müssen von dem Lichte, das von ruhenden Lichtquellen her stammt. Nichts von dem hat die Erfahrung ergeben. Den überzeugendsten Grund gegen diese, von Ritz vertretene Auffassungsweise hat der holländische Astronom Pexider geltend gemacht. Die einzelnen Sterne von Sternsystemen (Doppelsternen) müssten in verschiedenen Epochen ihres Umlaufes Licht mit verschiedenen Geschwindigkeiten zu uns senden. Es würde also die Zeit der Lichtausbreitung vom Doppelstern bis zu uns für die verschiedenen Epochen verschieden sein. Die zeitliche Aufeinanderfolge der Epochen, wie sie bei uns mittelst des

²⁶⁸ Eine Arbeit, die das Thema näher behandelt, wäre in Zukunft sicher wünschenswert.

²⁶⁹ Die Fußnote 1 lautet: „1) Ansatz von Ritz“ (Cohn, 1920, pp. 21, fn. 1).

²⁷⁰ Die Fußnote 2 lautet: „2) Vgl. de Sitter, Physikalische Zeitschrift. Band 14, 1913“ (Cohn, 1920, pp. 21, fn. 2). Vergleiche diese Fußnote mit (CPAE 4; 1; p. 104, fn. 52).

²⁷¹ An dieser Stelle schreibt Einstein in einer Fußnote: „Die obige Formel zeigt, dass sich im Falle der Lichtausbreitung im Vakuum ($n = 1$) die Geschwindigkeit der Bewegung der Lichtquelle einfach zur Vakuum-Lichtgeschwindigkeit einer ruhenden Lichtquelle addieren müsste.“ (CPAE 4; 1; p. 104, fn. 51)

Doppler'schen Prinzips verfolgt wird, wäre also eine andere als in Wirklichkeit; und zwar zeigt eine einfache Rechnung, dass jener Einfluss ein derart erheblicher sein müsste, dass er den Astronomen unmöglich hätte entgehen können, wenn die zugrunde gelegte Hypothese den Thatsachen entspräche. Die Unhaltbarkeit dieser Auffassung kann wohl als endgültig erwiesen betrachtet werden.“ (CPAE 4; 1; p. 35)

4.4.2.4. Thema IV: Die erkenntnistheoretische Ebene der SRT [40]-[44]

Einstein sagt in seiner Kyoto-Rede in aller Deutlichkeit:

„[40] Ich hegte keinen Zweifel daran, dass sie auch vom philosophischen Standpunkt aus richtig ist. [41] Sie stimmt auch mit der MACHschen Theorie überein.“

(Haubold & Yasui, 1986, p. 275)

Folgende Punkte untermauern seine Ansicht:

1. Einstein und Mach pflegten eine freundliche und gegenseitig wertschätzende Korrespondenz, in welcher Mach Vergnügen und Interesse an der Speziellen Relativitätstheorie zeigte.²⁷²
2. Im Abschnitt „3.1. E. Machs publizierte Äußerungen zu Einsteins Relativitätstheorie“ haben wir gesehen, dass Mach sich zu Lebzeiten nur positiv zur Speziellen Relativitätstheorie geäußert hat, sie mit seinen eigenen Ansichten in Verbindung brachte und Einstein dies auch wissen ließ.
3. Im Abschnitt „3.3. Entstehungsgeschichte der SRT: Cohns Verteidigung der SRT als Andenken an Mach“ konnten wir sehen, dass man aufgrund der Rekonstruktion der Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie von Emil Cohn, Machs Konzepte ohne Probleme mit der SRT in Verbindung bringen kann, da auch die Spezielle Relativitätstheorie den unterschiedlichen experimentellen Resultaten eine möglichst einfache Antwort zu bieten versuchte.

Ein weiterer Punkt ist, dass Einstein in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) nur seinem Freund Besso dankt, der in der Einstein-Forschung bekannt dafür ist, dass er Einstein Machs Ideen näherbrachte – das wurde im Abschnitt „2.1.1. Das O von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“ behandelt.

Zusätzlich haben wir versucht in „4.4.2.3.1. Die Neudefinition der Zeit: Cohn und Machs möglicher Einfluss“, „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“, „4.4.2.3.5.1. 1. Grund: Die Geschichte des Dopplerschen Prinzips und der SRT wurden zu wenig erforscht, um Zusammenhänge erkennen zu können“ und in „4.4.2.3.5.3. 3. Grund: Einsteins Gedankenexperiment: Magnet und Leiter“ den möglichen Einfluss von Mach auf Einstein zu zeigen.

²⁷² Siehe dazu (Wolters, 1987, pp. 148-163).

Im Abschnitt „4.3. 2. Hypothese: Die Vorgeschichte zu Einsteins Kyoto-Rede“ haben wir erklärt, weshalb Einsteins Rede, sich wohl indirekt auf das Vorwort in *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) bezogen hat. An Sommerfeld schrieb er (am 13. Juli 1921) diesbezüglich:

„Es wundert mich, dass Mach nicht für die Relativitätstheorie war. Dieser Gedankengang liegt nämlich ganz in seiner Denkrichtung. Ich bin neugierig, wie er zu seinem ablehnenden Standpunkt kommt.“ (CPAE 12; 175; p. 218)

In Einsteins Kyoto-Rede wird er diesen Standpunkt aufrechterhalten und erneut betonen:

„[40] Ich hegte keinen Zweifel daran, dass sie auch vom philosophischen Standpunkt aus richtig ist. [41] Sie stimmt auch mit der MACHschen Theorie überein.“
(Haubold & Yasui, 1986, p. 275)

Zusammenfassend können wir sagen, dass wir, aufgrund der obigen Punkte, genügend Argumente haben, um unsere zweite Hypothese vertreten zu können:

Im Jahre 1921 erschien das gefälschte Vorwort, welches Mach als einen Relativitätsgegner darstellte und ihn damit nicht als Wegbereiter der Relativitätstheorie ansah. Aufgrund der Korrespondenz (1921) zwischen Einstein und Sommerfeld (bezüglich des gefälschten Vorwortes von Ernst Mach), der zeitlichen Nähe und des Inhalts der Kyoto-Rede ist ersichtlich, dass diese als eine Verteidigungsschrift gegenüber dem gefälschten Vorwort zu lesen ist. Dazu ist es jedoch notwendig sowohl auf den sozial-historischen Kontext der Rede einzugehen, als auch darauf, dass sich der Inhalt der Rede aufgrund der Quellen geschichtlich und wissenschaftlich tatsächlich rekonstruieren lässt.

In „4.4.2.3.1. Die Neudefinition der Zeit: Cohn und Machs möglicher Einfluss“ sind wir dafür auf den Briefwechsel zwischen Einstein und Besso (im Jahre 1947/1948) eingegangen.

Einstein schreibt (am 6. Januar 1948) nämlich:

„Interessant ist übrigens, dass Mach die spez. R. Th. leidenschaftlich ablehnte. (Die allg. R. Th. hat er nicht mehr erlebt.) Die Theorie war ihm unerlaubt spekulativ.“ (Speziali, 1972, p. 391)

Er glaubte wohl bis ans Ende seines Lebens, dass das Vorwort tatsächlich von Ernst Mach stammte. Gereon Wolters gelang es jedoch zu zeigen (Wolters, 1987) (Wolters, 2019), dass das Vorwort eine Fälschung war.

Die „Ernst-Mach-Studienausgabe“ von *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 2020) von Mach²⁷³, herausgegeben von Dieter Hoffmann und Josef Pircher, gewährt nun zusätzlich einen kompakten Einblick dazu. So erklärt Dieter Hoffman in „Einleitung des Herausgebers“:

„Von den drei Studien ist die *Mechanik* wohl das gewichtigste und auch populärste Buch – noch zu Lebzeiten Machs erfuhr es sieben Auflagen und mehrere Übersetzungen. Dagegen blieb die *Optik* nicht nur unvollendet, sondern sie ist, wegen ihres spektakulären Vorworts, umstritten, denn wie der Konstanzer Wissenschaftsphilosoph Gereon Wolters in den 1980er Jahren zeigen konnte, sprechen alle Fakten dafür, dass es nicht von Mach selbst, sondern posthum von seinem Sohn Ludwig verfasst wurde.“ (Mach, 2020, p. XI)

Ebenso erfahren wir von Hoffmann, dass „die Machsche *Optik* stärker noch als die anderen historisch-kritischen Monographien in Machs eigener physikalischer Forschungstätigkeit“ „wurzelt“ (Mach, 2020, p. XII):

„Die Bibliographie seiner Schriften zeigt, dass optische Untersuchungen in seinem Schaffen einen hohen Stellenwert besitzen – angefangen mit Studien zur Fotografie und Stereoskopie sowie seinen optisch-akustischen Versuchen aus den 1860er Jahren über spektroskopische Untersuchungen und Interferenzversuche in den folgenden Jahrzehnten bis zu den späten Beiträgen in den Festschriften von Adolf Lieben (1906) und Wilhelm Jerusalem (1915), die ebenfalls optische Fragen zum Thema haben; nicht zuletzt hatten ja auch seine bahnbrechenden Arbeiten zu den Erscheinungen an fliegenden Projektilen eine erheblich optische Komponente und gleiches trifft auch seine zusammen mit seinem Sohn Ludwig betriebene erfinderische Tätigkeit in Gestalt des Mach-Zehnder-Interferometers zu, das bis in die Gegenwart hinein eine breite Anwendung findet.“ (Mach, 2020, p. XII)

Im Buch *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) spiegelt sich daher auch seine jahrelange Tätigkeit als Physiker und Vortragender auf diesem Gebiet wider – welche Teile nun genau von Ernst Mach persönlich stammen, lässt sich nur an bestimmten Kapiteln sagen – siehe (Mach, 2020, p. XV). Fest steht jedoch, dass das Vorwort nicht von Ernst Mach stammt (Mach, 2020, pp. XVI-XVII).

Dieses Ergebnis, erzielt durch Gereon Wolters, hätte wahrscheinlich sowohl Albert Einstein als auch Ernst Mach sehr erfreut.

²⁷³ Ernst Mach begann im Jahre 1896 *Die Prinzipien der physikalischen Optik* zu schreiben (Mach, 2020, p. XI).

4.4.3. Zusammenfassung der Ergebnisse und die daraus resultierenden Forschungsfragen für die nächsten Abschnitte

4.4.3.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Wir haben im Abschnitt: „1. Forschungsstand“ (Unterabschnitt: „1.1. 100. Geburtstag von Albert Einstein (1979) – bis jetzt“) gesehen, dass Roman U. Sexl auf die Bedeutung von Einsteins Kyoto-Rede hingewiesen hat (Sexl, 1985, pp. 35-36).

Motiviert durch Sexls Arbeit wurde es daher für uns wichtig, uns die Kyoto-Rede und ihre Entstehungsgeschichte genauer anzusehen: Wie kam es zu dieser Kyoto-Rede von Einstein und ist sie, anhand zurzeit zugänglicher Quellen, historisch-kritisch rekonstruierbar?

Infolgedessen haben wir im selben Kapitel („1. Kapitel“; Abschnitt „1.3. Hypothesen zu den Forschungslücken“) unsere Hypothesen zu den Forschungslücken vorgestellt – dabei lautete unsere zweite Forschungshypothese:

Im Jahre 1921 erschien das gefälschte Vorwort, welches Mach als einen Relativitätsgegner darstellte und ihn damit nicht als Wegbereiter der Relativitätstheorie ansah. Aufgrund der Korrespondenz (1921) zwischen Einstein und Sommerfeld (bezüglich des gefälschten Vorwortes von Ernst Mach), der zeitlichen Nähe und des Inhalts der Kyoto-Rede ist ersichtlich, dass diese als eine Verteidigungsschrift gegenüber dem gefälschten Vorwort zu lesen ist. Dazu ist es jedoch notwendig sowohl auf den sozial-historischen Kontext der Rede einzugehen, als auch darauf, dass sich der Inhalt der Rede aufgrund der Quellen geschichtlich und wissenschaftlich tatsächlich rekonstruieren lässt.

Es war daher zuerst wichtig, den sozial-historischen Kontext der Kyoto-Rede von Einstein zu untersuchen. Deshalb haben wir uns zu Beginn die Jahre 1921/1922 genauer angesehen. Im Abschnitt „4.1. Einsteins Japan-Reise und ihre Vorgeschichte“ haben wir darauf hingewiesen, dass 1921/1922 für Einstein allgemein sehr turbulente Jahre waren. Der Antisemitismus hatte sich nämlich zu dieser Zeit in Deutschland verstärkt, worunter Einstein immer mehr zu leiden hatte, davon zeugt, unter anderem, Einsteins Brief an Heinrich Zangger am 18. Juni 1922 (CPAE 13; 241; p. 370) - er wurde aufgrund seiner Popularität eine wichtige Zielscheibe für Antisemiten.²⁷⁴ Um von dieser unguten politischen Atmosphäre zu profitieren, hatte schließlich Ludwig Mach das Buch *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) mit

²⁷⁴ Seine Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie, nämlich dass das Licht (von den Sternen) an großen Massen (in diesem Fall der Sonne) aufgrund der Raumzeitkrümmung abgelenkt wird, konnte vom Astronomen Arthur Stanley Eddington im Jahre 1919 bestätigt werden, wodurch Einstein zu weltweitem Ruhm gelangte.

einem gefälschten Vorwort veröffentlicht (Wolters, 1987). Im Abschnitt „4.3. 2. Hypothese: Die Vorgeschichte zu Einsteins Kyoto-Rede“ sind wir näher darauf eingegangen. Arnold Sommerfeld hat Einstein in einem Brief (am 4. Juli 1921) auf das Vorwort aufmerksam gemacht (CPAE 12; 168; p. 212), worauf Einstein antwortete:

„Es wundert mich, dass Mach nicht für die Relativitätstheorie war. Dieser Gedankengang liegt nämlich ganz in seiner Denkrichtung. Ich bin neugierig, wie er zu seinem ablehnenden Standpunkt kommt.“ (CPAE 12; 175; p. 218)

Doch was er genau mit „Dieser Gedankengang liegt nämlich ganz in seiner Denkrichtung“ meinte, erklärte er erst in seiner Kyoto-Rede.

Am 24. Juni 1922 fiel der deutsche Reichsaußenminister (jüdischer Abstammung), Walther Rathenau, einem Attentat durch Rechtsradikale zum Opfer. Daher kam die Japan-Reise Einstein sehr entgegen, um sich der Gefahr in Deutschland zu entziehen – siehe dazu Einsteins Brief an den deutschen Botschafter in Tokio, Wilhelm Solf, am 20. Dezember 1922 (CPAE 13; 402; p. 643). In Japan bekam er die Möglichkeit, mehrere Vorträge zur Relativitätstheorie zu halten – wohl wegen der entspannten Atmosphäre in der Ferne betonte er nun in seiner Kyoto-Rede E. Machs Rolle für die Relativitätstheorie und wollte somit das Bild wieder geraderücken – darauf sind wir vor allem im Abschnitt „4.4.2.4. Thema IV: Erkenntnistheoretische Ebene der SRT [40]-[44]“, näher eingegangen und die Argumente vorgetragen.

Aus dem 3. Kapitel (Abschnitt: „3.4.1.5. Die aus den Ergebnissen resultierenden Forschungsfragen für die nächsten Abschnitte“) blieben jedoch noch drei Fragen offen – auf zwei davon können wir nun Antworten geben.

4.4.3.1.1. Antwort auf die 4. Frage

Wir haben festgestellt, dass Cohn den Schwerpunkt seiner rationalen Rekonstruktion der Speziellen Relativitätstheorie auf einen (scheinbaren) Widerspruch zwischen zwei experimentellen Ergebnissen legte, nämlich zwischen dem Experiment von Fizeau (1851) und dem Experiment von Michelson (1881) (Cohn, 1920, p. 9), die es aufzulösen galt. Dies führte uns zu unserer Fragestellung:

Hat Einstein jemals direkt ausgesprochen, dass das Lösen dieses Widerspruches bei der Entstehung der SRT eine wesentliche Rolle gespielt hat?

Die Antwort auf diese Frage haben wir versucht, im Abschnitt „4.4.2.2. Thema II: Der Widerspruch [16]-[25]“ zu geben. In seiner Kyoto-Rede hat Einstein erklärt [3]-[15], wie er durch das Ergebnis des Michelson-Morley Experiments zum Relativitätsprinzip kam. Anschließend verweist er auf die Arbeit von Lorentz [16] und bespricht zusätzlich das Experiment von Fizeau [17]. Wegen der Maxwell-Lorentzschen Theorie, so berichtet er weiter, ging er von einer Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für Inertialsysteme aus [18]-[19]. Diese Annahme vertrug sich aber nicht mit der Geschwindigkeitsaddition der Mechanik [20]. Es bestand also tatsächlich ein „Widerspruch“ [21], welcher ihn längere Zeit beschäftigte.

Diese Erzählweise von Einstein deckt sich somit mit Cohns Darstellung: Das Experiment von Michelson und Morley hat gezeigt, dass das Relativitätsprinzip für Inertialsysteme gültig war – das Experiment von Fizeau schien dem jedoch zu widersprechen (Cohn, 1920, p. 9). Die Lösung des Widerspruchs konnte gelingen, indem man die klassische Transformation und die klassische Geschwindigkeitsaddition durch die relativistische Transformation und die relativistische Geschwindigkeitsaddition ersetzte.

Im Anschluss haben wir die Gründe besprochen, aufgrund derer wahrscheinlich in der Forschung lange gezweifelt wurde, ob das Michelson-Morley Experiment für Einstein eine wichtige Rolle gespielt hat:

- 1.) Einstein verweist in „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905) nicht auf andere Arbeiten, wodurch unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten entstanden sind.
- 2.) Experimentelle Resultate, auf die er eher beiläufig hinweist (Einstein, 1905r, p. 891), lassen sich (schwer) konkreten Versuchen zuordnen. Erst später, bei seiner ersten systematischen Erklärung der Speziellen Relativitätstheorie „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) wird er mit seinen Hinweisen aber konkreter und geht auf die wichtige Rolle des Michelson-Experiments ein (CPAE 2; 47; p. 434).

Aufgrund der Arbeit von Wien (Wien, 1898), durch das Buch von Lorentz (Lorentz 1895) und schließlich durch die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien, Cohn und Abraham, und durch die Arbeiten von Eichenwald hatte Einstein mit Sicherheit einen guten Einblick in die damalige experimentelle Situation.

4.4.3.1.2. Antwort auf die 5. Frage

Wir haben uns im dritten Kapitel (Abschnitt: „3.4.1.5.2. 5. Frage:“) die fünfte Frage gestellt:

War die wissenschaftsgeschichtliche Analogie zwischen Licht- und Schallwellen (insbesondere die Arbeiten von Mach) für Einstein bei der Entstehungsgeschichte der SRT wichtig?

Nun werden wir versuchen, eine Antwort darauf zu geben: Im Abschnitt „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“ sind wir darauf eingegangen, dass Einstein unter anderem Machs Werke las, während er über ein Experiment darüber nachdachte, wie man den Äther messen könnte (CPAE 1; 54; p. 230). Aus einem anderen Brief erfahren wir, dass er dabei auch an Interferenzversuche dachte. Da Einstein sich für solche Versuche interessierte, ist es nicht unwahrscheinlich, dass er sich auch Machs Studien zu Akustik und Optik ansah (Mach, 1873a) (Mach, 1873b) (Mach, 1891) (Mach, 1904). Allgemein könnte das Dopplersche Prinzip bei der Entstehungsgeschichte eine wesentliche Rolle gespielt haben, da Einstein darauf im Abschnitt „§ 7. Theorie des Doppellerschen Prinzips und der Aberration“ (Einstein, 1905r, pp. 910-912) eingeht. Von einer Arbeit von Dieter B. Hermann, der sich mit der Entstehungsgeschichte des Dopplerschen Prinzip auseinandersetzte, bekamen wir womöglich einen indirekten Hinweis darauf, dass Mach, aufgrund seiner Arbeiten zum Dopplerschen Prinzip, für Einstein von Bedeutung gewesen sein könnte (Herrmann 2004, p. 50). Auch Susan G. Sterrett hat in ihrem Artikel „Sounds Like Light: Einstein’s Special Theory of Relativity and Mach’s Work in Acoustics and Aerodynamics“ (Sterrett, 1998) versucht zu zeigen, dass Einstein von den Arbeiten Machs zu Akustik und Optik womöglich profitiert hat.

Anhand unserer Analyse konnten wir darauf schließen, dass Einstein in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) womöglich folgenderweise voranschritt: Um den Doppler-Effekt und die Aberration zu verstehen (§ 7), musste er die Transformation der Maxwellgleichungen verstehen (§ 6) und dafür wiederum sollte er die Raum- und

Zeittransformationen herausfinden (§ 3) – dafür war wiederum das Verständnis Relativität der Gleichzeitigkeit wichtig (§ 1) – siehe dazu (Einstein, 1905r, pp. 892, 911).

Einstein hat die Interpretation der „Ortszeit“ von Lorentz erst auf die richtige Spur gebracht – dabei hat er wohl vor allem von Cohns und Machs Arbeiten profitiert. (Das haben wir im Abschnitt „4.4.2.3.1 Die Neudefinition der Zeit: Cohns und Machs möglicher Einfluss“ genauer besprochen.)

Weiters ist auch zentral, dass Einstein sich intensiv mit der Aberration des Lichtes auseinandersetzte (CPAE 2; 47; p. 448-449). Das Dopplersche Prinzip geht jedoch der Aberration voraus, wie auch aus Einsteins Arbeit (Einstein, 1905r, p. § 7) deutlich erkennbar.

Schließlich spricht auch einiges dafür, dass Voigts Arbeit „Ueber das Doppler'sche Princip“ (Voigt, 1887) für ihn wichtig gewesen sein dürfte. Einstein kannte die Arbeit von Lorentz zu Transformationen nicht, die erst 1904 erschien (Schröder, 1988, pp. 157-158). Zudem hatte Voigt mehrere Arbeiten geschrieben, die für Einstein vor der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie interessant gewesen wären (Schröder, 1988, p. 169). Es ist daher möglich, dass er das ursprüngliche Konzept der Transformation von Voigt übernommen und weiterentwickelt hat. Dass in Voigts Arbeit wichtige Konzepte zu finden sind, die eine Vorstufe der Speziellen Relativitätstheorie darstellen, wurde bereits von einigen Wissenschaftlern erkannt und analysiert – siehe (Ernst & Hsu, 2001), (Heras, 2017). Wir haben zudem ein weiteres Argument dafür dargelegt, dass Einstein Machs und Voigts Werke zum Doppler'schen Prinzip hätte kennen müssen: Im Jahre 1903 erscheint Einsteins Arbeit „Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik“ (Einstein, 1903) in den *Annalen der Physik* (der ganzen Reihe 316. Band) – im selben Band (und in derselben Folge 5)²⁷⁵ finden wir ebenso die Schrift „Über ein Integral der Gleichungen für die Wellenbewegung, welches dem Dopplerschen Prinzip entspricht“ (Kohl, 1903a) vom österreichischen Physiker Emil Kohl, wo er gleich zu Beginn auf die Arbeiten von Mach und Voigt hinweist (Kohl, 1903a, pp. 96, fn. 1). Diese Arbeit (Kohl, 1903a) bietet einen guten Überblick über den Doppler-Effekt

²⁷⁵ In diesem Band ist ebenso die Arbeit „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1903a) von Alexander Eichenwald zu finden, worauf wir im Abschnitt „2.1.2.2.3. Der Diskurs und seine experimentelle Ebene: Magnet und Leiter“ bzw. „2.1.2.2.3.1. Ad 1.:“ näher eingegangen sind.

bei Relativbewegungen; wobei auch die Aberration besprochen wird (Kohl, 1903a, pp. 102-103). Zudem verwendet er, ähnlich wie Mach, sowohl das Teilchenmodell (Kohl, 1903a, pp. 103, 106, 112-113) als auch das Wellenmodell (Kohl, 1903a, pp. 97-100, 102-104, 110, 112) und Begriffe, wie „Medium“ oder „Äther“, kommen nicht vor.²⁷⁶ Diese Arbeit könnte Einstein bei seinen Recherchen zur Elektrodynamik bewegter Körper gedient haben. Wir können daher davon ausgehen, dass Einstein Kohls Arbeit (Kohl, 1903a) kannte und somit auch die Arbeiten von Mach und Voigt zum Doppler-Effekt.

Ein weiterer Anhaltspunkt zur Beantwortung unserer 5. Frage ist, dass wir bereits im zweiten Kapitel (Abschnitt „2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien:

Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“) darauf hingewiesen haben, dass das Dopplersche Prinzip gerade in der Diskussion zwischen Wien und Abraham eine wichtige Rolle gespielt hat. Darauf sind wir im Abschnitt „4.4.2.3.3. Der Doppler-Effekt als Lösung für die Diskussion zwischen Wien und Abraham“ näher eingegangen. Ein wichtiger Punkt in der Auseinandersetzung zwischen den beiden war die Frage, ob man die Lichtgeschwindigkeit physikalisch als eine Grenzgeschwindigkeit betrachten sollte. Dass der theoretischen Untersuchung des Lichts und dessen Eigenschaft in der (relativen) Ausbreitung in der Speziellen Relativitätstheorie eine zentrale Rolle zukam, wird dadurch verständlich. Damit Einstein die Elektrodynamik mit der Mechanik vereinen konnte, musste er die Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum) als eine obere Grenzgeschwindigkeit darstellen, worauf Einstein im Paragraphen zum Dopplerschen Prinzip und zur Aberration eingeht (Einstein, 1905r, pp. 911-912).

Anschließend haben wir auch Einsteins berühmtes Gedankenexperiment (Einstein, 1986, p. 10) (Norton, 2013, p. 213) (Wertheimer, 2019, p. 231) besprochen, wo er in Gedanken versuchte dem Licht nachzujagen (Abschnitt: „4.4.2.3.4. Der Doppler Effekt als Erklärung für Einsteins Gedankenexperiment ‚Chasing the light‘“). In diesem Gedankenexperiment bespricht Einstein, was passieren würde, wenn man einen Lichtstrahl mit immer höher werdender Geschwindigkeit verfolgen würde. Dabei ist er auf ein Paradoxon gestoßen, nämlich, dass, wenn man ein Lichtstrahl mit der Geschwindigkeit c (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum) hinterherjagt, man den Lichtstrahl bzw. das elektromagnetische Feld in Ruhe

²⁷⁶ Siehe dazu den Abschnitt „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“.

beobachten können müsste – sozusagen ein erstarrtes bzw. eingefrorenes elektromagnetisches Feld wahrnehmen müsste. Da aber das Relativitätsprinzip für jede beliebige Geschwindigkeit gelten sollte, müsste erklärt werden, weshalb gerade der Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum) eine Sonderrolle zukommt.

Eine einfache Erklärung dafür bietet der relativistische Doppler-Effekt:

Nehmen wir an, ein Beobachter (A) (= Sender) sendet einen blauen Lichtstrahl und ein Beobachter (B) (= Empfänger) bewegt sich relativ vom Beobachter (A) weg. Der (relativistische) Doppler-Effekt besagt, dass es dabei zu einer Rotverschiebung kommen würde. Bei höher Geschwindigkeit wandert das Licht anschließend in den nicht sichtbaren Bereich (Infrarot usw.). Anhand des Doppler-Effekts ist somit die relative Geschwindigkeit des Beobachters (B) zum Beobachter (A) physikalisch beschreibbar. In der hypothetischen Annahme, dass Beobachter (B) mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum unterwegs sei, würde ihn nun gar kein Licht mehr vom Beobachter (A) erreichen. Die Spezielle Relativitätstheorie erlaubt jedoch für einen Beobachter mit Masse nicht sich mit Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum) fortzubewegen, wie Einstein selbst in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905) erklärt²⁷⁷ – wenn also der Doppler-Effekt seinen physikalischen Sinn beibehalten soll, muss man die Lichtgeschwindigkeit als eine Grenzggeschwindigkeit postulieren und die Geschwindigkeitsaddition der Mechanik in Frage stellen.

Ein Beobachter (B) ohne Masse wäre in diesem Zusammenhang ein Inertialsystem – und für ein Inertialsystem, welches sich mit der Lichtgeschwindigkeit bewegt, würde nach der relativistischen Transformationsgleichung die Zeit stehen bleiben:

Für den Fall $v = c$ gilt

$$t_B = \sqrt{1 - \frac{c^2}{c^2}} \cdot t_A = \sqrt{1 - 1} \cdot t_A = 0 \cdot t_A$$

Daraus lässt sich schließen, dass der relativistische Doppler-Effekt als ein raumzeitliches Phänomen zu betrachten ist.

²⁷⁷ Siehe Abschnitt „4.4.2.3.3. Der Doppler-Effekt als Lösung für die Diskussion zwischen Wien und Abraham“.

Wir hoffen, dadurch gezeigt zu haben, dass das Gedankenexperiment gerade im Zusammenhang mit dem Doppler-Prinzip verständlich wird.²⁷⁸ Durch das Hinterfragen und theoretische Ausschließen des Äthers konnte man sich von physikalischen Konzepten, wie der absoluten Ruhe oder der absoluten Bewegung, verabschieden. Nur relative Bewegungen zueinander bekamen eine physikalische Bedeutung. Jedoch war es notwendig, um die Mechanik mit der Elektrodynamik zu vereinen, von einer konstanten Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum) auszugehen.

Diese fundamentalen Unterschiede zwischen der klassischen Physik²⁷⁹ und der Speziellen Relativitätstheorie spiegeln sich gerade beim Vergleich des klassischen und des relativistischen Doppler-Effekts wider. Es liegt daher nah, dass für Einstein gerade die physikalische Auseinandersetzung mit dem Dopplerschen Prinzip bei der Ausarbeitung der Speziellen Relativitätstheorie eine wesentliche Rolle gespielt haben könnte.

Zum Schluss haben wir (Abschnitt: „4.4.2.3.5. Wieso wurde die bedeutende Rolle des Dopplerschen Prinzips übersehen?“) Argumente aufgezählt, aus welchen Gründen die wichtige Rolle des Dopplerschen Prinzips bei der Entstehungsgeschichte wohl größtenteils übersehen wurde:

(I) Einerseits hat man sowohl die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie als auch die des Dopplerschen Prinzips nicht genau genug untersucht, um Zusammenhänge erkennen zu können. (Siehe die Abschnitte „4.4.2.3.5.1. 1. Grund: Die Geschichte des Dopplerschen Prinzips und der SRT wurden zu wenig erforscht, um Zusammenhänge erkennen zu können“ und „4.4.2.3.5.4. 4. Grund: Die Emissionstheorie von Walter Ritz“)

(II) Ein anderer Punkt ist der Aufbau von Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r): Das zweite Kapitel „II. Elektrodynamischer Teil“ (Einstein, 1905r, pp. 907-921) beginnt erst ab ca. der Hälfte der Arbeit – und in diesem Abschnitt ist eben auch „§ 7. Theorie des *Dopplerschen* Prinzips und der Aberration“ (Einstein, 1905r, pp. 910-912) zu finden. Das Dopplersche Prinzip wurde dadurch etwas in den Hintergrund verdrängt. Besser

²⁷⁸ Der Zusammenhang zwischen dem Doppler-Effekt und Einsteins Gedanken-Experiment wurde offensichtlich von verschiedenen Einsteinforschern nicht gesehen – siehe dazu (Norton, 2013, pp. 126-130 ("3. Commentaries"))).

²⁷⁹ Gemeint ist die klassische Mechanik und die auf das Konzept des Äthers zurückgreifende Elektrodynamik.

wäre es wohl gewesen, wenn das Dopplersche Prinzip gleich im ersten Kapitel „I. Kinematischer Teil“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907) aufgenommen worden wäre, um die Zusammenhänge besser zu verstehen. Auf die Arbeiten von Max von Laue stützend gab Einstein später jedoch dem Dopplerschen Prinzip und der Aberration ihren wichtigen Platz wieder zurück: In seiner Schrift „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j), welche seine erste detaillierte Zusammenfassung der SRT darstellt und auch einen Einblick in die Entstehungsgeschichte gewährt, werden der Doppler-Effekt und die Aberration nicht mehr im Gebiet der Elektrodynamik behandelt, sondern im kinematischen Teil (Cassini & Levinas, 2019, p. 63) (CPAE 2; 47; p. 435-436). (Siehe Abschnitt „4.4.2.3.5. 2. Grund: Der Aufbau der ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘ (1905)“).

(III) Wir sind auf Einsteins Gedankenexperiment mit Magnet und Leiter eingegangen (Abschnitt: „4.4.2.3.5.3. 3. Grund: Einsteins Gedankenexperiment: Magnet und Leiter“), das gleich am Anfang seiner Arbeit zu finden ist (Einstein, 1905r, p. 891) und haben argumentiert, dass Einstein womöglich Föppls Arbeit „Über absolute und relative Bewegung“ (Föppl, 1904b) gelesen hat – und in Folge Poincares (Poincare, 1904) und Machs Werke wieder reflektierte. In diesem Zusammenhang könnte nun sich Einstein auch wieder eingehender mit *Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität* (Föppl, 1894) von Föppl auseinandergesetzt haben. Im fünften Abschnitt „Die Elektrodynamik bewegter Leiter“ (Föppl, 1894, pp. 307-355) dieses Buches diskutiert der Autor gleich zu Beginn „§ 114. Relative und absolute Bewegung im Raume“ (Föppl, 1894, pp. 307-311) und erklärt seine Gedanken zur Relativbewegung zwischen Magnet und Leiter. Die Parallelen zwischen diesen Titeln „Über absolute und relative Bewegung“ (Föppl, 1904b) und „§ 114. Relative und absolute Bewegung im Raume“ (Föppl, 1894, pp. 307-311) sind offensichtlich. Föppl tendierte in „§ 114. Relative und absolute Bewegung im Raume“ (Föppl, 1894, pp. 307-311) jedoch zu einem mit Äther ausgefülltem absoluten Raum (Föppl, 1894, pp. 307-308), womit er die „absolute Bewegung“ (Föppl, 1894, p. 308) begründete. Allgemein vertrat er damals mehr die Ansichten von C. Neumann als die von Mach – siehe dazu (Föppl, 1894, p. 309) (Mach, 2012, pp. 267, 306, 309-310). Es lässt sich daher zeigen, dass Föppl früher am absoluten Raum noch festhielt (Föppl, 1894); später sich aber von Machs Überlegungen leiten ließ, den absoluten Raum aufgab und das Relativitätsprinzip unterstützte (Föppl,

1904b, p. 383).²⁸⁰ Es ist gut möglich, dass Einstein sich von diesem Wandel (1904/1905) hat mitreißen lassen. Wir haben nämlich im Abschnitt „2.1.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“ bereits besprochen, dass Einstein von der Diskussion im Jahre 1904 zwischen Wilhelm Wien und Max Abraham stark profitiert hat. Das Buch *Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität* (Föppl, 1894) von Föppl wurde im Jahre 1904 in überarbeiteter Form in zweiter Auflage von Max Abraham herausgeben – siehe Max Abrahams Vorwort zur zweiten Auflage (Föppl, 1904, pp. XII-XIV). In dieser Auflage betont Abraham zu Beginn, dass die Relativbewegung bzw. das Relativitätsprinzip sowohl für die Mechanik als auch für die Elektrodynamik gilt – siehe den letzten Abschnitt des Buches „§ 91. Relative und absolute Bewegung“ (Föppl, 1904, p. 431). Wenn Einstein in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) auf die Gültigkeit des Relativitätsprinzips anhand der Relativbewegung zwischen Magnet und Leiter hinweist (Einstein, 1905r, p. 891), dann dürfte er dazu durch Föppls Äußerungen (Föppl, 1894, pp. 307-308) und Abrahams überarbeitete Diskussion (Föppl, 1904, p. 431) motiviert worden sein.

Folgt man dieser Argumentation war das Gedankenexperiment Magnet und Leiter für Einstein womöglich erst gegen Ende seiner Studien von Bedeutung.

²⁸⁰ Es wäre wünschenswert, wenn zukünftige Arbeiten diesen Wechsel von Föppl genauer erläutern könnten.

4.4.3.2. *Die aus den Ergebnissen resultierenden Forschungsfragen für die nächsten Abschnitte*

4.4.3.2.1. 7. Frage: Machs Einfluss auf die Allgemeine Relativitätstheorie

Wie wir gesehen haben, beendet Einstein den Teil (I) seiner Rede, wo es um die Spezielle Relativitätstheorie geht, mit den Worten:

„[39] Fünf Wochen nach diesem Einfall stand die heutige Spezielle Relativitätstheorie fest. [40] Ich hegte keinen Zweifel daran, dass sie auch vom philosophischen Standpunkt aus richtig ist. [41] Sie stimmt auch mit der MACHschen Theorie überein. [42] Solche Probleme jedoch, die später durch die Allgemeine Relativitätstheorie gelöst wurden, standen nicht direkt mit MACHS Lehre im Zusammenhang. [43] Er hatte aber viele wissenschaftliche Begriffe analysiert und verdeutlicht, unter denen es einige gab, welche man als indirekt mit der Relativitätstheorie zusammenhängend betrachten dürfte.“

(Haubold & Yasui, 1986, p. 275)

Wie man den Satz [42] interpretieren sollte, gerade im Zusammenhang mit dem vorherigen Satz [41], ist schwer zu sagen. Deutlich verständlicher ist jedoch [43]: Mach hat „viele wissenschaftliche Begriffe analysiert und verdeutlicht, unter denen es einige gab, welche man als indirekt mit der Relativitätstheorie zusammenhängend betrachten dürfte.“ (Haubold & Yasui, 1986, p. 275)

Aufgrund der Zeile [43] ist unmissverständlich klar, dass nach Einsteins Ansicht Mach einige physikalische Begriffe analysiert hat, die man (zumindest) indirekt mit der Allgemeinen Relativitätstheorie in Verbindung bringen kann. Insofern stellt sich die Frage:

Welchen Einfluss hatte Mach auf Einstein in Bezug auf die Allgemeine Relativitätstheorie?

Um dies beantworten zu können, müssen wir auch den zweiten Teil von Einsteins Kyoto-Rede analysieren.

4.4.3.2.2. 8. Frage

Wir haben im Kapitel 3 in der „6. Frage“ darauf hingewiesen, dass Cohn ein Gedankenexperiment erläutert:

„[...] er spürt die Bewegung im Karussell, er spürt das Anfahren und das Anhalten des Fahrstuhls, aber er bemerkt nichts von der gleichförmigen Bewegung des Fahrstuhls.“

(Cohn, 1920, p. 6)

Dieses Gedankenexperiment über die Wahrnehmung in einem Fahrstuhl ist überaus interessant, weil sich ein ähnliches Gedankenexperiment sowohl bei E. Mach als auch bei Einstein finden lässt – unsere Frage lautete daher:

Wurde Einstein zu seinem berühmten Gedankenexperiment von Cohn oder von Mach inspiriert?

Die Antwort auf diese Frage blieb bis jetzt offen. Da Einstein das Gedankenexperiment mit dem Fahrstuhl im Zusammenhang mit der Allgemeinen Relativitätstheorie verwendet, könnte uns vielleicht auch hier die Rekonstruktion und die Analyse vom zweiten Teil der Kyoto-Rede weiterhelfen.

4.4.4. Die Analyse von Einsteins Rede: Teil II

Dass Ernst Machs Konzepte einen starken Einfluss auf die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie hatten, ist allgemein bekannt.²⁸¹ Sogar in seinem letzten Vortrag in Princeton (am 14. April 1954) sagte Einstein:

„Change coordinate system? Then change acceleration. Then I came to a real understanding of the equivalence of gravitational and inertial mass. No inertial system can be preferred. That was not so clear to me at that time. But Mach had the same idea, not the relation of gravitational and inertial mass, but that ‘inertial system’ was a very vicious concept. Inertia come from the presence of other bodies? How possible? Relative acceleration and against this a resistance. Quite a nice idea. But if you give up space, you have an enormous number of distances, and unhandy consistency relations. Mach not aware of time concept. Great thing that Mach, centuries after Newton, felt that there was something important about this concept of avoiding an inertial system. Need absolute covariance.“ (Einstein, 1979, p. 209)²⁸²

Unter anderem war offensichtlich die Kritik von Mach am Trägheitssystem, welches nach der klassischen Physik am absoluten Raum definiert war, für Einstein wichtig. Dass eine relationale bzw. relative Definition des Trägheitssystems (zu einer dynamischen Raum-Zeit) erforderlich war, wurde dadurch sichtbar. Diesen Ansatz bezeichnete Einstein selbst als das Machsche Prinzip und führte es in die theoretische Physik ein. Im Anschluss an einen Vortrag wurde er deshalb auch (von Callaway: „What do you think of Mach’s principle?“ (Einstein, 1979, p. 210)) darauf angesprochen:

„Mach assumes matter may be permanent. Therefore, why separate the rest of the field from the gravitational field? We have a satisfactory description in conformity with Mach’s principle if we have a theory without boundary conditions. I once thought to take the universe roughly static and closed in space. Then came the cosmological λ . But it was a sin against mathematical simplicity. If the world is expanding, it is hopeless. Time is essential. A boundary is unthinkable. Your question is related to the role of matter.“

(Einstein, 1979, pp. 210-211)

Um das Machsche Prinzip zu erfüllen, so Einstein, war die kosmologische Annahme notwendig, dass das Universum unter anderem geschlossen sei. Ob aber Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie tatsächlich im Sinne Machs zu verstehen ist, bleibt diskutabel

²⁸¹ Einen Vortrag zu diesem Thema, wo ich besonders auf die Astronomiegeschichte eingegangen bin, habe ich 2018 auf der Kuffner-Sternwarte gehalten – der Artikel „The First and Second Mach Principle – How Einstein Created the Theory of General Relativity“ (Simsek, 2020) dazu wurde bereits veröffentlicht.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Günter Wuchterl, Thomas Posch und Gudrun Wolfschmidt für Ihre Unterstützung bedanken.

²⁸² Der Inhalt von Einsteins letztem Vortrag sind durch die Notizen von John Archibald Wheeler erhalten geblieben (Einstein, 1979, p. 207).

und auch Einsteins (spätere) Sichtweise dazu war nicht eindeutig²⁸³; oder wie Carl-Friedrich von Weizsäcker es auf den Punkt bringt:

„Einstein formulated the problem of the theory of space and matter as the problem of a uniform field theory. He criticized Newton for viewing space as a ‘tenement building’ in which bodies move in and out like tenants. Mach wanted to accept the concept of matter as an economical description of sensations, and reject the concept of space as a metaphysical invention. Einstein, who began under Mach’s influence, was led to the opposite solution of the dualism of space and matter.“ (Weizsäcker, 1979, p. 164)

Dieser Dualismus zwischen der Raum-Zeit und der Materie ist in Einsteins Feldtheorie als Lösung gegeben. Es ist daher zum Teil (zurzeit) eine Geschmackssache, ob man „das Machsche Prinzip als erkenntnistheoretisch begründetes Auswahlkriterium“ (Carrier, 2009, p. 204) annehmen möchte oder nicht. Das ist und bleibt daher eine physikalische Diskussion. Jedoch ist wissenschaftstheoretisch und -geschichtlich allgemein die Frage zu stellen, ob Machs Einfluss auf die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie lediglich nur auf das Machsche Prinzip zu beschränken ist. Um einen Beitrag zu dieser Fragestellung leisten zu können, ist es notwendig, ebenso den zweiten Teil von Einsteins Kyoto-Rede zu rekonstruieren, da er darin Mach mehrmals erwähnt²⁸⁴...sehen wir sie uns daher etwas genauer an.

Im zweiten Teil seiner Rede erläutert Einstein, wie er zur Allgemeinen Relativitätstheorie kam [45]-[89] – auch dieser lässt sich in unterschiedliche Themen unterteilen:

- Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]
- Thema II: Das Äquivalenzprinzip [49]-[65]
- Thema III: Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]
- Thema IV: Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]

²⁸³ Beispielsweise dürfte Einstein am 16. Mai 1953 gemeint haben, dass er nicht mehr vom Machschen Prinzip überzeugt war (Aichelburg & Sexl, 1979, p. 204).

²⁸⁴ Einstein erwähnt im zweiten Teil seiner Rede Mach mehrmals (CPAE 13; 399; p. 638-639) – interessant ist, dass in *The Collected Papers of Albert Einstein* gar keine Kommentare dazu gibt. Wir können somit einen Beitrag zum Forschungsstand leisten.

Das letzte Thema betrifft, wie der erste Teil seiner Rede, die erkenntnistheoretische Ebene, wo er offen ausspricht, dass er die Konzepte von Mach, so wie er sie verstand, in einer relativistischen Kosmologie umzusetzen versuchte.

Es bleibt nun offen, ob auch die anderen Themen in einen Zusammenhang mit Machs Ideen stehen. Was uns zu unserer letzten Forschungsfrage führt...

4.4.4.1. 9. Frage

Gereon Wolters legt (zumindest indirekt)²⁸⁵ in seinem Buch (Wolters, 1987) die Ansicht nahe, dass die Allgemeinen Relativitätstheorie vom (intuitiv) Machschen Forschungsprogramm wichtige konzeptionelle Impulse erhalten hat. In der Ernst-Mach-Studienausgabe der *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt* (Mach, 2012) fassen Wolters und Giora Hon als Herausgeber in der Einleitung das Machsche Forschungsprogramm nochmal zusammen:

„Was konnte Einstein aus der von ihm genau studierten Machschen *Mechanik* lernen? Fasst man Einsteins expliziten Äußerungen zu Mach zusammen, dann sind es vor allem drei wichtige konzeptionelle Dinge: (1) Machs empiristisch-aufklärerisch motivierte Kritik am mechanistischen Weltbild; (2) Machs Kritik an den Newtonschen Absolutbegriffen von Raum und Zeit; (3) Machs Trägheitsprinzip, das – noch auf dem Boden der klassischen Mechanik – die Trägheit der Körper als Beziehung zu den großen, fernen Massen versteht. Im Zusammenhang damit prägte Einstein in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie den Ausdruck ‚Machsches Prinzip‘.

Eine genauere Lektüre der Mechanik lässt sogar etwas wie ein Forschungsprogramm ‚Allgemeine Relativität‘ erkennen. Dessen Komponenten sind: (a) Relativität der Trägheit, (b) allgemeine Kovarianz, (c) Äquivalenz von träger und schwerer Masse, (d) Nahwirkungscharakter physikalischer Wirkungen.

Freilich, auch Einstein fand an Mach etwas zu tadeln. Machs strikte, sensualistische Variante des Empirismus, welcher er selbst noch in seiner Jugendzeit angehangen hatte, konnte ihn auf Dauer nicht befriedigen. Der Grund dafür war, dass sie Mach zur Ablehnung

²⁸⁵ An dieser Stelle sei angemerkt, dass Wolters in seinem Werk vor allem zeigen wollte, dass Mach die Relativitätstheorie nicht abgelehnt hat:

„Dabei geht es nicht in erster Linie darum zu zeigen, daß Einstein von Mach vorgegebene Themata aufgegriffen hat. *Daß* er dies getan hat, ist wegen seiner zahlreichen einschlägigen Äußerungen in der heutigen wissenschaftshistorischen Literatur unbestritten. *Welche* Themata Einstein aufgenommen hat und *wie* er sie aufgenommen hat, ist schon viel wichtiger. Erstens herrscht hierüber kein vollständiger Konsens. Zweitens, und am wichtigsten: Dieses Buch will ja zeigen, daß Mach entgegen landläufiger Meinung die Relativitätstheorie *nicht* abgelehnt hat, sondern ihr *freundlich-abwartend* gegenüberstand. Indem ich nachweise, wie Einstein Themata aufnimmt und fortführt, die Mach selbst im Zentrum seines Denkens gesehen hat, möchte ich dafür argumentieren, daß Mach *nicht den geringsten Grund* hatte, die Relativitätstheorie abzulehnen.“ (Wolters, 1987, p. 14)

Wir werden in unserer Arbeit besprechen, wo sich anhand der Quellen der Einfluss von Mach auf Einstein belegen und wo sich ein solcher vermuten lässt (aber ein direkter Nachweis noch nicht gegeben ist). Mehrere wissenschaftliche Arbeiten, die detailliert auf unterschiedlichen Ebenen untersuchen, wie Mach die damalige geistige Atmosphäre direkt und indirekt beeinflusst hat, wären in Zukunft sicher wünschenswert.

der Existenz von Atomen geführt hatte und dazu, auch die Atomhypothese (ohne Existenzannahme) mit großer Vorsicht zu behandeln – immer in dem aufklärerischen Bestreben, dass nichts als existierend angenommen werden dürfe, was sich der Beobachtung entziehe. Es hat jedoch den Anschein, dass Mach gegen Ende seines Lebens diesen Mangel erkannt hat.“ (Wolters & Hon, 2012, pp. XX-XXI)

Unsere Forschungsfrage lautet daher:

Zeigt die historisch-kritische Rekonstruktion des zweiten Teils der Kyoto-Rede, dass die Konzepte

- Relativität der Trägheit,
- allgemeine Kovarianz,
- Äquivalenz von träger und schwerer Masse
- und der Nahwirkungscharakter physikalischer Wirkungen

bei der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie eine Rolle gespielt haben?

4.4.5. Teil II der Kyoto-Rede: Allgemeine Relativitätstheorie [45]-[89]

In einem Brief (1905) an Harald Höffling schreibt Mach:

„Mein Ziel und mein Beruf ist nämlich gar nicht, philosophische Probleme zu lösen, sondern nur die naturwissenschaftliche Methodik von alten im Wege liegenden Pseudoproblemen zu befreien. Was ich zu geben versucht habe ist nicht ein *Abschluss*, sondern ein Anfang.“

(Blackmore & Hentschel, 1985, p. 44)

Er hoffte offensichtlich, dass seine Kritik für die nächsten Generationen fruchtbar sein werden. Ob sie das nun waren oder nicht, kann nur der beantworten, der auf dem Felde der Physik einen wichtigen Beitrag leistete und Machs Beiträge dazu würdigte. Genau so eine Rolle nimmt Einstein ein, wenn er in seinem Nachruf „Ernst Mach“ schreibt:

„Die zitierten Zeilen zeigen, daß Mach die schwachen Seiten der klassischen Mechanik klar erkannt hat und nicht weit davon entfernt war, eine allgemeine Relativitätstheorie zu fordern, und dies schon vor fast einem halben Jahrhundert!“

(Einstein, 1916c, p. 103)(CPAE 6; 29; p. 280)

Umso wichtiger ist es, uns den zweiten Teil seiner Rede genauer anzusehen.

4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]

Einstein erklärt, dass er im Jahre 1907 auf den Denkansatz kam [45], welche in weiterer Entwicklung zur Allgemeinen Relativitätstheorie wurde. Und zwar störte es Einstein, dass das Konzept der Relativität die beschleunigten Bezugssysteme nicht einbeziehen konnte. Die Spezielle Relativitätstheorie galt nur für Inertialsysteme – mit dieser theoretischen Einschränkung war er nicht zufrieden [47] und dachte ständig daran, wie sie aufgehoben werden könne [48]. Einige Sätze weiter sagt er: „[66] MACH war derjenige, der behauptete, daß alle Systeme, die Beschleunigung aufweisen, einander gleichwertig seien.“ (Haubold & Yasui, 1986, p. 276) Diese Äußerung Einsteins deckt sich auch mit anderen Zeilen aus seinen Artikeln. Beispielsweise schreibt er in „Zum Relativitäts-Problem“:

„Die klassische Mechanik sowohl wie die vorhin kurz besprochene [Spezielle, Anmerkung von E.S.] Relativitätstheorie im engeren Sinne leiden an einem fundamentalen Mangel, den kein Mensch leugnen kann, der erkenntnistheoretischen Argumenten zugänglich ist. Die zu besprechenden Schwächen unseres physikalischen Weltbildes hat E. Mach in seinen tief eindringenden Untersuchungen über die Grundlagen der Newton'schen Mechanik bereits mit aller Klarheit aufgedeckt, sodass das, was ich in dieser Hinsicht hier vorbringe, auf Neuheit keinen Anspruch machen kann.“ (Einstein, 1914h, p. 344)

Auf den „fundamentalen Mangel“ hat also offensichtlich Mach hingewiesen und dadurch Einstein den Weg geebnet – worauf er auch in „Autobiographisches“ (Einstein, 1983, pp. 10, 24-26) eingeht. Es geht darum, dass in der klassischen Physik beschleunigte Bewegungen (gegenüber dem absoluten, ruhenden Raum) ausgezeichnet sind. Einstein erklärt das in einem Beispiel:

„Ich will den wesentlichen Punkt der Sache an einem Beispiel erläutern, das recht elementar gewählt ist, um das Wesentliche hervortreten zu lassen.

Im Weltraum schweben in grosser Entfernung von allen Himmelskörpern zwei Massen. Dieselben seien einander nahe genug, um Wirkungen aufeinander ausüben zu können. Ein Beobachter verfolge nun die Bewegung beider Körper, indem er stets in Richtung der Verbindungslinie beider Massen nach dem Fixsterngewölbe visiert. Er wird wahrnehmen, dass die Visierlinie am sichtbaren Fixsterngewölbe eine geschlossene Linie herauschneidet, welche ihren Ort in bezug auf das sichtbare Fixsterngewölbe nicht verändert. Wenn der Beobachter natürlichen Verstand besitzt, aber weder Geometrie noch Mechanik gelernt hat, so wird er so schliessen: « Meine Massen führen eine Bewegung aus, welche wenigstens zum Teil vom Fixsternsystem kausal bestimmt wird. Die Gesetze, nach denen sich Massen in meiner Umgebung bewegen, werden mitbestimmt durch die Fixsterne ». Ein Mann, der durch die Schule der Wissenschaft gegangen ist, wird über die Einfalt unseres Beobachters lächeln und ihm sagen: « Die Bewegung Deiner Massen hat mit dem Fixstern-Himmel nichts zu schaffen; sie wird vielmehr ganz unabhängig von den übrigen Massen durch die Gesetze der Mechanik bestimmt. Es gibt einen Raum R , in dem diese Gesetze gelten. Diese Gesetze sind so, dass Deine Massen fortgesetzt in einer Ebene dieses Raumes bleiben. Das Fixstern-System aber kann in diesem Raum nicht rotieren, weil es sonst durch gewaltige Zentrifugalkräfte zerrissen würde. Es ruht also notwendigerweise (wenigstens beinahe !), wenn es überhaupt dauernd soll existieren können; daher kommt es, dass die Ebene in der sich Deine Masse bewegen, immer durch dieselben Fixsterne hindurchgeht ». – Unser furchtloser Beobachter wird aber sagen: « Du magst ja unvergleichlich gelehrt sein. Aber ebensowenig, als ich je dazu zu bringen war, an Gespenster zu glauben, glaube ich an das riesige Ding, von dem Du mir sprichst, und das Du Raum nennst. Ich kann weder so etwas sehen, noch mir etwas darunter denken. Oder soll ich mir Deinen Raum R als sehr subtiles Körpernetz denken, auf das sich die übrigen Dinge beziehen? Dann kann ich mir ausser R noch ein zweites solches Netz R' denken, das relativ zu R beliebig bewegt ist (z. B. rotiert). Gelten Deine Gleichungen dann auch zugleich relativ zu R' ? » Der gelehrte Mann verneint dies mit Sicherheit. Hierauf der Einfältige: « Woher wissen denn aber die Massen, bezüglich welches der « Räume » R , R' etc. sie sich Deinen Gesetzen gemäss bewegen sollen, woran erkennen sie den Raum bzw. die Räume, nach dem sie sich zu richten haben? » Nun ist unser gelehrter Mann in grösster Verlegenheit. Er betont zwar, dass es derartige privilegierte Räume geben müsse, aber er weiss keinen Grund dafür anzugeben, warum jene Räume vor anderen ausgezeichnet sein könnten. Hierauf der Einfältige: « Dann halte ich bis auf Weiteres Deine bevorzugten Räume für müssige Erfindung und bleibe bei meiner Auffassung, dass das Fixsterngewölbe das mechanische Verhalten meiner Versuchsmassen mitbestimmt ».

Ich will den Verstoss gegen die elementarsten Postulate der Erkenntnistheorie, deren sich unsere Physik schuldig macht, noch auf eine zweite Weise darlegen. Man wird sich vergeblich bemühen, darzulegen, was man unter Beschleunigung schlechthin eines Körpers zu verstehen hat. Es wird nur gelingen, relative Beschleunigungen von Körpern gegen einander zu definieren. Andererseits aber gründen wir unsere Mechanik auf die Voraussetzung, dass zur Erzeugung einer Beschleunigung eines Körpers eine Kraft (Ursache) notwendig ist, wobei wir übersehen, dass wir gar nicht anzugeben vermögen, was wir unter «

Beschleunigung » dabei zu verstehen haben, eben weil nur relative Beschleunigungen Gegenstand der Wahrnehmung sein können.“ (Einstein, 1914h, pp. 344-346)

Anschließend äußert er ein zusätzliches Argument, welches er einem Gedankenexperiment seines Freundes Besso verdankt (Einstein, 1914h, p. 346). Wir haben bereits darauf hingewiesen, dass Besso ein Machianer war und Einstein Machs Konzepte näherbrachte. Jedenfalls stellt Einstein den „fundamentalen Mangel“ (Einstein, 1914h, p. 344), der der klassischen Physik anhaftet, durch einen Dialog zwischen zwei Personen dar. Der erste Beobachter hat einen „natürlichen Verstand“ (Einstein, 1914h, p. 345) und vertritt die Ansicht, dass Bewegung sei sie beschleunigt oder unbeschleunigt, „wenigstens zum Teil vom Fixsternsystem kausal bestimmt wird.“ (Einstein, 1914h, p. 345) Die zweite Person ist „durch die Schule der Wissenschaft gegangen“ (Einstein, 1914h, p. 345) und ist daher ein Vertreter des absoluten Raumes. Schließlich geht der Erste aus der Diskussion als Sieger hervor. Die Erzählweise erinnert etwas an Galileis „Dialog“ (Galilei, 1891), in welchem das ptolemäische und das kopernikanische Weltbild diskutiert werden. Jedenfalls ist unverkennbar, dass die erste Person Machs Position vertritt und die zweite die von Newton. Anschließend betont Einstein: „Es wird nur gelingen, relative Beschleunigungen von Körpern gegen einander zu definieren.“ (Einstein, 1914h, p. 346) Hier denkt er wohl Einstein an Machs Worte vom Abschnitt „6. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung“ (Mach, 2012, pp. 250-273):

„Alle Massen, alle Geschwindigkeiten, demnach *alle* Kräfte sind relativ. Es gibt keine Entscheidung über Relatives und Absolutes, welche wir treffen könnten, zu welcher wir gedrängt wären, aus welcher wir einen intellektuellen oder einen anderen Vorteil ziehen könnten. – Wenn noch immer moderne Autoren durch die Newtonschen, vom Wassergefäß hergenommenen Argumente sich verleiten lassen, zwischen relativer und absoluter Bewegung zu unterscheiden, so bedenken sie nicht, dass das Weltsystem uns nur *einmal* gegeben, die ptolemäische oder kopernikanische Auffassung aber unsere Interpretationen, aber beide gleich wirklich sind. Man versuche das Newtonsche Wassergefäß festzuhalten, den Fixsternhimmel dagegen zu rotieren und das Fehlen der Fliehkräfte nun nachzuweisen.“
(Mach, 2012, p. 257)

Mach betont, dass Massen, Geschwindigkeiten und Kräfte stets nur relativ definierbar (und zu messen) sind. Er geht sogar so weit, dass er dadurch die Weltbilder relativiert.²⁸⁶ Hans Reichenbach hat diese Stelle folgendermaßen kommentiert:

²⁸⁶ Eine physikalische Analyse von Machs Ideen dazu findet der Leser in (Reichenbach, 1928, pp. 249-250).

„Die dynamische Relativitätslehre [von Ernst Mach, Anmerkung von E.S.] ist nicht eine interne wissenschaftliche Angelegenheit, sondern mit ihr ist in aller Form das Kopernikanische Weltbild erschüttert worden; es hat danach keinen Sinn, zwischen Kopernikus und Ptolemäus von einem Wahrheitsunterschied zu sprechen — beide Auffassungen sind gleichberechtigte Beschreibungen. Was man als größte Entdeckung der abendländischen Wissenschaft gegenüber dem Altertum angesehen hatte, wird hier in seinem Wahrheitswert bestritten; so sehr freilich diese Tatsache zur Vorsicht in der Formulierung und Auswertung wissenschaftlicher Resultate ermahnt, so wenig bedeutet sie einen Rückschritt der geschichtlichen Entwicklung. Denn die Relativitätslehre besagt ja nicht etwa, daß nun die alte Auffassung des Ptolemäus die richtige sei, sondern sie bestreitet die absolute Bedeutung für *beide* ; und sie kann diese Behauptung nur deshalb verteidigen, weil die historische Entwicklung durch beide Auffassungen hindurchging, weil die Überwindung der Ptolemäischen Weltansicht durch die Kopernikanische erst die neue Mechanik begründete und ihr damit schließlich wieder Mittel an die Hand gab, auch das Kopernikanische Weltbild selbst wieder in seiner Einseitigkeit zu erkennen. Der Weg zur Wahrheit hat hier in der reinsten Form jenen Dreischritt befolgt, den Hegel als notwendig für alle historische Entwicklung betrachtet.

Freilich wäre es zuviel gesagt, wenn man in dem Gedanken Machs bereits die Vollendung der dritten Stufe vollzogen sieht. Wenn Mach Newton erwiderte, daß die Zentrifugalkraft allein aus der Relativbewegung erklärt werden muß, so ist dies noch keine physikalische Theorie, sondern nur ein Programm; ja, auch nur der Anfang eines Programms für die physikalische Theorie, die diesen Gedanken erst durchführt.“

(Reichenbach, 1928, pp. 251-252)

Reichenbach spricht hier also von einem Machschen Programm bzw. von einem „Anfang eines Programms“ (Reichenbach, 1928, p. 252). Wie sehr dieses Programm in der Allgemeinen Relativitätstheorie umgesetzt wurde, ist heute strittig – siehe dazu allgemein (Barbour & Pfister, 1995a) bzw. (Barbour & et al., 1995b) und (Barbour, 1995c). Fest steht jedoch, dass nach der Allgemeinen Relativitätstheorie von Einstein das Kopernikanische Weltbild und das Ptolemäische Weltbild nicht gleich richtig sind; oder mit einfacheren Worten ausgedrückt: nach der Allgemeinen Relativitätstheorie rotiert die Erde um die Sonne und nicht umgekehrt. Das bedeutet aber nicht, dass Einstein bei der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie sich nicht zu Beginn an Mach orientierte. (Viele Einsichten, die die ART betreffen kamen Einstein erst nach und nach...)

Jedenfalls hat Einstein öfter auf diesen Mangel – dass die klassische Physik (und die SRT) nur in unbeschleunigten Bezugssystemen gelten – hingewiesen und gleichzeitig Machs wichtige Rolle betont, der diesen Mangel zuerst bemerkte und kritisierte, wie beispielsweise auch in „Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1914o, pp. 1031-1032)²⁸⁷. Doch bei beiden Hinweisen (Einstein, 1914h, p. 344) (Einstein, 1914o, p. 1031) gibt

²⁸⁷ Dort schreibt Einstein:

Einstein keine Quelle an, wo diese Kritik in Machs Werken zu finden sind, womit sich die Frage stellt, an welchen Abschnitten von Machs *Mechanik* er sich genau orientierte? Auch sind diese Publikationen entstanden, bevor Einstein die Allgemeine Relativitätstheorie fertig gestellt hat – betonte Einstein auch nach der Vollendung der ART Machs wegweisende Rolle? Beide Fragen lassen sich relativ einfach beantworten. Sehen wir uns beispielsweise seinen Artikel „Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1916e) an, die in den *Annalen der Physik* veröffentlicht wurde. Dort beginnt er den zweiten Paragraphen „§ 2. Über die Gründe, welche eine Erweiterung des Relativitätspostulates nahelegen“, der genau zu unserem Thema passt, mit den Worten:

„Der klassischen Mechanik und nicht minder der speziellen Relativitätstheorie haftet ein erkenntnistheoretischer Mangel an, der vielleicht zum ersten Male von E. Mach klar hervorgehoben wurde. Wir erläutern ihn am folgenden Beispiel. Zwei flüssige Körper von gleicher Größe und Art schweben frei im Raume in so großer Entfernung voneinander (und von allen übrigen Massen), daß nur diejenigen Gravitationskräfte berücksichtigt werden müssen, welche die Teile eines dieser Körper aufeinander ausüben. Die Entfernung der Körper voneinander sei unveränderlich. Relative Bewegungen der Teile eines der Körper gegeneinander sollen nicht auftreten. Aber jede Masse soll – von einem relativ zu der anderen Masse ruhenden Beobachter aus beurteilt – um die Verbindungslinie der Massen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotieren (es ist dies eine konstatierbare Relativbewegung beider Massen). Nun denken wir uns die Oberflächen beider Körper (S_1 und S_2) mit Hilfe (relativ ruhender) Maßstäbe ausgemessen; es ergebe sich, daß die Oberfläche von S_1 eine Kugel, die von S_2 ein Rotationsellipsoid sei.

Wir fragen nun: Aus welchem Grunde verhalten sich die Körper S_1 und S_2 verschieden? Eine Antwort auf diese Frage kann nur dann als erkenntnistheoretisch befriedigend ¹⁾²⁸⁸ anerkannt werden, wenn die als Grund angegebene Sache eine *beobachtbare Erfahrungstatsache* ist; denn das Kausalitätsgesetz hat nur dann den Sinn einer Aussage über die Erfahrungswelt, wenn als Ursachen und Wirkungen letzten Endes nur *beobachtbare Tatsachen* auftreten.

„Es sei nämlich K ein im Galilei-Newtonschen Sinne berechtigtes Koordinatensystem, K' ein relativ zu K gleichförmig rotierendes Koordinatensystem. Dann wirken auf relativ zu K' ruhende Massen Zentrifugalkräfte, während auf relativ zu K ruhende Massen solche nicht wirken. Hierin sah bereits Newton einen Beweis dafür, daß man die Rotation von K' als eine »absolute« aufzufassen habe, daß man also K' nicht mit demselben Rechte wie K als »ruhend« behandeln könne. Dies Argument ist aber – wie insbesondere E. Mach ausgeführt hat – nicht stichhaltig. Die Existenz jener Zentrifugalkräfte brauchen wir nämlich nicht notwendig auf eine Bewegung von K' zurückzuführen; wir können sie vielmehr ebensogut zurückführen auf die durchschnittliche Rotationsbewegung der ponderablen fernen Massen der Umgebung in bezug auf K' , wobei wir K' als »ruhend« behandeln.“

(Einstein, 1914o, p. 1031)

Einstein erkennt hier ganz richtig, dass es im Sinne von Mach war, die Trägheitskräfte bzw. Fliehkräfte nicht als Scheinkräfte zu deklarieren, sondern als wirkliche Kräfte.

²⁸⁸ An dieser Stelle schreibt Einstein in der Fußnote 1:

„Eine derartige erkenntnistheoretisch befriedigende Antwort kann natürlich immer noch physikalisch unzutreffend sein, falls sie mit anderen Erfahrungen im Widerspruch ist.“

(Einstein, 1916e, pp. 771, fn. 1)

Die Newtonsche Mechanik gibt auf diese Frage keine befriedigende Antwort. Sie sagt nämlich folgendes. Die Gesetze der Mechanik gelten wohl für einen Raum R_1 , gegen welchen der Körper S_1 in Ruhe ist, nicht aber gegenüber einem Raume R_2 , gegen welchen S_2 in Ruhe ist. Der berechnete Galileische Raum R_1 , der hierbei eingeführt wird, ist aber eine *bloß fingierte* Ursache, keine beobachtbare Sache. Es ist also klar, daß die Newtonsche Mechanik der Forderung der Kausalität in dem betrachteten Falle nicht wirklich, sondern nur scheinbar Genüge leistet, indem sie die bloß fingierte Ursache R_1 für das beobachtbare verschiedene Verhalten der Körper S_1 und S_2 verantwortlich macht.

Eine befriedigende Antwort auf die oben aufgeworfene Frage kann nur so lauten: Das aus S_1 und S_2 bestehende physikalische System zeigt für sich allein keine denkbare Ursache, auf welche das verschiedene Verhalten von S_1 und S_2 zurückgeführt werden könnte. Die Ursache muß also außerhalb dieses Systems liegen. Man gelangt zu der Auffassung, daß die allgemeinen Bewegungsgesetze, welche im speziellen die Gestalten von S_1 und S_2 bestimmen, derart sein müssen, daß das mechanische Verhalten von S_1 und S_2 ganz wesentlich durch ferne Massen mitbedingt werden muß, welche wir nicht zu dem betrachteten System gerechnet hatten. Diese fernen Massen (und ihre Relativbewegungen gegen die betrachteten Körper) sind dann als Träger prinzipiell beobachtbarer Ursachen für das verschiedene Verhalten unserer betrachteten Körper anzusehen; sie übernehmen die Rolle der fingierten Ursache R_1 . Von allen denkbaren, relativ zueinander beliebig bewegten Räumen R_1 , R_2 usw. darf a priori keiner als bevorzugt angesehen werden, wenn nicht der dargelegte erkenntnistheoretische Einwand wieder aufleben soll. *Die Gesetze der Physik müssen so beschaffen sein, daß sie in bezug auf beliebig bewegte Bezugssysteme gelten.* Wir gelangen also auf diesem Wege zu einer Erweiterung des Relativitätspostulates.“

(Einstein, 1916e, pp. 771-772)

(Für eine detaillierte Analyse davon, wie diese Zeilen von Einstein mit den Ansichten von Mach übereinstimmen siehe (Wolters, 1987, pp. 57-63).)

Fassen wir Einsteins Erläuterungen kurz zusammen: Der klassischen Mechanik (aber auch der Speziellen Relativitätstheorie) haftet ein erkenntnistheoretischer Mangel an. Dieser wurde wahrscheinlich zum ersten Mal von Ernst Mach hervorgehoben. Um den Mangel zu erläutern, betrachtet Einstein zwei flüssige Körper S_1 und S_2 , die weit entfernt von anderen Massen im Universum liegen. Nehmen wir an, dass wir durch Beobachtung feststellen würden, dass die Oberfläche von S_1 eine Kugel sei, die von S_2 aber ein Rotationsellipsoid. Woher kommt nun die Kraft bzw. die Zentrifugalkraft, welche den Körper S_2 verformt? Die Antwort der Newtonschen Physik wäre, dass der Körper S_2 gegenüber dem absoluten Raum rotiert, der Körper S_1 jedoch nicht. Nach Einstein stimmt das aber mit dem Kausalitätsgesetz nicht überein, da dieses physikalisch nur Sinn macht „wenn als Ursachen und Wirkungen letzten Endes nur *beobachtbare Tatsachen* auftreten.“ (Einstein, 1916e, p. 771) Den absoluten Raum können wir aber nicht messen – er ist somit keine beobachtbare Erfahrungstatsache. Zudem ergibt es kausal wenig Sinn, wenn der absolute Raum auf Körper einwirken kann, die Körper aber das auf ihn nicht tun können. Dieser absolute Raum ist daher nach Einstein „eine *bloß fingierte* Ursache, keine beobachtbare Sache.“ (Einstein,

1916e, p. 771) Eine Lösung für das erkenntnistheoretische Problem bietet jedoch das was heute als das Machsche Prinzip verstanden wird. Dabei ist es nicht der absolute Raum, den man a priori annimmt, welcher das Trägheitssystem und somit die Trägheitskräfte verursacht, sondern es sind die restlichen Massen im Universum – siehe (Einstein, 1916e, p. 772).

Aus diesen Zeilen Einsteins wird klar, dass er, wohl durch die Kritik von Mach einen erkenntnistheoretischen Mangel in der klassischen Physik (aber auch in der Speziellen Relativitätstheorie) erkannte – ebenso wird anhand des Beispiels klar, um welchen Mangel es sich dabei handelte. Jedoch fehlen noch Verweise von Einstein auf konkrete Stellen bei Mach, in denen er das Problem aufwirft. Wir können uns daher fragen, ob Mach das Problem tatsächlich angesprochen hat? Zudem können wir uns fragen, welche Zeilen von Mach Einstein sich genau bezog. Zum Glück ist er darauf in seinem Nachruf „Ernst Mach“ etwas detaillierter eingegangen:

„Die Bedeutung solcher Geister, wie Mach, liegt nun keineswegs nur darin, daß sie gewisse philosophische Bedürfnisse der Zeit befriedigen, die der eingefleischte Fachwissenschaftler als Luxus bezeichnen mag. Begriffe, welche sich bei der Ordnung der Dinge als nützlich erwiesen haben, erlangen über uns leicht eine solche Autorität, daß wir ihres irdischen Ursprungs vergessen und sie als unabänderliche Gegebenheiten hinnehmen. Sie werden dann zu ‚Denknotwendigkeiten‘, ‚Gegebenen a priori‘ usw. gestempelt. Der Weg des wissenschaftlichen Fortschrittes wird durch solche Irrtümer oft für lange Zeit ungangbar gemacht. Es ist deshalb durchaus keine müßige Spielerei, wenn wir darin geübt werden, die längst geläufigen Begriffe zu analysieren und zu zeigen, von welchen Umständen ihre Berechtigung und Brauchbarkeit abhängt, wie sie im einzelnen aus den Gegebenheiten der Erfahrung herausgewachsen sind. Dadurch wird ihre allzu große Autorität gebrochen. Sie werden entfernt, wenn sie sich nicht ordentlich legitimieren können, korrigiert, wenn ihre Zuordnung zu den gegebenen Dingen allzu nachlässig war, durch andere ersetzt, wenn sich ein neues System aufstellen läßt, das wir aus irgendwelchen Gründen vorziehen.

Derartige Analysen erscheinen dem Fachwissenschaftler, dessen Blick mehr auf das Einzelne gerichtet ist, meist überflüssig, gespreizt, zuweilen gar lächerlich. Die Situation ändert sich aber, wenn einer der gewohnheitsmäßig benutzten Begriffe durch einen schärferen ersetzt werden soll, weil es die Entwicklung der betreffenden Wissenschaft erheischt. Dann erheben diejenigen, welche den eigenen Begriffen gegenüber nicht reinlich verfahren sind, energischen Protest und klagen über revolutionäre Bedrohung der heiligsten Güter. In dies Geschrei mischen sich dann die Stimmen derjenigen Philosophen, welche jenen Begriff nicht entbehren zu können glauben, weil sie ihn in ihr Schatzkästlein des ‚Absoluten‘ des ‚a priori‘ oder kurz derart eingereiht hatten, daß sie dessen prinzipielle Unabänderlichkeit proklamiert hatten.

Der Leser errät schon, daß ich hier vorzugsweise auf gewisse Begriffe der Lehre von Raum und Zeit, sowie der Mechanik anspiele, welche durch die Relativitätstheorie eine Modifikation erfahren haben. Niemand kann es den Erkenntnistheoretikern nehmen, daß sie der Entwicklung hier die Wege geebnet haben; von mir selbst weiß ich mindestens, daß ich insbesondere durch Hume und Mach direkt und indirekt sehr gefördert worden bin. Ich bitte

den Leser, Machs Werk: ‚Die Mechanik in ihrer Entwicklung‘ in die Hand zu nehmen und die unter 6. und 7. im zweiten Kapitel gegebenen Betrachtungen (‚Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung‘ und ‚Übersichtliche Kritik der Newtonschen Aufstellungen‘). Dort finden sich Gedanken meisterhaft dargelegt, die noch keineswegs Gemeingut der Physiker geworden sind. Diese Partien sind noch deshalb besonders anziehend, weil sie an wörtlich zitierte Stellen Newtons anknüpfen. Hier einige Rosinen:

Newton: ‚Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand. Sie wird auch mit dem Namen Dauer belegt.‘

‚Die relative, scheinbare und gewöhnliche Zeit ist ein fühlbares und äußerliches, entweder genaues oder ungleiches Maß der Dauer, dessen man sich gewöhnlich statt der wahren Zeit bedient, wie Stunde, Tag, Monat, Jahr.‘

Mach: ‚... Wenn ein Ding A sich mit der Zeit ändert, so heißt dies nur, die Umstände eines Dinges A hängen von den Umständen eines andern Dinges B ab. Die Schwingungen eines Pendels gehen in der Zeit vor, wenn dessen Exkursion von der Lage der Erde abhängt. Da wir bei Beobachtung des Pendels nicht auf die Abhängigkeit von der Lage der Erde zu achten brauchen, sondern dasselbe mit irgendeinem anderen Ding vergleichen können (...), so entsteht leicht die Meinung, daß alle diese Dinge unwesentlich seien. ... Wir sind außerstande, die Veränderungen der Dinge an der Zeit zu messen. Die Zeit ist vielmehr eine Abstraktion, zu der wir durch die Veränderung der Dinge gelangen, weil wir auf kein bestimmtes Maß angewiesen sind, da eben alle untereinander zusammenhängen.‘

Newton: ‚Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand stets gleich und unbeweglich.‘

‚Der relative Raum ist ein Maß oder ein beweglicher Teil des ersteren, welcher von unseren Sinnen, durch seine Lage gegen andere Körper bezeichnet und gewöhnlich für den unbeweglichen Raum genommen wird.‘

Dann folgt eine entsprechende Definition der Begriffe ‚absolute Bewegung‘ und ‚relative Bewegung‘. Hierauf:

‚Die wirkenden Ursachen, durch welche absolute und relative Bewegung voneinander verschieden sind, sind die Fliehkräfte von der Achse der Bewegung. Bei einer nur relativen Kreisbewegung existieren diese Kräfte nicht, aber sie sind kleiner oder größer, je nach Verhältnis der Größe der (absoluten) Bewegung.‘

Es folgt nun die Beschreibung des wohlbekannten Eimerversuches, welcher die letzte Behauptung anschaulich begründen soll.

Die Kritik, welche Mach diesem Standpunkte zuteil werden läßt, ist sehr interessant; ich zitiere aus derselben einige besonders prägnante Stellen. ‚Wenn wir sagen, daß ein Körper K seine Richtung und Geschwindigkeit nur durch den Einfluß eines anderen Körpers K' ändert, so können wir zu dieser Einsicht gar nicht kommen, wenn nicht andere Körper A, B, C ... vorhanden sind, gegen welche wir die Bewegung des Körpers K beurteilen. Wir erkennen also eigentlich eine Beziehung des Körpers K zu A, B, C Wenn wir nun plötzlich von A, B, C ... absehen, und von einem Verhalten des Körpers K im absoluten Raume sprechen wollten, so würden wir einen doppelten Fehler begehen. Einmal könnten wir nicht wissen, wie sich K bei Abwesenheit von A, B, C ... benehmen würde, dann aber würde uns jedes Mittel fehlen, das Benehmen des Körpers K zu beurteilen, und unsere Aussage zu prüfen, welche demnach keinen naturwissenschaftlichen Sinn hätte.‘

‚Die Bewegung eines Körpers K kann immer nur beurteilt werden in bezug auf andere Körper A, B, C Da wir immer eine genügende Anzahl gegeneinander relativ festliegender oder ihre Lage nur langsam ändernder Körper zur Verfügung haben, so sind wir hierbei auf keinen bestimmten Körper angewiesen, und können bald von diesem, bald von jenem absehen. Hierdurch entstand die Meinung, daß diese Körper überhaupt gleichgültig seien.‘

‚Der Versuch Newtons mit dem rotierenden Wassergefäß lehrt nur, daß die Relativdrehung des Wassers gegen die Gefäßwände keine merklichen Zentrifugalkräfte weckt, daß dieselben aber durch die Relativdrehung gegen die Masse der Erde und die

übrigen Himmelskörper geweckt werden. Niemand kann sagen, wie der Versuch verlaufen würde, wenn die Gefäßwände immer dicker und massiger und zuletzt mehrere Meilen dick würden . . .²⁸⁹

Die zitierten Zeilen zeigen, daß Mach die schwachen Seiten der klassischen Mechanik klar erkannt hat und nicht weit davon entfernt war, eine allgemeine Relativitätstheorie zu fordern, und dies schon vor fast einem halben Jahrhundert! Es ist nicht unwahrscheinlich, daß Mach auf die Relativitätstheorie gekommen wäre, wenn in der Zeit, als er jugendfrischen Geistes war, die Frage nach der Bedeutung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit schon die Physiker bewegt hätte. Beim Fehlen dieser aus der Maxwell-Lorentzschen Elektrodynamik fließenden Anregung reichte auch Machs kritisches Bedürfnis nicht hin, um das Gefühl der Notwendigkeit einer Definition der Gleichzeitigkeit örtlich distanter Ereignisse zu erwecken.

Die Betrachtungen über Newtons Eimerversuch zeigen, wie nahe seinem Geiste die Forderung der Relativität im allgemeineren Sinne (Relativität der Beschleunigungen) lag. Allerdings fehlt hier das lebhafteste Bewußtsein davon, daß die Gleichheit der trägen und schweren Masse der Körper zu einem Relativitätspostulat im weiteren Sinne herausfordert, indem wir nicht imstande sind, durch Versuche darüber zu entscheiden, ob das Fallen der Körper relativ zu einem Koordinatensystem auf das Vorhandensein eines Gravitationsfeldes oder auf einen Beschleunigungszustand des Koordinatensystems zurückzuführen sei.“

(Einstein, 1916c, pp. 102-103)

Zusammenfassend erklärt Einstein, dass es wichtig ist, Begriffe, die man als a priori gegeben annimmt – wie beispielsweise den absoluten Raum und die absolute Zeit – kritisch zu hinterfragen, da sie sonst den wissenschaftlichen Fortschritt hindern. Aus diesem Grund haben die Kritiken von „Hume und Mach“ Einstein „direkt oder indirekt sehr gefördert“ (Einstein, 1916c, p. 102). Anschließend verweist er (Einstein, 1916c, p. 102) auf das Buch *Die Mechanik in ihrer Entwicklung* (Mach, 2012, pp. 142-310) – genauer auf das zweite Kapitel „Die Entwicklung der Prinzipien der Dynamik“, Abschnitte „6. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung“ (Mach, 2012, pp. 250-273) und „7. Übersichtliche Kritik der Newtonschen Aufstellungen“ (Mach, 2012, pp. 273-280). Diese sind überaus interessant:

Im sechsten Abschnitt finden wir:

- Machs Kritik an Newtons Interpretation des Eimer-Versuchs (Mach, 2012, pp. 257, fn. 202);
- seinen konzeptionellen Ansatz (Mach, 2012, p. 261), welcher später als eine Voraussage der Allgemeinen Relativitätstheorie theoretisch von Josef Lense und Walter Thirring ausgearbeitet wurde und heute als Thirring-Lense-Effekt bezeichnet wird (Mach, 2012, pp. 261, fn. 206);

²⁸⁹ Die theoretische Ausarbeitung dieser Überlegung wird heute als Thirring-Lense-Effekt bezeichnet (Mach, 2012, pp. 261, fn. 206).

- das Machsche Prinzip (Mach, 2012, pp. 262, fn. 208);
- den Wunsch eines Gravitationsgesetzes nach dem Ideal der elektrischen Fernwirkung bzw. eine Nahwirkungstheorie der Gravitation (Mach, 2012, pp. 272, fn. 215).

Im siebten Abschnitt ist unter anderem Machs Hinweis auf Poincarés Buch *La Science et l'Hypothèse* im Zusammenhang mit seinen eigenen Konzepten (Mach, 2012, pp. 279, fn. 223) usw. gegeben.

Einstein zitiert ausschließlich aus dem sechsten Abschnitt²⁹⁰. Seine Zitate sind so zusammengefügt, so dass sie sich als ein wissenschaftlicher Dialog zwischen Newton und Mach lesen lassen. Zuerst stellt Newton seine absolute Zeit vor (Einstein, 1916c, pp. 102-103), woraufhin Mach darauf hinweist, dass wir „außerstande“ „sind“, „Ding an der Zeit zu messen“ (Einstein, 1916c, p. 103) – sie „ist vielmehr eine Abstraktion, zu der wir durch die Veränderung der Dinge gelangen, [...]“ (Einstein, 1916c, p. 103). Anschließend erläutert Newton den absoluten Raum und den Umstand, wie man die absolute Bewegung – beispielsweise die Rotation eines mit Wasser gefüllten Eimers – anhand der Fliehkräfte demonstrieren kann (Einstein, 1916c, p. 103). Mach erklärt jedoch, dass Newton bei seinen Überlegungen die übrigen Massen im Universum ignoriert, die nicht nur als Bezugssystem dienen, sondern ebenso die Ursache der Fliehkräfte sein könnten. Newton müsste daher alle Massen im Universum bis auf den Eimer entfernen, um das beweisen zu können, was er beabsichtigt. Da aber die Massen im Universum nun einmal da sind, sprechen die Argumente nicht für den hypothetisch absoluten Raum, sondern eher dagegen (Einstein, 1916c, p. 103). Diese Dialog-Form, die wir in (Einstein, 1914h, pp. 344-346) (Einstein, 1916c, pp. 102-103) finden, wird er in seiner Schrift: „Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie“ (Einstein, 1918k) fortsetzen.

Dass diese Überlegungen von Mach als eine Suche nach Kovarianz ansehbar sind, hat bereits Einsteins Schüler und Freund Hans Reichenbach gedeutet:

„Erst Ernst Mach hat dasjenige Argument gefunden, das Newtons Theorie der Zentrifugalkraft allein entgegengehalten werden kann, wenn man eine relativistische Dynamik durchführen will. Mach knüpft an den Eimerversuch an, den Newton beschreibt. Ein

²⁹⁰ Vergleiche (Einstein, 1916c, pp. 102-103) mit (Mach, 2012, pp. 250-252, 254-255, 258-259, 261).

mit Wasser halb gefüllter Eimer hängt an einem Seil und wird durch Torsion des Seiles in Rotation versetzt. Er wird im Anfang das Wasser noch nicht mitreißen, sondern allein rotieren; allmählich nimmt er das Wasser mit in seine Umdrehung, und nun nimmt die Oberfläche des Wassers die bekannte in der Mitte ausgehöhlte Form an, die von der Zentrifugalkraft herrührt. Schließlich hält er den Eimer fest, während das Wasser noch weiter rotiert und dabei seine parabolische Oberfläche noch beibehält. Newton schließt hieraus, daß die Zentrifugalkraft nicht durch eine Relativbewegung erklärt werden könne; denn eine Relativbewegung zwischen Wasser und Eimer ist zu Anfang und Ende des beschriebenen Vorgangs vorhanden, während Zentrifugalkräfte nur im zweiten Fall auftreten. Rotiert der Eimer bei stillstehendem Wasser, so tritt keine Zentrifugalwirkung auf, rotiert aber das Wasser bei stillstehendem Eimer, so tritt die Zentrifugalwirkung auf.

Mach erwidert hierauf, daß Newton übersehen hat, die umgebenden Massen der Erde und der Fixsterne mit in das betrachtete System einzubeziehen. Das Wasser rotiert nicht nur gegen den Eimer, sondern auch gegen diese großen Massen; diese können als Ursache der Zentrifugalkraft betrachtet werden. Die Zentrifugalkraft beweist deshalb nicht eine Rotation gegen den absoluten Raum, sondern nur gegen die Massen des Weltalls. Betrachtet man das in der Oberfläche ausgehöhlte Wasser als ruhend, so rotieren Erde und Fixsternsystem um das Wasser herum; in dieser Auffassung ist die Zentrifugalkraft eine *dynamische Gravitationswirkung der rotierenden Massen*. Eine solche aus der Rotation von Massen entspringende Zugkraft ist sehr wohl vorstellbar. Hat doch auch eine bewegte elektrische Ladung — wie späterhin Einstein argumentiert — zusätzliche Kraftwirkungen gegenüber einer ruhenden!

Das Neue an der Machschen Auffassung ist die Idee, daß sich die Trägheitskraft in der relativistischen Auffassung als dynamische Gravitationswirkung deuten läßt. *Die Relativität ist dynamisch zu halten, wenn man auch die Kräfte relativistisch umdeutet*; dieselbe an dem Körper K_1 angreifende Kraft erscheint in der einen Auffassung als Wirkung der Rotation von K_1 , in der andern Auffassung als Wirkung der Rotation von K_2 . Damit ist eine fundamentale Umdeutung des Kraftbegriffs vollzogen (wenn Mach sich dessen auch nicht voll bewußt wird); Kräfte sind nicht absolute Größen, sondern vom Koordinatensystem abhängige Größen. In der Physik gibt es Größen beider Art; die elektrische Ladung, die Entropie sind *Invarianten*, d. h. vom Koordinatensystem unabhängige Größen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen sind *Kovarianten*, d. h. vom Koordinatensystem abhängige Größen. Mit der Machschen Auflösung des Rotationsproblems ist das Gravitationsfeld seines absoluten Charakters entkleidet und als *kovariante* Größe erkannt, die sich mit dem Bewegungszustand des Koordinatensystems transformiert; darin liegt die Bedeutung des Machschen Gedankens. Der Grundgedanke des Prinzips der allgemeinen Kovarianz ist hier zum erstenmal ausgesprochen.“ (Reichenbach, 1928, pp. 247-248)

Nach Reichenbach scheinen Machs Überlegungen den Anstoß dazu gegeben zu haben, nicht von absoluten Größen, wie beispielsweise von absoluten Beschleunigungen, zu sprechen, sondern diese relativ zum Bezugssystem zu betrachten — „[d]er Grundgedanke des Prinzips der allgemeinen Kovarianz ist hier zum erstenmal ausgesprochen.“ (Reichenbach, 1928, p. 248) Insofern ist es stimmig, wenn Einstein verdeutlicht:

„Die zitierten Zeilen zeigen, daß Mach die schwachen Seiten der klassischen Mechanik klar erkannt hat und nicht weit davon entfernt war, eine allgemeine Relativitätstheorie zu fordern, und dies schon vor fast einem halben Jahrhundert! [...]

Die Betrachtungen über Newtons Eimerversuch zeigen, wie nahe seinem Geiste die Forderung der Relativität im allgemeineren Sinne (Relativität der Beschleunigungen) lag.“

(Einstein, 1916c, p. 103)

Er betont aber zum Schluss, was bei Mach noch gefehlt hat:

„Allerdings fehlt hier das lebhafteste Bewußtsein davon, daß die Gleichheit der trägen und schweren Masse der Körper zu einem Relativitätspostulat im weiteren Sinne herausfordert, indem wir nicht imstande sind, durch Versuche darüber zu entscheiden, ob das Fallen der Körper relativ zu einem Koordinatensystem auf das Vorhandensein eines Gravitationsfeldes oder auf einen Beschleunigungszustand des Koordinatensystems zurückzuführen sei.“ (Einstein, 1916c, p. 103)

Nach Einsteins Ansicht fehlte bei Mach die wichtige Postulierung des Äquivalenzprinzips, welches einer der Grundpfeiler der Allgemeinen Relativitätstheorie darstellt. Gereon Wolters kommentiert jene Zeilen jedoch mit den Worten:

„Einstein hat Mach entweder nicht genau gelesen oder Machs Bemerkungen zu dieser Frage wieder vergessen. Denn in Machs Vision der Themata einer erkenntnistheoretisch befriedigenden Physik taucht, wenn auch nicht explizit ausgesprochen, auch das *Äquivalenzprinzip*, d. h. die These von der Gleichheit von träger und schwerer Masse, auf.“

(Wolters, 1987, pp. 62-63)

Wie er zu seiner Idee über des Äquivalenzprinzips kam, erläutert Einstein in seiner Kyoto-Rede als nächstes.

4.4.5.2. Thema II: Das Äquivalenzprinzip [49]-[65]

Einstein erläutert, dass er auf Anfrage von Johannes Stark den Artikel „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) für das „Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik“ verfasste [49]. Wir sind bereits im Kapitel 3, Abschnitt „3.2. Entstehungsgeschichte der SRT: Einstein erwähnt Cohn“ auf diesen Artikel eingegangen, welcher zugleich die erste detaillierte Zusammenfassung der SRT darstellt und auch einen Einblick in ihre Entstehungsgeschichte gewährt. Und, wie in Einsteins Kyoto-Rede erwähnt, konnten wir dort anhand von Quellen zeigen, dass Einstein diese Arbeit tatsächlich auf Bitte von Johannes Stark verfasste – siehe (CPAE 5; 58; p. 74) und (CPAE 5; 63; p. 77-78). Zudem haben wir dort darauf hingewiesen, dass genau diese Arbeit (Einstein, 1907j) in einer Karte (17. August 1909) von Einstein an Mach erwähnt wird (CPAE 5; 175; p. 205). Mach erkannte den wichtigen Hinweis von Einstein und vermerkte sich die Arbeit in seinem Notizbuch (CPAE 5; 175; p. 205, fn. 5).

Jedenfalls sehen wir aus Einsteins Kyoto-Rede, dass dieser Artikel (Einstein, 1907j) uns nicht nur in Bezug auf die Entstehungsgeschichte der SRT, sondern auch auf jene der ART weiterhelfen kann. Einstein erklärt, dass er beim Schreiben der Arbeit bemerkte, dass in der Speziellen Relativitätstheorie das Gravitationsgesetz nicht miteinbezogen wurde [50]. Zwar gelangte man durch die SRT zur Äquivalenz von (träger) Masse und Energie; aber weshalb das Äquivalenzprinzip zwischen träger und schwerer Masse gegeben war, konnte damit nicht gelöst werden [52]-[53].

Seit wann Einstein dieses Problem der Äquivalenz von schwerer und träger Masse beschäftigte, lässt sich schwer sagen. Wir haben im 2. Kapitel, Abschnitt „2.1.2. Das A von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“ gezeigt, dass für Einstein die Arbeit „Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen“ (Wien, 1898) nicht nur wegweisend, sondern zugleich einer der ursprünglichen Anregungen für Einstein bei der Entwicklung der Relativitätstheorie war – siehe seinen Brief an Marić (am 28? September 1899) (CPAE 1; 57; p. 233-234). Etwa zu jener Zeit fing er auch an unter anderem Machs Bücher zu lesen – siehe seinen Brief (10. September 1899) an Marić (CPAE 1; 54; p. 230). Wenn wir uns Wiens Arbeit wieder ansehen, erkennen wir, dass Wien sich im letzten Kapitel dem Äquivalenzprinzip der trägen und schweren Masse widmet:

„Gravitation und Trägheit.

Dass die Gravitation eine Ausnahmestellung einnimmt und keine bemerkbaren Beziehungen zu den übrigen Naturerscheinungen hat, ist schon oft hervorgehoben worden. Ihre Zurückführung auf Druckkräfte wird durch die Thatsache erschwert, dass der Energievorrath eines gravitirenden Systems bei unendlicher Entfernung der einzelnen Massentheile seinen grössten Werth hat. Es ist aber nicht immer deutlich genug hervorgehoben, dass die Beschleunigung schwerer Massen höchst wahrscheinlich mit der Gravitation zusammen hängt, weil durch die Beschleunigung und durch die Gravitation zwei voneinander unabhängige Definitionen der Masse gewonnen werden, die, soweit die hier sehr genauen Beobachtungen reichen, vollkommen übereinstimmen. Verlangt man eine weitere Erklärung der Gravitation, so müsste sie gleichzeitig davon Rechenschaft geben, weshalb Arbeitsaufwand zur Beschleunigung schwerer Massen erforderlich ist. Dass die beiden Definitionen der Masse übereinstimmen, müsste dann als eine Folge dieser Erklärung herauskommen. Ob eine solche Theorie sich auch auf den Aether zu stützen hat, lässt sich nicht mit Sicherheit behaupten, ist aber wahrscheinlich.

Es muss hier aber auch hervorgehoben werden, dass es keineswegs feststeht, ob eine Zurückführung aller Wirkungen auf Spannungen im Aether gelingen kann, ebenso wie es zweifelhaft bleibt, ob die Vorgänge im Aether sich durch die Gesetze der Mechanik vollkommen befriedigend darstellen lassen.“ (Wien, 1898, p. XVI)

Wien bespricht hier ebenfalls sowohl die Ausnahmestellung der Gravitation als auch die theoretisch nicht begründete Äquivalenz der trägen und der schweren Masse. Nach seiner Ansicht müsste eine (neue, erweiterte) Theorie der Gravitation dieses Problem lösen können:

„Verlangt man eine weitere Erklärung der Gravitation, so müsste sie gleichzeitig davon Rechenschaft geben, weshalb Arbeitsaufwand zur Beschleunigung schwerer Massen erforderlich ist. Dass die beiden Definitionen der Masse übereinstimmen, müsste dann als eine Folge dieser Erklärung herauskommen.“ (Wien, 1898, p. XVI)

Diese Zeilen von Wien – aber auch Machs Äußerungen, auf die wir noch kommen werden – könnten Einstein als eine theoretische Herausforderung, die auf eine Lösung wartete, im Gedächtnis geblieben sein. Weshalb genau nun Einstein das Jahr 1907 wählt, um sich dazu zu äußern, hatte wohl verschiedenste Gründe. Einen Anreiz dazu könnte ihm Plancks Schrift „Zur Dynamik bewegter Systeme“ gegeben haben, in welcher Planck schreibt:

„Indessen sind nach allen unseren Erfahrungen Trägheit und Gravitation in jeder Beziehung, für die verschiedenartigsten Stoffe, von den leichtesten bis zu den schwersten, so eng miteinander verbunden, daß man wohl ohne Bedenken den Ursprung dieser beiden Wirkungen an der nämlichen Stelle suchen darf, nämlich in der latenten Energie der chemischen Atome. Nimmt man die Gravitation als direkt proportional der latenten Energie an, so wäre die von der Temperatur abhängige träge Masse ein wenig, aber nur äußerst wenig größer als die von der Temperatur ganz unabhängige ponderable Masse. In jedem Falle aber müßte sich eine merkliche Verminderung der latenten Energie auch in einer merklichen Verminderung der ponderablen Masse äußern.“ (Planck, 1908, p. 32)

Hier legt Planck nahe, dass die Erklärung der Äquivalenz zwischen träger und schwerer Masse über den Energiebegriff gegeben wäre. Diese Arbeit wurde der „Sitzungsber. d. k. preuß. Akad. der Wissensch. vom 13. Juni 1907“ bereits von Planck mitgeteilt (Planck, 1908, p. 1). Einstein kannte die Schrift, da er in einem anderen Zusammenhang auch darauf hinweist (Einstein, 1907j, pp. 452, fn. 1). Jedenfalls macht Einstein in seiner Schrift „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) in jenem Kontext einen weiteren Schritt und beginnt den letzten Abschnitt mit folgenden Erläuterungen:

„V. Relativitätsprinzip und Gravitation.
§ 17. Beschleunigtes Bezugssystem und Gravitationsfeld.

Bisher haben wir das Prinzip der Relativität, d. h. die Voraussetzung der Unabhängigkeit der Naturgesetze vom Bewegungszustand des Bezugssystems, nur auf beschleunigungsfreie Bezugssysteme angewendet. Ist es denkbar, daß das Prinzip der Relativität auch für Systeme gilt, welche relativ zueinander beschleunigt sind?

Es ist zwar hier nicht der Ort für die eingehende Behandlung dieser Frage. Da sich diese aber jedem aufdrängen muß, der die bisherigen Anwendungen des Relativitätsprinzips verfolgt hat, will ich es nicht unterlassen, zu der Frage hier Stellung zu nehmen.

Wir betrachten zwei Bewegungssysteme Σ_1 und Σ_2 . Σ_1 sei in Richtung seiner X-Achse beschleunigt, und es sei γ die (zeitlich konstante) Größe dieser Beschleunigung. Σ_2 sei ruhend; es befinde sich aber in einem homogenen Gravitationsfeld, das allen Gegenständen die Beschleunigung $-\gamma$ in Richtung der X-Achse erteilt.

Soweit wir wissen, unterscheiden sich die physikalischen Gesetze in bezug auf Σ_1 nicht von denjenigen in bezug auf Σ_2 ; es liegt dies daran, daß alle Körper im Gravitationsfeld gleich beschleunigt werden. Wir haben daher bei dem gegenwärtigen Stande unserer Erfahrung keinen Anlaß zu der Annahme, daß sich die Systeme Σ_1 und Σ_2 in irgendeiner Beziehung voneinander unterscheiden, und wollen daher im folgenden die völlige physikalische Gleichwertigkeit von Gravitationsfeld und entsprechender Beschleunigung des Bezugssystems annehmen.

Diese Annahme erweitert das Prinzip der Relativität auf den Fall der gleichförmig beschleunigten Translationsbewegung des Bezugssystems. Der heuristische Wert der Annahme liegt darin, daß sie ein homogenes Gravitationsfeld durch ein gleichförmig beschleunigtes Bezugssystem zu ersetzen gestattet, welcher letzterer Fall bis zu einem gewissen Grade der theoretischen Behandlung zugänglich ist.“ (Einstein, 1907j, p. 454)

In diesem Beispiel, welches zugleich ein Gedankenexperiment darstellt, betrachtet Einstein zwei Bezugssysteme Σ_1 und Σ_2 . Σ_1 wird mit γ beschleunigt, während Σ_2 auf einem homogenen Gravitationsfeld steht und die Beschleunigung $-\gamma$ erfährt. Es gibt kein Experiment, mit dem man innerhalb von Σ_1 oder Σ_2 feststellen könnte, ob man sich nun in

einem beschleunigten System Σ_1 befindet, oder in einem, welches auf einem gleichförmigen Gravitationsfeld steht. (Siehe dazu Abbildung 9.)

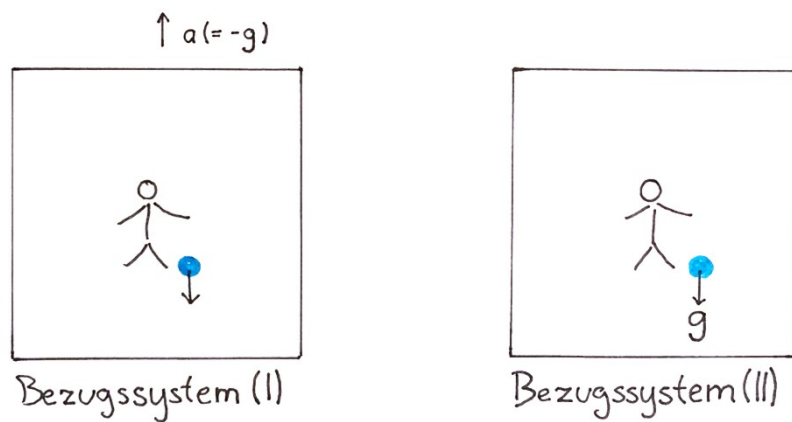


Abbildung 9: Die Resultate von Experimenten in einem gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem (I) sind dieselben, wie die sich in einem homogenen (= gleichförmigen) Gravitationsfeld befindenden Bezugssystem (II). Ein Gedankenexperiment zur Veranschaulichung: Würde man beispielsweise einen Körper loslassen, dann würde er in beiden Bezugssystemen mit gleicher Beschleunigung auf den Boden treffen.

Einstein formuliert somit das erste Mal das Äquivalenzprinzip:

„Soweit wir wissen, unterscheiden sich die physikalischen Gesetze in bezug auf Σ_1 nicht von denjenigen in bezug auf Σ_2 ; es liegt dies daran, daß alle Körper im Gravitationsfelde gleich beschleunigt werden.“ (Einstein, 1907j, p. 454)

Hat man das Äquivalenzprinzip akzeptiert, kann man ein homogenes Gravitationsfeld einem gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem äquivalent ansehen. In seiner Kyoto-Rede [54]-[60] verweist Einstein darauf, welche wichtige Rolle dabei seinem Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip zukam – im nächsten Abschnitt wollen wir dieses genauer untersuchen.²⁹¹

4.4.5.2.1. Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip und Machs möglicher Einfluss

Das Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip [54]-[57], hat Einstein bereits 1920 in seiner Schrift „Gedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt“ (CPAE 7; 31; p. 245)²⁹² näher erläutert:

²⁹¹ Für eine Einführung in die Diskussion darüber, welche Rolle das Äquivalenzprinzip bei der Entstehungsgeschichte gespielt hat siehe „Einstein on Gravitation and Relativity: The Static Field“ (CPAE 4; _; p. 124, 126).

²⁹² Dabei dürfte der Titel eine Anlehnung an Machs Buch *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt* gewesen sein – siehe (CPAE 7; 31; p. 279, fn. 2).

Ein didaktisch sehr einfaches, wertvolles Gedankenexperiment mit Eisenbahnwagen von Einstein zum Äquivalenzprinzip findet der Leser in (Einstein, 1913c, pp. 1254-1255).

„Als ich (i. J. 1907) mit einer zusammenfassenden Arbeit über die spezielle Relativitätstheorie für das ‚Jahrbuch für Radioaktivität und Elektronik‘ beschäftigt war, da musste ich auch versuchen, die Newton’sche Gravitationstheorie so zu modifizieren, dass ihre Gesetze in die Theorie hineinpassten. In dieser Richtung unternommene Versuche zeigten zwar die Durchführbarkeit dieses Unternehmens, befriedigten mich aber nicht, weil sie auf physikalisch unbegründete Hypothesen gestützt werden mussten. Da kam mir der glücklichste Gedanke meines Lebens in folgender Form:

Das Gravitationsfeld hat an einem betrachteten in ähnlicher Weise nur eine relative Existenz wie das durch magnetoelektrische Induktion erzeugte elektrische Feld. *Denn für einen vom Dache eines Hauses frei herabfallenden Beobachter existiert während seines Falles – wenigstens in seiner unmittelbaren Umgebung – kein Gravitationsfeld.* Lässt der Beobachter nämlich irgend welche Körper los, so bleiben sie relativ zu ihm im Zustande der Ruhe bzw. gleichförmigen Bewegung, unabhängig von ihrer besonderen chemischen und physikalischen Natur.²⁹³ Der Beobachter ist also berechtigt, seinen Zustand als ‚Ruhe‘ zu deuten.

Der ungemein sonderbare Erfahrungssatz, dass alle Körper in demselben Schwerfeld mit gleicher Beschleunigung fallen, erhielt durch diesen Gedanken sofort einen tiefen physikalischen Sinn. Wenn es nämlich auch nur ein einziges Ding gäbe, das im Schwerfeld anders fällt wie die andern, so könnte der Beobachter mit seiner Hilfe erkennen, dass er sich in einem Schwerfeld befindet und dass er in diesem fällt. Existiert aber ein solches Ding – wie die Erfahrung mit grosser Genauigkeit ergeben hatte – nicht, so fehlt zunächst jeder objektive Grund für den Beobachter, sich als einen in einem Gravitationsfeld fallenden zu betrachten. Er hat vielmehr das Recht, seinen Zustand als ruhend und seine Umgebung bezüglich der Gravitation als feldfrei zu betrachten.

Die Erfahrungsthatte von der Unabhängigkeit der Fallbeschleunigung vom Material ist also ein mächtiges Argument dafür, dass das Relativitätspostulat auf relativ zu einander ungleichförmig bewegte Koordinatensysteme auszudehnen ist.

Man kann auch umgekehrt von einem Raum ausgehen, in welchem kein Gravitationsfeld herrscht. Relativ zu einem Inertialsystem K verhält sich in diesem Raum ein von andern Massen hinlänglich entfernter materieller Punkt beschleunigungsfrei. Führt man aber ein relativ zu K *gleichförmig beschleunigtes* Koordinatensystem K' (gleichförmig beschleunigte Paralleltranslation) ein, so ist K' kein Inertialsystem im Sinne der klassischen Mechanik bzw. der speziellen Relativitätstheorie. Jeder von anderen Massenpunkten hinlänglich entfernte Massenpunkt ist bezüglich K' gleichförmig beschleunigt. Von K aus beurteilt ist natürlich die Beschleunigung des Systems K' die Ursache jener Relativbeschleunigung des Massenpunktes gegen K' ; und es ist im Sinne der klassischen Mechanik, wie sie bisher aufgefasst wurde, diese Interpretation die einzig mögliche. Wir können aber auch K' als berechtigtes („ruhendes“) System auffassen und die Beschleunigung der Massen relativ zu K' auf ein den ganzen betrachteten Raum erfüllendes statisches Gravitationsfeld zurückführen. Diese Interpretation ist wieder möglich auf Grund der Erfahrungsthatte, dass in einem Gravitationsfeld (wie relativ zu K') alle Körper in gleicher Weise fallen.

Kennen wir die Naturgesetze in bezug auf das (gravitationsfreie) System K , so können wir durch blosse Umrechnung die in bezug auf herrschenden Gesetze kennen lernen, d. h. wir lernen auf rein spekulativem Wege die physikalischen Eigenschaften des Gravitationsfeldes kennen. Dabei liegt die Hypothese zugrunde, dass das Relativitätsprinzip auch für relativ zu einander beschleunigte Koordinatensysteme gelte, und dass die relativ zu K' zu herrschenden physikalischen Eigenschaften des Raumes einem Gravitationsfeld völlig gleichwertig seien (Äquivalenz-Hypothese).“ (CPAE 7; 31; p. 265-266)

²⁹³ An dieser Stelle fügt Einstein in einer Fußnote hinzu: „Bei der Überlegung ist natürlich vom Luftwiderstande abgesehen.“ (CPAE 7; 31; p. 280, fn. 37)

Das Gedankenexperiment bezeichnet er als „[den] glücklichste[n] Gedanke[n] meines Lebens“ (CPAE 7; 31; p. 265); und zwar geht es dabei um einen „*frei herabfallenden Beobachter*“ (CPAE 7; 31; p. 265) und die daraus sich ergebenden Folgerungen. In aller Deutlichkeit erklärt er, wie wichtig dieses Gedankenexperiment war für den Ansatz der Allgemeinen Relativitätstheorie:

„Die Erfahrungsthat­sa­che von der Un­ab­hän­gig­keit der Fall­be­schleu­ni­gung vom Ma­te­ri­al ist also ein mäch­ti­ges Ar­gu­ment da­für, dass das Re­la­ti­vi­täts­pos­tu­lat auf re­la­tiv zu einan­der un­gleich­för­mig be­we­gte Ko­or­di­na­ten­sys­te­me aus­zu­dehnen ist.“
(CPAE 7; 31; p. 265)

Denn, indem man dieses Gedankenexperiment für unterschiedliche Fälle anwendet, kann man auf „spekulativem Wege“ (CPAE 7; 31; p. 266) zu verschiedenen Voraussagen gelangen. (Wir werden in den nächsten Abschnitten noch darauf eingehen.)

Es stellt sich natürlich die Frage, wie er genau zu diesem Gedanken kam. Nach seiner Äußerung in der Kyoto-Rede „saß“ er „im Berner Patentamt in einem Sessel, als“ ihm „plötzlich ein Gedanke kam“. Da Einstein jedoch selten seine Quellen angibt, könnte es ebenso sein, dass er zu diesem Gedankenexperiment von jemand anderem inspiriert wurde. Gleich auf der nächsten Seite stellt er fest, dass er das Äquivalenzprinzip vor allem mit Mach nicht in Verbindung bringt:

„(16) *Allgemeine Gründe für ein allgemeines Relativitätspostulat.* Die klassische Mechanik und die spezielle Relativitätstheorie kennen berechnete Koordinatensysteme (Inertialsysteme) und nicht berechnete Koordinatensysteme. Relativ zu ersteren sollen die Naturgesetze (z. B. das Trägheitsgesetz und der Satz von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit) gelten, relativ zu letzteren nicht. Vergebens fragt man nach dem objektiven Grund für diese Verschiedenwertigkeit der Systeme; man ist genötigt, sie durch eine selbständige, höchst sonderbare Eigenschaft des Raum-Zeit-Kontinuums zu erklären. Nur ungern gab sich Newton mit dieser Auffassung („absoluter Raum“) zufrieden, glaubte aber im Vorhandensein der Zentrifugalkraft einen objektiven Beweis für dieselbe in der Hand zu haben.

Aber E. Mach erkannte als erster die Schwäche dieses Argumentes. Vielleicht bestimmte nicht eine physikalische Qualität des Raumes das Trägheits-Verhalten der Körper; es war doch auch möglich, dass die Trägheit nicht der (begrifflich inhaltslosen) Beschleunigung *gegen den Raum* sondern der Beschleunigung *gegen die übrigen ponderablen Körper der Welt* entgegenwirkte. Eine solche Hypothese erschien Mach befriedigender als die alte Auffassung der Trägheit, weil sie dem Raum keine <selbständigen> mechanisch bestimmenden Eigenschaften zuschrieb, sondern alle Koordinatensysteme als prinzipiell gleichwertig erscheinen liess. Nach dieser Auffassung war die Trägheit ebenso eine

Wechselwirkung zwischen den Körpern wie die Newton'sche Gravitation. Freilich wies dieser Gedanke noch keinen Weg für die exakte (quantitative) Behandlung des Problems, und auch die Wesensgleichheit von Trägheit und Schwere, welche vorhin dargelegt wurde (Äquivalenzhypothese) blieb Mach verborgen. Aber er war (nach Newton) der erste, welcher die erkenntnistheoretischen Schwächen der klassischen Mechanik lebhaft empfand und klar beleuchtete.“ (CPAE 7; 31; p. 267-268)

Nach Einsteins Erläuterung blieb Mach das Äquivalenzprinzip bzw. die Äquivalenzhypothese verborgen. Mach machte (bildlich gesprochen) Newton bei der Interpretation des Eimer-Experiments darauf aufmerksam, dass er dabei die restlichen Massen im Universum vernachlässigte (Mach, 2012, pp. 260-261). Nach Machs Ansicht wäre es theoretisch, möglich die Trägheitsbewegung (und somit auch die Trägheitskräfte) eines Körpers auf die (gravitative) Wechselwirkung zu anderen Körpern zu definieren und somit nicht zu einem absoluten Raum – was man heute als Machsches Prinzip bezeichnet. (Beispielsweise kann man beim Eimer-Experiment die Anziehungskraft der Erde nicht vernachlässigen, da sonst das Wasser erst gar nicht im Eimer bleiben würde. Wenn man demnach nicht einmal die Erde vernachlässigen darf, weshalb sollte man dann die gesamte Masse im Universum vernachlässigen dürfen?) Eine solche Argumentation hat vor allem dann Gewicht, wenn man von einer Äquivalenz von träger und schwerer Masse ausgeht. Denn gerade aufgrund des Äquivalenzprinzips darf man hypothetisch die restlichen (schweren) Massen im Universum gar nicht vernachlässigen, wenn man das Verhalten von träger Masse bespricht. Einstein hätte das eigentlich auffallen müssen – zumindest erkannte es ein guter Freund von Einstein, nämlich der Physiker und Philosoph Hans Reichenbach. Er schreibt in seinem Buch *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre* (Reichenbach, 1928):

„Die Äquivalenz von Trägheit und Schwere ist die strenge Formulierung des Machschen Prinzips im engeren Sinne. Sie bewirkt, daß jede in beschleunigten Systemen auftretende Trägheitserscheinung auch erklärt werden kann als Gravitationswirkung, und darum nicht als Kennzeichen des Bewegungszustandes verwandt werden kann. Man kann das Äquivalenz-Prinzip deshalb auch umgekehrt benutzen, um ein Gravitationsfeld, das wir in der klassischen Mechanik als schlechthin gegeben ansehen, *wegzutransformieren*. Ein Fahrstuhl, der mit Fallgeschwindigkeit herunterfällt, ist ein System, in dem die Gravitation der Erde wegtransformiert ist; in ihm würde jeder angestoßene Körper sich gradlinig und kräftefrei im Sinne des Trägheitsgesetzes bewegen.

Freilich gilt diese Wegtransformierbarkeit nur mit einer wesentlichen Einschränkung. Im allgemeinen läßt sich ein Gravitationsfeld nur infinitesimal wegtransformieren.“

(Reichenbach, 1928, p. 260)

Weshalb Einstein die „Äquivalenzhypothese“ (CPAE 7; 31; p. 268) mit Mach nicht in Verbindung bringen möchte, dürfte einen anderen Grund gehabt haben. Er beendet nämlich seine Arbeit mit den Worten:

„Der im § 11 abgeleitete Satz, daß einer Energiemenge E eine Masse von der Größe $\frac{E}{c^2}$ zukomme, gilt also, falls die im § 17 eingeführte Voraussetzung zutrifft, nicht nur für die *träge*, sondern auch für die *gravitierende* Masse.“ (Einstein, 1907j, p. 462)

Sehen wir uns die beiden Paragraphen (§ 11 und § 17) daher etwas genauer an. Im „§ 11. Über die Abhängigkeit der Masse von der Energie.“ (Einstein, 1907j, pp. 440-444) geht es, auf den Punkt gebracht, um die Äquivalenz von Energie und Masse bzw. um die weltberühmte Formel: $E = m \cdot c^2$ (siehe dazu (Einstein, 1907j, p. 442)). Wenn man also die Masse über die Energie definieren kann, dann kommt der Klassifizierung von *träger* oder *schwerer* Masse keine primäre Rolle mehr zu:

„Im vorhergehenden ist stillschweigend vorausgesetzt, daß eine derartige Massenänderung mit dem zur Messung von Massen gewöhnlich benutzten Instrument, der Waage, gemessen werden könne, daß also die Beziehung

$$M = \mu + \frac{E_0}{c^2}$$

nicht nur für die *träge* Masse, sondern auch für die *gravitierende* Masse gelte, oder mit anderen Worten, daß *Trägheit* und *Schwere* eines Systems unter allen Umständen genau proportional seien. Wir hätten also auch z. B. anzunehmen, daß in einem Hohlraum eingeschlossene Strahlung nicht nur *Trägheit*, sondern auch *Gewicht* besitze. Jene Proportionalität zwischen *träger* und *schwerer* Masse gilt aber ausnahmslos für alle Körper mit der bisher erreichten Genauigkeit, so daß wir bis zum Beweise des Gegenteils die Allgemeingültigkeit annehmen müssen. Wir werden ferner im letzten Abschnitt dieser Abhandlung ein neues, die Annahme stützendes Argument finden.“

(Einstein, 1907j, pp. 443-444)

Einstein verweist also bereits an dieser Stelle auf ein weiteres, stützendes Argument für das Äquivalenzprinzip im letzten Abschnitt – gemeint ist das Kapitel „V. Relativitätsprinzip und Gravitation.“ (Einstein, 1907j, pp. 454-562) und vor allem der erste Paragraph in diesem Kapitel: „§ 17. Beschleunigtes Bezugssystem und Gravitationsfeld.“ (Einstein, 1907j, p. 454). Wenn für Einstein vor allem das Energiekonzept zählt, dann ist es auf Grund des Äquivalenzprinzips in gewisser Weise eine Sache der Perspektive bzw. des Bezugssystems, ob nun gleichförmig beschleunigte Bewegung oder das homogene Schwerfeld betrachtet

werden usw. Zusammengefasst gibt es zwei mögliche Gründe, weshalb Einstein Mach mit dem Äquivalenzprinzip nicht in Verbindung bringen wollte:

1.) Höchstwahrscheinlich wurde er vor allem durch Wiens (Wien, 1898, p. XVI) und Plancks (Planck, 1908, p. 32) Schriften motiviert, sich genauer mit dem Äquivalenzprinzip auseinanderzusetzen.

2.) In Machs Arbeiten fehlt ein mathematisch-physikalisches Konzept, welche die Äquivalenz von Energie und Masse ($E = m \cdot c^2$) manifestiert. Infolgedessen sah er diese Errungenschaft wohl als seine eigene an.²⁹⁴

Das schließt jedoch nicht zwingend aus, dass er sich zu einem Gedankenexperiment womöglich von Mach inspirieren ließ. Jedenfalls ist ein ähnliches Gedankenexperiment in Machs *Mechanik* zu finden:

„Wenn wir selbst von einer Höhe herabspringen oder fallen, haben wir ein eigentümliches Gefühl, welches durch die Aufhebung des Gewichtsdrucks der Körperteile aufeinander, des Blutes usw. bedingt sein muss. Ein ähnliches Gefühl, als ob der Boden unter uns versinken würde, müssten wir auf einem kleinern Weltkörper haben, wenn wir plötzlich dorthin versetzt würden. Das Gefühl des fortwährenden Erhebens, wie bei einem Erdbeben, würde sich auf einem größern Weltkörper einstellen.“ (Mach, 2012, p. 234)

Das Gedankenexperiment von Mach kommentiert Wolters mit den Worten: „Mit diesen Überlegungen steuert Mach auf die Gleichheit von träger und schwerer Masse zu, welche einen Eckstein der allgemeinen Relativitätstheorie bildet.“ (Mach, 2012, pp. 234-235, fn. 186) Eine eingehende Untersuchung kann der Leser in (Wolters, 1987, pp. 63-65) finden. Dass es bei diesem Gedankenexperiment Mach tatsächlich um die Äquivalenz von träger und schwerer Masse geht, wird ersichtlich, da er eine Seite davor frei fallende Körper bespricht auf welche Trägheitskräfte ausgeübt werden – dabei spricht er von einer „Relativbeschleunigung“ (Mach, 2012, p. 233)²⁹⁵ usw. Nach dem erläuterten überrascht es daher nicht, dass der Gedanke nahe liegt, dass Einstein zu seinem Gedankenexperiment wohl von jenem Machs inspiriert wurde. Beispielsweise leitet Michael Heller seine Arbeit „The happiest thought of Einstein’s life“ (Heller, 1991) mit folgenden Worten ein:

²⁹⁴ Siehe dazu auch (Einstein, 1983, p. 24).

²⁹⁵ Für ein besser Verständnis der Seiten (Mach, 2012, pp. 233-234) sei der Leser auf (Wolters, 1987, pp. 63-65) (Reichenbach, 1928, pp. 257-262) hingewiesen.

„It is a commonly told story that Einstein formulated his famous principle of equivalence when thinking about what happens in a freely falling elevator, and that it was an original idea of his genius distinguished by the rare capability to see deep problems in the most ordinary things. In my reading of Einstein's and Ernst Mach's works I have discovered, with great surprise, that it was not a physicist in an elevator which led to the principle of equivalence but rather somebody falling from a roof; moreover, the idea behind the principle was not invented by Einstein himself but rather read by him from the book by Mach (1974) entitled *The Science of Mechanics*. The influence this book had on young Einstein is very well known. However, since I have never encountered any account of this particular dependence of Einstein upon Mach, it would be worthwhile to share my 'discovery' with others. I intend to do this in the present note.“ (Heller, 1991, p. 177)²⁹⁶

Ebenso untersuchte auch Richard Staley dieses Gedankenexperiment von Mach und beendet seine Arbeit „Ernst Mach on bodies and buckets“ (Staley, 2013) mit den folgenden Worten:

„Mach's work provided central elements for Einstein's thought and helped set the form in which it arrived. Although Einstein never recalled his reading of Mach when describing that idea – the origins of the 'equivalence principle,' the equivalence of a gravitational field and a corresponding acceleration – his thought experiment is clearly a variation on Mach's, which was based on extensive empirical studies. So before pointing to the elevator and spacecraft to which Einstein and others allude in outlining the equivalence principle, we should recall the heaving ship, mineshaft elevator, and loaded table that Mach considered in the course of his physiological studies on motion.“ (Staley, 2013, p. 47)

Mehr darüber kann man in Staley's Artikel „Revisiting Einstein's Happiest Thought. From the Physiology of Perception to Experimental Propositions and Principles in the History of Relativity“ (Staley, 2019, pp. 360-363) in Erfahrung bringen.

Zusammengefasst haben sind wir in diesem Abschnitt zwei Fragestellungen eine einfache Antwort zu geben versucht:

1.) Weshalb hat Einstein Ernst Mach nicht mit dem Äquivalenzprinzip in Verbindung gebracht? Die Antwort auf diese Frage ist relativ einfach: Bei Mach hat, nach Einstein, das mathematisch-physikalische Konzept der Äquivalenz von Masse und Energie gefehlt oder, mit anderen Worten, die Formel: $E = m \cdot c^2$. Möchte man für das Äquivalenzprinzip (der trägen und der schweren Masse) eine Allgemeingültigkeit für alle Gebiete der Physik manifestieren, dann wäre eine Formel jedoch Voraussetzung gewesen.

²⁹⁶ Unter anderem macht auch er auf die Kyoto-Rede aufmerksam (Heller, 1991, p. 178).

2.) Wurde Einstein zu seinem Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip von einem Gedankenexperiment von Mach inspiriert? Diese Frage lässt sich anhand der Quellen nicht mit Sicherheit beantworten. Es spricht jedoch nichts dagegen, wissenschaftsgeschichtlich den Standpunkt zu vertreten – siehe (Wolters, 1987) (Heller, 1991) (Staley, 2019) –, dass er von Mach dazu inspiriert wurde. Dass das Äquivalenzprinzip für das Machsche Prinzip und somit für Mach eine wichtige Rolle spielte, wurde allgemein bereits sehr früh erkannt (Reichenbach, 1928, p. 260).

Wie wir gesehen haben, hat Einstein selbst mehrmals darauf hingewiesen, welche wichtige Rolle diesem Gedankenexperiment zukam. Bei richtiger Anwendung wird es zu einem mächtigen Instrument, mit welchem man physikalische Voraussagen machen kann, die experimentell überprüft werden können – dies wollen wir sogleich besprechen.

4.4.5.2.2. Gedankenexperiment: Lichtablenkung am Gravitationsfeld²⁹⁷

Einstein betont in seiner Schrift „Gedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt“ (1920):

„Kennen wir die Naturgesetze inbezug auf das (gravitationsfreie) System K , so können wir durch blosser Umrechnung die inbezug auf K' herrschenden Gesetze kennen lernen, d. h. wir lernen auf rein spekulativem Wege die physikalischen Eigenschaften des Gravitationsfeldes kennen.“ (CPAE 7; 31; p. 266)

Anhand von Gedankenexperimenten zum Äquivalenzprinzip kann man somit auf „spekulativem Wege“ zu „physikalischen Eigenschaften des Gravitationsfeldes“ gelangen und Voraussagen machen. Welche diese sind, erläutert Einstein einige Seiten weiter:

„(17) *Einige Folgerungen aus der Aequivalenz-Hypothese.* Wir betrachten ein raumzeitliches Gebiet, in welchem bei passend gewähltem Koordinatensystem K (relativ zu letzterem) ein Gravitationsfeld nicht vorhanden sei; K ist also ein Inertialsystem im Sinne der klassischen Mechanik. Die inbezug auf K herrschenden Gesetze, z. B. das Gesetz der Ausbreitung des Lichtes, sind also als bekannt anzusehen. Wir führen nun neben K ein zweites Koordinatensystem K' ein, welches relativ zu K beschleunigt bewegt sei. Relativ zu K' herrscht dann nach der Aequivalenzhypothese ein Gravitationsfeld. Da man durch blosser Umrechnung von K auf K' den Verlauf der Naturvorgänge inbezug auf K' ermitteln kann, so erfährt man durch eine solche Betrachtung, welchen Einfluss das inbezug auf K' herrschende Gravitationsfeld auf die ins Auge gefassten Naturvorgänge hat.

Inbezug auf K pflanzt sich ein Vakuum-Lichtstrahl gradlinig und gleichförmig fort mit der Geschwindigkeit c . Eine einfache geometrische Überlegung zeigt, dass derselbe Lichtstrahl inbezug auf K' eine Krümmung besitzt, sobald die Richtung des Lichtstrahles mit der Richtung der Beschleunigung des Systems einen Winkel bildet. Die Schwerkraft biegt also den Lichtstrahl, wie wenn das Licht ein geschleudertes schwerer Körper wäre.

Diese Konsequenz ist in doppelter Beziehung von grosser Bedeutung. Erstens nämlich liefert sie ein der Beobachtung zugängliches Kriterium der Theorie. Es ergibt sich nämlich durch einfache Umrechnung, dass ein an einem Himmelskörper von Sonnengrösse vorbeistreichender Lichtstrahl eine Ablenkung von der Grössenordnung einer Bogensekunde erfahren muss. Dies Ergebnis ist es ja, welches die beiden englischen Expeditionen im verflossenen Jahre bestätigt haben. Doch sei hier darauf hingewiesen, dass diese einfache Betrachtung *numerisch* nur die Hälfte des tatsächlichen Wertes der Ablenkung liefert.“

(CPAE 7; 31; p. 268-269)

Bei diesem Beispiel bzw. Gedankenexperiment geht es also um die berühmte Lichtablenkung im Gravitationsfeld. Dabei ist K das gleichmäßig beschleunigte System und K' befindet sich an einem Gravitationsfeld. Im Jahre 1919 wurden Einsteins theoretische Voraussagen experimentell überprüft und machten ihn weltberühmt. Er betont, dass die konkrete

²⁹⁷ Bei den Erklärungen und Abbildungen orientieren wir uns in diesem Abschnitt an (Reichenbach, 1928, pp. 261-264) und (Tipler & Llewellyn, 2010, p. 124).

Rechnung dieses Beispiels nicht einfach war, denn diese gelang ihm erst 1915 – siehe dazu (CPAE 7; 31; p. 281, fn. 43). Doch die Überlegung, dass das Licht abgelenkt werden müsste, hatte er bereits 1907 – wir wollen daher versuchen zu verstehen, wie er allgemein zu dieser Voraussage gelangen konnte.

Nach der klassischen Physik gibt es allgemein keine masselosen Teilchen. Nach der Relativitätstheorie sind hingegen Lichtteilchen masselos. Diese werden dem Äquivalenzprinzip zufolge durch die Gravitationskraft abgelenkt. In jenem Kontext kann uns das Gedankenexperiment von Einstein weiterhelfen.

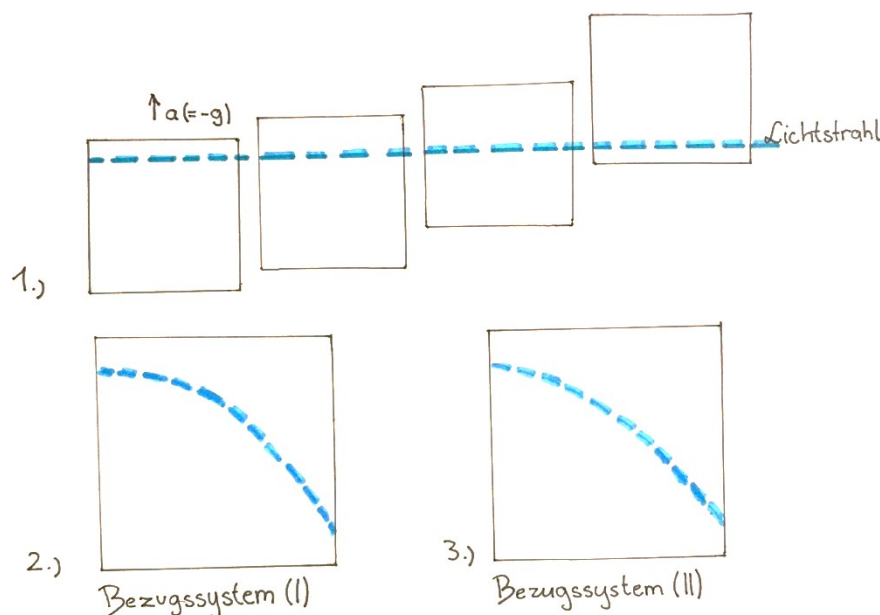


Abbildung 10: Das Bezugssystem (I) bzw. K wird mit $a=-g$ beschleunigt (1. und 2.) und das Bezugssystem (II) bzw. K' ruht im Gravitationsfeld der Erde (3.). Siehe dazu auch (Reichenbach, 1928, p. 263: Fig. 42) und (Tipler & Llewellyn, 2010, p. 124: Abb.2.17).

Nehmen wir zuerst die Perspektive eines außenstehenden Beobachters an. Denken wir an einen Lichtstrahl, der sich geradlinig in einem (nach oben) gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem K ausbreitet (siehe Abb. 10, 1.). Wir können uns dabei auch dessen Position in gleichen zeitlichen Abständen (in t_1, t_2, t_3, t_4) vorstellen. Aus der Perspektive innerhalb des Bezugssystems K erscheint die Bahn des Lichtstrahls jedoch als eine Parabel, die wir auch von Wurfparabeln kennen – das Licht scheint daher nach unten abgelenkt zu sein (siehe Abb. 10, 2.). Aufgrund des Äquivalenzprinzips können wir schlussfolgern, dass das Licht ebenso im Gravitationsfeld beschleunigt und somit abgelenkt wird (siehe Abb. 10, 3.) – also im Bezugssystem K' . Vergleiche hierzu die Stelle, an der Einstein zum ersten Mal Erläuterungen

zur Lichtablenkung im Abschnitt „§ 20. Einfluß der Schwere auf die elektromagnetischen Vorgänge.“ (Einstein, 1907j, p. 461) angibt.

Hat man also durch das Gedankenexperiment das Äquivalenzprinzip verinnerlicht, so ist es relativ einfach eine Lichtablenkung vorauszusagen. Seine Überlegung, dass das Licht eines „Fixsternes“ (Einstein, 1911h, p. 898) an der Sonne eine Ablenkung²⁹⁸ erfährt und experimentell bei der Sonnenfinsternis überprüft werden könnte (Einstein, 1911h, pp. 906-908), beschreibt er zum ersten Mal als Prager Professor in seiner Schrift „Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes“ (Einstein, 1911h):²⁹⁹

„[...] Da die Fixsterne der der Sonne zugewandten Himmelspartien bei totalen Sonnenfinsternissen sichtbar werden, ist diese Konsequenz der Theorie mit der Erfahrung vergleichbar. [...] Es wäre dringend zu wünschen, daß sich Astronomen der hier aufgerollten Frage annähmen, auch wenn die im vorigen gegebenen Überlegungen ungenügend fundiert oder gar abenteuerlich erscheinen sollten. Denn abgesehen von jeder Theorie muß man sich fragen, ob mit den heutigen Mitteln ein Einfluß der Gravitationsfelder auf die Ausbreitung des Lichtes sich konstatieren läßt.

Prag, Juni 1911.“ (Einstein, 1911h, p. 908)

4.4.5.2.3. Gedankenexperiment: Gravitationsbedingte Rotverschiebung³⁰⁰

Orientieren wir uns in Gedanken wieder an zwei Bezugssysteme wie in der Abb. 11. Das Bezugssystem K steht in großer Entfernung zu allen Massen (im Universum) und ist mit $a = -g$ beschleunigt. (Wir können hierbei an eine Rakete oder ähnliches denken.) Das Bezugssystem K' ruht dagegen im Gravitationsfeld der Erde.

²⁹⁸ Die Berechnung ergibt eine Lichtablenkung von 0,83 Bogensekunden (Einstein, 1911h, p. 908). Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie ist sie jedoch doppelt so groß – siehe dazu (CPAE 3; 23; p. 497, fn. 11).

²⁹⁹ Siehe dazu auch Einsteins Berliner Vortrag „Allgemeine Relativität Sommersemester 1919. Berlin“ (CPAE 7; 19; p. 148)

³⁰⁰ Bei den Erklärungen und Abbildungen orientieren wir uns in diesem Abschnitt an (Tipler & Llewellyn, 2010, pp. 128-129). Die Berechnungen gelten näherungsweise, wenn $g \cdot h \ll c^2$, woraus ebenso $v \ll c$ folgt.

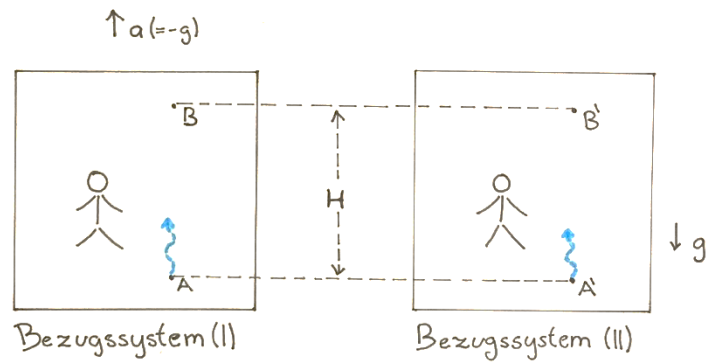


Abbildung 11: Das Bezugssystem (I) bzw. K wird mit $a=-g$ beschleunigt und das Bezugssystem (II) bzw. K' ruht im Gravitationsfeld der Erde. Siehe dazu auch (Reichenbach, 1928, p. 265: Fig. 44) und (Tipler & Llewellyn, 2010, p. 129: Abb. 2.21))

Nehmen wir an, dass wir zwei (identische) Lichtquellen haben: A und A'. Die Photonen werden dort jeweils ausgesandt und gelangen zu den Detektoren: B und B'. Das Bezugssystem K beschleunigt bei $t = 0$. Zur selben Zeit ($t = 0$) sendet A ein Photon mit der Frequenz f_1 . In der Zeit $t = \frac{H}{c}$, wo das Licht die Strecke von A nach B zurücklegt³⁰¹, hat B bereits die Geschwindigkeit $v = a \cdot t = \frac{g \cdot H}{c}$ erreichen können.³⁰² Der Detektor B misst daher aufgrund des Doppler-Effekts eine Rotverschiebung des Lichtes. Die Frequenzänderung kann in guter Näherung – für den Fall, dass $v \ll c$ – angegeben werden:³⁰³

$$\frac{f_1 - f_2}{f_1} = \frac{\Delta f}{f_1} \approx \beta = \frac{v}{c} \quad / \quad v = \frac{g \cdot H}{c}$$

$$\frac{\Delta f}{f_1} \approx \frac{g \cdot H}{c \cdot c} = \frac{g \cdot H}{c^2}$$

³⁰¹ Eine kurze physikalische Erklärung:
Es gilt für die Berechnung der Strecke

$$s = v \cdot t$$

Setzen wir nun unsere Werte $s = H$, $v = c$ ein, dann erhalten wir

$$H = c \cdot t \quad / \quad \div c$$

$$\frac{H}{c} = t.$$

³⁰² Eine kurze physikalische Erklärung:
Es gilt für die Berechnung der Geschwindigkeit

$$v = a \cdot t$$

Setzen wir nun unsere Werte $t = \frac{H}{c}$, $a = g$ ein, dann erhalten wir

$$v = \frac{g \cdot H}{c}.$$

³⁰³ Dabei ist f_2 , die Frequenz des Lichtes, welche bei B' detektiert wird.

Wir sehen an dieser Stelle, dass der Doppler-Effekt nicht nur bei der Entstehungsgeschichte der SRT, sondern auch bei jener der ART eine bedeutende Rolle gespielt hat – siehe dazu (Einstein, 1911h, p. 904).³⁰⁴ Darauf hat bereits Reichenbach hingewiesen (Reichenbach, 1928, pp. 265-267).³⁰⁵

Betrachten wir die Gleichung etwas genauer, dann erkennen wir, dass die rechte Seite $\left(\frac{g \cdot H}{c^2}\right)$ dem Gravitationspotential zwischen A und B entspricht: $\Delta\phi = g \cdot H$, wo im Nenner noch ein c^2 hinzukommt. Da das Äquivalenzprinzip gilt, muss also auch im Bezugssystem K' aufgrund des Gravitationspotentials eine Rotverschiebung festgestellt werden, die man durch die gravitative Zeitveränderung im homogenen Schwerfeld erklären kann. Und zwar kommen wir zu der Lösung:

$$\frac{f_1 - f_2}{f_1} = \frac{g \cdot H}{c^2}$$

oder

$$\frac{f_2}{f_1} = 1 - \frac{g \cdot H}{c^2} \quad / \cdot f_1$$

$$f_2 = f_1 \cdot \left(1 - \frac{g \cdot H}{c^2}\right)$$

(Im Falle einer Blauverschiebung wären wir zu dem Ergebnis $f_2 = f_1 \cdot \left(1 + \frac{g \cdot H}{c^2}\right)$ gekommen.)

Zudem kennen wir den physikalischen Zusammenhang zwischen der Schwingungsdauer T und der Frequenz f : $T = \frac{1}{f}$. Setzen wir nun diese Beziehung ein, erhalten wir

$$f_2 = f_1 \cdot \left(1 - \frac{g \cdot H}{c^2}\right) \quad / T_1 = \frac{1}{f_1} \quad T_2 = \frac{1}{f_2}$$

$$\frac{1}{T_2} = \frac{\left(1 - \frac{g \cdot H}{c^2}\right)}{T_1} \quad / \cdot T_1 \quad / \cdot T_2$$

³⁰⁴ Siehe dazu auch Abschnitt „4.4.5.3. Thema III: Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]“.

³⁰⁵ Reichenbach erkennt aber nicht ganz, dass der relativistische Doppler-Effekt bereits eine Zeitdilatation voraussetzt. Er geht vom klassischen Doppler-Effekt aus – siehe dazu (Reichenbach, 1928, p. 267).

$$T_1 = T_2 \cdot \left(1 - \frac{g \cdot H}{c^2}\right)$$

(Im Falle einer Blauverschiebung wären wir zu $T_1 = T_2 \cdot \left(1 + \frac{g \cdot H}{c^2}\right)$ gelangt.)

Vergleiche unser Ergebnis mit Einsteins Erläuterungen im Kapitel „§ 3. Zeit und Lichtgeschwindigkeit im Schwerfeld“ seiner Arbeit „Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes“ (Einstein, 1911h, pp. 903-906) – diesen Zugang wählte Einstein auch für seinen Vortrag „Allgemeine Relativität Sommersemester 1919. Berlin“ (CPAE 7; 19; p. 147), den er Mai bis Juni 1919 hielt. Reichenbach war beim Vortrag als Student dabei und hat seine Notizen dazu aufgehoben.³⁰⁶

(Im Anschluss können unsere Ergebnisse auch mit dem Abschnitt „§ 18. Raum und Zeit in einem gleichförmig beschleunigten Bezugssystem.“ (Einstein, 1907j, p. 457), und „§ 19. Einfluß des Gravitationsfeldes auf Uhren.“ (Einstein, 1907j, pp. 480-481) verglichen werden.)

Wir können sehen, dass daraus $T_1 < T_2$ folgt, oder mit anderen Worten: Die Zeit an der Lichtquelle (A) vergeht langsamer als beim Detektor (B).³⁰⁷

Allgemein ist zudem aus Einsteins Artikel „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) zu erkennen, dass die Neuinterpretation der „Ortszeit“ von Lorentz den Schlüssel zur Speziellen Relativitätstheorie darstellte – siehe dazu (Einstein, 1907j, p. 413).³⁰⁸ In einer Fußnote wird in *The Collected Papers of Albert Einstein* erklärt:

„Lorentz 1895, pp. 49-50, defines the local time t' for a frame of reference moving through the ether by the equation:

$$t' = t - p_x/V^2 x - p_y/V^2 y - p_z/V^2 z$$

³⁰⁶ Siehe dazu (CPAE 7; 19; p. 177, fn. 1, 2, 5, 6, 17, 21, 31).

³⁰⁷ Von hier aus ist es bis zum Verständnis der gravitativen Längenänderung im homogenen Schwerfeld nicht weit:

$$L_1 = L_2 \cdot \left(1 - \frac{g \cdot H}{c^2}\right)$$

³⁰⁸ Siehe dazu die Abschnitte „4.4.2.3. Thema III: Die Lösung des Widerspruchs (durch die Neudefinition der Zeit) [26]-[39]“ und „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“.

, where t is the (universal) time, $\mathbf{p}$ is the velocity vector of the moving frame with respect to the ether frame, and $\mathbf{r} = (x, y, z)$ is the position vector with respect to the ether frame of the point at which the local time is calculated. *Lorentz 1904a* defines the local time by an expression that is formally equivalent to Einstein's expression for the time relative to the moving frame of reference. *Cohn 1904b*, p. 1408, expresses a view similar to Einstein's on the role of the local time." (CPAE 2; 47; p. 485, fn. 6)

Dass Cohns Arbeiten für Einstein und somit für die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie eine wichtige Rolle spielten, haben wir im Abschnitt „2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“ bereits erläutert. An diese Stelle möchten wir darauf hinweisen, dass Einstein die „Ortszeit“ (Einstein, 1907j, p. 456) ebenso im Zusammenhang der, noch im Entwicklungsprozess befindlichen, Allgemeinen Relativitätstheorie bespricht.

Wie sehr das Machsche Prinzip bei all diesen Gedanken eine Rolle spielte, lässt sich schwer sagen. Interessant ist, dass Einstein in „Gedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt“ (1920) ein weiteres Gedankenexperiment zur gravitationsbedingten Rotverschiebung bzw. zur gravitativen Zeitveränderung im Schwerefeld erwähnt, welches das Machsche Prinzip vorauszusetzen scheint:

„(18) Einfluss des Gravitationsfeldes auf den Gang von Uhren. Rotverschiebung der Spektrallinien. Nach der allgemeinen Relativitätstheorie ist die Gleichwertigkeit der Koordinatensysteme nicht auf ungleichförmige Paralleltranslation (drehungsfreie Bewegung) der Koordinatensysteme beschränkt. Soll die Theorie den erwähnten erkenntnistheoretischen Mangel der klassischen Mechanik beseitigen, so muss jedes Koordinatensystem, welches auch sein Bewegungszustand gegen andere sein mag, als ein ‚ruhendes‘ aufgefasst werden können; d. h. die allgemeinen Naturgesetze müssen relativ zu allen wie immer bewegten Systemen durch dieselben Gleichungen ausgedrückt sein.

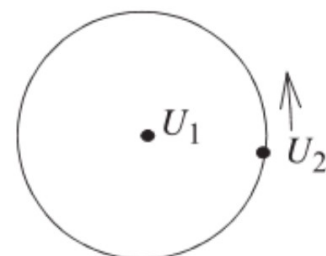


Figure 7: Quelle:
<https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol7-doc/318> [Zugriff am 22. Mai 2020].

Wir gehen nun wieder von einem Gebiete aus, welches inbezug auf ein Koordinatensystem K ohne Gravitationsfeld sei. K ist also ein ‚Inertialsystem‘ im Sinne der klassischen Mechanik. Wir führen nun ein zweites Koordinatensystem K' ein, das gegenüber K gleichförmig rotiert; wir versinnlichen dies System als eine relativ zu K gleichförmig rotierende Kreisscheibe (Vgl. Figur). Wir denken uns nun von zwei gleich beschaffenen Uhren die eine (U_1) im Zentrum, die andere (U_2) an der Peripherie der Scheibe angebracht, derart, dass sie die Rotationsbewegung mitmachen. Beurteilt man den Gang dieser Uhren von K aus (d. h. vom Standpunkt des nicht rotierenden Systems), so ist nach einem Ergebnis der speziellen Relativitätstheorie, die ja inbezug auf K gilt, klar, dass U_2 langsamer läuft als U_1 . Denn U_2 besitzt gegen K (gegen das Papier) eine Geschwindigkeit, U_1 dagegen nicht. Dass U_2

langsamer geht als U_1 müsste auch ein (etwa neben U_1) auf der Scheibe sitzender Beobachter wahrnehmen; U_2 läuft also auch – von K' aus beurteilt – langsamer als U_1 .

Nach der allgemeinen Relativitätstheorie können wir das System K' auch als ‚ruhend‘ ansehen. Dann müssen wir aber das in bezug auf K' herrschende Feld der Zentrifugalkräfte als ein (reales) Gravitationsfeld auffassen, welches auf alle relativ zu K' ruhenden Körper proportional deren Masse einwirkt. (Dabei ist allerdings der Vollständigkeit halber hinzuzufügen, dass dies Gravitationsfeld nicht nur in diesem Zentrifugalfeld besteht, sondern noch andere Komponenten hat, die sich durch ihre Wirkung auf *bewegte* Massen äussern). Von K' aus beurteilt liegen die beiden Uhren in verschiedenen Punkten eines Gravitationsfeldes, und letzteres ist die Ursache dafür, dass die beiden Uhren verschieden schnell gehen. Quantitativ kann man aus diesem Beispiele schliessen, dass die Ganggeschwindigkeit einer und derselben Uhr proportional $1 + \frac{\phi}{c^2}$ ist, wenn ϕ das Potential des Gravitationsfeldes am Orte der Uhr ist.

Es folgt daraus, dass eine an der Oberfläche eines Himmelskörpers befindliche Uhr langsamer läuft als dieselbe Uhr, wenn sie (ruhend) im Weltraume schwebt oder sich an der Oberfläche eines kleineren Weltkörpers befindet. Nun ist jedes System als ‚Uhr‘ zu betrachten, dem vermöge innerer gesetzlich und periodisch verlaufender Vorgänge eine bestimmte Frequenz zukommt, also z. B. ein Atom, welches eine bestimmte Spektrallinie zu emittieren bzw. absorbieren vermag. An der Sonnenoberfläche erzeugte bzw. absorbierte Spektrallinien müssen daher gegenüber von demselben Element auf der Erde erzeugten Spektrallinien eine Verschiebung nach dem Rot aufweisen, welche Verschiebung einem Dopplereffekt von etwa 0,6 km/sek äquivalent ist.“ (CPAE 7; 31; p. 270-271)³⁰⁹

Wenn Machs Gedanken konsequent in der theoretischen Physik behandelt werden, dann dürfen die Gesetze der Physik keine bestimmten Bezugssysteme auszeichnen. Die Scheinkräfte, wie die Zentrifugalkraft in rotierenden Bezugssystemen, können daher ähnlich wie die Gravitationskraft betrachtet werden. In diesem Zusammenhang bespricht Einstein ein rotierendes Bezugssystem. Die Uhr U_1 befindet sich im Zentrum des Systems und bewegt sich nicht und die Uhr U_2 ist am äußeren Rand und rotiert. Aufgrund der Geschwindigkeit muss U_2 verständlicherweise langsamer gehen als die ruhende Uhr U_1 . Das Äquivalenzprinzip erlaubt uns nun die Zentrifugalkraft als eine gravitative Kraft zu interpretieren, wodurch verständlich wird, dass die Zeit langsamer vergeht, je stärker das Gravitationsfeld ist. Diese Überlegungen sind bereits in „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1916e, p. 775) zu finden.

Wir sehen an diesem Beispiel wieder, welch großen Einfluss Machs Gedanken wohl auf Einstein hatten. Ab wann er dieses Gedankenexperiment mit dem rotierenden Bezugssystem anwandte, um seine Konzepte zu erforschen, lässt sich schwer sagen – es dürfte jedoch ab

³⁰⁹ Siehe dazu auch Einsteins Berliner Vortrag „Allgemeine Relativität Sommersemester 1919. Berlin“ (CPAE 7; 19; p. 148) (CPAE 7; 19; p. 178, fn. 6) und (Reichenbach, 1928, pp. 272-277).

September oder Oktober 1909 gewesen sein. Am 29. September 1909 wird Einstein – also etwa ein Monat nach dem Briefwechsel mit Mach³¹⁰ – an Arnold Sommerfeld schreiben:

„Hoch geehrter Herr Prof. Sommerfeld!

Es drängt mich dazu, Ihnen noch besonders zu danken für Ihre grosse Freundlichkeit. Ganz besonders wird es mir unvergesslich bleiben, wie Sie sich Donnerstag Abend meiner angenommen haben. [...]

Die Behandlung des gleichförmig rotierenden starren Körpers scheint mir von grosser Wichtigkeit wegen einer Ausdehnung des Relativitätsprinzips auf gleichförmig rotierende Systeme nach analogen Gedankengängen, wie ich sie im letzten § meiner in der Zeitschr. f. Radioaktiv. publizierten Abhandlung für gleichförmig beschleunigte Translation durchzuführen versucht habe.“ (CPAE 5; 179; p. 210)

Einstein schreibt in seinem Brief zurecht über „analoge Gedankengänge“ – denn im erwähnten letzten Abschnitt werden „gleichförmig rotierende Systemen“ nicht besprochen. Dort bezieht sich Einstein auf das statische Gravitationsfeld, also auf gleichförmig beschleunigte Bewegung. Was Einstein mit „Donnerstag Abend“ gemeint haben könnte, wird in der Fußnote (1) in *The Collected Papers of Albert Einstein* erläutert:

„Einstein delivered a lecture to the meeting of the Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte in Salzburg on Tuesday, 21 September. As a ‘guest of honor’ (‘Ehrengast’) of the Deutsche Physikalische Gesellschaft [...], Einstein may have been asked to attend a business meeting of the scientific commission of the GDNA, which took place the evening of Thursday, 23 September [...].“ (CPAE 5; 179; p. 210, fn. 1)

Ebenfalls aus einer weiteren Fußnote (5) erfahren wir, dass bei diesem Treffen in Salzburg über rotierende Systeme diskutiert wurde:

„At the Salzburg meeting Max Born had presented a paper on rigid motion in special relativity [...], on which Sommerfeld had commented in the discussion following the paper. Einstein and Born had discussed the subject and had discovered that setting a rigid disk into rotation would give rise to a paradox: the rim becomes Lorentz-contracted, whereas the radius remains invariant [...]. The existence of this paradox was first pointed out in print by Paul Ehrenfest (1880-1933) in a paper that was received on the date of this letter (see Ehrenfest 1909). See also Stachel 1980 for a historical discussion of Einstein’s treatment of the rigidly rotating disk.“ (CPAE 5; 179; p. 211, fn. 5)

Über die Relativität der Rotation dürfte Einstein auch mit seinem Freund und Nachbar (in Zürich) Friedrich Adler gesprochen haben. Dieser war von Mach stark beeinflusst und stand

³¹⁰ Einsteins erster Brief an Mach ist auf den 9. August 1909 (Wolters, 1987, p. 149) und seine Postkarte (ebenso an Mach) auf den 17. August 1909 datiert (Wolters, 1987, p. 150).

mit diesem auch seit 1903 in einem stetigen Briefwechsel³¹¹. In einem Brief an seine Eltern (am 28. Oktober 1909) berichtet F. Adler:

„Nächste Woche habe ich noch dazu einen Vortrag in der physikalischen Gesellschaft über Planck.

Mit Einstein, der über uns wohnt stehen wir sehr gut, und wie das schon so geht, von allen Akademikern gerade mit ihm am intimsten. [...] Je mehr ich mit Einstein spreche – und das geschieht ziemlich viel – umso mehr sehe ich, dass meine günstige Meinung von ihm berechtigt war. Er ist unter den heutigen Physikern nicht nur einer der klarsten sondern auch einer der unabhängigsten Köpfe und wir sind in Fragen einer Meinung, deren Stellung die Überzahl der anderen Physiker überhaupt nicht begriffe. Dabei ist er immer Physiker, d.h. hat in erster Instanz physikalische Probleme, was ja bei mir zu Deinem Leidwesen nicht der Fall ist.“ (Maier & Maderthaner, 2006, p. 70)

Offensichtlich sprach F. Adler mit Einstein über physikalische Themen – unter diesen dürften unter anderem Machs Konzepte gewesen sein, weshalb F. Adler Jahre später aus dem Gefängnis³¹² (am 9.3.1917) an Einstein schreiben wird:

„Ich habe die Relativität auch für Rotationen seit ich auf dem Mach'schen Standpunkte stehe (1903) für selbstverständlich betrachtet und sie auch schon 1907 in meinen Vorlesungen in Zürich vertreten. Vielleicht erinnern Sie sich auch noch daran, dass wir etwa 1909 in unseren Mansarden in der Moussonstrasse eine längere Auseinandersetzung darüber hatten. Mir ist sie lebhaft im Gedächtnis geblieben, da sie für mich sehr bedeutungsvoll war. Ich war nämlich sehr irritiert darüber, dass Sie mit Rücksicht auf die Centrifugalerscheinungen die Relativität für Rotationen ablehnen. Ich fragte mich damals, ob nicht doch bei Mach resp. bei

³¹¹ F. Adler und E. Mach haben sich über Jahre hinweg brieflich unterhalten. Sie schreiben über die Definition der Masse (1903-1904) (Blackmore & Hentschel, 1985, pp. 30-31; 32-34), die Dialektik von Hegel, Marx und Engels (1907) (Blackmore & Hentschel, 1985, p. 49), über die Metaphysik in der Physik (Blackmore & Hentschel, 1985, p. 50), über die ungerechtfertigten Mach Rezeptionen (1909) (Blackmore & Hentschel, 1985, pp. 57-58; 61), über die russische Übersetzung der *Mechanik* von Mach (1909) (Blackmore & Hentschel, 1985, pp. 64-65), über physikalische Weltbilder usw. (1909) (Blackmore & Hentschel, 1985, pp. 68-72; 75-76). Interessant ist, dass in keinem der Briefe F. Adler mit Mach über rotierende Bezugssysteme spricht. In der Korrespondenz zwischen F. Adler und E. Mach ist aber deutlich zu sehen, dass Mach sich für die Relativitätstheorie Einsteins interessierte und mehr darüber in Erfahrung bringen wollte (Blackmore & Hentschel, 1985, pp. 56, 58, 64, 66, 77, 79).

³¹² F. Adler hatte zuvor gehofft, die Professur in Zürich zu bekommen, welche dann schließlich Einstein erhalten hat, worüber sich Adler jedoch schließlich freute – siehe dazu (Maier & Maderthaner, 2006, pp. 61, 65-66, 69). In jenem Jahr (1916), als Ernst Mach starb und die Allgemeine Relativitätstheorie von Einstein bereits vollendet wurde, beging F. Adler ein Attentat auf den österreichischen Ministerpräsidenten. Er erschoss ihn (am 21. Oktober 1916) aus nächster Nähe. Es ist möglich, aber nicht zwingend, dass die „Revolution“, die Einstein mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (größtenteils im Sinne Machs) in die Physik brachte, wohl F. Adler unter anderem dazu veranlasste, selber eine „Revolution“, wenn auch eine politische, auszulösen. Dafür würde sprechen, dass im Gefängnis seine Gedanken keine Ruhe fanden und er sich stets mit Machs Konzepten beschäftigte – siehe dazu seine Briefe aus dem Gefängnis (Maier & Maderthaner, 2006, pp. 76-80). In diesem Zusammenhang schreibt er im Gefängnis auch eine physikalische Arbeit – siehe (Maier & Maderthaner, 2006, pp. 159-163) – und bittet Einstein darum, dass er diese lese und ihm ehrlich mitteile, was er darüber denkt. (Mit dieser Arbeit wollte F. Adler zudem zeigen, dass er kein pathologischer Fall ist.) In seiner Antwort versucht Einstein seinem Freund (1918) zu erklären, dass er mit dem Inhalt Größtenteils nicht einer Meinung ist (Maier & Maderthaner, 2006, pp. 108-114).

mir ein Fehler in der Argumentation sei. Konnte aber keinen finden. Umso grösser war dann meine Freude, als Ihre allgemeine Relativitätstheorie kam. Aber ich hatte nicht Zeit die Sache genau zu verfolgen. Erst jetzt liess ich mir die neuere Literatur kommen, um Mach's Verhältnis zur Relativität darstellen zu können. Und da sah ich zuerst in Freundlich's Broschüre und dann in ihren eigenen Arbeiten, dass Sie Mach's Standpunkt inclusive Zentrifugalerscheinungen vollkommen akzeptiert haben.“

(Maier & Maderthaner, 2006, p. 92)

In seinen früheren Arbeiten (1907, 1911) beschränkte Einstein sein Gedankenexperiment noch auf gleichmäßig beschleunigte Bezugssysteme – siehe dazu die Fußnote (CPAE 7; 31; p. 281, fn. 45). Es könnte in der Tat sein, dass er aufgrund von Machs Überlegungen sich auch immer mehr mit rotierenden Systemen auseinandersetzte. In einem Brief an seinen Freund Besso (am 26.03.1912) erklärt er: „Du siehst, dass ich noch weit davon entfernt bin, die Drehung als Ruhe auffassen zu können!“ (CPAE 5; 377; p. 436).

4.4.5.3. *Thema III: Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit*
[66]-[77]

Dass Mach eine allgemeine Kovarianz forderte [66] haben wir bereits im Abschnitt „4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]“ besprochen. Einstein fährt fort und erklärt, dass er einen Widerspruch zwischen Machs Forderung und der euklidischen Geometrie sah:

„[66] MACH war derjenige, der behauptete, daß alle Systeme, die Beschleunigung aufweisen, einander gleichwertig seien. [67] Dies steht jedoch im evidenten Widerspruch zu unserer Geometrie. [68] Denn, wenn alle solche Systeme als möglich zugelassen würden, gälte in jedem einzelnen die EUKLIDISCHE Geometrie nicht mehr.“

(Haubold & Yasui, 1986, p. 276)

Einstein meint damit, dass die physikalische Beschreibung von rotierenden Systemen unter der Voraussetzung des Äquivalenzprinzip mit der euklidischen Geometrie nicht in Einklang zu bringen sind – bereits in seiner Schrift „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1916e) ist er darauf detailliert eingegangen:

„§ 3. Das Raum-Zeit-Kontinuum. Forderung der allgemeinen Kovarianz für die die allgemeinen Naturgesetze ausdrückenden Gleichungen.“

In der klassischen Mechanik sowie in der speziellen Relativitätstheorie haben die Koordinaten des Raumes und der Zeit eine unmittelbare physikalische Bedeutung. Ein Punktereignis hat die X_1 -Koordinate x_1 , bedeutet: Die nach den Regeln der Euklidischen Geometrie mittels starrer Stäbe ermittelte Projektion des Punktereignisses auf die X_1 -Achse wird erhalten, indem man einen bestimmten Stab, den Einheitsmaßstab, x_1 mal vom Anfangspunkt des Koordinatenkörpers auf der (positiven) X_1 -Achse abträgt. Ein Punkt hat die X_4 -Koordinate $x_4 = t$, bedeutet: Eine relativ zum Koordinatensystem ruhend angeordnete, mit dem Punktereignis räumlich (praktisch) zusammenfallende Einheitsuhr, welche nach bestimmten Vorschriften gerichtet ist, hat $x_4 = t$ Perioden zurückgelegt beim Eintreten des Punktereignisses.

Diese Auffassung von Raum und Zeit schwebte den Physikern stets, wenn auch meist unbewußt, vor, wie aus der Rolle klar erkennbar ist, welche diese Begriffe in der messenden Physik spielen; diese Auffassung mußte der Leser auch der zweiten Betrachtung des letzten Paragraphen zugrunde legen, um mit diesen Ausführungen einen Sinn verbinden zu können. Aber wir wollen nun zeigen, daß man sie fallen lassen und durch eine allgemeinere ersetzen muß, um das Postulat der allgemeinen Relativität durchführen zu können, falls die spezielle Relativitätstheorie für den Grenzfall des Fehlens eines Gravitationsfeldes zutrifft.

Wir führen in einem Raume, der frei sei von Gravitationsfeldern, ein Galileisches Bezugssystem $K(x, y, z, t)$ ein, und außerdem ein relativ zu K gleichförmig rotierendes Koordinatensystem $K'(x', y', z', t')$. Die Anfangspunkte beider Systeme sowie deren Z -Achsen mögen dauernd zusammenfallen. Wir wollen zeigen, daß für eine Raum-Zeitmessung im System K' die obige Festsetzung für die physikalische Bedeutung von Längen und Zeiten nicht aufrecht erhalten werden kann. Aus Symmetriegründen ist klar, daß ein Kreis um den Anfangspunkt in der X - Y -Ebene von K zugleich als Kreis in der X' - Y' -Ebene von K' aufgefaßt werden kann. Wir denken uns nun Umfang und Durchmesser dieses Kreises mit einem

(relativ zum Radius unendlich kleinen) Einheitsmaßstäbe ausgemessen und den Quotienten beider Meßresultate gebildet. Würde man dieses Experiment mit einem relativ zum Galileischen System K ruhenden Maßstabe ausführen, so würde man als Quotienten die Zahl π erhalten. Das Resultat der mit einem relativ zu K' ruhenden Maßstabe ausgeführten Bestimmung würde eine Zahl sein, die größer ist als π . Man erkennt dies leicht, wenn man den ganzen Meßprozeß vom ‚ruhenden‘ System K aus beurteilt und berücksichtigt, daß der peripherisch angelegte Maßstab eine Lorentzverkürzung erleidet, der radial angelegte Maßstab aber nicht. Es gilt daher in bezug auf K' nicht die Euklidische Geometrie; der oben festgelegte Koordinaten- begriff, welcher die Gültigkeit der Euklidischen Geometrie voraussetzt, versagt also mit Bezug auf das System K' . Ebenso wenig kann man in K' eine den physikalischen Bedürfnissen entsprechende Zeit einführen, welche durch relativ zu K' ruhende, gleich beschaffene Uhren angezeigt wird. Um dies einzusehen, denke man sich im Koordinatenursprung und an der Peripherie des Kreises je eine von zwei gleich beschaffenen Uhren angeordnet und vom ‚ruhenden‘ System K aus betrachtet. Nach einem bekannten Resultat der speziellen Relativitätstheorie geht – von K aus beurteilt – die auf der Kreisperipherie angeordnete Uhr langsamer als die im Anfangspunkt angeordnete Uhr, weil erstere Uhr bewegt ist letztere aber nicht. Ein im gemeinsamen Koordinatenursprung befindlicher Beobachter, welcher auch die an der Peripherie befindliche Uhr mittels des Lichtes zu beobachten fähig wäre, würde also die an der Peripherie angeordnete Uhr langsamer gehen sehen als die neben ihm angeordnete Uhr. Da er sich nicht dazu entschließen wird, die Lichtgeschwindigkeit auf dem in Betracht kommenden Wege explizite von der Zeit abhängen zu lassen, wird er seine Beobachtung dahin interpretieren, daß die Uhr an der Peripherie ‚wirklich‘ langsamer gehe als die im Ursprung angeordnete. Er wird also nicht umhin können, die Zeit so zu definieren, daß die Ganggeschwindigkeit einer Uhr vom Orte abhängt.

Wir gelangen also zu dem Ergebnis: In der allgemeinen Relativitätstheorie können Raum- und Zeitgrößen nicht so definiert werden, daß räumliche Koordinatendifferenzen unmittelbar mit dem Einheitsmaßstab, zeitliche mit einer Normaluhr gemessen werden könnten.

Das bisherige Mittel, in das zeiträumliche Kontinuum in bestimmter Weise Koordinaten zu legen, versagt also, und es scheint sich auch kein *anderer Weg* darzubieten, der gestatten würde, der vierdimensionalen Welt Koordinatensysteme so anzupassen, daß bei ihrer Verwendung eine besonders einfache Formulierung der Naturgesetze zu erwarten wäre. Es bleibt daher nichts anderes übrig, als alle denkbaren Koordinatensysteme als für die Naturbeschreibung prinzipiell gleichberechtigt anzusehen. Dies kommt auf die Forderung hinaus:

Die allgemeinen Naturgesetze sind durch Gleichungen auszudrücken, die für alle Koordinatensysteme gelten, d. h. die beliebigen Substitutionen gegenüber kovariant (allgemein kovariant) sind.“ (Einstein, 1916e, pp. 773-776)

Nach Einstein erfordert die allgemeine Kovarianz somit die euklidische Geometrie aufzugeben. Im gleichnamigen Abschnitt („4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]“ sind wir bereits auf das Thema „allgemeine Kovarianz“) eingegangen und gesehen, dass Einstein Machs Vorreiterrolle gerade darin sieht, dass Mach sie gefordert hatte – siehe (Einstein, 1914h, p. 344) (Einstein, 1914o, pp. 1031-1032) (Einstein, 1916e, pp. 771-772) (Einstein, 1916c, pp. 102-103) (Reichenbach, 1928, pp. 247-248). Da die Naturgesetze in rotierend beschleunigten Bezugssystemen gelten sollten, erkannte Einstein (anhand seiner Gedankenexperimente), dass Längen und Zeiten nach der euklidischen Geometrie nicht

mehr gültig sein konnten (Einstein, 1916e, p. 775). Im Abschnitt „4.4.5.2.3.

Gedankenexperiment: Gravitationsbedingte Rotverschiebung“ sind wir auf Einsteins Überlegungen zu rotierenden Bezugssystemen bereits eingegangen. Das dürfte tatsächlich einer der Gründe dafür gewesen sein, dass Einstein anfang die vierdimensionale Raum-Zeit von Minkowski als grundlegender zu betrachten, die im Grenzfall der Allgemeinen Relativitätstheorie gelten musste. Dabei könnte auch eine Rolle gespielt haben, dass Mach in seinen Publikationen (1909/1910) besonders auf die wichtige Arbeit von Minkowski hinwies – siehe dazu drittes Kapitel (Abschnitt: „3.1. E. Machs publizierte Äußerungen zu Einsteins Relativitätstheorie“).

Ob man tatsächlich unbedingt Einsteins Konzept der vierdimensionalen Raum-Zeit folgen muss, um die Machschen Gedanken umsetzen zu können, ist aber derzeit strittig.

Beispielsweise meint Julian Barbour, dass man eine relationale Physik nach Machs Ansichten ohne die Annahme einer vierdimensionalen Raum-Zeit entwickeln kann, die zu denselben theoretischen Ergebnissen führt, wie die Allgemeine Relativitätstheorie – siehe dazu „General Relativity as a Perfectly Machian Theory“ (Barbour, 1995c) von J. Barbour bzw. die anschließende Diskussion (Barbour, 1995c, p. 232).

Fakt ist, dass Einstein mit der euklidischen Geometrie nicht zufrieden war – das ist auch verständlich: Hermann Minkowski hielt am 21. September 1908 bei der 80. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte seinen berühmten Vortrag über „Raum und Zeit“. Nur wenige Monate danach verstarb er (am 12. Januar 1909) und konnte die Veröffentlichung seines Vortrages nicht mehr erleben – siehe dazu das Vorwort von A. Gutzmer (Minkowski, 1909). Seinen Vortrag beginnt Minkowski mit den Worten:

„M. H.! Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich Ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund’ an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.“ (Minkowski, 1909, p. 1)

Er konnte in seinem Vortrag damit mathematisch-physikalisch zeigen, dass man auf Grund der Speziellen Relativitätstheorie Raum und Zeit nicht getrennt, sondern als eine vierdimensionalen Raum-Zeit betrachten konnte. Wie wir im 3. Kapitel (Abschnitt „3.1. E. Machs publizierte Äußerungen zu Einsteins Relativitätstheorie“) gezeigt haben, war Mach

ein Befürworter von Minkowskis Ansichten (Mach, 1909, pp. 59-60) (Mach, 1910a, p. 605) (Mach, 1910b, pp. 264, fn. 1)³¹³. Ebenso wie Mach hat offensichtlich auch Einstein den Beitrag von Minkowski als wichtig erachtet. In seinen Überlegungen, die später zur Allgemeinen Relativitätstheorie führten, wurde nun die Überzeugung einer vierdimensionalen Raum-Zeit zu einem der Eckpfeiler.

Jedenfalls lässt sich der Inhalt von Einsteins Kyoto-Rede rekonstruieren. Beispielsweise sagt Einstein, dass er von Prag nach Zürich kam; dort konnte er mit seinem Freund, Mathematiker Grossmann, zusammenarbeiten – ihre Ergebnisse haben sie dann 1913 veröffentlicht [73]-[74]. Diese Aussagen von Einstein lassen sich anhand der Quellen auch bestätigen: Einstein wurde für den Lehrstuhl der theoretischen Physik tatsächlich nach Prag berufen und war dort (1. April 1911 bis 30. September 1912) tätig – weshalb er für diesen Zeitraum auch die österreichische Staatsbürgerschaft hatte (Küpper, 2000-2018). In der Prager Universität waren früher Christian Doppler und Ernst Mach tätig. Wir sind auf die bedeutende Rolle des Doppler-Effekts für die Spezielle Relativitätstheorie eingegangen – siehe dazu 4. Kapitel³¹⁴. Es dürfte daher kein Zufall gewesen sein, dass gerade die Wissenschaftler in Prag Interesse an Einsteins Arbeiten hatten. Beispielsweise hatte Aurel Stodola, der 1884-1992 (im Bereich Maschinenbau) in Prag tätig war, an Einsteins Vortrag (am 11. Februar 1909) in Zürich über „Elektrodynamik und Relativitätsprinzip“³¹⁵ teilgenommen und schreibt am nächsten Tag in einem Brief an Einstein:

„Sehr geehrter Herr Doktor!

Neben den vielen Fragen, zu denen mich meine (oft vorlaute) Neugierde veranlasst hat, habe ich vergessen Ihnen das positive Ergebnis, das ich mitnahm mitzuteilen, daß nämlich Ihr Vortrag von ausgezeichneter Klarheit und Sachlichkeit gewesen ist, was ich hiermit noch gerne nachhole. Das Gleichnis mit dem Schall ist nichts, und ich glaube daß mir die philosoph. Tragweite Ihrer Konzeption allmählich aufdämmert. Mit freundlichen Grüßen Ihr ergebener

A. Stodola“
(CPAE 5; 138; p. 158)

³¹³ Siehe dazu auch (Wolters, 1987, pp. 27; 34-35, 163-164, 168-172, 177, 191-194, 227-236).

³¹⁴ Siehe Abschnitte: „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“, „4.4.2.3.3. Der Doppler-Effekt als Lösung für die Diskussion zwischen Wien und Abraham“ und „Der Doppler Effekt als Erklärung für Einsteins Gedankenexperiment ‚Chasing the light‘“.

³¹⁵ Siehe dazu (CPAE 5; 138; p. 158, fn. 1).

Offensichtlich ist Einstein in seinem Vortrag auf den Unterschied zwischen dem klassischen Doppler-Effekt des Schalls und dem relativistischen Doppler-Effekt des Lichtes eingegangen und darauf, inwiefern die Analogie nicht stimmt, weshalb Stodola betont: „Das Gleichnis mit dem Schall ist nichts, und ich glaube daß mir die philosoph. Tragweite Ihrer Konzeption allmählich aufdämmert.“ (CPAE 5; 138; p. 158)

In diesem Zusammenhang sei auch das einmalige Treffen zwischen Albert Einstein und Ernst Mach kurz erwähnt. Einstein reiste (am 24. September 1910) nach Wien, weil er nach Prag berufen wurde und er deshalb beim Ministerium Angelegenheiten zu erledigen hatte (Frank, 1979, p. 135) (Wolters, 1987, pp. 131-133). Die Gelegenheit hat er gleich genutzt und hat „an einem der Tage nach dem 24. September 1910“ (Wolters, 1987, p. 133) auch den früheren Prager Professor Ernst Mach in Wien besucht, um mit ihm über Physik zu sprechen (Wolters, 1987, pp. 132-133). Das Gesprächsthema dürfte Atomismus (und die Lichtquantenhypothese von Einstein) gewesen sein, wo wahrscheinlich auch der Doppler-Effekt zur Sprache kam.³¹⁶

Jedenfalls wechselte Einstein Ende 1912 von der Universität Prag nach Zürich. Auf seinen Wunsch bekam Philipp Frank Einsteins früheren Lehrstuhl in Prag. Das dürfte kein Zufall gewesen sein, da Frank vor allem von Mach sehr beeinflusst war. Im Jahre 1909, als Mach sich für die Spezielle Relativitätstheorie zu interessieren begann, bat Mach Frank um Hilfe, um die Konzepte der Speziellen Relativitätstheorie, wie die physikalische Verwendung der vierdimensionalen Raum-Zeit, genau zu verstehen, worauf Frank ihn „zur Jahreswende 1909/1910“ besuchte (Wolters, 1987, p. 165). Frank schrieb über dieses Treffen mit Mach an Friedrich Herneck (am 18. Mai 1959):

„In der letzten Zeit seines und meines Aufenthaltes in Wien, (ungefähr 1910) erhielt ich einen Brief von Mach, in dem er mich ersuchte, ihm persönlich Erklärungen über die Einsteinsche Theorie zu geben. Ich besuchte ihn auch, und das war das einzige Mal, daß ich ihn persönlich getroffen habe. Er wollte besonders Genaueres über die Verwendung der vierdimensionalen Geometrie wissen. Wie Sie vielleicht aus seinem Buch ‚Erkenntnis und Irrtum‘ wissen, war eine von Machs Liebblingsideen, daß vielleicht die vierdimensionale Geometrie praktischer für physikalische Erklärungen ist als die dreidimensionale. Ich hatte damals den Eindruck, daß er vollständig mit Einsteins ‚spezieller‘ Theorie übereinstimmte und auch besonders mit deren philosophischer Basis. Mach ersuchte mich, ihm meine Darstellung noch schriftlich oder

³¹⁶ Im Abschnitt „5.4. Anhang IV: Einsteins Unterhaltung mit Ernst Mach über die Atomtheorie – und die Lichtquantenhypothese?“ werden wir näher darauf eingehen.

gedruckt zu hinterlassen. Ich tat das auch, und daher ist die Darstellung der Einsteinschen Theorie, der Mach zustimmte, auch in einem gedruckten Text vorhanden.“

(Herneck, 1966, p. 7), siehe dazu auch (Wolters, 1987, p. 164)

Frank stellt in seinem Brief somit klar, dass Mach nicht nur Interesse an der Speziellen Relativitätstheorie, sondern auch erkenntnistheoretisch mit ihren Konzepten keinerlei Probleme hatte. Dieses Treffen von Mach und Frank ereignete sich wohl bereits vor dem Gespräch zwischen Mach und Einstein. Einstein hat somit, anhand der Briefe von Mach an ihn und durch andere Personen, gewusst, dass Mach das Konzept der Relativitätstheorie unterstützte.

Aus diesen Gründen überrascht es nicht, dass Einstein begann Machs Konzepte mit seinen eigenen Theorien in Prag stärker in Verbindung zu bringen. Er veröffentlichte in der Arbeit „Gibt es eine Gravitationswirkung, die der elektrodynamischen Induktionswirkung analog ist?“ (Einstein, 1912e) dazu:

„Das Resultat ist an sich von grossem Interesse. Es zeigt, dass die Anwesenheit der trägen Hülle K die träge Masse des darin befindlichen materiellen Punktes P erhöht. Es legt dies die Vermutung nahe, dass die ganze Trägheit eines Massenpunktes eine Wirkung des Vorhandenseins aller übrigen Massen sei, auf einer Art Wechselwirkung mit den letzteren beruhend ¹⁾. Inwieweit diese Auffassung berechtigt ist, wird sich zeigen, wenn wir in dem glücklichen Besitze einer brauchbaren Dynamik der Gravitation sein werden.“

(Einstein, 1912e, p. 39)

In der Fußnote ¹⁾ geht er näher auf seine Quelle ein:

„Es ist dies ganz derjenige Standpunkt, welchen E. Mach in seinen scharfsinnigen Untersuchungen über den Gegenstand geltend gemacht hat. (E. Mach, Die Entwicklung der Prinzipien der Dynamik. Zweites Kapitel. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung.)“ (Einstein, 1912e, pp. 39, fn. 1)

In *The Collected Papers of Albert Einstein* lesen wir als Kommentar zu dieser Schrift:

„In this paper he analyzes a physical system consisting of a point mass inside a massive hollow shell in order to investigate the effect of an acceleration of the shell on the mass inside. Einstein describes this effect as an analogon of electrodynamical induction. The paper illustrates the crucial influence of Mach's critique of Newton's mechanics at the beginning of Einstein's search for a general theory of relativity. In his simple model Einstein is in fact able to show that what he defined to be the inertial mass of the point particle is increased by the presence of the massive shell, which is what he expected on the basis of his reading of Mach's critique of Newton's concept of inertia.“ (CPAE 4; _ ; p. 127)

Offensichtlich war Machs Kritik an Newtons Trägheitskonzept eine der treibenden Ideen für Einstein bei der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie – für eine Einführung wie Einstein Machs Kritik interpretierte, siehe „Einstein and Mach’s Principle“ (Barbour, 1992).

In Zürich arbeitete Einstein dann gemeinsam mit seinem Freund Marcel Großmann – über die Zusammenarbeit kann der Leser in *The Collected Papers of Albert Einstein* (CPAE 4; _ ; p. 294-301) mehr in Erfahrung bringen, weshalb wir nicht näher darauf eingehen werden. Ein Ergebnis ihrer Zusammenarbeit wurde 1913 veröffentlicht, wie Einstein in der Kyoto-Rede berichtet [74]. Gemeint ist die Arbeit „Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation“ (Einstein & Grossmann, 1913), die aus zwei Teilen besteht:

„I. Physikalischer Teil“ (Einstein & Grossmann, 1913, pp. 3-22) ist von Albert Einstein und „II. Mathematischer Teil“ (Einstein & Grossmann, 1913, pp. 23-38) von Marcel Grossmann. Diese Arbeit kann wohl als ein wichtiger Meilenstein in der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie betrachtet werden, da Einstein in seinem Konzept einige neue mathematische Werkzeuge anwendet – seine damalige Theorie war jedoch nicht ganz ausgereift, weil unter anderem die Gleichungen, welche das Gravitationsfeld beschreiben, nicht allgemein kovariant waren – siehe dazu (CPAE 4; _ ; p. 294). In *The Collected Papers of Albert Einstein* erfahren wir:

„Immediately after the publication of Einstein and Grossmann 1913 (Doc. 13), Einstein sent an offprint to Ernst Mach, and, in an accompanying letter, acknowledged his debt to the latter’s ‘brilliant investigations on the foundations of mechanics.’ In the same letter, Einstein mentions several results demonstrating that the new theory of gravitation at least partially vindicates Mach’s critique of Newton’s mechanics: the dependence of the inertia of a body on the proximity of surrounding masses, the fact that the acceleration of a mass shell induces an acceleration of a body it encloses, and the creation of a Coriolis field by a rotating mass shell. Einstein presented these results, together with a detailed exposition of the derivation of the gravitational field equations and of the heuristics that had guided his research, in a talk he gave at a meeting of the Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, held in Vienna in September 1913.“ (CPAE 4; _ ; p. 295).

Sehen wir uns diesen Brief etwas genauer an. Einstein schreibt (am 25. Juni 1913) an Mach

„Hoch geehrter Herr Kollege!
Dieser Tage haben Sie wohl meine neue Arbeit über Relativität und Gravitation erhalten, die nach unendlicher Mühe und quälendem Zweifel nun endlich fertig geworden ist. Nächstes Jahr bei der Sonnenfinsternis soll sich zeigen, ob die Lichtstrahlen an der Sonne gekrümmt werden, ob m. a. W. die zugrunde gelegte fundamentale Annahme von der Aequivalenz von Beschleunigung des Bezugssystems einerseits und Schwerfeld andererseits wirklich zutrifft.

Wenn ja, so erfahren Ihre genialen Untersuchungen über die Grundlagen der Mechanik – Planck's ungerechtfertigter Kritik zum Trotz – eine glänzende Bestätigung. Denn es ergibt sich mit Notwendigkeit, dass die Trägheit in einer Art Wechselwirkung der Körper ihren Ursprung hat, ganz im Sinne Ihrer Überlegungen zum Newton'schen Eimer-Versuch.

Eine erste Konsequenz in diesem Sinne finden Sie oben auf Seite 6 der Arbeit. Es hat sich ferner folgendes ergeben:

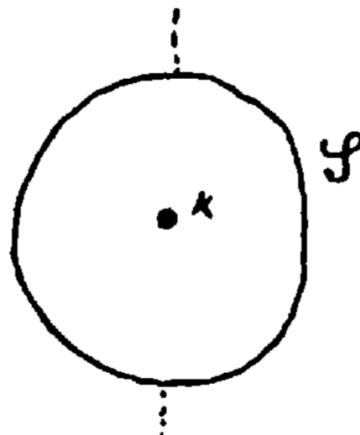


Figure 8: Quelle: „(Originalzeichnung Einsteins im Brief vom 25. 6.1913)“ (Wolters, 1987, p. 151).

- 1) Beschleunigt man eine träge Kugelschale S , so erfährt nach der Theorie ein von ihr eingeschlossener Körper eine beschleunigende Kraft.
- 2) Rotiert die Schale S um eine durch ihren Mittelpunkt gehende Achse (relativ zum Fixsterne (‚Restsystem‘)), so entsteht im Innern der Schale ein Coriolis-Feld, d. h. die Ebene des Foucault-Pendels wird (mit einer allerdings praktisch unmessbar kleinen Geschwindigkeit) mitgenommen.

Es ist mir eine grosse Freude, Ihnen dies mitteilen zu können, zumal jene Kritik Plancks mir schon immer höchst ungerechtfertigt erschienen war. Mit grösster Hochachtung grüsst Sie herzlich

Ihr ergebener

A. Einstein.

Ich danke Ihnen herzlich für die Übersendung Ihres Buches.“

(Wolters, 1987, pp. 151-152) (CPAE 5; 448; p. 531-532)

Zu Beginn des Briefes verweist Einstein auf seine Voraussage der Lichtablenkung am Gravitationsfeld, welche vom Äquivalenzprinzip abgeleitet werden kann – siehe dazu den Abschnitt: „4.4.5.2.2. Gedankenexperiment: Lichtablenkung am Gravitationsfeld“. Man erkenntlich deutlich, wie wichtig es für Einstein war, dass seine Theorien experimentell überprüft werden³¹⁷ – allgemein orientierte er sich sehr an experimentellen Erfahrungstatsachen.³¹⁸ Dass er die Überprüfbarkeit seiner Theorie dem experimentellen

³¹⁷ Siehe dazu (CPAE 4; _; p. 295, fn. 8).

³¹⁸ Beispielsweise bespricht er in seiner Schrift „Zum gegenwärtigen Stande des Gravitationsproblems“ (Einstein, 1913c) ebenso anhand von Gedankenexperimenten das Äquivalenzprinzip (Einstein, 1913c, pp. 1254-1255) und fragt anschließend:

„Gibt es für die beiden Physiker ein Kriterium, nach dem sie entscheiden könnten, wer recht hat? Wir kennen kein derartiges Kriterium, aber wir wissen nicht, ob es kein Kriterium gibt. Immerhin aber spricht der exakte Versuch von Eötvös über die Gleichheit der trägen und der schweren Masse dafür, daß es kein solches Kriterium gibt. Man sieht, daß in diesem Zusammenhange der Eötvössche Versuch

Physiker Mach als erstes mitteilt, überrascht daher nicht. Interessant ist zudem, dass Einstein das Äquivalenzprinzip mit Machs Überlegungen direkt in Verbindung bringt. Zudem ist sichtbar, dass er sich als ein Verteidiger von Mach (gegenüber Planck) versteht. Anschließend verweist er auf Seite 6 seiner Arbeit – dort lesen wir:

„Bei gegebener Geschwindigkeit sind also Impuls und kinetische Energie der Größe c umgekehrt proportional; anders ausgedrückt: Die träge Masse, so wie sie in Impuls und Energie eingeht, ist $\frac{m}{c}$, wobei m eine für den Massenpunkt charakteristische, vom Gravitationspotential unabhängige Konstante bedeutet. Es paßt dies zu Machs kühnem Gedanken, daß die Trägheit in einer Wechselwirkung des betrachteten Massenpunktes mit allen übrigen ihren Ursprung habe; denn häufen wir Massen in der Nähe des betrachteten Massenpunktes an, so verkleinern wir damit das Gravitationspotential c , erhöhen also die für die Trägheit maßgebende Größe $\frac{m}{c}$.“ (Einstein & Grossmann, 1913, p. 6)

Nach Einstein müsste nämlich die Trägheitsbewegung eines Körpers zu anderen Körpern in Beziehung stehen: Rotiert die Schale S , so erfährt der Körper K aufgrund dessen eine Beschleunigung – vgl. dazu die Analyse von Wolters (Wolters, 1987, pp. 151-152).

Wir sind im zweiten Kapitel³¹⁹ und im vierten Kapitel³²⁰ auf die wichtige Rolle von Besso bei der Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie eingegangen, da er mit Einstein über die Konzepte von Mach sprach. Insofern überrascht es nicht, dass Einstein nun auch bei der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie Besso zur Rate zog – wahrscheinlich Juni 1913³²¹. Gemeinsam haben sie an Berechnungen gearbeitet, wie beispielsweise an der Periheldrehung des Merkur (CPAE 4; 14; p. 360)³²² aber auch an der Relativität der Trägheit³²³ (CPAE 4; Appendix B; p. 665-667).³²⁴ Bei seinem Vortrag „Zum gegenwärtigen Stande des Gravitationsproblems“ (Einstein, 1913c) bei der 85. *Versammlung der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte* in Wien ist er (am 23. September 1913) auf

eine ähnliche Rolle spielt wie der Michelsonsche Versuch bei der Frage der physikalischen Nachweisbarkeit einer gleichförmigen Bewegung.“ (Einstein, 1913c, p. 1255)

Experimente waren auch (später) „erwünscht“, da Einsteins Theorie und die Theorie von Nordström unterschiedliche Voraussagen machten – siehe dazu (CPAE 4; 7; p. 299, fn. 30).

³¹⁹ Siehe Abschnitt „2.1.1. Das O von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“.

³²⁰ Siehe Abschnitte „4.4.2.3. Thema III: Die Lösung des Widerspruchs (durch die Neudefinition der Zeit) [26]-[39]“ und „Neudefinition der Zeit: Cohn und Machs möglicher Einfluss“.

³²¹ Siehe dazu (CPAE 4; __, p. 344, 357-359).

³²² Siehe dazu (CPAE 4; Appendix B; p. 631).

³²³ Siehe dazu (CPAE 4; __; p. 179, fn. 7). Für die Zusammenhänge zwischen dem Einstein-Besso-Manuskript und dem Thirring-Lense-Effekt siehe (CPAE 4; __; p. 347, fn. 21-23).

³²⁴ Die gemeinsame Arbeit hat Besso zeitlebens aufbewahrt – sie steht dem Leser in *The Collected Papers of Albert Einstein* als Dokument „B. Facsimile Reproduction of the Manuscript of Document 14“ (CPAE 4; Appendix B; p. 630-682) online zur Verfügung.

das Thema *Relativität der Trägheit* daher erneut eingegangen und hat wieder diesbezüglich auf Mach verwiesen:

„[...] Dies Resultat ist von hohem theoretischen Interesse. Denn wenn die Trägheit eines Körpers durch Anhäufung von Massen in seiner Umgebung erhöht werden kann, so werden wir kaum umhin können, die Trägheit eines Punkts als durch die Existenz der übrigen Massen bedingt anzusehen. Die Trägheit erscheint so bedingt durch eine Art Wechselwirkung des zu beschleunigenden Massenpunkts mit allen übrigen Massenpunkten.

Es erscheint dies Ergebnis recht befriedigend, wenn man sich folgendes überlegt. Von Bewegung, also auch Beschleunigung eines Körpers *A* an sich zu reden, hat keinen Sinn. Man kann nur von Bewegung bzw. Beschleunigung eines Körpers *A* relativ zu anderen Körpern *B*, *C* usw. sprechen. Was in kinematischer Beziehung von der Beschleunigung gilt, das dürfte auch von dem Trägheitswiderstande gelten, den die Körper einer Beschleunigung entgegensetzen; es ist a priori zu erwarten, wenn auch nicht gerade notwendig, daß der Trägheitswiderstand nichts anderes sei als ein Widerstand gegen Relativbeschleunigung des betrachteten Körpers *A* gegenüber der Gesamtheit aller übrigen Körper *B*, *C* usw. Es ist wohlbekannt, daß E. Mach in seiner Geschichte der Mechanik diesen Standpunkt zuerst mit aller Schärfe und Klarheit vertreten hat, so daß ich hier einfach auf seine Ausführungen verweisen kann. Ich verweise auch auf eine geistreiche Broschüre des Wiener Mathematikers W. Hofmann, in welcher unabhängig derselbe Standpunkt vertreten wird. Ich will die skizzierte Auffassung als ‚Hypothese von der Relativität der Trägheit‘ bezeichnen.

Um Mißverständnisse zu vermeiden, sei nochmals gesagt, daß ich ebensowenig wie Mach der Ansicht bin, es entspreche die Relativität der Trägheit einer logischen Notwendigkeit. Aber eine Theorie, in welcher die Relativität der Trägheit gewahrt ist, ist befriedigender als die uns heute geläufige Theorie, weil in letzterer das Inertialsystem eingeführt wird, dessen Bewegungszustand einerseits nicht durch die Zustände der beobachtbaren Gegenstände bedingt, also durch nichts der Wahrnehmung Zugängliches verursacht, andererseits aber für das Verhalten der materiellen Punkte bestimmend sein soll.“ (Einstein, 1913c, pp. 1260-1261)

An diesen Zeilen bemerkt man Machs Einfluss ganz stark: So wie die Geschwindigkeit sollte auch die Beschleunigung eines Körpers relativ bzw. relational zu einem anderen Körper definiert sein – insofern kann man nach diesem Ansatz von einer Relativität der Trägheit sprechen.³²⁵ In einem Brief an Lorentz (am 14. August 1913) erörtert Einstein die Ergebnisse seiner Theorie (Einstein, 1913c) und schließt mit den Worten:

„Alle diese Effekte sind zwar wegen ihrer Kleinheit nicht der Prüfung zugänglich, sind aber an und für sich plausibel, wie Mach in seiner Mechanik so hübsch bei seiner Kritik von Newtons Prinzipien gezeigt hat.“ (CPAE 5; 467; p. 548)

Das Problem der Relativität der Trägheit hat Einstein offensichtlich in den Jahren 1912-1916 (Einstein, 1912e) (Einstein & Grossmann, 1913) (Einstein, 1913c) (Einstein, 1914o, pp. 1031-1032, 1085) (Einstein, 1916e, pp. 771-772) beschäftigt – dass er dabei versuchte Machs

³²⁵ Siehe dazu auch (Einstein, 1913c, pp. 1261-1262) und (CPAE 4; 17; p. 503, fn. 64).

Ideen umzusetzen, steht außer Zweifel, da Einstein in seinen Arbeiten stets selber darauf hingewiesen hat und auch von anderen Quellen – wie seinen Briefen an Mach, seiner Zusammenarbeit mit Besso, seinem Brief an Lorentz usw. – wird es bestätigt. Dass Machs physikalische Konzepte bei der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie eine wichtige Rolle gespielt haben, kann somit mit Sicherheit ausgesprochen werden.

Doch der Weg zur Fertigstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie benötigte noch einiges an Arbeit – schließlich mussten einige Probleme (im Jahre 1915) endgültig gelöst werden, worauf Einstein in seiner Kyoto-Rede aufmerksam macht [75]-[79]. Wir wollen auf diese Entwicklung nicht näher darauf eingehen – es gibt bereits eine Reihe wissenschaftlicher Beiträge, die diese Entwicklung ausgearbeitet haben³²⁶; z.B.:

- „Einstein on Gravitation and Relativity: The Static Field“ (CPAE 4; _ ; p. 122-179)
- „Einstein’s Research Notes on a Generalized Theory of Relativity“ (CPAE 4; _ ; p. 192-199)
- „Einstein on Gravitation and Relativity: the Collaboration with Marcel Grossmann“ (CPAE 4; _ ; p. 294-301)
- „The Einstein-Besso Manuscript on the Motion of the Perihelion of Mercury“ (CPAE 4; _ ; p. 344-359)
- *The Attraction of Gravitation: new Studies in the History of General Relativity* (Earman, et al., 1993)
- *The road to relativity: The history and meaning of Einstein’s ‘The foundation of general relativity’ featuring the original manuscript of Einstein’s masterpiece* (Gutfreund & Renn, 2015)

Die Entwicklung kann, knapp zusammengefasst, folgendermaßen wiedergegeben werden: In der Arbeit von Einstein und Grossmann (Einstein & Grossmann, 1913) sind bereits wichtige Ansätze dafür zu finden, wie beispielsweise das Gravitationsfeld durch einen metrischen Tensor zu definieren ist usw. Jedoch war dieser Entwurf noch nicht allgemein kovariant. (Dass der Ricci-Tensor – vom Riemann-Tensor konstruiert – den Gravitationstensor für eine allgemein kovariante Theorie darstellen sollte, wurde übersehen.) Einstein begann unter

³²⁶ Siehe dazu auch allgemein den Artikel „Autobiographische Skizze“ (Einstein, 1986, pp. 14-16) von Einstein und „Erinnerungen eines Kommilitonen“ (Kollros, 1986, pp. 26-30) von Louis Kollros.

anderem zu argumentieren, weshalb die Theorie nicht allgemein kovariant sein kann; das bekannteste Beispiel ist sein „Lochargument“, worauf wir nicht näher eingehen werden – siehe für eine detaillierte Besprechung des Themas (Norton, 2019). Im Jahre 1915 kam er jedoch auf das Konzept der Allgemeinen Kovarianz zurück und vervollständigte die Allgemeine Relativitätstheorie in seiner Arbeit „Zur allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1915f), wie er gleich zu Beginn erläutert:

„In den letzten Jahren war ich bemüht, auf die Voraussetzung der Relativität auch nicht gleichförmiger Bewegungen eine allgemeine Relativitätstheorie zu gründen. Ich glaubte in der Tat, das einzige Gravitationsgesetz gefunden zu haben, das dem sinngemäß gefaßten, allgemeinen Relativitätspostulate entspricht, und suchte die Notwendigkeit gerade dieser Lösung in einer im vorigen Jahre in diesen Sitzungsberichten erschienenen Arbeit darzutun.

Eine erneute Kritik zeigte mir, daß sich jene Notwendigkeit auf dem dort eingeschlagenen Wege absolut nicht erweisen läßt; daß dies doch der Fall zu sein schien, beruhte auf Irrtum. Das Postulat der Relativität, *soweit ich es dort gefordert habe*, ist stets erfüllt, wenn man das Hamiltonsche Prinzip zugrunde legt; es liefert aber in Wahrheit keine Handhabe für eine Ermittlung der HAMILTONschen Funktion H des Gravitationsfeldes. In der Tat drückt die die Wahl von H einschränkende Gleichung (77) a. a. O. nichts anderes aus, als daß H eine Invariante bezüglich linearer Transformationen sein soll, welche Forderung mit der der Relativität der Beschleunigung nichts zu schaffen hat. Ferner wird die durch Gleichung (78) a. a. O. getroffene Wahl durch Gleichung (77) keineswegs festgelegt.

Aus diesen Gründen verlor ich das Vertrauen zu den von mir aufgestellten Feldgleichungen vollständig und suchte nach einem Wege, der die Möglichkeiten in einer natürlichen Weise einschränkte. So gelangte ich zu der Forderung einer allgemeineren Kovarianz der Feldgleichungen zurück, von der ich vor drei Jahren, als ich zusammen mit meinem Freunde GROSSMANN arbeitete, nur mit schwerem Herzen abgegangen war. In der Tat waren wir damals der im nachfolgenden gegebenen Lösung des Problems bereits ganz nahe gekommen.

Wie die spezielle Relativitätstheorie auf das Postulat gegründet ist, daß ihre Gleichungen bezüglich linearer, orthogonaler Transformationen kovariant sein sollen, so ruht die hier darzulegende Theorie auf dem Postulat *der Kovarianz aller Gleichungssysteme bezüglich Transformationen von der Substitutionsdeterminante*.

Dem Zauber dieser Theorie wird sich kaum jemand entziehen können, der sie wirklich erfaßt hat; sie bedeutet einen wahren Triumph der durch GAUSS, RIEMANN, CHRISTOFFEL, RICCI und LEVI-CIVITER begründeten Methode des allgemeinen Differentialkalküls.“

(Einstein, 1915f, pp. 778-779)

Wir lesen, wie nah Einstein und Grossmann an der Fertigstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie bereits im Jahre 1913 waren. Doch es dauerte noch zwei Jahre bis Einstein die richtige Fährte wieder aufnehmen konnte. Die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie zeigt einmal mehr, welche wichtige Rolle *Erkenntnis und Irrtum* für den Fortschritt der Wissenschaft spielten. Offensichtlich war Einstein zum Schluss von der Ästhetik seiner Theorie tief beeindruckt – er spricht vom „Zauber“ seiner „Theorie“,

von dem „kaum jemand“ sich „entziehen können“ „wird“, „der sie wirklich erfaßt hat“ (Einstein, 1915f, p. 779).

Wichtig ist darauf hinzuweisen, dass Einstein, gerade was die mathematische Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie betrifft, verständlicherweise auf Machs Arbeiten nicht zurückgreifen konnte, da keine Angaben dazu bei Mach zu finden waren. Es ist daher mit Sicherheit richtig, die fertige Allgemeine Relativitätstheorie allein als Einsteins Werk anzusehen – obwohl viele seiner Freunde, wie Marcel Grossmann und Michel Besso usw. Beiträge dazu leisteten. Wie sehr die Allgemeine Relativitätstheorie nun Machs Konzepte umsetzen konnte oder nicht, ist immer noch ein Thema wissenschaftlicher Diskussionen – siehe für eine Einführung (Barbour & Pfister, 1995a). Doch eines soll bereits an dieser Stelle zum Schluss betont werden: Der Grund, weshalb Einstein seiner eigenen „Entwurf“-Theorie (Einstein & Grossmann, 1913) misstraute, lag daran, dass er mit ihr das Machsche Prinzip nicht erfüllen konnte – siehe dazu (CPAE 8, Part A; 123; p. 177-178) (CPAE 8, Part A; 245; p. 325, fn. 7) und (CPAE 7; 4; p. 42, fn. 5). Erst die allgemeine Kovarianz gab ihm die Sicherheit, dass damit auch das Machsche Prinzip gelten musste – siehe dazu (CPAE 8, Part A; 245; p. 324-325). Doch diese Schlussfolgerung war etwas übereilt, wie wir im nächsten Abschnitt noch sehen werden...

4.4.5.4. Thema IV: Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]

In seiner Kyoto-Rede erklärt Einstein, dass er sich ab 1915 unter anderem den kosmologischen Problemen widmete [80]. Er dachte über die Chronometrie und die Geometrie des Alls nach [81]. Dabei ging es um die Grenzbedingungen (des Universums) nach der relativistischen Kosmologie und in diesem Zusammenhang um das Trägheitskonzept von Mach [83], welches heute als das „Machsche Prinzip“ bekannt ist. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass bereits der Begriff des „Machschen Prinzips“ von Einstein in die theoretische Physik eingeführt wurde – in „Prinzipielles zur Allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1918e) schreibt er gleich zu Beginn:

„Eine Reihe von Publikationen der letzten Zeit, insbesondere die neulich in diesen Annalen 53. Heft 16 erschienene scharfsinnige Arbeit von *Kretschmann*, veranlassen mich, nochmals auf die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie zurückzukommen. Dabei ist es mein Ziel, lediglich die Grundgedanken herauszuheben, wobei ich die Theorie als bekannt voraussetze.

Die Theorie, wie sie mir heute vorschwebt, beruht auf drei Hauptgesichtspunkten, die allerdings keineswegs voneinander unabhängig sind. Sie seien im folgenden kurz angeführt und charakterisiert und hierauf im nachfolgenden von einigen Seiten beleuchtet:

a) Relativitätsprinzip: Die Naturgesetze sind nur Aussagen über zeiträumliche Koinzidenzen; sie finden deshalb ihren einzig natürlichen Ausdruck in allgemein kovarianten Gleichungen.

b) Äquivalenzprinzip: Trägheit und Schwere sind wesensgleich. Hieraus und aus den Ergebnissen der speziellen Relativitätstheorie folgt notwendig, daß der symmetrische ‚Fundamentaltensor‘ ($g_{\mu\nu}$) die metrischen Eigenschaften des Raumes, das Trägheitsverhalten der Körper in ihm, sowie die Gravitationswirkungen bestimmt. Den durch den Fundamentaltensor beschriebenen Raumzustand wollen wir als ‚G-Feld‘ bezeichnen.

c) Machsches Prinzip¹: Das G-Feld ist *restlos* durch die Massen der Körper bestimmt. Da Masse und Energie nach den Ergebnissen der speziellen Relativitätstheorie das Gleiche sind und die Energie formal durch den symmetrischen Energietensor ($T_{\mu\nu}$) beschrieben wird, so besagt dies, daß das G-Feld durch den Energietensor der Materie bedingt und bestimmt sei.“ (Einstein, 1918e, pp. 241-242)

In der Fußnote 1 (zum Machschen Prinzip) erklärt Einstein³²⁷:

„Bisher habe ich die Prinzipie a) und c) nicht auseinandergehalten, was aber verwirrend wirkte. Den Namen ‚Machsches Prinzip‘ habe ich deshalb gewählt, weil dies Prinzip eine Verallgemeinerung der Machschen Forderung bedeutet, daß die Trägheit auf eine Wechselwirkung der Körper zurückgeführt werden müsse.“ (Einstein, 1918e, pp. 241, fn. 1)

Wir sehen hier deutlich, wie Einstein (aus theoretischen Gründen) nun das Relativitätsprinzip vom Machschen Prinzip unterscheidet. Das hat mitunter dazu geführt, dass Machs

³²⁷ Siehe zum Maschen Prinzip den Anhang „5.3. Anhang III: Das Machsche Prinzip – was meinte Mach?“ und allgemein auch (Meinl, 2016, pp. 21-22, 86-88, 260).

Bedeutung für die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie weitaus geringer betrachtet wurde, wie Wolters erklärt:

„Manche historischen Darstellungen der Geschichte der Relativitätstheorie beschränken den Einfluß Machs auf Einstein und damit Machs Stellung in der Geschichte der Relativitätstheorie darauf, daß Einstein aus dem Machschen Trägheitsprinzip das von ihm so genannte ‚Machsche Prinzip‘ entwickelt habe. Solche Darstellungen — wir werden in § 5 eine kennenlernen — machen sich weiter keine Gedanken um ein für sie entstehendes merkwürdiges Problem: dem Machschen Prinzip war in Einsteins Verständnis der allgemeinen Relativitätstheorie keine lange Lebensdauer beschieden. Spätestens 1931, nach langen Jahren des Zögerns und schrittweiser Demontage (cf. Pais (1982), 287 f.), gab Einstein das Machsche Prinzip auf. Und noch am 2.2.1954 (EAP), im Jahr vor seinem Tod, schrieb er an F. Pirani: ‚Von dem Mach’schen Prinzip [...] sollte man nach meiner Meinung überhaupt nicht mehr sprechen.‘ Das erwähnte Problem für oberflächliche Darstellungen der Geschichte der Relativitätstheorie besteht darin zu erklären, woher Einsteins ungebrochene Hochachtung für Mach stammt, wenn doch die einzige Idee Machs, die Einstein angeblich übernommen hat, sich so bald als Windei entpuppte. Denn bei nicht wenigen Gelegenheiten, etwa noch in seiner letzten Vorlesung (14. April 1954, cf. Wheeler (1979), 218 f.) hat Einstein Machs Bedeutung für seine eigene wissenschaftliche Entwicklung hervorgehoben. Zuletzt zwei Wochen vor seinem Tod in einem Gespräch mit I. B. Cohen ‚he [Einstein] told me [Cohen] he admired Mach’s writings, which had a great influence on him‘ (Cohen (1955), 72). Selten fehlt der Name ‚Mach‘, wenn Einstein die für ihn Großen der Physik aufzählt. Und dies doch wohl nicht bloß deshalb, weil er Einstein nur mit einem Gedanken versorgt hatte, von dem man besser ‚nicht mehr sprechen‘ sollte! Man wird sehen, daß die Machsche Kritik des absoluten Raumes und seine Überlegungen zur Trägheit für Einstein erheblich mehr bedeutet haben als nur den Anstoß zum Machschen Prinzip.“ (Wolters, 1987, pp. 49-50)

Wir haben gelesen, dass Einstein eine Theorie vorschwebte, die auf drei Prinzipien gründen soll – wie bereits besprochen, waren die Ansätze für diese Prinzipien bereits bei Mach zu finden:

*Das Relativitätsprinzip:*³²⁸ Im Abschnitt „4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]“ konnten wir zeigen, dass Einstein gerade bei der Idee der allgemeinen Kovarianz in seinen früheren Arbeiten (Einstein, 1914h, p. 344) (Einstein, 1914o, pp. 1031-1032) (Einstein, 1916e, pp. 771-772) und Schriften (Einstein, 1916c, p. 103) auf Mach hingewiesen hat.

*Das Äquivalenzprinzip:*³²⁹ Im Abschnitt „4.4.5.2.1. Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip und Machs möglicher Einfluss“ haben wir darauf hingewiesen, dass Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip [54]-[57] (CPAE 7; 31; p. 265) in ähnlicher Form bereits bei Mach gegeben war (Wolters, 1987, pp. 63-65) (Heller, 1991, p. 177) (Mach, 2012, p. 234) (Staley, 2013, p. 47) (Staley, 2019, pp. 360-363) und dass das

³²⁸ Siehe dazu „Allgemeine Kovarianz“ (Wolters, 1987, pp. 57-63).

³²⁹ Siehe dazu „Äquivalenzprinzip“ (Wolters, 1987, pp. 63-65).

Machsche Konzept (bzw. das Machsche Prinzip) mit dem Äquivalenzprinzip konzeptionell eng verbunden ist (Reichenbach, 1928, p. 260).

*Das Machsche Prinzip:*³³⁰ Nach Mach lässt sich die Trägheitsbewegung eines Körpers auf die restlichen Massen im Universum zurückführen:

„Das Verhalten der irdischen Körper gegen die Erde lässt sich auf deren Verhalten gegen die fernen Himmelskörper zurückführen. Wollten wir behaupten, dass wir von den bewegten Körpern mehr kennen als jenes durch die Erfahrung nahe gelegte hypothetische Verhalten gegen die Himmelskörper, so würden wir uns einer Unehrllichkeit schuldig machen. Wenn wir daher sagen, dass ein Körper seine Richtung und Geschwindigkeit im Raum beibehält, so liegt darin nur eine kurze Anweisung auf Beachtung der ganzen Welt. Der Erfinder des Prinzips darf sich diesen gekürzten Ausdruck erlauben, weil er weiß, dass der Ausführung der Anweisung in der Regel keine Schwierigkeiten im Wege stehen. Er kann aber nicht helfen, wenn sich solche Schwierigkeiten einstellen, wenn z.B. die nötigen gegeneinander festliegenden Körper fehlen.“
(Mach, 2012, pp. 262 (II. Kapitel – 6. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung))

Deutlich ist herauszulesen, dass er sein Konzept für ein „durch die Erfahrung nahe gelegte[s] hypothetische[s]“ (Mach, 2012, p. 262) hält – siehe dazu auch (Wolters, 1987, p. 52). Mach spricht seiner Darlegung daher keine Gewissheit zu, sondern sieht sie als eine mögliche, alternative Erklärung, um Argumente gegen die Vorstellung eines absoluten Raumes, einer absoluten Zeit oder einer absoluten Bewegung zu geben. Er möchte durch sein Programm die Physik von Dogmatismus befreien und einen vorurteilsfreien Fortschritt ermöglichen:

„Erlauben wir uns noch eine freiere Betrachtung. Wir messen unsere Zeit nach dem Drehungswinkel der Erde, könnten dieselbe aber ebenso wohl nach dem Drehungswinkel irgendeines anderen Planeten bemessen. Darum werden wir aber nicht glauben, dass der *zeitliche* Verlauf aller physikalischen Erscheinungen sofort gestört werden müsste, wenn die Erde oder jener ferne Planet eine zufällige plötzliche Änderung der Winkelgeschwindigkeit erfahren würde. Wir halten die Abhängigkeit für *keine unmittelbare*, also die zeitliche Orientierung für eine *äußerliche*. So wird auch niemand glauben, dass in einem System unbeeinflusster, sich selbst überlassener, geradlinig gleichförmig bewegter Körper die zufällige Störung des einen, bei Fixierung des Koordinatensystems mitbestimmenden, etwa durch einen Zusammenstoß, sofort auch eine Störung der übrigen zur Folge hätte. Die Orientierung ist auch hier äußerlich. So sehr man auch für diese dankbar [...] sein muss, namentlich wenn sie von Sinnlosigkeiten gereinigt ist, so sehr wird der Naturforscher das Bedürfnis nach weiterer Einsicht, nach Erkenntnis der *unmittelbaren* Zusammenhänge, etwa der Massen des Weltalls, empfinden. Als Ideal wird ihm eine prinzipielle Einsicht vorschweben, aus der sich in gleicher Weise die beschleunigten und die Trägheitsbewegungen ergeben. Der Fortschritt von der Keplerschen Entdeckung zu dem Newtonschen Gravitationsgesetz und das Drängen von diesem zu einem physikalischen Verständnis nach Art der elektrischen Fernwirkung mag hier vorbildlich sein. Wir müssen sogar dem Gedanken Raum geben, dass die Massen, die wir sehen und nach welchen wir uns

³³⁰ Siehe dazu „*Machsches Prinzip und Relativität der Trägheit*“ (Wolters, 1987, pp. 52-57).

zufällig orientieren, vielleicht gar nicht die eigentlich entscheidenden sind. Deshalb darf man auch Experimentalideen, wie die der Herren Friedländer und Föppl, nicht unterschätzen, wenn man auch noch keinen unmittelbaren Erfolg absieht. Greift der Forscher auch freudig nach dem zunächst Erreichbaren, so schadet ihm gewiss nicht der zeitweilige Blick in die Tiefe des Unerforschten.“

(Mach, 2012, pp. 271-272 (II. Kapitel – 6. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung))

Mach erklärt hier deutlich, dass man an Alternativen denken sollte – beispielsweise, dass man die gravitative Wechselwirkung ähnlich wie die „elektrische Fernwirkung“³³¹ konstruieren sollte. Er betont jedoch:

„Wir müssen sogar dem Gedanken Raum geben, dass die Massen, die wir sehen und nach welchen wir uns zufällig orientieren, vielleicht gar nicht die eigentlich entscheidenden sind. [...] Greift der Forscher auch freudig nach dem zunächst Erreichbaren, so schadet ihm gewiss nicht der zeitweilige Blick in die Tiefe des Unerforschten.“ (Mach, 2012, p. 272)

Dass Einstein also eine Arbeit mit dem Titel „Gibt es eine Gravitationswirkung, die der elektrodynamischen Induktionswirkung analog ist?“ (Einstein, 1912e) verfasst, ist daher kein Zufall – da er darin genau auf jenes Kapitel hinweist, welches wir von Mach zitiert haben:

„Das Resultat ist an sich von grossem Interesse. Es zeigt, dass die Anwesenheit der trägen Hülle K die träge Masse des darin befindlichen materiellen Punktes P erhöht. Es legt dies die Vermutung nahe, dass die ganze Trägheit eines Massenpunktes eine Wirkung des Vorhandenseins aller übrigen Massen sei, auf einer Art Wechselwirkung mit den letzteren beruhend ¹⁾. Inwieweit diese Auffassung berechtigt ist, wird sich zeigen, wenn wir in dem glücklichen Besitze einer brauchbaren Dynamik der Gravitation sein werden.“

(Einstein, 1912e, p. 39)

In der Fußnote ¹⁾ verweist er genau auf jenes Kapitel:

„Es ist dies ganz derjenige Standpunkt, welchen E. Mach in seinen scharfsinnigen Untersuchungen über den Gegenstand geltend gemacht hat. (E. Mach, Die Entwicklung der Prinzipien der Dynamik. Zweites Kapitel. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung.)“ (Einstein, 1912e, pp. 39, fn. 1)

Darauf sind wir im Abschnitt „4.4.5.3. Thema III: Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]“ näher eingegangen. Wir haben auf die Kommentare in *The Collected Papers of Albert Einstein* (CPAE 4; _ ; p. 127) (CPAE 4; _ ; p. 295), auf Einsteins und Grossmanns Arbeit (Einstein & Grossmann, 1913, p. 6) und in diesem Zusammenhang auch auf Einsteins Brief an Mach (am 25.06.13) (Wolters, 1987, pp. 151-152) (CPAE 5; 448; p. 531-532) hingewiesen. Anschließend sind wir auf Einsteins Arbeit (Einstein,

³³¹ Siehe dazu „*Nahwirkungstheorie*“ (Wolters, 1987, pp. 65-70).

1913c, pp. 1260-1261) eingegangen usw. und konnten allgemein zeigen, dass die Relativität der Trägheit bzw. das Machsche Prinzip Einstein bei der Entstehungsgeschichte offensichtlich in den Jahren 1912-1916 (Einstein, 1912e) (Einstein & Grossmann, 1913) (Einstein, 1913c) (Einstein, 1914o, pp. 1031-1032, 1085) (Einstein, 1916e, pp. 771-772) beschäftigte.

Er gab seine „Entwurf“-Theorie (Einstein & Grossmann, 1913) auf, weil er mit ihr das Machsche Prinzip nicht erfüllen konnte – siehe dazu (CPAE 8, Part A; 123; p. 177-178) und (CPAE 7; 4; p. 42, fn. 5). Einstein dachte (Einstein, 1916e) womöglich, dass, wenn seine Theorie das Relativitätsprinzip bzw. die allgemeine Kovarianz erfüllt, sich dann auch automatisch das Machsche Prinzip erfüllt – siehe dazu (CPAE 8, Part A; 245; p. 324-325). (Dieser Ansatz hätte zu den ursprünglichen Überlegungen von Mach gut gepasst.)³³² So schreibt Einstein an Besso (am 31. Juli 1916):

„Das Feld des rotierenden Ringes in der Nähe der Achse ist so zu finden. Das Feld in erster Näherung ergibt sich leicht durch unmittelbare Integration der Feldgleichungen. Die zweite Näherung ergibt sich aus den Vakuumfeldgleichungen als nächste Näherung. Die erste Näherung liefert die Korioliskräfte, die zweite die Zentrifugalkräfte. Dass Letztere richtig herauskommen, ist bei der allgemeinen Kovarianz der Gleichungen selbstverständlich, sodass ein wirkliches Durchrechnen keinerlei Interesse mehr hat. Dies Interesse ist nur dann vorhanden, wenn man nicht weiss, ob Rotations-Transformationen zu den ‚erlaubten‘ gehören, d. h. wenn man sich über die Transformationseigenschaften der Gleichungen nicht im Klaren ist, welches Stadium gottlob endgültig überwunden ist.“

(CPAE 8, Part A; 245; p. 324-325)

Einstein geht hier offensichtlich (noch) davon aus, dass das (metrische) Feld (innerhalb) des rotierenden Ringes durch das (metrische) Feld der Minkowski-Raumzeit in rotierenden Koordinaten ersetzt werden kann – siehe dazu (CPAE 8, Part A; 245; p. 325, fn. 7) und (CPAE 7; 4; p. 42, fn. 5). Somit können Scheinkräfte, wie die Korioliskraft und die Zentrifugalkraft, als wirkliche Kräfte betrachtet werden, die in diesem Fall von der Rotation des rotierenden Ringes verursacht werden. Nach Einstein gingen somit die Relativität der Trägheit bzw. das Machsche Prinzip und die allgemeine Kovarianz Hand in Hand und das Problem schien durch die Allgemeine Relativitätstheorie endlich gelöst zu sein.

³³² Siehe dazu Beispielsweise (Mach, 2012, pp. 260-262).

In einem Brief (am 1. November 1916) machte jedoch Willem de Sitter Einstein darauf aufmerksam, dass die Allgemeine Relativitätstheorie das Machsche Prinzip nicht zwangsläufig erfüllte:

„[...]

Ich habe noch viel gedacht über die relativität der Trägheit und den fernen Massen, und wie langer ich darüber denke, desto unannehmlicher wird mir Ihre Hypothese. Ich meine die Hypothese dass $a.$ im unendlichen die g_{ij} so sind dass die Minkowski'sche Kegel zu ebenen (d. h. zu drei-dimensionalen ebenen Räumen) werden, und $b.$ dass es weit hinter allen bekannten materiellen Körpern noch unbekannte Massen gibt die hervorbringen dass in den Teilen des Raumes und der Zeit die wir kennen bei abwesenheit von Massen die specielle Relativitätstheorie gilt, also die Minkowskischen Kegel eine endliche Oeffnung haben. [...] Wenn ich recht habe würde also die Hypothese nicht nur die Welt endlich machen im Raum, aber auch in der Zeit. Wir wissen nichts von der unendlich fernen Vergangenheit und der Unendlich fernen Zukunft – also keine Beobachtung kann uns lehren dass es immer eine Welt gegeben hat und immer eine Welt geben wird. Es ist nicht die principielle beschränktheit in Raum und Zeit die mich hindert, sondern die Ueberzeugung dass die Grenze, die ‚Hülle‘ doch immer hypothetisch bleiben wird, und niemals beobachtet werden wird. Jetzt können wir sagen: die Brunnen der Trägheit liegen ausserhalb der Milchstrasse, aber wenn unsere Enkel einmal eine Erfindung machen die die bekannte Welt vergrössert in demselben Verhältniss wie sie vor 300 Jahren durch die Erfindung des Fernrohrs vergrössert worden ist, so wieder einfach die Hülle hinausrücken müssen. Daraus folgere ich dass die Hülle keine physikalische Realität ist.

Wenn man die Hypothese annimmt, so wird man erstens sich [auch?] Vorstellung darüber machen wollen wo diese fernen Massen sich befinden, und wie sie beschaffen sind, zweitens darüber wie denn die Trägheit von dort zu hier herüber kommt. Es wird ein künstlicher Mechanismus erfunden werden. Und das Koordinaten System bezüglich welche die Hülle und dieser Mechanismus ruht, wirdt ausgezeichnet sein. Das Relativitätsprincip wird zwar *formell* noch wahr sein. aber tatsächlich werden wir den alten absoluten Raum mit dem Aether zurück haben.

[...]

Alles das ist natürlich *nicht* in Streit mit dem Relativitätsprincip, dass erkenne ich. Aber wenn ich dass alles Glauben soll, dan hat Ihre Theorie für mich doch viel von ihre klassische Schönheit verloren. Mann gewinnt damit eine ‚Erklärung‘ des Ursprungs der Trägheit, die doch eigentlich keine Erklärung ist, denn es ist nicht eine Erklärung aus bekannten, oder kontrollierbaren Tatsachen, sondern aus ad hoc erfundenen Massen. Ich bin überzeugt – aber das ist natürlich nur ein *Glauben*, dass nicht erwiesen werden kann – dass es mit diesen Massen gehen wird wie mit dem ‚Aetherwind‘. Man wird immer neue Anstrengung machen sie wirklich zu beobachten, aber das wird niemals gelingen, bis man schliesslich zu der Ueberzeugung kommt dass sie nicht existieren. [...] Wäre es nicht möglich dass schliesslich die Erklärung der Trägheit im Unendlich *kleinen* gesucht werden muss statt im Unendlich grossen? Ich bin kein Physiker, und wahrscheinlich ist dass nur eine Hallucination, ganz ohne Sinn. Aber an den fernen Massen glauben ist mir sehr schwer. Lieber ist es mir keine Erklärung der Trägheit zu haben, als diese.“

(CPAE 8, Part A; 272; p. 357-358)

Wir wollen bei der Einstein-De-Sitter Debatte nicht allzu sehr ins Detail gehen. Einstein wollte eine Rückkehr zum absoluten Raum und zur absoluten Zeit von Newton unbedingt vermeiden. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie war es aber nicht möglich das

(metrische) Feld allein durch die Materie zu bestimmen, weshalb die Trägheit nicht allein auf die Massen im Universum zurückführbar war. Man musste zusätzlich die Grenzbedingungen des Universums so modellieren, dass das Machsche Prinzip erfüllt werden konnte. Sein Konzept hat Einstein mit de Sitter in den Niederlanden besprochen. Wie aus de Sitters Brief deutlich erkennbar, war er damit nicht einverstanden. De Sitter argumentiert unter anderem, dass nach diesem Konzept die Massen, welche für die Trägheit verantwortlich wären, im nichtbeobachtbarem Teil des Universums liegen würden – siehe dazu „The Einstein-De Sitter-Weyl-Klein Debate“ (CPAE 8, Part A; _ ; p. 352). Deswegen schreibt de Sitter von „ad hoc erfundenen Massen“, die er anschließend mit dem Äther vergleicht. Einstein antwortet darauf (am 4. November 1916):

„[...] Es thut mir leid, Ihnen gegenüber zu viel Nachdruck auf die Frage der Grenzbedingungen gelegt zu haben. Es handelt sich hier um eine reine Geschmacksfrage, die nie eine naturwissenschaftliche Bedeutung erlangen wird. [...] Eine *besondere* trägheitserzeugende Hülle wird nicht angenommen; sondern alle trägheitserzeugende Materie wird aus Sternen bestehen, wie in dem unseren Fernrohren zugänglichen Teil der Welt. Dies ist mit den Thatsachen allerdings nur dann vereinbar, wenn wir uns vorstellen, dass der uns sichtbare Teil der Welt gegenüber dem Weltall als äusserst klein (inbezug auf Masse) aufzufassen sei. Psychologisch hat diese Auffassung bei mir eine bedeutende Rolle gespielt; denn sie gab mir den Mut, an dem Problem weiterzuarbeiten, als es mir absolut nicht gelingen wollte, kovariante Feldgleichungen zu erlangen.

Nun nachdem die kovarianten Feldgleichungen gewonnen sind, liegt kein Anlass mehr vor, auf die vollkommene Relativität der Trägheit ein so grosses Gewicht zu legen. Ich kann dann mit Ihnen auch so sagen. Ich habe stets einen gewissen Teil der Welt zu beschreiben. In diesem sind die $g_{\mu\nu}$ (sowie die Trägheit) bestimmt durch die in dem betrachteten Raumteil befindlichen Massen und durch die $g_{\mu\nu}$ an der Begrenzung. Was von der Trägheit von den Massen herrührt und was von den Grenzbedingungen, hängt von der Wahl der Begrenzung ab.“ (CPAE 8, Part A; 273; p. 359-360)

Wir sehen, wie er gegenüber de Sitter betont, welche psychologisch bedeutende Rolle das Machsche Prinzip für ihn gespielt hat: Es gab ihm Mut weiterzuarbeiten, bis er die Allgemeine Relativitätstheorie in kovarianter Form schreiben und somit abschließen konnte. Nun, wo sie fertig ist, erklärt er, bräuchte man an der Relativität der Trägheit bzw. am Machschen Prinzip nicht unbedingt festzuhalten – es ist lediglich eine Geschmacksfrage, ob man die Grenzbedingungen des Universums so angibt, dass sie mit dem Machschen Prinzip im Einklang steht. Deutlich jedoch ist zu erkennen, dass er selbst am Machschen Prinzip noch festhalten wollte – denn es hatte ihn von Beginn an begleitet.

Deshalb begann nun Einstein in seinem Artikel „Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1917b) ein räumlich geschlossenes Modell des Universums vorzuschlagen, um das Problem der Grenzbedingung zu lösen:

„§ 2. Die Grenzbedingungen gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie.

[...] Es ergibt sich dann schließlich, daß Grenzbedingungen im räumlich Unendlichen überhaupt entfallen, da das Weltkontinuum bezüglich seiner räumlichen Erstreckungen als ein in sich geschlossenes von endlichem, räumlichem (dreidimensionalem) Volumen aufzufassen ist.

Meine bis vor kurzem gehegte Meinung über die im räumlich Unendlichen zu setzenden Grenzbedingungen fußte auf folgenden Überlegungen. In einer konsequenten Relativitätstheorie kann es keine Trägheit gegenüber dem »Raume« geben, sondern nur eine Trägheit der Massen gegeneinander. Wenn ich daher eine Masse von allen anderen Massen der Welt räumlich genügend entferne, so muß ihre Trägheit zu Null herabsinken. [...]“

(Einstein, 1917b, pp. 144-145)

Somit war das Machsche Prinzip nach Einstein wieder gerettet. Dieses spezielle Modell eines geschlossenen und somit endlichen, aber unbegrenzten, Universums, welches Einstein hier vertritt, ist jedoch nicht selbstverständlich (Einstein, 1917b) – beispielsweise geht er von einem statischen Universum aus, worauf er zum Schluss noch ausdrücklich hinweist:

„Die theoretische Auffassung der tatsächlichen Welt wäre also, falls dieselbe unserer Betrachtung entspricht, die folgende. Der Krümmungscharakter des Raumes ist nach Maßgabe der Verteilung der Materie zeitlich und örtlich variabel, läßt sich aber im großen durch einen sphärischen Raum approximieren. Jedenfalls ist diese Auffassung logisch widerspruchsfrei und vom Standpunkte der allgemeinen Relativitätstheorie die naheliegendste; ob sie, vom Standpunkt des heutigen astronomischen Wissens aus betrachtet, haltbar ist, soll hier nicht untersucht werden. Um zu dieser widerspruchsfreien Auffassung zu gelangen, mußten wir allerdings eine neue, durch unser tatsächliches Wissen von der Gravitation nicht gerechtfertigte Erweiterung der Feldgleichungen der Gravitation einführen. Es ist jedoch hervorzuheben, daß eine positive Krümmung des Baumes durch die in demselben befindliche Materie auch dann resultiert, wenn jenes Zusatzglied nicht eingeführt wird; das letztere haben wir nur nötig, um eine quasistatische Verteilung der Materie zu ermöglichen, wie es der Tatsache der kleinen Sternengeschwindigkeiten entspricht.“

(Einstein, 1917b, p. 152)

Um zu diesem kosmologischen Modell zu gelangen, musste Einstein die Allgemeine Relativitätstheorie jedoch um die „universelle Konstante λ “ erweitern (Einstein, 1917b, pp. 144-152). Darüber schreibt er an Paul Ehrenfest:

„Ich habe auch wieder etwas verbrochen in der Gravitationstheorie, was mich ein wenig in Gefahr setzt, in einem Tollhaus interniert zu werden. Hoffentlich habt Ihr keins in Leiden, dass ich Euch ungefährdet wieder besuchen kann.“ (CPAE 8; Part A; 294; p. 386)

Es stellt sich daher die Frage, weshalb Einstein diese Konstante einführte, obwohl er (wohl humorvoll) meint, dass er deswegen in einem „Tollhaus“ landen könnte. Peter C. Aichelburg erklärt in „Mach’s Influence on Einstein’s ‘Biggest Blunder’ and the Consequences for Modern Cosmology“ (Aichelburg, 2019), dass Einstein aus drei Gründen sich für die Konstante λ entschied (Aichelburg, 2019, p. 315):

1. Sie ermöglichte ein statisches Universum.
2. Das Trägheitsproblem konnte dadurch überwunden werden, da das Universum geschlossen, aber zugleich unbegrenzt war. (Die Masse eines Körpers konnte somit nicht in einer unendlichen Entfernung zu den anderen Massen im Universum betrachtet werden.)
3. Durch die Konstante λ erhoffte sich Einstein, dass keine Vakuumlösungen mehr gegeben wären. (Ein Universum ohne Massen bzw. ohne Körper darin würde somit physikalisch keinen Sinn machen.)

Das Machsche Prinzip in der relativistischen Kosmologie zu vertreten war für Einstein offensichtlich „vom Standpunkte der allgemeinen Relativitätstheorie [das] naheliegendste“. Dies verdeutlicht einmal mehr, die Bedeutung, die er selbst jenem Prinzip beimaß – unabhängig davon, ob dies für die Allgemeine Relativitätstheorie notwendig war oder nicht. In einem Brief an Felix Klein berichtet er daher (am 26. März 1917):

„Die neue Variante der Theorie bedeutet formal eine Komplizierung der Grundlagen und wird wohl von fast allen Fachgenossen als ein wenn auch interessantes, aber doch mutwilliges und überflüssiges Kunststück angesehen werden, zumal eine empirische Stütze sich in absehbarer Zeit kaum wird herbeischaffen lassen. Ich aber sehe die Sache als eine notwendige Ergänzung an, ohne welche weder die Trägheit noch die Geometrie wahrhaft relativ ist. Wer es aber nicht als störend empfindet, wenn die Existenz eines $g_{\mu\nu}$ – Feldes ohne felderzeugende Materie aus der Theorie sich als möglich ergibt, und wenn eine einzige (allein in der Welt vorhanden gedachte) Masse Trägheit besitzen kann, der ist von der Notwendigkeit des neuen Schrittes nicht zu überzeugen.“ (CPAE 8, Part A; 319; p. 425)

Einstein sah also seine Überlegungen als „eine notwendige Ergänzung an, ohne welche weder die Trägheit noch die Geometrie wahrhaft relativ ist.“ Die Ansicht, dass er damit alle

Physiker oder Astronomen von der „Notwendigkeit des neuen Schrittes“ überzeugen werde, hatte er nicht. Es war vor allem seine eigene Überzeugung, dass das Machsche Prinzip bzw. die Relativität der Trägheit kosmologisch ihre Gültigkeit bewahren sollte. Wie sich bald zeigen sollte, konnte man mit der Allgemeinen Relativitätstheorie unterschiedliche Modelle ableiten (CPAE 8, Part A; 317; p. 353-354). Einstein jedoch blieb (noch längere Zeit) bei seiner Überzeugung, auf das (von ihm mathematisch formulierte) Machsche Prinzip, nicht verzichten zu wollen.³³³ In seiner Arbeit „Prinzipielles zur Allgemeinen Relativitätstheorie“ heißt es daher:

„c) Machsches Prinzip: Das G -Feld ist *restlos* durch die Massen der Körper bestimmt. Da Masse und Energie nach den Ergebnissen der speziellen Relativitätstheorie das Gleiche sind und die Energie formal durch den symmetrischen Energietensor ($T_{\mu\nu}$) beschrieben wird, so besagt dies, daß das G -Feld durch den Energietensor der Materie bedingt und bestimmt sei.“ (Einstein, 1918e, pp. 241-242)

Und in „Kritisches zu einer von Hrn. de Sitter gegebenen Lösung der Gravitationsgleichungen“ erklärt er:

„Nach meiner Meinung bildet die allgemeine Relativitätstheorie nämlich nur dann ein befriedigendes System, wenn nach ihr die physikalischen Qualitäten des Raumes allein durch die Materie *vollständig* bestimmt werden. Es darf also kein $g_{\mu\nu}$ -Feld, d. h. kein Raum-Zeit-Kontinuum, möglich sein ohne Materie, welche es erzeugt.“ (Einstein, 1918c, p. 271)

Auf die weiteren kosmologischen Diskussionen, die Einstein mit de Sitter, Hermann Weyl und Felix Klein führte, werden wir nicht weiter eingehen und verweisen den Leser auf (CPAE 8, Part A; _ ; p. 355-357). Erwähnt sei an dieser Stelle, dass de Sitter (1917/1918) zeigen konnte, dass die Allgemeine Relativitätstheorie mit einer universellen Konstante auch Lösungen bot, die das Machsche Prinzip nicht erfüllten (CPAE 8, Part A; _ ; p. 356-357). Das Prinzip blieb daher eine Geschmacksfrage – aber eben ein *Prinzip* nach Einsteins Geschmack, wie die Arbeit „Spielen Gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle?“ (Einstein, 1919a) verdeutlicht (Einstein, 1919a, pp. 353-356). In seinen Notizen für seinen Vortrag „Allgemeine Relativität Sommersemester 1919. Berlin“, die er von Mai bis Juni 1919 hielt, schreibt er:

³³³ Siehe dazu den Brief von Einstein an de Sitter (am 24. März 1917) (CPAE 8, Part A; 317; p. 421-422) und an Gustav Mie (CPAE 8, Part B; 460; p. 638-640).

„Kosmologisches Problem.

Genäherte Lösung zeigt, dass genäherte Massen Trägheit vergrößern, Induktion im Sinne der Beschl. erzeugen, sowie Kor. Kräfte. Einheit der Auffassung führt dazu, jegliche Trägheit, d. h. das $g_{\mu\nu}$ -Feld als durch Materie bedingt anzusehen. (Allg. Relativitäts-Gedanke (Mach)“ (CPAE 7; 19; p. 170)

Aus diesen Gründen wundert es nicht, dass Einstein in seiner Kyoto-Rede erklärt:

„[80] Aus den Arbeiten, die nach 1915 geleistet wurden, sei lediglich das kosmologische Problem erwähnt. [...] Ihnen zugrunde gelegt sind die Behandlung der Grenzbedingungen in der Allgemeinen Relativitätstheorie und auch die MACHschen Überlegungen über die Trägheit. [...]

[85] Die Grenzbedingungen für die Gravitationsgleichung sollten invariant gehalten werden. [86] Zu diesem Zweck betrachtete ich die Welt als einen geschlossenen Raum und konnte so die Grenzen beseitigen, wodurch die Lösung des kosmologischen Problems ermöglicht wurde. [87] Infolgedessen erscheint die Trägheit nunmehr nur als Eigenschaft zwischen den Körpern, so daß die Trägheit der Körper auch verschwinden muß, wenn keine relativ gegeneinanderstehende Materie vorhanden ist. [88] Durch diesen Schluß, so glaube ich, erlangte die Allgemeine Relativitätstheorie auch die erkenntnistheoretische Vollständigkeit.

[89] In diesem kurzen historischen Rückblick habe ich versucht, Ihnen zu zeigen, wie die Hauptpunkte der Relativitätstheorie aufgestellt worden sind.“

(Haubold & Yasui, 1986, pp. 277-278)

Tatsächlich war Einstein nach der Fertigstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie bemüht, das Machsche Prinzip in das kosmologische Konzept einzuführen, zu begründen und zu verteidigen. Das Machsche Prinzip war eben eine Geschmacksfrage – sie war also nicht unbedingt notwendig. Einstein hoffte, dass dadurch „die Allgemeine Relativitätstheorie auch die erkenntnistheoretische Vollständigkeit“ erlangen konnte [88]. Erkenntnistheoretisch hatte ihn nämlich das Machsche Prinzip (in unterschiedlichen Formulierungen) jahrelang bei der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie begleitet – offensichtlich tat er sich später schwer, davon abzugehen. Wir können daher sehen, dass Einsteins Erläuterungen in seiner Kyoto-Rede mit den Quellen in Übereinstimmung sind.

Um das Machsche Prinzip zu verteidigen führte er sogar eine universelle Konstante λ ein (ab 1917), die ein statisches Universum beschreiben sollte, welches das Machsche Prinzip enthielt. De Sitter konnte theoretisch zeigen, dass ein kosmologisches Modell mit Konstante λ das Machsche Prinzip jedoch nicht erfüllen musste.

Die weitere Entwicklung in der Astronomie widersprach immer mehr dem statischen kosmologischen Modell Einsteins:

- 1922 und 1924 konnte Alexander Friedmann kosmologische Modelle formulieren, die weder statisch waren, noch die Konstante λ beinhalteten – siehe (Aichelburg, 2019, p. 317).
- 1927 postulierte George Lemaitre ein expandierendes Universum (Lemaître, 1927).
- 1929 stellte Edwin Hubble mit Hilfe von Leistungsstarken Teleskopen fest, dass die Galaxien sich voneinander entfernen, und zwar umso schneller, je größer die Distanz zueinander war (Hubble, 1929).

Deshalb veröffentlicht Einstein ab 1931 Arbeiten, wo er sowohl auf die universelle Konstante als auch auf ein statisches Modell verzichtete (O’Raifeartaigh & Mitton, 2018, pp. 321-322) und behielt diese Meinung auch in den 1940ern bei (O’Raifeartaigh & Mitton, 2018, pp. 323-325). Laut der Erzählung des Physikers George Gamov soll Einstein gesagt haben, dass er die von ihm selbst eingeführte universelle Konstante als den größten Fehler seines Lebens ansah (O’Raifeartaigh & Mitton, 2018, p. 325).

In den 1990er Jahren wurde entdeckt, dass das Universum eine beschleunigte Expansion erfährt, die mit der *dunklen Energie* begründet wird. Um die dunkle Energie zu beschreiben, wurde die kosmologische Konstante wieder eingeführt (Aichelburg, 2019, pp. 317-318).

Die Physikgeschichte ist voll von solchen Ironien: Konzepte wie die kosmologische Konstante werden (1930er) aufgegeben und Jahrzehnte später (1990er) wieder in die theoretische Physik aufgenommen. Einstein selbst wäre wohl darüber erfreut gewesen, dass die Physik stets in einem Wandel und einem fortlaufenden Dialog³³⁴ (auch über bereits aufgegebene Konzepte) ist.

Insofern bleibt der historisch-kritische Blick auf die Physikgeschichte von Mach erhalten. Seine Kritik (an der klassischen Mechanik) konnte bereits zeigen, dass man für selbstverständlich angenommene, fundamentale Begriffe, wie Raum, Zeit und Masse – die bereits bei der Beschreibung des Zustandes eines Körpers ihre Anwendung finden – alle anderen Körper im Universum nicht außer Acht lassen sollte. „Absolute“ Begriffe (wie Raum und Zeit) anzunehmen war nicht die Aufgabe der Physik. Im Gegenteil: Es muss für die Forschung stets eine unvoreingenommene Atmosphäre gegeben sein, um neue

³³⁴ Siehe dazu Abschnitt „4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]“.

Zusammenhänge erkennen und aufdecken zu können. Die philosophische bzw. erkenntnistheoretische Aufgabe ist aus diesen einzelnen Daten ein gesamtes Bild zu rekonstruieren:

„Das von den großen Forschern geübte Verfahren des Zusammenstimmens der Einzelvorstellungen mit dem Allgemeinbild eines Erscheinungsgebietes, die stete Rücksicht auf das Ganze bei Betrachtung des Einzelnen, kann als ein wahrhaft philosophisches Verfahren bezeichnet werden. Eine wirklich philosophische Behandlung einer Spezialwissenschaft wird immer darin bestehen, dass man deren Ergebnisse mit dem feststehenden Gesamtwissen in Zusammenhang und Einklang bringt.“ (Mach, 2012, p. 44)³³⁵

Dabei kommen Gedankenexperimenten eine wichtige Rolle zu, um das Ganze in einem stimmigen Bild rekonstruieren und einordnen zu können (Mach, 2012, p. 43). In diesem Sinne ist das Machsche Prinzip als kosmologisches Prinzip³³⁶ nur als eine Sonderform einer allgemein wissenschaftlichen Methode verstehbar:

„In der Tat kann die Naturwissenschaft durch bloße Beachtung des *Einzelnen* nichts erreichen, wenn sie nicht zeitweilig auch den Blick ins *Große* richtet. Die Galileischen Fallgesetze, das Huygenssche Prinzip der lebendigen Kräfte, das Prinzip [...] der virtuellen Verschiebungen, selbst der Massenbegriff, konnten, wie wir uns erinnern, nur gewonnen werden, indem abwechselnd das Einzelne und das Ganze der Naturvorgänge betrachtet wurde. Man kann bei der Nachbildung der mechanischen Naturvorgänge in Gedanken von den Eigenschaften der einzelnen Massen (von den Elementargesetzen) ausgehen, und das Bild des Vorganges zusammensetzen. Man kann sich aber auch an die Eigenschaften des ganzen Systems (an die Integralgesetze) halten. Da aber die Eigenschaften einer Masse immer Beziehungen zu anderen Massen enthalten, z.B. in der Geschwindigkeit und Beschleunigung schon eine Beziehung auf die Zeit, also auf die ganze Welt liegt, so erkennt man, dass es *reine* Elementargesetze eigentlich gar nicht gibt. Es wäre also inkonsequent, wenn man den doch unentbehrlichen Blick auf das Ganze, auf allgemeinere Eigenschaften, als weniger sicher ausschließen wollte. Wir werden nur, je allgemeiner ein neuer Satz und je größer dessen Tragweite ist, mit Rücksicht auf die Möglichkeit des Irrtums, desto *bessere Proben* für denselben verlangen.“ (Mach, 2012, p. 486)³³⁷

³³⁵ Siehe dazu auch (Mach, 2012, pp. 86-87).

³³⁶ Mach erklärt:

„Bedenkt man, dass die in die Beschleunigung eingehende Zeit selbst nichts ist als die Maßzahl von Entfernungen (oder von Drehungswinkeln) der Weltkörper, so sieht man, dass selbst in dem einfachsten Fall, in welchem man sich scheinbar nur mit der Wechselwirkung von *zwei Massen* befasst, ein Absehen von der *übrigen Welt* nicht möglich ist. Die Natur beginnt eben nicht mit Elementen, so wie wir genötigt sind, mit Elementen zu beginnen. Für uns ist es allerdings ein Glück, wenn wir zeitweilig unseren Blick von dem überwältigenden Ganzen ablenken und auf das Einzelne richten können. Wir dürfen aber nicht versäumen, alsbald das vorläufig Unbeachtete neuerdings ergänzend und korrigierend zu untersuchen.“ (Mach, 2012, p. 264)

³³⁷ Siehe dazu auch (Mach, 2012, pp. 173-173, 523, 555).

Ähnlich hat auch Einstein die Gedankenexperimente verwendet – sei es nun, um die Elektrodynamik mit der Mechanik zu vereinen (SRT) oder die Relativitätstheorie auf die Gravitation auszuweiten (ART).

Lassen wir an dieser Stelle die Entstehungsgeschichte der Relativitätstheorie in Gedanken Revue passieren, so erkennen wir, dass, um zu einem gesamten Bild zu kommen, es nicht ausreicht, mehr über Einstein als Person zu wissen. Er ist als Individuum stets ein Teil der sozio-kulturellen, wissenschaftlichen Gesellschaft. Beispielsweise profitierte Einstein (für die SRT) von der damaligen Technologie, welche unter anderem die Experimente von Fizeau, Michelson und Eichenwald ermöglichten; zudem orientierte er sich an den theoretischen Konzepten (unter anderem) von Mach, Lorentz, Poincare, Wien, Kohl, Voigt, Cohn und Abraham. Vor allem der wissenschaftliche Dialog und die Diskussion, die im Jahr 1904 stattfanden, waren für Einstein enorm förderlich.³³⁸ Für die Allgemeine Relativitätstheorie waren Machs Konzepte sicher wegweisend – es überrascht daher nicht, dass Einstein in den Briefen an Mach ihn darauf aufmerksam machte, dass die (sich noch in der Entwicklung befindende) Theorie seine Ansichten verteidigte. Aber sowohl Minkowskis Arbeit, die Mach sehr schätzte, trug für den Weg der SRT zur ART Wesentliches bei, als auch Einsteins Freunde Besso und Grossmann usw. Auf diese Weise ist eine rationale Rekonstruktion möglich und der Fortschritt der Wissenschaft verstehbar – oder wie Mach erläuterte:

„Auf zweifache Weise wächst diese Wissenschaft. *Einmal*, indem wir die beobachteten Tatsachen, die Vorgänge im Gedächtnis festzuhalten, in den Vorstellungen nachzubilden, in Gedanken zu rekonstruieren suchen. Bei Fortsetzung der Beobachtungen weisen aber diese nacheinander oder zugleich vorgenommenen Konstruktionsversuche immer gewisse Mängel auf, durch welche die Übereinstimmung derselben sowohl mit den Tatsachen als auch

³³⁸ Ähnlich kann womöglich auch der Werdegang der Quantentheorie verstanden werden. Sein Buch *Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik* beginnt Heisenberg mit den Worten:

„Wissenschaft wird von Menschen gemacht. Dieser an sich selbstverständliche Sachverhalt gerät leicht in Vergessenheit, und mag zur Verringerung der oft beklagten Kluft zwischen den beiden Kulturen, der geisteswissenschaftlich-künstlerischen und der technisch-naturwissenschaftlichen, beitragen, wenn man ihn wieder in Gedächtnis zurückruft. Das vorliegende Buch handelt von der Entwicklung der Atomphysik in den letzten 50 Jahren, so wie der Verfasser sie erlebt hat. Naturwissenschaft beruht auf Experimenten, sie gelangt zu ihren Ergebnissen durch die Gespräche der in ihr Tätigen, die miteinander über die Deutung der Experimente beraten. [...] In den Gesprächen spielt die Atomphysik keineswegs immer die wichtige Rolle. Vielmehr geht es ebensooft um menschliche, philosophische oder politische Probleme, und der Verfasser hofft, daß gerade daran deutlich wird, wie wenig sich die Naturwissenschaft von diesen allgemeineren Fragen trennen läßt.“ (Heisenberg, 1969, p. 9)

untereinander gestört wird. Es ergibt sich also das Bedürfnis der sachlichen Korrektur und der logischen Zusammenstimmung der Konstruktionen; dies ist der *zweite* die Wissenschaft bauende Prozess. Wäre jeder nur auf sich angewiesen, müsste jeder mit seinen Beobachtungen und Gedanken allein von neuem beginnen, so könnte er nicht weit gelangen. Dies gilt für den einzelnen Menschen wie für das einzelne Volk. Das Erbe also, welches unsere unmittelbaren Kulturvorgänger, die griechischen Naturforscher, Astronomen und Mathematiker, zurückgelassen haben, können wir gar nicht hoch genug einschätzen. Im Besitz eines wenn auch unzureichenden Weltbildes und namentlich mit der logisch-kritischen Schulung der griechischen Mathematiker ausgerüstet, treten wir schon unter günstigen Bedingungen in die Forschung ein. Dieser Besitz erleichtert uns die Fortsetzung der Arbeit. Aber nicht allein der wissenschaftliche Nachlass, sondern auch die *materielle* Kultur, in unserem besondern Falle die überkommenen Maschinen und Werkzeuge, sowie die Tradition des Gebrauchs derselben müssen in Betracht gezogen werden.“

(Mach, 2012, p. 100)

4.4.6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Konzepte von Ernst Mach hatten nicht nur einen starken Einfluss auf die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie. Mit dem Machschen Prinzip setzte sich Einstein auch später auseinander; siehe dazu seinen letzten Vortrag in Princeton (am 14. April 1954) (Einstein, 1979, pp. 209, 210-211). Ob die endgültige Allgemeine Relativitätstheorie gänzlich im Sinne Machs ist, bleibt schlussendlich diskutabel (Weizsäcker, 1979, p. 164) (Aichelburg & Sexl, 1979, p. 204) (Barbour & Pfister, 1995a) (Aichelburg, 2019). Es bleibt (zurzeit) eine Geschmackssache und vor allem eine Diskussion unter Physikern, ob man das Machsche Prinzip als ein Auswahlprinzip annehmen möchte oder nicht.³³⁹

Gänzlich unabhängig davon ist aber wissenschaftsgeschichtlich und -theoretisch die Frage zu stellen, ob Machs Einfluss auf die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie lediglich auf das Machsche Prinzip zu beschränken ist. Damit wir einen Beitrag zu dieser Fragestellung leisten können, haben wir ebenso den zweiten Teil von Einsteins Kyoto-Rede rekonstruiert, da darin Mach mehrmals erwähnt wird³⁴⁰.

4.4.6.1. Die Allgemeine Kovarianz und Machs (eindeutiger) Einfluss

Im Abschnitt „4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]“ sind wir darauf eingegangen, dass Einstein (im Jahre 1907) [45]/[47-48] unzufrieden war, weil das Konzept der Relativität die beschleunigten Bezugssysteme nicht einbeziehen konnte. Offensichtlich wurde er durch Machs Kritik darauf aufmerksam: „[66] MACH war derjenige, der behauptete, daß alle Systeme, die Beschleunigung aufweisen, einander gleichwertig seien.“ (Haubold & Yasui, 1986, p. 276) Auch durch andere Quellen kann das einfach belegt werden, z.B: (Einstein, 1914h, p. 344) (Einstein, 1914o, pp. 1031-1032) (Einstein, 1916e, pp. 771-772) (Einstein, 1983, pp. 10, 24-26) (Reichenbach, 1928, pp. 247-248). Reichenbach spricht diesbezüglich sogar von einem Machschen Programm bzw. von einem „Anfang eines Programms“ (Reichenbach, 1928, p. 252).

³³⁹ Siehe dazu die Abschnitte „4.4.4. Die Analyse von Einsteins Rede: Teil II“ und „4.4.5.4. Thema IV: Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]“.

³⁴⁰ Obwohl Mach im zweiten Teil der Rede Einsteins mehrmals erwähnt wird (CPAE 13; 399; p. 638-639) – gibt es dazu in *The Collected Papers of Albert Einstein* gar keine Kommentare. Wir konnten somit einen Beitrag zum Forschungsstand leisten.

Aus Einsteins Nachruf „Ernst Mach“ (Einstein, 1916c) können wir sogar in Erfahrung bringen, auf welches Kapitel (und welche Abschnitte) in Machs *Mechanik* er sich bezog (Einstein, 1916c, p. 102): das zweite Kapitel „Die Entwicklung der Prinzipien der Dynamik“, Abschnitte „6. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung“ (Mach, 2012, pp. 250-273) und „7. Übersichtliche Kritik der Newtonschen Aufstellungen“ (Mach, 2012, pp. 273-280). Der sechste Abschnitt ist überaus wichtig³⁴¹, weil wir darin folgende Themen finden:

- Machs Kritik an Newtons Interpretation des Eimer-Versuchs (Mach, 2012, pp. 257, fn. 202);
- seinen konzeptionellen Ansatz (Mach, 2012, p. 261), welcher später als eine Voraussage der Allgemeinen Relativitätstheorie theoretisch von Josef Lense und Walter Thirring ausgearbeitet wurde und heute als Thirring-Lense-Effekt bezeichnet wird (Mach, 2012, pp. 261, fn. 206)³⁴²;
- das Machsche Prinzip (Mach, 2012, pp. 262, fn. 208);
- den Wunsch eines Gravitationsgesetzes nach dem Ideal der elektrischen Fernwirkung bzw. eine Nahwirkungstheorie der Gravitation (Mach, 2012, pp. 272, fn. 215).

Einstein zitiert ausschließlich aus dem sechsten Abschnitt³⁴³. Insofern ist es stimmig, wenn er in aller Klarheit ausspricht:

„Die zitierten Zeilen zeigen, daß Mach die schwachen Seiten der klassischen Mechanik klar erkannt hat und nicht weit davon entfernt war, eine allgemeine Relativitätstheorie zu fordern, und dies schon vor fast einem halben Jahrhundert! [...] Die Betrachtungen über Newtons Eimerversuch zeigen, wie nahe seinem Geiste die Forderung der Relativität im allgemeineren Sinne (Relativität der Beschleunigungen) lag.“
(Einstein, 1916c, p. 103)

Aus diesem Grund können wir anhand der Quellen bestätigen, dass Einstein zur allgemeinen Kovarianz tatsächlich durch Machs Zeilen motiviert wurde.

³⁴¹ Im siebten Abschnitt gibt es unter anderem einen Hinweis auf Poincarés Buch *La Science et l'Hypothèse* (Mach, 2012, pp. 279, fn. 223) usw.

³⁴² Siehe dazu auch (Bondi & Samuel, 1997) (Meinl, 2016, p. 88) (Fließbach, 2016, p. 171).

³⁴³ Vergleiche (Einstein, 1916c, pp. 102-103) mit (Mach, 2012, pp. 250-252, 254-255, 258-259, 261).

4.4.6.2. Das Äquivalenzprinzip und Machs (möglicher) Einfluss

Im Abschnitt „4.4.5.2. Thema II: Das Äquivalenzprinzip [49]-[65]“ sind wir auf die Geschichte des eben jenes Prinzips eingegangen. Ab wann Einstein das Problem der Äquivalenz von schwerer und träger Masse beschäftigte, kann man nicht eindeutig sagen.

Er las (September 1899) die Arbeit „Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen“ (Wien, 1898) von Wilhelm Wien, die eine der ursprünglichen Anregungen für Einstein bei der Entwicklung der Relativitätstheorie war – siehe (CPAE 1; 57; p. 233-234). Interessanterweise bespricht Wien dort ebenfalls sowohl die Ausnahmestellung der Gravitation als auch die theoretisch nicht begründete Äquivalenz der trägen und der schweren Masse (Wien, 1898, p. XVI). Zu jener Zeit (September 1899) begann Einstein auch Machs Bücher zu lesen (CPAE 1; 54; p. 230). Es liegt daher nahe, dass er aufgrund von Wiens Arbeit (Wien, 1898) und Machs Buch *Mechanik* (Mach, 2012) die theoretische Herausforderung kannte und diese (bewusst oder unbewusst) im Gedächtnis behielt. Der Grund, weshalb Einstein jedoch erst das Jahr 1907 wählte, um sich dazu zu äußern, war höchstwahrscheinlich Plancks Schrift „Zur Dynamik bewegter Systeme“ (Planck, 1908), wo er auf die Äquivalenz zwischen schwerer und träger Masse und der Energie einging (Planck, 1908, p. 32).³⁴⁴

Jedenfalls erläutert Einstein in seiner Rede, dass er beim Schreiben der Arbeit „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) bemerkte, dass in der Speziellen Relativitätstheorie das Gravitationsgesetz nicht miteinbezogen wurde [50].³⁴⁵ Durch die SRT konnte man erfolgreich zur Äquivalenz von (träger) Masse und Energie gelangen; aber weshalb das Äquivalenzprinzip zwischen träger und schwerer Masse gegeben war, konnte damit nicht gelöst werden [52]-[53]. In „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) formuliert Einstein nun das erste Mal das Äquivalenzprinzip:

„Soweit wir wissen, unterscheiden sich die physikalischen Gesetze in bezug auf Σ_1 nicht von denjenigen in bezug auf Σ_2 ; es liegt dies daran, daß alle Körper im Gravitationsfelde gleich beschleunigt werden.“ (Einstein, 1907j, p. 454)

³⁴⁴ Die Schrift von Planck wurde der *Sitzungsber. d. k. preuß. Akad. der Wissensch. vom 13. Juni 1907* mitgeteilt (Planck, 1908, p. 1), weshalb Einstein bereits darauf (in einem anderen Zusammenhang) hinweisen konnte (Einstein, 1907j, pp. 452, fn. 1).

³⁴⁵ Diese Arbeit (Einstein, 1907j) wird in einer Karte (17.8.1909) von Einstein an Mach erwähnt (CPAE 5; 175; p. 205). Mach dürfte den wichtigen Hinweis von Einstein erkannt haben und vermerkte die Arbeit in seinem Notizbuch (CPAE 5; 175; p. 205, fn. 5).

Anhand eines Gedankenexperiments betrachtet Einstein zwei Bezugssysteme Σ_1 und Σ_2 . Dabei wird Σ_1 mit γ beschleunigt, während Σ_2 auf einem homogenen Gravitationsfeld steht und die Beschleunigung $-\gamma$ erfährt. Einsteins Schlussfolgerung ist, dass kein Experiment existiert, mit dem man innerhalb von Σ_1 oder Σ_2 feststellen könnte, ob man sich nun in einem beschleunigten System Σ_1 befindet oder in einem, welches auf einem gleichförmigen Gravitationsfeld steht.

Da Einstein das Gedankenexperiment als eine Methode wählt und Mach bekanntermaßen als ein Pionier in diesem Bereich gilt, stellte sich natürlich die Frage, ob Einstein zu seinem Gedankenexperiment durch Machs Werke inspiriert wurde. Dieser Frage sind wir im Abschnitt „4.4.5.2.1. Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip und Machs möglicher Einfluss“ eingegangen. Einstein hatte zwei Jahre vor seiner Kyoto-Rede (1920) in seiner Schrift „Gedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt“ (CPAE 7; 31; p. 245)³⁴⁶ das Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip [54]-[57], näher erläutert (CPAE 7; 31; p. 265-266) – und zwar geht es dabei um einen „*frei herabfallenden Beobachter*“ (CPAE 7; 31; p. 265) und die sich daraus ergebenden Folgerungen. Wie wichtig dieses Gedankenexperiment für den Ansatz der Allgemeinen Relativitätstheorie war, erklärt er mit den Worten:

„Die Erfahrungsthatsache von der Unabhängigkeit der Fallbeschleunigung vom Material ist also ein mächtiges Argument dafür, dass das Relativitätspostulat auf relativ zu einander ungleichförmig bewegte Koordinatensysteme auszudehnen ist.“
(CPAE 7; 31; p. 265)

Wenn man dieses Gedankenexperiment für unterschiedliche Fälle anwendet, kann man auf „spekulativem Wege“ (CPAE 7; 31; p. 266) zu verschiedenen Voraussagen gelangen – darauf sind wir in den Abschnitten „4.4.5.2.2. Gedankenexperiment: Lichtablenkung am Gravitationsfeld“ und „4.4.5.2.3. Gedankenexperiment: Gravitationsbedingte Rotverschiebung“³⁴⁷ näher eingegangen.

³⁴⁶ Der Titel dürfte eine Anlehnung an Machs Buch *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt* gewesen sein – siehe (CPAE 7; 31; p. 279, fn. 2).

³⁴⁷ In diesem Abschnitt konnten wir ebenfalls zeigen, dass der Doppler-Effekt nicht nur bei der Entstehungsgeschichte der SRT, sondern auch bei jener der ART eine wichtige Rolle gespielt hat – siehe dazu (Einstein, 1911h, p. 904) (Reichenbach, 1928, pp. 265-267). Zudem könnte es sein, dass Einstein Machs Gedankenexperiment zu rotierenden Systemen übernommen und erweitert hat, um zu der Idee der

Dass das Gedankenexperiment eine äußerst wichtige Methode bzw. ein nützliches Instrument für ihn darstellte, steht somit außer Frage. Interessant ist, dass Einstein Ernst Mach dezidiert mit dem Äquivalenzprinzip nicht in Verbindung verbringen möchte (Einstein, 1916c, p. 103) (CPAE 7; 31; p. 267-268). Diese Sichtweise von Einstein ist etwas überraschend. Mach machte nämlich bei der Kritik des Eimer-Experiments darauf aufmerksam, dass Newton bei seinen Überlegungen die restlichen Massen im Universum vernachlässigte (Mach, 2012, pp. 260-261). Nach Machs Sichtweise wäre es theoretisch möglich, die Trägheitsbewegung (und somit auch die Trägheitskräfte) eines Körpers auf die (gravitative) Wechselwirkung zu anderen Körpern zu definieren; dadurch kann man auf einen absoluten Raum in der Physik verzichten. Diese Argumentation wird heute als das Machsche Prinzip bezeichnet. Sie gewinnt vor allem dadurch an Bedeutung, dass man von einer Äquivalenz von träger und schwerer Masse ausgeht: Das Äquivalenzprinzips verbietet es die restlichen (schweren) Massen im Universum zu vernachlässigen, wenn man das Verhalten von träger Masse bespricht. Einsteins Schüler und Freund Hans Reichenbach hat das klar in seinem Buch *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre* (Reichenbach, 1928) ausgesprochen:

„Die Äquivalenz von Trägheit und Schwere ist die strenge Formulierung des Machschen Prinzips im engeren Sinne.“ (Reichenbach, 1928, p. 260)

Weshalb Einstein die „Äquivalenzhypothese“ (CPAE 7; 31; p. 268) mit Mach nicht in Verbindung bringt, hat wohl ganz einfache Gründe:

1.) Einstein wurde, wohl vor allem durch Wiens (Wien, 1898, p. XVI) und Plancks (Planck, 1908, p. 32) Schriften, motiviert, sich mit dem Äquivalenzprinzip auseinanderzusetzen.

2.) In Machs Arbeiten kommt ein mathematisch-physikalisches Konzept, in welchem sich die Äquivalenz von Energie und Masse ($E = m \cdot c^2$) manifestiert, nicht vor. Um für das Äquivalenzprinzip (der trägen und der schweren Masse) eine Allgemeingültigkeit für alle

gravitativen Zeitveränderung im Schwerfeld zu gelangen – siehe dazu (Einstein, 1916e, p. 775) (CPAE 7; 31; p. 270-271) (CPAE 7; 19; p. 148) (CPAE 7; 19; p. 178, fn. 6) und (Reichenbach, 1928, pp. 272-277). Außerdem konnten wir darlegen, dass die Neuinterpretation der „Ortszeit“ von Lorentz, die den Schlüssel zur Speziellen Relativitätstheorie darstellte (Einstein, 1907j, p. 413) ebenso im Zusammenhang der, sich noch im Entwicklungsprozess befindlichen, Allgemeinen Relativitätstheorie (Einstein, 1907j, p. 456) erneut besprochen wurde.

Gebiete der Physik aussprechen zu können, wäre eine Formel jedoch Voraussetzung gewesen. Infolgedessen sah Einstein diese Errungenschaft wohl als seine eigene an.³⁴⁸

Jedoch gibt es ebenso gute Gründe, dass Einstein sich zu seinem Gedankenexperiment über das Äquivalenzprinzip womöglich von Mach inspirieren ließ. Jedenfalls finden wir ein ähnliches Gedankenexperiment in Machs *Mechanik*:

„Wenn wir selbst von einer Höhe herabspringen oder fallen, haben wir ein eigentümliches Gefühl, welches durch die Aufhebung des Gewichtsdrucks der Körperteile aufeinander, des Blutes usw. bedingt sein muss. Ein ähnliches Gefühl, als ob der Boden unter uns versinken würde, müssten wir auf einem kleinern Weltkörper haben, wenn wir plötzlich dorthin versetzt würden. Das Gefühl des fortwährenden Erhebens, wie bei einem Erdbeben, würde sich auf einem größern Weltkörper einstellen.“ (Mach, 2012, p. 234)

Dieser Zusammenhang wurde bereits von anderen Forschern gesehen – siehe (Wolters, 1987, pp. 63-65) (Mach, 2012, pp. 234-235, fn. 186) (Heller, 1991, p. 177)³⁴⁹ (Staley, 2013, p. 47) (Staley, 2019, pp. 360-363). Anhand der Quellen lässt sich nicht mit Sicherheit beantworten, ob Einstein das Gedankenexperiment tatsächlich von Mach übernommen hat. Es spricht aber nichts dagegen, wissenschaftsgeschichtlich den Standpunkt zu vertreten, dass Einstein von Mach dazu inspiriert wurde, da Einstein allgemein sehr sparsam ist, was seine Quellen anbelangt.

Somit können wir unsere „8.Frage“ beantworten, welche lautete:

Wurde Einstein zu seinem berühmten Gedankenexperiment von Cohn oder von Mach inspiriert?

Da Einstein das Gedankenexperiment bereits in seinem Artikel „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) anwendet, kann sie nicht von Cohn übernommen sein. Jedoch liegt es nahe, dass Einstein zu diesem Experiment von Machs *Mechanik* (Mach, 2012, p. 234) inspiriert wurde.

³⁴⁸ Siehe dazu auch (Einstein, 1983, p. 24).

³⁴⁹ Auch Heller macht unter anderem auf die Kyoto-Rede aufmerksam (Heller, 1991, p. 178).

4.4.6.3. *Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit (?)*

Im Abschnitt „4.4.5.3. Thema III: Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]“ sind wir auf Einsteins Ansicht eingegangen, dass Machs Vision von einer allgemeinen Kovarianz nicht mit der euklidischen Geometrie vereinbar sei (Haubold & Yasui, 1986, p. 276) – siehe dazu auch (Einstein, 1916e, pp. 773-776).³⁵⁰

Wie wir bereits im 3. Kapitel (Abschnitt „3.1. E. Machs publizierte Äußerungen zu Einsteins Relativitätstheorie“) darlegen konnten, war Mach ein Befürworter von Minkowskis Ansichten (Mach, 1909, pp. 59-60) (Mach, 1910a, p. 605) (Mach, 1910b, pp. 264, fn. 1). Auch Einstein begann den Beitrag von Minkowski als wichtig zu erachten, wodurch die vierdimensionalen Raum-Zeit zu einem der Eckpfeiler der Allgemeinen Relativitätstheorie wurde. Doch bis dahin waren noch einige theoretische Hürden zu meistern.

Einstein wurde zuerst an den Lehrstuhl der theoretischen Physik nach Prag berufen und war dort (1. April 1911 bis 30. September 1912) tätig, wo früher bereits Christian Doppler und Ernst Mach forschten und lehrten. Wir sind im 4. Kapitel auf die wichtige Rolle des Doppler-Effekts für die Spezielle Relativitätstheorie eingegangen, weshalb es wohl kein Zufall war, dass die Wissenschaftler in Prag Interesse an Einsteins Forschung hatten. In diesem Zusammenhang sind wir auf den Brief (am 11. Februar 1909) von Aurel Stodola an Einstein eingegangen (CPAE 5; 138; p. 158), wo der Doppler-Effekt besprochen wird und haben auch auf das Treffen zwischen Mach und Einstein „*an einem der Tage nach dem 24. September 1910*“ (Wolters, 1987, p. 133) hingewiesen.

Als Prager Professor veröffentlichte Einstein beispielsweise:

- „Die Relativitäts-Theorie“ (Einstein, 1911i), ein Artikel, in welchem zum ersten Mal die spezielle Relativitätstheorie als „Relativitätstheorie“ (Einstein, 1911i, p. 1) (CPAE 3; 17; p. 425) bezeichnet wird (CPAE 3; 17; p. 439, fn. 1).
Das Relativitätsprinzip beginnt er gleich am Anfang seiner Arbeit mit einem Gedankenexperiment anhand von zwei Physikern zu erklären: der eine steht am

³⁵⁰ Nach Julian Barbour ist eine relationale Physik nach Machs Ansichten ohne die Annahme einer vierdimensionalen Raum-Zeit möglich – siehe dazu „General Relativity as a Perfectly Machian Theory“ (Barbour, 1995c) von J. Barbour bzw. die anschließende Diskussion (Barbour, 1995c, p. 232).

offenen Feld und der zweite fährt mit dem Zug (Einstein, 1911i, p. 1) (CPAE 3; 17; p. 425). Auf der nächsten Seite wird Einstein Licht mit Schallwellen verglichen (Einstein, 1911i, p. 2) (CPAE 3; 17; p. 426). Es zeigen sich bereits hier Parallelen zu Mach.³⁵¹

- „Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes“ (Einstein, 1911h), welche zeigt, dass der Doppler-Effekt nicht nur bei der Entstehungsgeschichte der SRT, sondern auch bei jener der ART eine bedeutende Rolle gespielt hat (Einstein, 1911h, p. 904).³⁵²
- „Gibt es eine Gravitationswirkung, die der elektrodynamischen Induktionswirkung analog ist?“ (Einstein, 1912e), wo er betont:

„Das Resultat ist an sich von grossem Interesse. Es zeigt, dass die Anwesenheit der trägen Hülle K die träge Masse des darin befindlichen materiellen Punktes P erhöht. Es legt dies die Vermutung nahe, dass die ganze Trägheit eines Massenpunktes eine Wirkung des Vorhandenseins aller übrigen Massen sei, auf einer Art Wechselwirkung mit den letzteren beruhend ¹⁾. Inwieweit diese Auffassung berechtigt ist, wird sich zeigen, wenn wir in dem glücklichen Besitze einer brauchbaren Dynamik der Gravitation sein werden.“ (Einstein, 1912e, p. 39)

In der Fußnote ¹⁾ geht er näher auf seine Quelle ein:

„Es ist dies ganz derjenige Standpunkt, welchen E. Mach in seinen scharfsinnigen Untersuchungen über den Gegenstand geltend gemacht hat. (E. Mach, Die Entwicklung der Prinzipien der Dynamik. Zweites Kapitel. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung.)“
(Einstein, 1912e, pp. 39, fn. 1) – siehe dazu auch (CPAE 4; _ ; p. 127)

Somit wird klar: Machs Kritik an Newtons Trägheitskonzept war eine der treibenden Ideen für Einstein bei der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Ende 1912 wechselte Einstein von der Universität Prag nach Zürich. Auf seinen Wunsch bekam Philipp Frank dessen früheren Lehrstuhl in Prag.³⁵³ Frank war stark von Mach beeinflusst und half ihm bei einem Treffen „zur Jahreswende 1909/1910“ (Wolters, 1987, p. 165) die Konzepte der Speziellen Relativitätstheorie, wie die physikalische Verwendung der vierdimensionalen Raum-Zeit, zu verstehen (Herneck, 1966, p. 7), siehe dazu auch (Wolters, 1987, p. 164).

³⁵¹ Siehe dazu den Abschnitt „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein.“

³⁵² Siehe dazu Abschnitt „4.4.5.2.3. Gedankenexperiment: Gravitationsbedingte Rotverschiebung“.

³⁵³ Siehe dazu auch Abschnitt „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“.

In Zürich arbeitete Einstein mit seinem Freund Marcel Großmann zusammen (CPAE 4; 138; p. 294-301). 1913 wurde ein Ergebnis ihrer Kooperation veröffentlicht (Einstein & Grossmann, 1913), die als ein wichtiger Meilenstein in der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie betrachtet werden kann, da neue mathematische Werkzeuge angewendet wurden. Die damalige Theorie war jedoch noch nicht allgemein kovariant (CPAE 4; 138; p. 294). Da Einstein Machs Konzepten folgte, wird auf ihn verständlicherweise auch hingewiesen (Einstein & Grossmann, 1913, p. 6). An Mach schreibt Einstein (am 25. Juni 1913) über diese Arbeit:

„Nächstes Jahr bei der Sonnenfinsternis soll sich zeigen, ob die Lichtstrahlen an der Sonne gekrümmt werden, ob m. a. W. die zugrunde gelegte fundamentale Annahme von der Aequivalenz von Beschleunigung des Bezugssystems einerseits und Schwerefeld andererseits wirklich zutrifft.

Wenn ja, so erfahren Ihre genialen Untersuchungen über die Grundlagen der Mechanik – Planck's ungerechtfertigter Kritik zum Trotz – eine glänzende Bestätigung. Denn es ergibt sich mit Notwendigkeit, dass die Trägheit in einer Art Wechselwirkung der Körper ihren Ursprung hat, ganz im Sinne Ihrer Überlegungen zum Newton'schen Eimer-Versuch.

[...]

Es ist mir eine grosse Freude, Ihnen dies mitteilen zu können, zumal jene Kritik Plancks mir schon immer höchst ungerechtfertigt erschienen war. Mit grösster Hochachtung grüsst Sie herzlich

Ihr ergebener

A. Einstein.

Ich danke Ihnen herzlich für die Übersendung Ihres Buches.“

(Wolters, 1987, pp. 151-152) (CPAE 5; 448; p. 531-532)

Interessant ist unter anderem, dass Einstein das Äquivalenzprinzip mit Machschen Überlegungen direkt in Verbindung bringt. Zudem wird deutlich sichtbar, dass er sich als ein Verteidiger von Mach (gegenüber Planck) versteht.

Wir erfahren anhand von Dokumenten, dass Einstein, ähnlich wie bei der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie, auch bei der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie, wahrscheinlich Juni 1913, Besso zu Rate zog. Gemeinsam haben sie an den Berechnungen zur Periheldrehung des Merkur (CPAE 4; 14; p. 360) und der Relativität der Trägheit (CPAE 4; Appendix B; p. 665-667) gearbeitet.

Bei seinem Vortrag „Zum gegenwärtigen Stande des Gravitationsproblems“ (Einstein, 1913c) bei der 85. *Versammlung der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte* in Wien ist er (am 23. September 1913) auf das Thema Relativität der Trägheit deshalb erneut eingegangen und hat wieder diesbezüglich auf Mach verwiesen (Einstein, 1913c, pp. 1260-1261). In einem Brief an Lorentz (am 14. August 1913) erörtert er:

„Alle diese Effekte sind zwar wegen ihrer Kleinheit nicht der Prüfung zugänglich, sind aber an und für sich plausibel, wie Mach in seiner Mechanik so hübsch bei seiner Kritik von Newtons Prinzipien gezeigt hat.“ (CPAE 5; 467; p. 548)

Nun, ohne auf die Details eingehen zu wollen, ist es glasklar, dass das Problem der Relativität der Trägheit Einstein offensichtlich in den Jahren 1912 bis 1916 (Einstein, 1912e) (Einstein & Grossmann, 1913) (Einstein, 1913c) (Einstein, 1914o, pp. 1031-1032, 1085) (Einstein, 1916e, pp. 771-772) beschäftigt hat und dass er dabei versuchte Machs Ideen umzusetzen. Machs physikalische Konzepte haben bei der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie eine wesentliche Rolle gespielt – daran besteht kein Zweifel.

Aber die theoretische Fertigstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie war, auf Grund der mathematischen Herausforderungen, eine schwere, langjährige Forschung Einsteins. Erst im Jahre 1915 kam er wieder auf das Konzept der allgemeinen Kovarianz zurück und vervollständigte die Allgemeine Relativitätstheorie in seiner Arbeit „Zur allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1915f). Der Grund, weshalb Einstein seiner eigenen „Entwurf“-Theorie (Einstein & Grossmann, 1913) schlussendlich misstraute, lag daran, dass er das Machsche Prinzip nicht erfüllen konnte – siehe dazu (CPAE 8, Part A; 123; p. 177-178) (CPAE 8, Part A; 245; p. 325, fn. 7) (CPAE 7; 4; p. 42, fn. 5) – und ihm die allgemeine Kovarianz die Sicherheit gab, dass nun auch das Machsche Prinzip gelten musste – siehe dazu (CPAE 8, Part A; 245; p. 324-325). Doch diese Schlussfolgerung war etwas übereilt...

Wichtig ist es, an diese Stelle auch darauf hinzuweisen, dass Einstein, gerade was die mathematische Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie betrifft, verständlicherweise auf Machs Arbeiten nicht zurückgreifen konnte, da keine Angaben dazu bei Mach zu finden waren. Somit ist es daher mit Sicherheit richtig, die fertige Allgemeine Relativitätstheorie allein als Einsteins Werk anzusehen – obwohl viele seiner Freunde, wie Marcel Grossmann und Michel Besso usw., ihn dabei sehr unterstützt haben.

4.4.6.4. Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]

Einstein berichtet in seiner Kyoto-Rede, dass er sich ab 1915 den kosmologischen Problemen widmete. Darauf sind wir im Abschnitt „4.4.5.4. Thema IV: Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]“ näher eingegangen. Und zwar ging es in Einsteins Artikeln um die Grenzbedingungen des Universums, welche das Trägheitskonzept von Mach erfüllen konnten.

Der Begriff „das Machsche Prinzip“ war in diesem Zusammenhang von Einstein in seinem Artikel „Prinzipielles zur Allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1918e) eingeführt worden (Einstein, 1918e, pp. 241-242). In dieser Schrift hat Einstein (aus theoretischen Gründen) versucht *das Relativitätsprinzip, das Äquivalenzprinzip und das Machsche Prinzip* auseinanderzuhalten, was dazu geführt hat, dass Machs Bedeutung für die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie für weitaus geringer betrachtet wurde (Wolters, 1987, pp. 49-50), als sie tatsächlich war. Denn die Ansätze für diese Prinzipien waren bereits bei Mach zu finden:

Das Relativitätsprinzip: Im Abschnitt „4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]“ haben wir dargelegt, dass Einstein die Idee der allgemeinen Kovarianz von Mach übernommen hat – siehe (Einstein, 1914h, p. 344) (Einstein, 1914o, pp. 1031-1032) (Einstein, 1916e, pp. 771-772) (Einstein, 1916c, p. 103).

Das Äquivalenzprinzip: Im Abschnitt „4.4.5.2.1. Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip und Machs möglicher Einfluss“ haben wir zeigen können, dass Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip [54]-[57] (CPAE 7; 31; p. 265) in ähnlicher Form bereit bei Mach gegeben war (Wolters, 1987, pp. 63-65) (Heller, 1991, p. 177) (Mach, 2012, p. 234) (Staley, 2013, p. 47) (Staley, 2019, pp. 360-363). Das Machsche Konzept (bzw. das Machsche Prinzip) ist mit dem Äquivalenzprinzip konzeptionell eng verbunden (Reichenbach, 1928).

*Das Machsche Prinzip:*³⁵⁴ Nach Mach lässt sich, wie Einstein stets selbst hinwies, die Trägheitsbewegung eines Körpers auf die restlichen Massen im Universum zurückführen (Mach, 2012, pp. 262 (II. Kapitel – 6. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung)).

³⁵⁴ Siehe dazu „*Machsches Prinzip und Relativität der Trägheit*“ (Wolters, 1987, pp. 52-57).

Dabei betonte Mach, dass seine Überlegung eine „durch die Erfahrung nahe gelegte hypothetische“ (Mach, 2012, p. 262) sei – siehe dazu (Wolters, 1987, p. 52). Mach sieht das Machsche Prinzip lediglich als eine mögliche, alternative Erklärung, um Argumente gegen die Vorstellung eines absoluten Raumes, einer absoluten Zeit oder einer absoluten Bewegung geben zu können. Sein Programm beabsichtigt die Physik von Dogmatismus zu befreien und einen vorurteilsfreien Fortschritt zu ermöglichen (Mach, 2012, pp. 271-272 (II. Kapitel – 6. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung)). Ebenso meinte Mach, dass es „vorbildlich“ wäre, wenn man die gravitative Wechselwirkung ähnlich wie die „elektrische Fernwirkung“ konstruieren würde (Mach, 2012, p. 272). Dass Einstein als Prager Professor seinen Artikel „Gibt es eine Gravitationswirkung, die der elektrodynamischen Induktionswirkung analog ist?“ (Einstein, 1912e) verfasst hat, war daher kein Zufall – da er darin genau auf jenes Kapitel hinweist, welches wir von Mach zitiert haben:

„Es ist dies ganz derjenige Standpunkt, welchen E. Mach in seinen scharfsinnigen Untersuchungen über den Gegenstand geltend gemacht hat. (E. Mach, Die Entwicklung der Prinzipien der Dynamik. Zweites Kapitel. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung.)“ (Einstein, 1912e, pp. 39, fn. 1)

Darauf sind wir bereits im Abschnitt „4.4.5.3. Thema III: Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]“ näher eingegangen. Dort konnten wir zeigen, dass Einstein die Relativität der Trägheit bzw. das Machsche Prinzip bei der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie offensichtlich in den Jahren 1912 bis 1916 (Einstein, 1912e) (Einstein & Grossmann, 1913) (Einstein, 1913c) (Einstein, 1914o, pp. 1031-1032, 1085) (Einstein, 1916e, pp. 771-772) beschäftigte. Einstein dachte (Einstein, 1916e), dass, wenn seine Theorie das Relativitätsprinzip bzw. die allgemeine Kovarianz erfüllt, sich dann auch das Machsche Prinzip erfüllen würde (CPAE 8, Part A; 245; p. 324-325). Dieser Ansatz hätte zu den ursprünglichen Überlegungen von Mach gut gepasst, wie Einstein gegenüber Besso (am 31. Juli 1916) in einem Brief erläuterte (CPAE 8, Part A; 245; p. 324-325). Damals dachte Einstein, dass die Relativität der Trägheit bzw. das Machsche Prinzip und die allgemeine Kovarianz Hand in Hand gingen und das Problem durch die Allgemeine Relativitätstheorie gelöst sei.

Erst durch die wissenschaftliche Diskussion (ab November 1916) zwischen Einstein und Willem de Sitter wurde klar, dass die Allgemeine Relativitätstheorie das Machsche Prinzip

nicht zwangsläufig erfüllte – siehe dazu „The Einstein-De Sitter-Weyl-Klein Debate“ (CPAE 8, Part A; _ ; p. 352) (CPAE 8, Part A; 272; p. 357-358).

Aus dem Brief von Einstein an de Sitter (am 4. November 1916) (CPAE 8, Part A; 273; p. 359-360) wird deutlich, welche psychologisch bedeutende Rolle das Machsche Prinzip bei der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie für Einstein gespielt hat: Es motivierte ihn dazu weiterzuarbeiten, bis er die ART in kovarianter Form schreiben und somit abschließen konnte. Nun, wo sie fertig ist, bräuchte man an der Relativität der Trägheit bzw. am Machschen Prinzip nicht zwangsläufig festzuhalten – es ist lediglich eine Geschmacksfrage, ob man die Grenzbedingungen des Universums so angibt, dass sie mit dem Machschen Prinzip im Einklang stehen. Er selbst wolle am Machschen Prinzip jedoch noch festhalten – da es ihn von Beginn an begleitete. Aus diesem Grund begann nun Einstein in seinem Artikel „Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1917b) ein räumlich geschlossenes Modell des Universums vorzuschlagen, um das Problem der Grenzbedingung zu lösen (Einstein, 1917b, pp. 144-145), wodurch das Machsche Prinzip nach seiner Ansicht wieder gerettet war. Sein Modell (Einstein, 1917b) ging aber von einem statischen Universum aus (Einstein, 1917b, p. 152) und um das zu gewährleisten, musste er die Allgemeine Relativitätstheorie um die „universelle Konstante λ “ erweitern (Einstein, 1917b, pp. 144-152). Peter C. Aichelburg erklärt detaillierter in „Mach’s Influence on Einstein’s ‘Biggest Blunder’ and the Consequences for Modern Cosmology“ (Aichelburg, 2019), dass Einstein sich aus drei Gründen für die Konstante λ entschied (Aichelburg, 2019, p. 315):

1. Sie ermöglichte ein statisches Universum.
2. Das Trägheitsproblem konnte dadurch überwunden werden, da das Universum geschlossen, aber zugleich unbegrenzt war. (Die Masse eines Körpers konnte somit nicht in einer unendlichen Entfernung zu den anderen Massen im Universum betrachtet werden.)
3. Durch die Konstante λ erhoffte sich Einstein, dass keine Vakuumlösungen mehr gegeben wären. (Ein Universum ohne Massen bzw. ohne Körper darin würde somit physikalisch keinen Sinn machen.)

Wie sich bald zeigen sollte, konnte man mit der ART unterschiedliche Modelle ableiten (CPAE 8, Part A; 317; p. 353-354). Einstein jedoch blieb noch einige Zeit bei seiner Überzeugung, das (von ihm mathematisch formulierte) Machsche Prinzip beizubehalten³⁵⁵ – siehe dazu (Einstein, 1918e, pp. 241-242, 271). Schließlich gelang es de Sitter (1917/1918) zu zeigen, dass die Allgemeine Relativitätstheorie mit einer universellen Konstante auch Lösungen bot, die das Machsche Prinzip nicht erfüllten (CPAE 8, Part A; _ ; p. 356-357). Das Prinzip blieb daher eine Geschmacksfrage – aber eben eines nach Einsteins Geschmack, wie die Arbeit (Einstein, 1919a, pp. 353-356) und sein Vortrag in Berlin verdeutlichen (CPAE 7; 19; p. 170). Der Inhalt der Kyoto-Rede [80]-[88] deckt sich somit mit den vorhandenen Quellen.

Wenn wir nun auf unsere „7. Frage“ zurückblicken³⁵⁶

Welchen Einfluss hatte Mach auf Einstein in Bezug auf die Allgemeine Relativitätstheorie?

dann lässt sie sich dahingehend einfach antworten, dass Mach gerade durch das *Relativitätsprinzip (= allgemeine Kovarianz)* und das *Machsche Prinzip (= Relativität der Trägheit)* auf Einstein und somit auf die Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie einen starken Einfluss hatte. Es lässt sich nicht direkt anhand von Quellen belegen, doch liegt es nahe, dass Einstein zu seinem Gedankenexperiment in Bezug auf das *Äquivalenzprinzip* ebenfalls von Mach (Mach, 2012, p. 234) inspiriert wurde. Somit würden alle drei Prinzipien, die Einstein in „Prinzipielles zur Allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1918e) angibt (Einstein, 1918e, pp. 241-242), zu Mach in Beziehung stehen.

Insofern lässt sich auch unsere „9. Frage“

Zeigt die historisch-kritische Rekonstruktion des zweiten Teils der Kyoto-Rede, dass die Konzepte

- Relativität der Trägheit,
- allgemeine Kovarianz,
- Äquivalenz von träger und schwerer Masse

³⁵⁵ Siehe dazu den Brief von Einstein an de Sitter (am 24.3.17) (CPAE 8, Part A; 317; p. 421-422) und an Gustav Mie (CPAE 8, Part B; 460; p. 638-640).

³⁵⁶ Siehe Abschnitt „4.4.3.2.1. 7. Frage: Machs Einfluss auf die Allgemeine Relativitätstheorie“.

- und der Nahwirkungscharakter physikalischer Wirkungen

bei der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie eine Rolle gespielt haben?
beantworten. Und zwar stehen diese Konzepte mit den Themen, die Einstein in seiner Kyoto-
Rede anspricht in Beziehung (Tab. 2):

Tabelle 2: Einsteins Kyoto-Rede und das intuitive Machsche Forschungsprogramm im Vergleich

Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]	„Allgemeine Kovarianz“ (Wolters, 1987, pp. 57-63)
Das Äquivalenzprinzip [49]-[65]	„Äquivalenzprinzip“ (Wolters, 1987, pp. 63-65)
Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]	„Nahwirkungstheorie“ (Wolters, 1987, pp. 65-70)
Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]	
	„Machsches Prinzip und Relativität der Trägheit“ (Wolters, 1987, pp. 52-57)

Dabei möchten wir an dieser Stelle festhalten, dass die Nahwirkungstheorie Mach, als ein „Ideal“, konzeptionell höchstwahrscheinlich vorschwebte, er sie aber begrifflich nicht klar definiert hat – siehe dazu (Wolters, 1987, pp. 65-70); den Abschnitt wo Mach in seiner *Mechanik* darauf eingeht, hat Einstein mit Sicherheit gekannt. In Einsteins Rede wird die Nahwirkungstheorie jedoch nicht direkt besprochen – ob Einstein sich dazu also von Mach inspirieren ließ, lässt sich nicht eindeutig sagen. (Fest steht nur, dass Einstein Machs Kritik der Mechanik gefolgt ist.) Zudem wird das Äquivalenzprinzip bei Mach zwar vorausgesetzt und in seinem Gedankenexperiment angewendet, doch wird es erst durch Einstein zu einem Prinzip erhoben und in Gedankenexperimenten derart instrumentalisiert, dass er damit physikalische Voraussagen machen

konnte. Es scheint, dass der größte Einfluss von Mach auf Einstein und somit auf die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie vor allem durch die *Allgemeine Kovarianz* und *das Machsche Prinzip (bzw. die Relativität der Trägheit)* gegeben war – siehe dazu auch (Rosenberger, 2002). Zusammenfassend spricht insofern wissenschaftsgeschichtlich nichts dagegen, dass Einstein wohl einem „*intuitive[n]*“ „*Machschen Forschungsprogramm*“ (Wolters, 1987, p. 50) konzeptionell gefolgt sein könnte. Ebenso kann man Mach als den „geistigen Vater der ART“ (Rosenberger, 2002, p. 88) ansehen, obwohl die fertige Allgemeine Relativitätstheorie über die Erwartungen und Voraussagen von Mach hinausreicht. Insofern stimmt der Spruch von Robert Schumann: „Ein rechter Meister zieht keine Schüler, sondern eben wiederum Meister.“ (Schumann, 1891, p. 61)

5.) ANHANG

5.1. Anhang I: Lakatos' Vermutung

5.1.1. Forschungsprogramm als wissenschaftstheoretisches Konzept

Imre Lakatos genießt als ein „Vermittler“ zwischen K. Popper³⁵⁷, T. Kuhn³⁵⁸ und P. Feyerabend³⁵⁹ in der Wissenschaftsphilosophie hohes Ansehen – siehe (Kuhn, 1974). So wie die Begriffe „Paradigma“ von Kuhn und „Falsifikation“ von Popper ist auch das „Forschungsprogramm“ von Lakatos ein Begriff, welcher über die Philosophie hinaus seine Stellung bereits im allgemeinen Sprachgebrauch genießt.

Die Wissenschafts- und im Besonderen die Physikgeschichte zeigt, wie Lakatos und andere feststellen konnten, dass erfolgreiche Konzepte, wenn sie durch empirische Beobachtungen bzw. Experimente „falsifiziert“ werden, nicht gleich aufgegeben oder ersetzt werden. Falsifikationismus im „popperschen“ bzw. radikalen Sinne als eine strenge Methode scheint daher in der Physikgeschichte selten erfolgt zu sein.³⁶⁰ *Insofern war es eine große Leistung von Lakatos, verschiedene Weisen der Falsifikation (und mit ihnen das Verhältnis zwischen Theorie und Empirie) zu differenzieren.* So unterscheidet er in seiner methodologischen Diskussion zwischen zwei Varianten des Falsifikationismus: einerseits den dogmatischen

³⁵⁷ An dieser Stelle sei kurz angemerkt, dass Karl Popper die Lehre von Ernst Mach etwas missverstanden hat; siehe dazu (Stadler, 2015).

³⁵⁸ Es ist interessant, dass Thomas Kuhn in seiner epochalen und einflussreichen Arbeit *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* (Kuhn, 2012), in der Gedankenexperimente diskutiert werden und er auch die Einsteinsche Revolution im Detail analysiert, Ernst Mach nicht ein einziges Mal erwähnt. Dieses Buch ist daher geradezu ein Paradebeispiel dafür, wie sehr die Mach-Forschung in der Wissenschaftstheorie vernachlässigt wurde.

³⁵⁹ Feyerabend ist nicht nur als Mach-Kenner (Feyerabend, 1988) und Lakatos-Kritiker/Freund (Feyerabend, 1983) in Zusammenhang mit dieser Arbeit von Bedeutung. Er spielte auch eine wichtige Rolle bei den Diskussionen um die Fälschungsthese von Wolters (Blackmore, 1989, p. 537) (Wolters, 2019, pp. 382-383).

³⁶⁰ Allgemein erkannte auch Popper bereits in *Logik der Forschung* (Popper, 2005), dass sich nicht alle physikalischen Gesetze strikt falsifizieren lassen und führte somit die „praktische Falsifikation“ (Popper, 2005, p. 174) ein.

bzw. naturalistischen Falsifikationismus (Lakatos, 1982, p. 11)³⁶¹ und andererseits den methodologischen Falsifikationismus.³⁶²

Doch sowohl mit dem dogmatischen als auch mit dem methodologischen Falsifikationismus ist Lakatos unzufrieden (Lakatos, 1982, pp. 29-30). Den Grund, weshalb sie unhaltbar sind, sieht er vor allem in der Duhem-These (Lakatos, 1982, pp. 96-97).³⁶³

Jedenfalls finden wir sowohl bei Kuhn (Kuhn, 2012, p. 157) als auch bei Duhem die Feststellung, dass falsifizierte Theorien in der Wissenschaftsgeschichte nicht gleich vollständig aufgegeben wurden. Dieser Tatsache folgend stellt Lakatos eine Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme auf. Jene setzt sich aus zwei Elementen zusammen:

1) Der harte Kern³⁶⁴ (*hard core*). Hier sind die zentralen Hauptthesen bzw. die unwiderlegbaren Allsätze zu finden. Zum Beispiel „die drei Bewegungsgesetze und das Gravitationsgesetz im Newtonschen Forschungsprogramm“ (Lakatos, 1982, p. 192). Dies ist insofern für unsere Arbeit von Interesse, da es einerseits Lakatos' Lieblingsbeispiel zu sein scheint, andererseits weil *Ernst Mach offensichtlich gerade den Kern des Newtonschen Forschungsprogramms kritisiert und somit möglicherweise ein neues Programm einleitet, ...*

2.) Der Schutzgürtel (*auxiliary belt*). Bei auftretenden Anomalien soll der Schutzgürtel durch Hilfhypothesen modifiziert werden. „Zur Schutzzone des Newtonschen Programms gehörte die geometrische Optik, die Newtonsche Theorie der atmosphärischen Strahlenbrechung

³⁶¹ Den dogmatischen Falsifikationismus sieht Lakatos, ebenso wie Popper (Lakatos, 1982, pp. 93, fn. 341), als unhaltbar, weil (a) Beobachtungen stets theoriebeladen sind, (b) Theorien selbst niemals bestätigt werden und (c) durch Hilfhypothesen auch einer Falsifizierung entgehen können (Lakatos, 1982, pp. 13-18). Aus diesen Gründen schlägt Lakatos eine zweite Variante vor...

³⁶² Die empirische Basis wird nun anhand von methodologischen oder konventionellen Entscheidungen festgelegt (Lakatos, 1982, pp. 51-52). Dabei konstituiert er einerseits den naiven und andererseits den raffinierten Falsifikationismus.

³⁶³ Lakatos selbst spricht von einer Duhem-Quine-These. Für eine genauere Analyse der Duhem-These siehe auch (Rowbottom, 2011, pp. 96-98). Gekürzt kann man sagen, dass diese These besagt, dass eine Theorie aus einer Gruppe bzw. Konjunktion von Hypothesen besteht und dass ein Widerspruch (bzw. ein falsifizierendes Experiment) – durch das Nicht-Eintreten einer Prognose – nur zeigt, dass mindestens eine der Hypothesen unzulässig ist. Daraus folgt aber nicht, dass die ganze Theorie als fehlerhaft anzunehmen ist, sondern sie vielleicht nur einer Korrektur (eines der Glieder der Konjunktion) bedarf – welcher, lässt sich allerdings nicht logisch ableiten (Moulines, 2008, pp. 36-37). Insofern lehnt er die Möglichkeit eines 'experimentum crucis' ab (Duhem, 1908, pp. 243, 249-251).

³⁶⁴ Wichtig an dieser Stelle ist sicher zu erwähnen, dass Lakatos selbst den harten Kern nicht als ein statisches Element ansieht – wie es sich aber allmählich dynamisch genau entwickelt, wird bei ihm nicht genauer untersucht. Vgl. dazu (Lakatos, 1982, p. 48).

u.a.“ (Lakatos, 1982, p. 193). Um den Schutzgürtel in Stand zu halten, wird dabei eine negative (Lakatos, 1982, p. 47) (Andersson, 1998, p. 66) und eine positive Heuristik (Lakatos, 1982, p. 49)³⁶⁵ benötigt. Weiteres erläutert Lakatos – ähnlich wie im raffinierten Falsifikationismus:

„Jeder Schritt in ihnen muß eine *konsequent progressive theoretische Problemverschiebung* darstellen. Die einzige weitere Forderung ist, daß der Zuwachs an Gehalt sich zumindest gelegentlich im nachhinein bewähre: Das Programm als Ganzes soll auch eine *gelegentlich progressive empirische Verschiebung* aufweisen.“ (Lakatos, 1982, p. 48)³⁶⁶

Andernfalls wäre das Programm als *degenerativ* anzusehen, weshalb sich in weiterer Folge Wissenschaftler entscheiden *können*, nicht mehr an ihr weiterzuarbeiten (Lakatos, 1982, p. 70).³⁶⁷

Ein konkurrenzfähiges³⁶⁸, progressives Forschungsprogramm sollte deshalb „den früheren Erfolg des Rivalen“ erklären „und ihn durch eine weitere Schaustellung von *heuristischem Potential*“ (Lakatos, 1982, p. 68) überholen können – siehe auch (Lakatos, 1982, pp. 68, fn. 239). Andersson stellt hier fest:

„[...] aber wie sollen die zukünftigen Leistungen eines Forschungsprogramms, sein heuristisches Potential, geschätzt werden? Lakatos gibt keine Antwort auf diese Frage, die die Achillesferse der Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme zeigt.“
(Andersson, 1998, p. 68)³⁶⁹

Das mag vielleicht der Hauptgrund dafür gewesen sein, dass Lakatos in seinen späteren Arbeiten den Schwerpunkt mehr auf eine *rationale Rekonstruktion der Wissenschaftsgeschichte* legte (Lakatos, 1982, p. 75).³⁷⁰ Und genau hier könnte eine zukünftige Arbeit ansetzen: Kann man das Machsche Forschungsprogramm rational

³⁶⁵ „Im Falle Newtons bestand sie aus dem mathematischen Apparat des Programms, bestehend aus der Differentialrechnung und der Theorie der Konvergenz, der Differential- und der Integralgleichung.“ (Lakatos, 1982, pp. 192-193) Man könnte die *Heuristik(en)* auch als eine dritte (mehr oder weniger eigenständige) Komponente des Forschungsprogramms ansehen.

³⁶⁶ Ein „künstliches Mikro-Beispiel für eine progressive Newtonsche Problemverschiebung“ wird von ihm auf der Seite (Lakatos, 1982, pp. 15-16) „angeführt“ (Lakatos, 1982, p. 48).

³⁶⁷ Lakatos betont jedoch, dass „eine degenerative Phase“ „durch eine kleine Revolution oder eine *schöpferische Verschiebung* in seiner positiven Heuristik wieder gefördert“ (Lakatos, 1982, p. 51) werden kann. Vgl. dazu auch (Lakatos, 1982, p. 70).

³⁶⁸ Für Lakatos ist es ganz besonders wichtig, dass es konkurrierende Forschungsprogramme gibt, sonst würde man nie ein Forschungsprogramm aufgeben: „Es gibt keine Falsifikation vor dem Auftauchen einer besseren Theorie.“ (Lakatos, 1982, p. 34); vgl. dazu auch (Zoubek & Lauth, 1992, p. 224).

³⁶⁹ Vgl. dazu auch (Giesen & Schmid, 1974).

³⁷⁰ Vgl. dazu auch (Andersson, 1998, p. 68).

rekonstruieren? Diese Leitfrage wäre wohl auch im Sinne Machs gewesen, da er gerade für seine historisch-kritische Analysen und Rekonstruktionen hochgeschätzt wurde.

5.1.2. Forschungslücke in der Wissenschaftstheorie

Lakatos erläutert in seiner Arbeit „Falsifikation und die Methodologie der wissenschaftlichen Forschungsprogramme“ die Entwicklung der Relativitätstheorie folgendermaßen:

„Während die meisten Physiker versuchen, Michelsons Experimente im Rahmen des Ätherprogramms zu interpretieren, kam Einstein, ohne Kenntnis von Michelsons, Fitzgerald und Lorentz, aber angeregt vor allem von Machs Kritik an Newtons Mechanik, auf ein neues Forschungsprogramm.“ (Lakatos, 1982, p. 75)

Und in einer Fußnote fügt er hinzu:

„Es gibt eine umfangreiche Kontroverse über den historisch-heuristischen Hintergrund von Einsteins Theorie, in deren Licht sich diese Behauptung als falsch erweisen mag.“
(Lakatos, 1982, pp. 75, fn. 270)

Auch wenn eine Unsicherheit in Lakatos' Texten zum möglichen MFP mitschwingt, ist es dennoch eindeutig, welche Bedeutung Lakatos dem (möglichen) MFP zumaß, sobald wir diese Zeilen lesen:

„Nach Popper bestand Einsteins Problem darin, die Experimente zu erklären, die die klassische Physik 'widerlegten', und ,er hat sich nicht die Aufgabe gestellt, ... unsere Vorstellungen von Raum und Zeit zu kritisieren'. Aber sicher hat er sich diese Aufgabe gestellt. Seine (Machsche) Kritik unserer Vorstellungen von Raum und Zeit und insbesondere seine operationalistische Kritik des Begriffes der Gleichzeitigkeit spielten in seinem Denken eine wichtige Rolle.“ (Lakatos, 1982, pp. 134, fn. 93)

Wir können den oben angeführten Textstellen entnehmen, dass Lakatos einerseits die Überzeugung vertrat, dass es so etwas wie ein MFP gegeben haben könnte, aber andererseits er es für besser hielt, es in jener Zeit nicht genauer zu rekonstruieren.

Hier ist also eine Forschungslücke zu finden. Da Lakatos auf ein „Ätherprogramm“ hinweist, in diesem Zusammenhang auch „Michelsons, Fitzgerald und Lorentz“ erwähnt (Lakatos, 1982, p. 75) und auf das Problem der „Gleichzeitigkeit“ (Lakatos, 1982, pp. 134, fn. 93) eingeht, hat er eindeutig die Spezielle Relativitätstheorie als ein mögliches Machsches Forschungsprogramm vor Augen.³⁷¹ Machs Einfluss auf Einstein umfasst jedoch sowohl die Spezielle als auch die Allgemeine Relativitätstheorie, wie wir sehen werden. Vor allem hoffte

³⁷¹ Siehe dazu (Wolters, 1987, pp. 50, fn. 1).

Einstein gerade in der Ausarbeitung der Allgemeinen Relativitätstheorie Machs Konzepte erfüllen zu können.³⁷² Die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie sind jedoch als zwei unterschiedliche Theorien anzusehen, da sie unterschiedliche Voraussagen machen.³⁷³ Die Spezielle Relativitätstheorie hat nur als eine Näherung in lokalen Systemen in der Allgemeinen Relativitätstheorie eine Gültigkeit. Insofern wäre die Frage, ob die gesamte Relativitätstheorie historisch als ein Forschungsprogramm gesehen werden kann, schwierig zu beantworten. Zu Beginn müsste deshalb klar genug erforscht werden, worin genau Machs Beitrag zur Speziellen, zur Allgemeinen Relativitätstheorie oder zu beiden lag.

Bevor man ein Machsches Forschungsprogramm nach Lakatos' Konzept erarbeitet, ist es daher wichtig den „historisch-heuristischen Hintergrund von Einsteins Theorie[n]“ allgemein zu verstehen.

Wir fragen uns in dieser Arbeit daher zuerst, wie Einstein zur (Speziellen und Allgemeinen) Relativitätstheorie kam und anschließend in diesem Zusammenhang, welchen Einfluss Machs erkenntnistheoretische und physikalische Ansichten direkt oder indirekt darauf hatten. Durch dieses Vorgehen können andere Forscher eigenständig entscheiden, ob sie die Geschichte der Relativitätstheorie nach Poppers, Kuhns, Feyerabends oder Lakatos' Wissenschaftstheorie rekonstruieren möchten. Eine zu spezifische wissenschaftstheoretische Schablone gleich zu Beginn anzulegen, könnte nämlich dazu führen, dass die wissenschaftsgeschichtliche Beschreibung unnötig verzerrt wird.³⁷⁴

³⁷² In diesem Zusammenhang werden wir untersuchen, ob das *intuitive Machsche Forschungsprogramm* (Wolters, 1987, p. 50), wie es Gereon Wolter vertritt, sich in der Kyoto-Rede von Einstein wiederfinden lässt – siehe dazu die Abschnitte „4.4.4.1. 9. Frage“ und „4.4.6.4. Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]“.

³⁷³ Beispielsweise ist in der SRT die Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum) stets konstant – in der ART ist dieses Prinzip (aufgrund der Raum-Zeit-Krümmung) nicht gegeben (Einstein, 1911h, p. 906).

³⁷⁴ Leider war Lakatos (bewusst) nicht allzu sehr um die historische Korrektheit bemüht – siehe dazu (Lakatos, 1982, pp. 126, fn. 64; 60, fn. 210).

5.2. Anhang II: Die fehlenden Briefe zwischen Felix Ehrenhaft und Albert Einstein in *The Collected Papers of Albert Einstein*

Bei genauerer Analyse wird offensichtlich, dass in *The Collected Papers of Albert Einstein* von der Korrespondenz zwischen Felix Ehrenhaft und Einstein wenig in Erfahrung zu bringen ist. Vor 1918 finden wir keinerlei Korrespondenz zwischen den beiden. Im ersten erwähnten Brief schreibt beispielsweise Einstein (am 18. August 1918) an Felix Ehrenhaft:

„Lieber Herr Kollege!
Ich habe Ihre beiden grossen Abhandlungen mit gespanntem Interesse studiert.“
(CPAE 8, Part B; 605; p. 861)

Das lässt doch vermuten, dass Ehrenhaft Einstein vorher einen Brief mit seinen Abhandlungen gesendet haben müsste? Darüber erfahren wir aber nichts. (F. Ehrenhaft wird Einstein am 3. Okt. 1918 antworten – (CPAE 8, Part B; 630; p. 902). In einem weiteren Brief (vom 28. Mai 1919) schreibt F. Ehrenhaft:

„Lieber Herr Einstein!
Schon lange habe ich von Ihnen nichts gehört und lange Zeit haben Sie von mir nichts gehört. Ich will also die Pause unserer Korrespondenz wieder einmal unterbrechen.“
(CPAE 9; 46; p. 73)

F. Ehrenhaft schreibt ganz deutlich „wieder einmal unterbrechen“, das zeigt, dass es mehr Briefe zwischen Einstein und ihm (vor 1918) gegeben haben muss, als die die wir kennen – weshalb sich die Frage stellt: wo sind diese? Dass hier eine freundschaftliche Beziehung existiert hat, zeigt schon das Ende von Ehrenhafts Brief:

„Oft denke ich noch an unser politisches Gespräch 1917 auf der Terrasse Ihres Herrn Onkels in Berlin. Wie richtig haben wir die politische Situation damals beurteilt, Sie die deutsche & ich die osterr-ungarische. Und wie wenige Menschen hatten sich den klaren Blick nicht trüben lassen.

Seien Sie auf das allerherzlichste gegrüsst von Ihrem ergebenen

Ehrenhaft“
(CPAE 9; 46; p. 73)

Am 6. Dezember 1919 lädt F. Ehrenhaft als Vorstand der Chemisch-Physikalischen Gesellschaft Einstein schließlich nach Wien ein, wo er über die ART einen Vortrag geben möge. Interessant ist wieder, dass Ehrenhaft schreibt:

„Sie erwähnten in Ihrem freundlichen Briefe vom 3. November, [...]“ (CPAE9; 196; p. 277)

Dieser Brief (von Einstein an F. Ehrenhaft(?) vom 3. November) ist in *The Collected Papers of Albert Einstein* ebenfalls nicht zu finden. Doch Einsteins Antwort auf Ehrenhafts Einladung ist erhalten. Er beteuert, dass er aus gesundheitlichen Gründen nicht nach Wien kommen kann, erläutert aber weiter:

„Ich möchte nicht unterlassen, Sie bei dieser Gelegenheit auf den gegenwärtig in München weilenden hochbegabten jungen Wiener, Herrn Pauli, hinzuweisen, der mich vortrefflic[h] ersetzen könnte, ganz abgesehen von den Herren Schrödinger und Thirring, von welchen mir ebenfalls bekannt ist, dass sie die Gedankengänge der allgemeinen Relativitätstheorie vollkommen beherrschen.“ (CPAE9; 211, p. 298)

Aus einem Brief (vom 20. Jänner 1921) von Einstein an Paul Ehrenfest erfahren wir, dass Einstein, während der in Wien einen Vortrag hielt (CPAE12; 24; p. 46), bei F. Ehrenhaft in Wien gewohnt hat. Ein Briefwechsel zwischen Einstein und F. Ehrenhaft ist natürlich wieder nicht vorhanden. Im nächsten vorhandenen Brief (vom 28. Jänner 1921) schreibt F. Ehrenhaft:

„Ich freue mich über Ihren lieben Brief und danke für denselben herzlich.“
(CPAE 12; 36; p. 63)

Dieser Brief ist abermals nicht vorhanden. Am 12. Jänner 1922 gibt es schließlich wieder einen Brief von F. Ehrenhaft an Einstein, wo er Einstein um dessen Arbeiten zur ART ab 1918 bittet – F. Ehrenhaft wird nämlich eine der 17 Personen sein, die Einstein 1922 wieder für den Nobelpreis nominieren wird (CPAE 13; 15; p. 78). Falls die Leser nun wissen möchten, wie Einstein auf diesen Brief reagiert hat, werden sie enttäuscht werden. (Es sind nämlich in CPAE 13 und CPAE 14 keine Korrespondenzen mehr zwischen Einstein und F. Ehrenhaft zu finden.)

Interessant an dieser ganzen Sache ist Folgendes: Obwohl offensichtlich einige Briefe fehlen, wird in *The Collected Papers of Albert Einstein* nicht darauf eingegangen. Die Frage, die sich stellt, ist: Wieso? Und vor allem: Wo sind die Briefe?

5.3. Anhang III: Das Machsche Prinzip – was meinte Mach?

Wichtige Aussagen der Machschen (relativistischen bzw. relationalen) Physik sind das Machsche Prinzip und das (schwache) Machsche Prinzip, die wir an dieser Stelle näher untersuchen werden.

5.3.1. Das Machsche Prinzip

Das Machsche Prinzip: Die Trägheitsbewegung eines Körpers ist auf die Wechselwirkung der Körper im Universum zurückführbar, was automatisch auch für Trägheitskräfte gilt:

„Das Verhalten der irdischen Körper gegen die Erde lässt sich auf deren Verhalten gegen die fernen Himmelskörper zurückführen. Wollten wir behaupten, dass wir von den bewegten Körpern mehr kennen als jenes durch die Erfahrung nahe gelegte hypothetische Verhalten gegen die Himmelskörper, so würden wir uns einer *Unehrlichkeit* schuldig machen. Wenn wir daher sagen, dass ein Körper seine Richtung und Geschwindigkeit im Raum beibehält, so liegt darin nur eine kurze Anweisung auf Beachtung der *ganzen Welt*. Der Erfinder des Prinzips darf sich diesen gekürzten Ausdruck erlauben, weil er weiß, dass der Ausführung der Anweisung in der Regel keine Schwierigkeiten im Wege stehen.“ (Mach, 2012, p. 262) (Mach, 1908, pp. 247-248) - siehe dazu auch (Mach, 2012, pp. 262-263, fn. 208)

5.3.2. Das (schwache) Machsche Prinzip = Mitführungseffekt

Das (schwache) Machsche Prinzip, auch bekannt als der *Mitführungseffekt*: Die Trägheitsbewegung eines Körpers wird durch die Wechselwirkung von den nahegelegenen Körpern beeinflusst.

Auch das finden wir bei Mach klar ausgedrückt. Wir haben oben eine Stelle zitiert, an der das „Machsche Prinzip“ herauslesbar ist. Machs Gedanken dazu sind aber etwas präziser. Der obigen Stelle gehen auf der Seite 247 in der sechsten Ausgabe der *Mechanik* noch ein paar Sätze voraus. Um ihre volle Bedeutung zu verstehen, müssen wir uns vorher jedoch eine andere Passage ansehen. Mach erklärt einige Seiten zuvor:

„B. und J. Friedländer („Absolute und relative Bewegung“, Berlin 1896) versuchen Frage durch ein Experiment nach dem Schema des von mir S. 247 erwähnten zu entscheiden, wobei ich nur besorge, dass dasselbe quantitativ nicht zureichen wird.“ (Mach, 1908, p. 256)

Wichtig an dieser Stelle ist die Frage zu klären: Was steht nun auf Seite 247? Dort weist Mach auf folgendes hin:

„6. Wir können über die Bedeutung des Trägheitsgesetzes nicht in Zweifel sein, wenn wir uns gegenwärtig halten, in welcher Weise es gefunden worden ist. Galilei hat zuerst die Unveränderlichkeit der Geschwindigkeit und Richtung eines Körpers in Bezug auf Objekte bemerkt. Die meisten irdischen Bewegungen sind von so geringer Dauer und Ausdehnung, dass man gar nicht nöthig hat, auf die Aenderungen der Progressivgeschwindigkeit der Erde gegen die Himmelskörper und auf die Drehung derselben zu achten. Nur bei weitgeworfenen Projectilen, bei den Schwingungen des Foucault'schen Pendels u.s.w. erweist sich diese Rücksicht als nothwendig. [Nun kommt jener Abschnitt zum Machschen Prinzip, welchen wir oben besprochen haben; Anmerkung von E.S.]“ (Mach, 1908, p. 247)

In der sechsten Ausgabe geht somit der *Mitführungseffekt* dem *Machschen Prinzip* voraus. Dieser Abschnitt zeigt, dass Mach sich nicht nur deutlich für *Mitführungseffekte ausspricht, sondern auch selber darauf verweist*. In der späteren Ausgabe ist jene Stelle dann nicht mehr zu finden – siehe (Mach, 2012, pp. 261-262). Das ist auch nicht weiter überraschend. Jener Abschnitt dient genau genommen nur als ein Übergang. Gleich davor bespricht er die Gefäßwände von Newtons Eimer-Experiment und schreibt jene allzu bekannte Stelle:

„Niemand kann sagen, wie der Versuch quantitativ und qualitativ verlaufen würde, wenn die Gefäßwände immer dicker und massiger, zuletzt mehrere Meilen dick würden. Es liegt nur der eine Versuch vor, und wir haben denselben mit den übrigen uns bekannten Tatsachen, nicht aber mit unseren willkürlichen Dichtungen in Einklang zu bringen.“
(Mach, 1908, p. 247) (Mach, 2012, p. 261)

Genau genommen ist an dieser Stelle völlig ausreichend zu verstehen, dass Mach *Mitführungseffekte* voraussagte.

5.3.3. Variationen des Machschen Prinzips

Die Geschichte der Physik ist reich an Literatur, die sich mit der Interpretation des Machschen Prinzips auseinandergesetzt hat. Hermann Bondi und Joseph Samuel haben in ihrem Artikel „The Lense-Thirring effect and Mach's principle“ (Bondi & Samuel, 1997) eine Liste über die verschiedenen Variationen des Machschen Prinzips zusammengestellt, dabei betonen die Autoren, dass diese Liste natürlich nicht als vollständig zu betrachten ist (Bondi & Samuel, 1997, p. 121). Wir werden an dieser Stelle jene Versionen (Mach0 – Mach10) zuerst wiedergeben, um sie danach kurz zu interpretieren:

5.3.3.1. Mach0

Mach0: „*The universe, as represented by the average motion of distant galaxies does not appear to rotate relative to local inertial frames.*“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 121)

Sie erklären daraufhin:

„Mach0 is an experimental observation and not a principle. One could interpret Mach's writings as a suggestion to construct a theory in which Mach0 appears as a natural consequence.“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 122)

Ich habe oben jene Stelle (Mach, 2012, p. 262) zitiert, wo Mach deutlich das Machsche Prinzip erklärt. „Mach0“ ist mit Sicherheit die empirische Grundlage des Machschen Prinzips. Ob die Allgemeine Relativitätstheorie dieses Prinzip erfüllt, ist noch ungewiss.

5.3.3.2. Mach1

„Mach1: *Newton's gravitational constant G is a dynamical field.*“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 122)

Und erläutern anschließend:

„Mach1 is not true in N or E. This version applied to Einstein's theory has led to Brans–Dicke Theory [...].“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 122)

Mit „N“ ist die Newtonsche Physik bzw. ihr Raum- und Zeit-Verständnis und mit „E“ ist die Raum-Zeit der Allgemeinen Relativitätstheorie gemeint (Bondi & Samuel, 1997, p. 122). Wie aus der Arbeit von Bondi und Samuel ersichtlich ist, wird „Mach1“ bei der Brans-Dick Theorie vorausgesetzt.

Liest man beispielsweise die Dissertationsarbeit *Mach's Principle and a Varying Gravitational Constant* (1961), von Carl H. Brans, dann erkennt man, dass er sich auf einigen Seiten mit den Machschen Prinzipien auseinander setzt (Brans, 1961, pp. 1, 5, 26-30). Doch man wird vergeblich nach einem Zitat von Mach suchen müssen. Sieht man sich weiter seine Literaturquellen bzw. -liste an, so fehlt auch dort Mach gänzlich (Brans, 1961, p. 168). Verständlicherweise muss ein theoretischer Physiker sich nicht unbedingt mit der Geschichte der Physik genauer auseinandersetzen. Diese Arbeit von Brans zeigt jedoch deutlich, wie sich die Erzählung und die Interpretation des Machschen Prinzips mit der Zeit verselbstständigt hat.

Umso wichtiger wird es sein, dass wir uns mit den Gedanken von Mach genauer auseinandersetzen. Als er die Gedanken zu seinem Prinzip die allerersten Male (1872, 1883) veröffentlichte, gab es weder eine Spezielle Relativitätstheorie (1905) noch eine Allgemeine Relativitätstheorie (1915/1916). Das Machsche Forschungsprogramm wurde mehr als eine Alternative zum Newtonschen Forschungsprogramm entworfen, wobei er den *harten Kern* der Newtonschen Physik stark kritisiert. Dazu gehört auch die Gravitationstheorie, welche in der *Mechanik* von Mach nicht zu finden ist. Aus diesem Grund ist es auch schwer zu sagen, wie er die Gravitationskonstante interpretiert hat.

Es gibt jedoch eine Stelle, an der Mach in der *Mechanik* die Gravitationskonstante „indirekt“ behandelt. Und zwar bei der Herleitung des dritten Keplerschen Gesetztes.

Dieses Gesetz besagt (etwas einfach formuliert): Das Quadrat der Umlaufzeit (T) eines Planeten (um die Sonne) ist proportional zu den Kuben bzw. zu der dritten Potenz seiner Hauptachse (R):

$$\frac{T^2}{r^3} = C$$

Dabei ist C eine Konstante. Für eine einfache Herleitung können wir anstelle von Ellipsenbahnen von Kreisbahnen ausgehen – siehe (Mach, 2012, p. 211). (Da bei Machs Erklärung das Gravitationsgesetz nicht vorkommt, werde ich hier eine eher herkömmliche Herangehensweise darstellen.) Nach dem Newtonschen Forschungsprogramm herrscht zwischen dem Planeten (m_P) und der Sonne (m_S) eine Anziehungskraft, welche mit dem Gravitationsgesetz

$$F_G$$

beschrieben wird. Die Kraft zieht den Planeten Richtung Sonne und wirkt somit zum Kreismittelpunkt – sie stellt daher eine Zentripetalkraft F_Z dar:

$$F_G = F_Z$$

$$G \frac{m_P \cdot m_S}{r^2} = m_P \cdot \frac{v^2}{r}$$

(Die negativen Vorzeichen habe wir bereits auf beiden Seiten weggekürzt.) Da der Planet während eines Umlaufes genau einen Kreis beschreibt ($2 \cdot \pi \cdot r$), lässt sich seine Geschwindigkeit durch seine Umlaufzeit (T) ausdrücken³⁷⁵:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

Diese Gleichung können wir natürlich quadrieren und erhalten:

$$v^2 = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2}{T^2}$$

Setzen wir nun unser Ergebnis für v^2 in die obige Gleichung ein, so erhalten wir

$$G \frac{m_P \cdot m_S}{r^2} = m_P \cdot \frac{v^2}{r} \quad / \cdot r$$

$$G \frac{m_P \cdot m_S}{r} = m_P \cdot v^2$$

$$G \frac{m_P \cdot m_S}{r} = m_P \cdot v^2 \quad / \quad v^2 = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2}{T^2}$$

$$G \frac{m_P \cdot m_S}{r} = m_P \cdot \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2}{T^2} \quad / \div m_P$$

$$G \frac{m_S}{r} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2}{T^2}$$

³⁷⁵ Eine kurze physikalische Erklärung:

Weg (s) ist Geschwindigkeit (v) mal Zeit (t):

$$s = v \cdot t.$$

Wir formen nach der Geschwindigkeit um und erhalten:

$$s = v \cdot t \quad / \div t$$

$$\frac{s}{t} = v.$$

Nun setzen wir den Weg ein:

$$v = \frac{s}{t} \quad / s = 2 \cdot \pi \cdot r$$

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{t}.$$

Nun formen wir nach T^2 um und erhalten

$$T^2 = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot m_S} \cdot r^3$$

bzw.

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot m_S}$$

das dritte Keplersche Gesetz. Dabei ist $C = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot m_S}$ eine Proportionalitätskonstante, auch Kepler-Konstante genannt.³⁷⁶

Bei Mach finden wir aber nur die folgende Beziehung (Mach, 2012, p. 212):

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4 \cdot \pi^2}{K}$$

Die Konstante für Mach lautet daher $K = G \cdot m_S$. Daraus ergibt sich die wichtige Frage: Weshalb handhabt das Mach so?

Die Antwort darauf ist ganz einfach: Von der Beziehung des dritten Keplerschen Gesetzes zum Gravitationsgesetz allein kommt man auf keine Gravitationskonstante; und (viel wichtiger) Mach glaubt nicht an Naturkonstanten. (Gerade das wird zu der berühmten Mach-Planck Debatte führen.) Jedenfalls hat für ihn G *keine eigenständige Bedeutung*, sonst hätte er ihm Buch darauf hingewiesen.

³⁷⁶ Genau genommen ist das Beispiel ein Zweikörperproblem. Deshalb müsste die Kepler-Konstante konkreter folgendermaßen lauten:

$$C = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot (m_S + m_P)}$$

Da aber die Masse der Sonne um das Vielfache größer ist als jene des Planeten ($m_S \gg m_P$), können wir in guter Näherung

$$C \approx \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot m_S}$$

annehmen.

An dieser Stelle sei noch Folgendes angemerkt: Tycho Brahe hat anhand von Beobachtungen eine Reihe von Daten zu den Planetenbewegungen protokollieren können. Anhand dieser Datenreihen konnte anschließend Kepler eine mathematische Beschreibung der Planetenbewegungen angeben. Genau genommen gelten die Keplerschen Gesetze aber allgemein sowohl in der Natur als auch in Modellrechnungen nur näherungsweise.

Mach will sich als experimenteller Physiker auf Sachen verlassen, die sich aus der Erfahrung ergeben. Es ist davon auszugehen, dass er beispielsweise das Cavendish-Experiment von 1798 kannte, womit man die Gravitationskonstante misst. (Das ist ein Experiment, das die Physikstudenten meist bereits im ersten Jahr heute noch erlernen.) Das interessante ist aber, wie Franz Embacher in seiner Arbeit „Erde, Monde und G“ (2013) erklärt:

„Durch die Beobachtung der Bewegung von Körpern, auf die lediglich ihre (wechselseitigen) Gravitationskräfte wirken, lassen sich daher weder deren Massen noch die Gravitationskonstante bestimmen!

Der einzige Ausweg besteht darin, auch andere, nicht gravitative Kräfte einzubeziehen. Dabei erschweren uns allerdings zwei Tatsachen das Leben:

- Die Gravitationskräfte zwischen Himmelskörpern sind *so groß*, dass sie andere Kräfte bei Weitem dominieren (was wiederum damit zusammenhängt, dass elektrische Ladungen positiv oder negativ sein können und einander in normaler Materie über große Distanzen neutralisieren, während sich die von Massen verursachten Gravitationskräfte aufsummieren).
- Die Gravitationskräfte zwischen Gegenständen, mit denen wir auf der Erde experimentieren können, sind *so klein*, dass sie von anderen Kräften dominiert werden (was damit zusammenhängt, dass die Schwerkraft zwischen den elektrisch geladenen Bausteinen der Atome viel kleiner ist als die zwischen ihnen wirkenden elektromagnetischen Kräfte, auf die auch die mechanischen Kräfte, die wir im Alltag auf Gegenstände ausüben, zurückgeführt werden können).

Aus diesen Gründen ist die Gravitationskonstante unter allen fundamentalen Naturkonstanten diejenige, die wir am ungenauesten kennen. Historisch wurde sie im Jahr 1798 (mehr als 100 Jahre nachdem Newton sein Gravitationsgesetz aufgestellt hatte!) von Henry Cavendish bestimmt. Er verglich die zwischen zwei Kugeln von zusammen 316 kg Masse wirkenden Gravitationskräfte mit der auf einen Draht ausgeübten Torsionskraft. Um SchülerInnen begreiflich zu machen, woher wir den Wert dieser Naturkonstante kennen, wird meist auf das Cavendish-Experiment verwiesen.“ (Embacher, 2013, p. 44)

Da eben eine Bestimmung der Gravitationskonstante allein durch ihre wechselseitigen Gravitationskräften so nicht möglich ist, wird Mach wohl auch nicht auf die Gravitationskonstante eingegangen sein. Allgemein steht Mach dem Gravitationsgesetz betont skeptisch und kritisch gegenüber. Aber was genau daran falsch sein könnte und wie man das verbessern hätte können, darauf verweist er nur an unterschiedliche Literaturen; man erkennt jedoch deutlich, dass er auf ein Gravitationsgesetz hoffte, das der Beschreibung der Elektrodynamik ähnlich wäre (Mach, 2012, pp. 216-219, 272).

5.3.3.3. Mach2

„Mach2: *An isolated body in otherwise empty space has no inertia [...]*.“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 122)

Sie erläutern:

„Neither Newtonian nor Einsteinian gravity satisfy this version. In both theories the motion of an isolated body is determined and not arbitrary.“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 122)

Mach scheint hier eine klare Ansicht zu vertreten: *Solche Gedankenexperimente – ein Körper in einem ganz leeren Universum usw. – gehen über die Erfahrung des Menschen hinaus und haben daher physikalisch keine Bedeutung.* Mach erachtet eine solche Fragestellung daher gar nicht als sinnvoll. In einem Brief an Petzoldt (am 18. September 1904) erläutert er seine Überlegungen ganz präzise:

„Bewegt sich aber *ein* Körper, sehr fern und unbeschleunigt von den anderen, fort, so kann Bewegung nur mit Rücksicht auf die letzteren beschrieben werden. Der Gedanke, dass diese Bewegung durch letztere Körper *bestimmt* ist, kann also nicht ohne weiteres abgewiesen werden.“ (Blackmore & Hentschel, 1985, p. 38)

Für Mach ist die Bewegung stets relativ bzw. relational zu einem anderen Körper. Aber nicht nur die Bewegung, sondern auch Kräfte sind für ihn relativ bzw. relational – so sollten die Zentrifugalkräfte nach seiner Ansicht als wirkliche Kräfte aufgefasst werden, die durch Wechselwirkung der Körper entstehen, und nicht einfach als Scheinkräfte. Wenn ein Körper wie die Erde rotiert, dann ist beispielsweise die Zentrifugalkraft auf Fixsterne zurückzuführen. Bereits die Frage, was mit einem Körper passiert, der allein im Universum rotiert, ist für ihn daher eine sinnlose:

„Wenn ich mir die ganze Umgebung eines rotierenden Körpers wegdenke, keine Rotation mehr bestimmen kann, für die Bestimmung der Abplattung jeder Anhaltspunkt fehlt, so möchte mir erscheinen, dass die Umgebung zu einer sinnvollen Beschreibung nothwendig ist. Neumann zieht den entgegengesetzten Schluss daraus. Freilich ist sein absoluter Raum auch eine verkappte Umgebung, nur so mathematisch abstract, dass er durch jede Umgebung vertreten werden kann und demnach leicht mit gar keiner Umgebung verwechselt wird.“
(Blackmore & Hentschel, 1985, p. 38)

Mach betont, dass unsere Erfahrungen uns die einzige sichere Stütze geben, um wissenschaftliche Aussagen machen zu können; alle anderen Gedankendinge sind ungerechtfertigte Willkürlichkeiten:

„Kinematisch darf ich mir gewiss einen Beobachter einem Stern gegenüber denken, und es liegt dann ganz in meiner Willkür, ob ich diesem fingierten Beobachter den Stern ruhend oder rotierend sehen lassen will. Was soll aber der Physiker aus dieser rein kinematischen Ueberlegung folgern? Selbst wenn ein Physiker sich *wirklich* in den Weltraum begeben könnte, wüsste ich nicht, wie und in welcher Weiser er die Vorgänge, die er dort wahrnimmt ansehen sollte? Dazu wäre doch mindestens nothwendig, dass er in *verschiedenen* Fällen einen Einfluss der Lage seines Leibes wahrnimmt. Also Erfahrungen!

[...]

In dem Neumannschen Fall handelt es sich aber um *denselben* Körper, den ich zugleich als rotierend und nicht rotierend, und was schlimmer ist, als abgeplattet und nicht abgeplattet erwarten soll, wenn nicht der absolute Raum aus der Klemme hilft. Warum solls aber gerade der absolute Raum thun? Ist es nicht natürlicher anzunehmen, dass das Wegdenken der übrigen Körper das Unglück verschuldet hat? Ich möchte behaupten, dass die Annahme der Existenz zweier Fälle im leergefegten Weltraum eine ungerechtfertigte Willkürlichkeit ist. Wir haben nur einen Fall, über welchen uns ein *Gedankenexperiment* nicht hinausführen kann.“

(Blackmore & Hentschel, 1985, p. 39)

5.3.3.4. Mach3

„Mach3: *Local inertial frames are so affected by the cosmic motion and distribution of matter that the universe as represented by the average (in a sense to be made precise) motion of matter does not appear to rotate when viewed from the local inertial frames.*“

(Bondi & Samuel, 1997, p. 122)

Sie legen dar:

„(Makes sense in N, EA, EC 4 .). This version is closest to Mach0 and the bucket experiment. This version is closest to Mach0 and the bucket experiment. The potentially noticeable effect on inertial frames of nearby deviations from cosmic uniformity is sometimes called ‘frame dragging’. (See p. 81 and the statement due to Einstein: ‘... A hollow rotating body must generate inside of itself a ‘Coriolis field’ which deflects moving bodies in the sense of the rotation’). Mach3 attempts to give a dynamical explanation for Mach0. In this form, Newton’s theory is in clear conflict with Mach3. Einstein’s theory is not [...].“

(Bondi & Samuel, 1997, p. 4)

Mit „N“ ist wieder das Newtonsche Raum- und Zeit-Verständnis, mit „E“ die Raum-Zeit der Allgemeinen Relativitätstheorie, mit EA die asymptotische flache Raum-Zeit, die aus der ART abgeleitet werden kann, und mit EC die relativistische Kosmologie gemeint (Bondi & Samuel, 1997, p. 122).

Es wurde bereits auf Machs Ansichten zum *Mitführungseffekt* eingegangen.³⁷⁷ „Mach3“ ist mit Machs Ansichten daher übereinstimmend. Im Abschnitt „5.3.3.3. Mach2“ wurde auf einen wichtigen Brief von Mach an Petzoldt (18. September 1904) referiert. In jenem Brief

³⁷⁷ Siehe Abschnitt „5.3.2. Das (schwache) Machsche Prinzip = Mitführungseffekt“.

findet man auch einen experimentellen Vorschlag von Mach, wie man den Mitführungseffekt untersuchen könnte.

Einstein hat Mach verstanden und hat auf „Mach3“ auch hingewiesen. Dass „Mach3“ nicht mit der Newtonschen Physik erklärbar sein darf, ist selbstverständlich, da das Machsche Forschungsprogramm eine Alternative bietet und daher auch andere Voraussagen tätigt.

5.3.3.5. Mach4

„Mach4: *The universe is spatially closed [...]*“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 122)

Sie erklären:

„(Makes sense only in EC.) We do not know if Mach4 is true.“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 122)

Mach4 ist offensichtlich für die Einsteinsche Kosmologie („EC“) nicht uninteressant. Ob Mach das Universum als räumlich geschlossen betrachten wollte, wie „Mach4“ es ausdrückt, lässt sich schwer sagen. *Es spricht aber nichts dagegen „Mach4“ als ein Einstein-Machsches-Prinzip anzusehen.* Wie in „Mach2“ bereits erläutert, ist es für Mach eigentlich nicht ganz recht, wenn unsere Annahmen weit über die Erfahrung hinausgehen. *Deshalb ist eine Voraussage über das gesamte Universum bei Mach verständlicherweise nicht zu finden. Aber indirekt lässt sich eine Verbindung zu Machschen Überlegungen herstellen.*

Mach wusste, dass das Newtonsche Programm abgelöst werden würde und die Physik deshalb ein neues kosmologisches Konzept erwartete – wichtig war für ihn, dass man den wissenschaftlichen Fortschritt vorantreibt:

„Wir haben in dem Obigen versucht, das Trägheitsgesetz auf einen von dem gewöhnlichen verschiedenen Ausdruck zu bringen. Derselbe leistet, solange eine genügende Anzahl von Körpern im Weltraum scheinbar festliegt, dasselbe wie der gewöhnliche. Er ist ebenso leicht anzuwenden und stößt auf dieselben Schwierigkeiten. In dem einen Fall können wir des absoluten Raumes nicht habhaft werden, in dem anderen Fall ist nur eine beschränkte Zahl von Massen unserer Kenntnis zugänglich, und die angedeutete Summation ist also nicht zu vollenden. Ob der neue Ausdruck den Sachverhalt noch darstellen würde, wenn die Sterne durcheinander fluten würden, kann nicht angegeben werden. Die *allgemeinere* Erfahrung kann aus der uns vorliegenden *speziellern* nicht herauskonstruiert werden. Wir müssen vielmehr eine solche Erfahrung *abwarten*. Dieselbe wird sich vielleicht bei Erweiterung unserer physisch-astronomischen Kenntnisse irgendwo im Himmelsraum, [...] wo heftigere und kompliziertere Bewegungen vorgehen als in unserer Umgebung, darbieten. Das wichtigste Ergebnis unserer Betrachtungen ist aber, *dass gerade die scheinbar einfachsten mechanischen Sätze sehr komplizierter Natur sind, dass sie auf unabgeschlossenen, ja sogar auf nie vollständig abschließbaren Erfahrungen beruhen, dass sie zwar praktisch hinreichend*

gesichert sind, um mit Rücksicht auf die genügende Stabilität unserer Umgebung als Grundlage der mathematischen Deduktion zu dienen, dass sie aber keineswegs selbst als mathematisch ausgemachte Wahrheiten angesehen werden dürfen, sondern vielmehr als Sätze, welche einer fortgesetzten Erfahrungskontrolle nicht nur fähig, sondern sogar bedürftig sind. Ich glaube nicht, dass die seit Dezennien erschienenen Schriften der Vertreter des absoluten Raumes etwas anderes behaupten können, als die gesperrte Stelle, die schon 1883 in der ersten Auflage, S. 221, 222, stand. Diese Einsicht ist wertvoll, weil sie den wissenschaftlichen Fortschritt begünstigt.“ (Mach, 2012, p. 266)

Wie wir sehen, ist für Mach die „Erfahrungskontrolle“ ganz wichtig. Unsere Erfahrung über das gesamte Universum kann wohl nie als vollständig abgeschlossen betrachtet werden. Für Mach ist es mehr wichtig, kritisch und skeptisch gegenüber Theorien zu bleiben, weil unsere Erfahrung und somit unser Wissen begrenzt ist. Aus diesem Grunde wird auch seine Skepsis gegenüber der auf einer rein statistischen Mechanik beruhenden Interpretation der Entropie verständlich:

„Anderwärts (,Prinzipien der Wärmelehre‘ [2. Aufl., Leipzig 1900], S. 51) habe ich zu zeigen versucht, worauf die natürliche Neigung des Menschen beruht, seine für ihn wertvollen Begriffe, besonders diejenigen, zu welchen er instinktiv, ohne Kenntnis von deren Entwicklungsgeschichte, gelangt ist, zu hypostasieren. Die für den Temperaturbegriff daselbst gegebenen Ausführungen lassen sich unschwer auf den Zeitbegriff übertragen und machen die Entstehung von Newtons ,absoluter Zeit‘ verständlich. Auch auf den Zusammenhang des Entropiebegriffs mit der Nichtumkehrbarkeit der Zeit wird daselbst (S. 338) hingewiesen und die Ansicht ausgesprochen, dass die Entropie des Weltalls, wenn sie überhaupt bestimmt werden könnte, wirklich eine Art absoluten Zeitmaßes darstellen würde.“

(Mach, 2012, p. 254)

Mach hat insofern auch keine Probleme mit der absoluten Zeit (des Weltalls). Er ist aber skeptisch darüber („wenn sie überhaupt bestimmt werden könnte“) ob man die Entropie des gesamten Universums bestimmen könnte. Mach geht mit seiner Bescheidenheit den Weg eines aufrichtigen Wissenschaftlers. Man kann verschiedene Konzepte zwar vertreten, aber wenn uns eine gesicherte und unfehlbare Erfahrung fehlt, um das zu bestätigen, so müssen wir uns immer wieder an unserer Erfahrung orientieren.

Um zu zeigen, dass die Allgemeine Relativitätstheorie das Machsche Prinzip erfüllt, hat Einstein für ein geschlossenes Universum plädiert. Dieser Versuch von Einstein zeigt, dass das Machsche Prinzip eine Erkenntnistheoretische Aussage macht, nämlich dass unsere einfachsten Begriffe (Raum, Zeit, Materie) erst dann klar werden können, wenn wir uns ein Bild vom ganzen Universum machen können.

5.3.3.6. Mach5

„Mach5: *The total energy, angular and linear momentum of the universe are zero* (p. 237).“
(Bondi & Samuel, 1997, p. 122)

Ihre Analyse ergibt die folgende Schlussfolgerung:

„It is not true in N. In EC it is claimed [...] that the total angular momentum of a closed universe must vanish.“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 123)

Es wird also von manchen Wissenschaftlern die Ansicht vertreten, dass bei einem geschlossenen Universum der Gesamtdrehimpuls null sein sollte.

Wenn es relativ ist, ob sich der Eimer oder die Fixsterne sich bewegen, dann kann man wohl automatisch von einer verschwindenden Gesamtimpulserhaltung des Universums ausgehen. Der Gedanke, dass die Erhaltungssätze überall im Universum gelten oder gar für das gesamte Universum ausgedrückt werden können, ist aber nicht bei Mach zu finden – so erklärt er in seiner *Mechanik*:

„Auch die Vorstellungen von der Unveränderlichkeit der Menge der Materie, von der Unveränderlichkeit der Summe der Bewegung, von der Unzerstörbarkeit der Arbeit oder Energie, welche die ganze heutige Naturwissenschaft beherrschen, sind unter dem Einflusse theologischer Ideen herangewachsen. Sie sind angeregt durch einen schon erwähnten Ausspruch von [...] Descartes in den Prinzipien der Philosophie, nach welchen die zu Anfang erschaffene Menge der Materie und Quantität der Bewegung unverändert bleibt, wie dies allein mit der Beständigkeit des Schöpfers der Welt verträglich sei. Die Vorstellung von der Art, wie die Summe der Bewegung zu rechnen sei, hat sich von Descartes auf Leibniz und später bei den Nachfolgern sehr bedeutend modifiziert, und es ist nach und nach das entstanden, was man heute ‚Gesetz der Erhaltung der Energie‘ nennt. Der theologische Hintergrund hat sich aber nur sehr allmählich verloren. Ja es lässt sich nicht leugnen, dass auch heute noch manche Naturforscher mit dem Gesetz der Erhaltung der Energie eine eigene Mystik treiben.“ (Mach, 2012, p. 482)

Mach weist also darauf hin, dass in dem Gedanken der Erhaltungssätze ursprünglich mystische Gesichtspunkte verankert waren. Solche Überlegungen in die Physik zu übertragen, ohne eine Erfahrungskontrolle, ist ein riskantes Unterfangen. Für Mach war das Konzept der Energie beispielsweise deshalb interessant, weil er verschiedene Bereiche der Physik miteinander verbinden konnte, und somit über das mechanistische Weltbild hinausging:

„In dieser Form nennt man den Satz auch Gesetz der *Erhaltung der Energie*, indem die Summe der Spannkraft (der potentiellen Energie) und der lebendigen Kraft (der kinetischen Energie) im System konstant bleibt. Da nun in der Natur überhaupt für eine geleistete Arbeit

nicht nur lebendige Kraft, sondern auch eine Wärmemenge, oder das Potential einer elektrischen Ladung usw. auftreten kann, so sah man hierin den Ausdruck eines mechanischen, allen Naturerscheinungen zugrunde liegenden Vorganges. Es spricht sich aber hierin nichts aus, als ein unveränderlicher quantitativer *Zusammenhang* zwischen mechanischen und anderen Vorgängen.“

(Mach, 2012, p. 522); siehe dazu auch (Mach, 2012, p. 525)

Solche Verbindungen sind für uns als Wissenschaftler sehr wichtig, um übersichtlichere und verbindende Konzepte zu erschließen. Dass wir solche Konzepte verwenden bedeutet aber nicht, dass sie in der Natur zwangsläufig überall erfüllt sein müssen:

„Die Erhaltungsideen haben wie der Substanzbegriff ihren triftigen Grund in der Ökonomie des Denkens. Eine bloße zusammenhanglose Veränderung ohne festen Anhaltspunkt ist nicht fassbar und nachbildbar. Man fragt also, welche Vorstellung kann bei der Veränderung als *bleibend* festgehalten werden, welches *Gesetz* besteht, welche *Gleichung* bleibt erfüllt, welche *Werte* bleiben konstant?“ (Mach, 2012, pp. 527-528)

Wichtig für Mach war aus der Erfahrung des Prinzips des ausgeschlossenen Perpetuum mobile (Mach, 2012, p. 528) auf ein Verständnis vom Energieerhaltungssatz zu gelangen. Ob man den physikalischen Ausdruck der „Arbeit als *maßgebend*“ anerkennen darf, kann „nur die Erfahrung lehren“ (Mach, 2012, p. 68). Stets ist für Mach die Erfahrung wichtig, um wissenschaftliche Sätze aussprechen zu können.

5.3.3.7. Mach6

„Mach6: *Inertial mass is affected by the global distribution of matter (pp. 91 ,249).*“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 123)

Sie kommentieren:

„Makes sense in (N, EA, EC). Is not true in any of them. Hoyle and Narlikar [...] proposed a theory in which implements Mach6.“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 5)

Dass die träge Masse durch die Verteilung der Materie im Universum beeinflusst wird, ist demnach sowohl auf die Newtonsche Physik als auch auf die Einsteinsche Theorie und Kosmologie nicht zutreffend.

Für Mach ist die Kategorisierung der trägen und der schweren Masse gar nicht nötig. Nach Mach sind allein die *Relativbeschleunigungen* wichtig. Mach nimmt an, dass die Trägheitsbewegung eines Körpers durch die anderen Massen beeinflusst werden kann – das Trägheitsgesetz ist für ihn daher allgemein nur als eine Näherung zu sehen.

5.3.3.8. Mach7

„Mach7: *If you take away all matter, there is no more space [...].*“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 123)

Sie kommen zu dem Schluss:

„Makes sense in (N, EA, EC). (Not true in N, EA).“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 5)

Wir haben hier den analogen Fall zu „Mach2“. Für Mach sind solche Gedankenexperimente ungerechtfertigte Willkürlichkeiten, die über die Erfahrung hinausgehen und keinen Sinn geben. Die Annahmen zu „Mach2“ und „Mach7“ sind daher nicht von ihm. Er schreibt:

„Die Ansicht, dass die ‚absolute Bewegung‘ ein sinnloser, inhaltsleerer, wissenschaftlich nicht verwendbarer Begriff sei, die vor dreißig Jahren fast allgemein Befremden erregte, wird heute von vielen und namhaften Forschern vertreten. Ich möchte als entschiedene ‚Relativisten‘ nur anführen: [...]. Die Zahl der Relativisten ist in rascher Zunahme begriffen und die vorstehende Liste gewiss schon nicht mehr vollständig. Wahrscheinlich wird es bald keinen bedeutenden Vertreter der Gegenansicht mehr geben. Sind aber die ohnehin ungreifbaren Hypothesen des absoluten Raumes und der absoluten Zeit nicht mehr haltbar, so entsteht die Frage: Auf welche Weise können wir dem Trägheitsgesetz einen verständlichen Sinn geben?“ (Mach, 2012, p. 269)

Mach meint, die ohnehin *ungreifbaren* Hypothesen des absoluten Raumes und der absoluten Zeit sind nicht mehr haltbar, weil sie eben sinnlose, inhaltsleere, wissenschaftlich nicht verwendbare Begriffe seien. Er sagt daher nicht, dass es keinen absoluten Raum mehr gibt, wenn man alle Materie aus ihm rausnehmen würde, sondern dass solche gedanklichen Überlegungen erst gar nicht sinnvoll sind, weil man sie nicht überprüfen kann.

5.3.3.9. Mach8

„Mach8: $\Omega = 4\pi\rho GT^2$ is a definite number of order unity (p. 475). (Here, ρ is the mean density matter in the universe and T is the Hubble time. Makes sense in EC only.)“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 123)

Sie erläutern:

„ Ω does seem to be of order unity in our present universe, but note that of all EC models, only the Einstein–de Sitter makes this number a constant, if Ω is not *exactly* one. Making a theory in which this approximate equality appears natural is a worthwhile and ongoing effort.“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 123)

Sowohl die verschiedenen Lösungen der Einsteinschen Kosmologie als auch Hubbles Resultate fanden erst nach Ernst Machs Tod statt. Wie Mach zu diesen Überlegungen gestanden wäre, ist schwer zu sagen.

5.3.3.10. Mach9

„Mach9: *The theory contains no absolute elements [...]*.“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 123)

Da Mach bekanntlich das ‘Absolute’ stets verneint, lohnt es sich, dieses Prinzip genauer zu betrachten. Bondi und Samuel erklären:

„(Makes sense in N, EA and EC). This version is clearly explained by Jürgen Ehlers in [...]. The elements (fields, for example) appearing in the theory can be divided into dynamical (those that are varied in an Action principle) and absolute (those that are not). The Action principle leads to equations for the dynamical fields to satisfy. The absolute elements are predetermined and unaffected by the dynamics.

Newton’s theory does not satisfy Mach9 (space and time are absolute) and neither does EA (asymptotic flatness introduces an absolute element – the flat metric at infinity). EC does satisfy Mach9. From the point of view of invariance groups [...] Mach9 is the requirement that the invariance group of the theory is the *entire* diffeomorphism group of spacetime. Viewed in this light Mach9 is just the principle of general covariance.“

(Bondi & Samuel, 1997, p. 123)

Für Mach sind alle Massen, alle Bewegungen und alle Kräfte relativ – aus diesem Grund möchte er auch keine Definition des absoluten Raumes oder der absoluten Zeit geben. Dass diese Formulierung nicht vereinbar mit der Newtonschen Physik ist, aber in der Einsteinschen Kosmologie erfüllt ist, zeigt umso deutlicher, wie sehr Machs Überlegungen in Einsteins Theorie umgesetzt wurden. Ein anderer Grund ist, dass die Allgemeine Kovarianz als eine Heuristik des Machschen Programms angesehen werden kann.

5.3.3.11. Mach10

„Mach10: *Overall rigid rotations and translations of a system are unobservable.*“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 123)

Sie erläutern:

„(This version makes sense *only* in N; in Einsteinian spacetime one has no idea what a rigid rotation is anymore than one knows what a rigid body is.) Notice that Mach10 requires that *all* overall rigid motions of a system are unobservable (not just uniform ones). Only relative motions remain.“ (Bondi & Samuel, 1997, p. 123)

Der Kerngedanke bei Mach ist, dass alle Massen, Bewegungen und somit die Kräfte relativ verstanden sollten. Andererseits möchte er wohl die Scheinkräfte als wirkliche physikalische Kräfte verstanden wissen. Seiner Ansicht nach können wir uns denken, dass der Eimer ruht und dass die Fixsterne sich drehen. Eine solche Annahme geht nicht davon aus, dass man sich denken kann, dass der Gesamtdrehimpuls des Universums Null sein muss, was nach Mach10 womöglich der Fall sein sollte (Bondi & Samuel, 1997, p. 123), sondern dass er stets beliebige Werte annehmen kann. Es ist jedoch insgeheim nicht einfach, zu sagen, was Mach über Mach10 gedacht hätte. (Siehe dazu „5.3.4. Interview mit Julian Barbour“.)

5.3.4. Interview mit Julian Barbour

Julian Barbour ist (siehe Foto 1) „a former Visiting Professor in Physics at the University of Oxford“. Der Physikergemeinschaft wurde er bekannt durch seine Arbeiten, wie beispielsweise:



Foto 1: Julian B. Barbour in seinem Arbeitszimmer auf der College Farm, wo seine Werke entstehen.

- „Relative-distance Machian theories“ (Barbour, 1974), erschienen in *Nature*,
- „Mach’s principle and the structure of dynamical theories“ (Barbour & Bertotti, 1982), erschienen in *Proceedings of the Royal Society London*,
- „Relativity without relativity“ (Barbour, et al., 2002), erschienen in *General Relativity and Quantum Cosmology*,
- „The definition of Mach’s Principle“ (Barbour, 2010), erschienen in *Foundation Physics*,
- „Identification of a Gravitational Arrow of Time“ (Barbour, et al., 2014), erschienen in *Physical Review Letters*, usw.

Viele kennen zudem seine wissenschaftlichen Bücher:

- *The Discovery of Dynamics. A study from a Machian point of view of the discovery and the structure of dynamical theories* (Barbour, 2001)³⁷⁸ zur Physikgeschichte,
- (Mitherausgeber) von *Mach’s principle: From Newton’s bucket to quantum gravity* (Barbour & Pfister, 1995a) zu Physikgeschichte, theoretischer Physik und Kosmologie
- *The End of Time: The Next Revolution in our Understanding of the Universe* (Barbour, 1999), zu seinen physikalischen Thesen,
- zuletzt erschien auch sein Buch *The Janus Point: A New Theory of Time* (Barbour, 2020), wo im Abschnitt „Machian General Relativity“ (Barbour, 2020, pp. 77-81)³⁷⁹ auf Mach eingegangen wird.

³⁷⁸ Das Buch erschien das erste Mal unter dem Titel „Absolute or Relative Motion“ im Jahre 1988 (Barbour, 2001, p. vii).

³⁷⁹ Siehe zu Mach auch (Barbour, 2020, pp. 14, 39, 68-77, 200-207).

Barbour gilt aufgrund seiner, über 40-jährigen, Erfahrung zu diesem Thema und aufgrund dessen, dass seine Artikel, Essays und Bücher vielfach ausgezeichnet wurden, als Koryphäe auf diesem Gebiet. Freundlicherweise habe ich ihn für ein Interview auf seiner *College Farm* besuchen dürfen (siehe Fotos 1-4).³⁸⁰



Foto 2: Interview mit Barbour (vor dem Kamin auf der College Farm).

Durch die Covid-19 Situation kam es zu keinem weiteren Treffen mehr – doch durfte ich ihm per E-Mail weitere Fragen stellen. Ich gebe an dieser Stelle das Interview in knapper Form wieder³⁸¹:

SIMSEK: Herr Prof. Dr. Barbour, ich hätte ein paar Fragen zu den Ergebnissen Ihrer Arbeit. Wir haben über den Artikel von

Hermann Bondi und Joseph Samuel gesprochen (Bondi & Samuel, 1997). Ich wollte Sie fragen, ob Sie mit dieser Kategorisierung einverstanden sind? Ihre frühere Arbeit wird darin unter Mach10 eingeordnet. Vor allem würde es mich interessieren, welche Machschen Prinzipien (Mach1 – Mach10) Ihre neue Theorie „Shape dynamics“ (SD) erfüllen würde.

BARBOUR: Mach1. Shape dynamics does not treat G as a dynamical field. Mach2 is badly misguided: Mach correctly warned against attempts to deviate from his operational definition of mass. SD satisfies Mach3. SD requires Mach4 (spatially closed universe). SD satisfies Mach5. SD says Mach6 is wrong for the same reason as for Mach2. SD says Mach7 is wrong because vacuum



Foto 3: Das Nachbargebäude von der College Farm ist die St Peter ad Vincula Kirche, aus dem 12. Jhdt., die durch ihre Wandgemälde bekannt ist.

³⁸⁰ Der Besuch fand von 8.2.2020 bis 9.2.2020 statt.

Das erste Foto ist vom 8. Februar 2020 (17:49); das zweite vom 8. Februar 2020 (18:34); das dritte vom 8. Februar 2020 (17:07); das vierte vom 9. Februar 2020 (10:23). Die Fotos wurden alle von mir (Eren Simsek) gefertigt.

Eine kurze Anmerkung zum vierten Foto: Der Orkan Ciara – in Österreich und Deutschland als Orkan Sabine bezeichnet – hatte seinen Höhepunkt am 9./10. Februar, was, zurückblickend, das Treffen und den Rückflug zusätzlich abenteuerlicher machte.

³⁸¹ Das Interview wurde von Julian B. Barbour am 11. März 2021 gegengelesen und genehmigt.

GR with a spatially closed universe satisfies SD. SD says nothing about it. SD probably satisfies Mach9 – (in the case of particles the mass ratios are vitally important and are not varied. I am not persuaded that Ehlers really did define absolute elements. What about the electron and proton masses?) Mach10: SD is relational but I do wish Bondi and Samuel had properly recognized the importance of the Poincaré principle (in the weak form so that the universe can expand).



Foto 4: Orkan Ciara zieht über Europa.

SIMSEK: Flavio Mercati schreibt in seinem Buch *A Shape Dynamics Tutorial* (Mercati, 2017):

„It is in this sense that the novel foundation of dynamics I am describing satisfies Mach’s principle and solves the puzzle of Newton’s bucket (in the restricted case of a universe composed of point particles interacting with instantaneous potentials): the dynamical law is such that it can only contemplate a universe with zero total angular momentum. In Newtonian dynamics, on the contrary, angular momentum is a constant of motion that is freely specifiable through the initial conditions of our solution. The law that the total angular momentum of the universe must be zero solves the problem of Newton’s bucket in the following way: one makes a (small) error in assuming that the reference frame defined by the fixed stars is inertial. If the total angular momentum is zero, and the Earth is rotating w.r.t. the fixed stars, that reference frame cannot be inertial. This is due to the fact that the total angular momentum of the rest of the universe must be equal and opposite to that of the Earth. The reference frame of the fixed stars must be rotating very slowly (because the stars greatly outweigh the Earth), and a truly inertial frame would be rotating both w.r.t. Earth and w.r.t. the fixed stars.“ (Mercati, 2017, p. 19)

Meine Frage wäre: Was bedeutet hier „(small) error“? Man darf sich also den Gesamtimpuls des Universums als 0 vorstellen – habe ich das richtig verstanden?

BARBOUR: Of course the total momentum is zero. It’s the angular momentum that counts. In the resolution in particle dynamics, there is a small error if you say the stars have exactly vanishing angular momentum because the earth (or the bucket with walls Meilen dick) make a very small contribution to the determination of the inertial frame.

SIMSEK: Aber man kann nicht wie Ernst Mach denken, dass der Eimer stillsteht und das Universum rotiert, sondern das Universum müsste sich langsamer drehen – habe ich es

richtig verstanden?

BARBOUR: Correct. But I think Mach was being sarcastic when he suggested one should rotate the stars. The much better comment is about what will happen if the bucket walls are made thicker and thicker.

SIMSEK: Bei Ihrer relationalen Theorie liest man immer wieder, dass man mindestens drei Körper benötigt:

„In fact a fourth as well if $N = 3$ or 4 . With only two particles, nothing can be done. Relational dynamics requires at least three particles. The Universe certainly meets that requirement!“
(Mercati, 2017, pp. 12, fn. 7)

Meine Frage ist: Weshalb genau benötigt man unbedingt drei Körper?

Relational bedeutet, dass zwei Körper gegeben sein sollten; oder habe ich das nicht ganz richtig verstanden? Zum Beispiel das Zweikörperproblem. Für das Gravitationsgesetz von Newton und für die Coulombkraft reichen zwei Körper aus. Shape Dynamics hat hier also eine erkenntnistheoretische untere Schranke, die die anderen nicht haben? Ich habe aber nicht genau verstanden wieso? Könnten Sie mir das bitte etwas genauer erläutern. Und vor allem, was hätte das genau für Vorteile?

BARBOUR: A dynamical theory requires a dependent and an independent variable. In the three-body problem two internal angles α and β determine the instantaneous state. Then α as a function of β is meaningful. The Newtonian two-body is only meaningful because their positions are defined relative to the stars and the time relative to the rotation period of the earth (as Mach pointed out, Newton's laws were verified that way, not relative to absolute space and time). If you have two point particles and no external rods, clocks and compasses, then all you can say is that the two particles are not coincident.

SIMSEK: Herr Prof. Dr. Barbour, ich bedanke mich herzlich für das Interview und ihre Gastfreundschaft.

5.4. Anhang IV: Einsteins Unterhaltung mit Ernst Mach über die Atomtheorie – und die Lichtquantenhypothese?

Wir wissen, dass Einstein im Jahre 1910 (wahrscheinlich gegen Ende September) Ernst Mach besucht hat, um mit ihm, besonders über die Atomtheorie, zu sprechen. In diesem Teil der Arbeit werde ich Argumente präsentieren und auf Dokumente hinweisen, welche nahelegen, dass Einstein und Mach sich über die Atomtheorie und höchstwahrscheinlich über die Quanteneigenschaften des Lichtes unterhalten haben.³⁸² Dies ist umso interessanter, da im Jahr 1921 – in welchem Einstein (rückwirkend) den Nobelpreis besonders für seine Verdienste zum photoelektrischen Effekt bekam – das gefälschte Vorwort in *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) erschien, wo Mach als ein Gegner der Atomistik und auch der Relativitätstheorie präsentiert wurde.

Einstein glaubte zeitlebens³⁸³, dass das Vorwort von Ernst Mach war und wurde somit ebenfalls zum Opfer einer Fälschung. (Obwohl im selben Jahr (1921) auch die achte Auflage der *Mechanik* erschien, die Mach als Wegbereiter der Relativitätstheorie hervorhob.³⁸⁴)

5.4.1. Forschungsstand

Die bisher genaueste Analyse über „*Einsteins Besuch bei Mach*“ ist in (Wolters, 1987, pp. 130-134) zu finden. Insgesamt gibt es drei publizierte Erwähnungen über dieses Treffen:

- 1937 in (Weinberg, 1937)
- 1949 in (Frank, 1949), Reprint mit einem Vorwort von Einstein (Frank, 1979)
- 1955 in (Cohen, 1955)

Wir wollen nun die Beschreibungen über das Treffen im Abschnitt „5.4.2. 1910: Einsteins einziger Besuch bei und sein persönliches Gespräch mit Mach“ zuerst wiedergeben und kurz analysieren, um feststellen zu können, wann Einstein Mach besuchte und worüber er mit ihm gesprochen hat.

Anschließend werden wir im Abschnitt „5.4.3. Einsteins und Machs Unterhaltung über die Atomtheorie – und die Lichtquantenhypothese?“ Argumente dafür geben, dass sich Einstein

³⁸² Siehe zu Machs und Einsteins ähnlichen Ansichten zum Teilchenmodell des Lichtes Seite 158, Fußnote 176.

³⁸³ Siehe dazu Abschnitt „4.4.2.3.1 Die Neudefinition der Zeit: Cohns und Machs möglicher Einfluss“.

³⁸⁴ Siehe Petzoldts Anhang „Das Verhältnis der Machschen Gedankenwelt zur Relativitätstheorie“ (Mach, 2012, pp. 551-580).

mit Mach auch über seine Lichtquantenhypothese unterhalten hat. (Womöglich bat er Mach um ein Experiment oder um ein Konzept eines Experiments, um die Eigenschaften des Lichtes genauer zu untersuchen.)

5.4.2. 1910: Einsteins einziger Besuch bei und sein persönliches Gespräch mit Mach

5.4.2.1. Carlton Bereneda Weinberg über Einsteins Besuch bei Mach

Carlton Bereneda Weinberg schreibt in seiner Dissertation *Mach's Empirio-Pragmatism in Physical Science* (Weinberg, 1937):

„When Dr. Einstein met Ernst Mach in Vienna, around 1910 — 1911, at which time Mach was quite ill but still mentally alert, they discussed the question of atomic physics. Dr. Einstein inquired whether, if an atomic theory were found to be the only one which completely satisfied the experimental facts, Mach would accept the atomic theory. And Mach answered that he would. From this, it is not at all evident or clear that Mach accepts the possible reality of atoms, though Dr. Einstein informs me that Mach admitted in conversation much that he did not admit in his various works.“ (Weinberg, 1937, p. 104) – siehe (Wolters, 1987, p. 130)

Nach diesem Bericht war E. Mach zwar krank, aber geistig wach beim Besuch von Einstein, welcher nach Weinberg um 1910-1911 stattfand. Offensichtlich haben sie über die Atomtheorie diskutiert und Mach gab an, sich mit dieser anfreunden zu können, wenn sie im Stande wäre die experimentellen Tatsachen zu erklären.

5.4.2.2. Philipp Frank über den Besuch Einsteins bei Mach

Eine ähnliche, indirekte Wiedergabe des Treffens finden wir auch in Philipp Franks „Einstein. Sein Leben und seine Zeit“ (Frank, 1979):

„Einstein wollte bei seinem Aufenthalt in Wien auch den Physiker und Philosophen Ernst Mach persönlich kennenlernen, der in so mannigfacher Weise mit seinem eigenen Schaffen verbunden war.

Mach hatte an der Universität Wien Vorlesungen über die Geschichte und Theorie der ‚induktiven‘ Wissenschaften gehalten, d. h. über die Wissenschaften, die wie Physik und Chemie von Experimenten und Einzelbeobachtungen zu allgemeinen Sätzen vordringen. Jetzt aber litt er an schweren Lähmungserscheinungen und hatte sich seit zwölf Jahren vom Lehramt zurückgezogen. Er lebte in seiner Wohnung in einer Gartenvorstadt Wiens, beschäftigte sich nur mit seinen Studien und empfing gelegentlich Besuche. Wenn man zu ihm eintrat, sah man einen Mann mit einem grauen etwas wilden Bart, der wie ein slowakischer Arzt oder Rechtsanwalt aussah und mit einem halb gütigen, halb schlaun Blick sagte: ‚Bitte reden Sie laut mit mir. Außer meinen sonstigen unangenehmen Eigenschaften bin ich auch noch fast taub.‘ Mach lernte den Urheber der neuen Relativitätstheorie mit großem Interesse kennen. Einstein stand unter dem Eindruck von Machs Gedanken über die

logische Struktur der Physik, wenn er sich auch mit manchen Gedankengängen nicht recht befreunden konnte.

Zum Beispiel kam Einstein Machs Ablehnung der atomistischen Hypothese in der Physik unberechtigt vor. Besonders befremdete ihn, daß Mach die allgemeinen Sätze im Vergleich mit der Beschreibung der einzelnen Tatsachen zu gering bewertete. Machs Meinung, daß die allgemeinen Sätze der Wissenschaft nur ein Mittel wären, um die Einzeltatsachen in einfacher Weise im Gedächtnis zu behalten und handhaben zu können, erschien ihm nicht befriedigend. Denn unter ‚einfacher im Gedächtnis behalten‘ konnte man offenbar hier nur ‚einfach im psychologischen Sinne‘, d. h. ‚mit geringerer Mühe im Gedächtnis behalten‘ verstehen. Machs ‚Ökonomie‘ schien demnach eine Ökonomie im psychologischen Sinne zu sein.

Als die beiden ein wenig ins Gespräch gekommen waren, warf Einstein die folgende Frage auf: Nehmen wir an, wir könnten durch die Annahme von Atomen in einem Gase eine beobachtbare Eigenschaft dieses Gases vorhersagen, die man aus der nicht atomistischen Physik nicht vorhersagen kann. Würden Sie dann eine solche Hypothese zulassen, auch wenn die Berechnung ihrer Folgen sehr komplizierte und schwer verständliche Rechnungen erforderte?

Ich meine natürlich, wenn man aus dieser Hypothese die Verknüpfung mehrerer beobachtbarer Eigenschaften folgern könnte, die ohne diese Hypothese unverknüpft wären. Ist es dann ‚ökonomisch‘, d. h. einfach, die Hypothese der Existenz von Atomen zu machen?

Mach antwortete: ‚Wenn man wirklich einen Zusammenhang zwischen mehreren beobachtbaren Eigenschaften mit Hilfe der Atomhypothese ableiten kann, von denen ohne diese Hypothese jede für sich stünde, so würde ich Ihnen sagen, daß diese Hypothese eine ‚ökonomische‘ ist. Denn wir können mit ihrer Hilfe aus einer einzigen Annahme Beziehungen zwischen mehreren Beobachtungen ableiten. Ich würde mich dann auch nicht daran stoßen, daß die dazu notwendigen Rechnungen kompliziert und schwierig sind.‘

Damit war Einstein sehr zufrieden und sagte: ‚Dann verstehen Sie aber unter ‚einfach‘ und ‚ökonomisch‘ nicht eine ‚psychologische Ökonomie‘, nicht eine bloße Bequemlichkeit, sondern eine ‚logische Ökonomie‘. Die beobachtbaren Eigenschaften sollen aus möglichst wenigen Annahmen abgeleitet werden, mögen auch diese Annahmen selbst ‚willkürlich‘ erscheinen und die Berechnungen der Folgerungen schwierig sein.‘

Wenn man aber die ‚Ökonomie‘ als eine logische auffaßte, wenn möglichst viele Tatsachen aus möglichst wenig Hypothesen zu folgern sein sollten, so fühlte Einstein keinen Widerspruch mehr zwischen dem Machschen Standpunkt und seinen eigenen Forderungen an eine physikalische Theorie.

Mach hatte zwar im Gespräch dieses Zugeständnis gemacht, Einstein aber sah in Machs Schriften doch nur eine Forderung nach einer ‚psychologischen Ökonomie‘, d. h. einer Zusammenfassung von Tatsachen in Sätzen, die der Leser mit möglichst wenig Anstrengung erfassen und im Gedächtnis behalten kann. Einstein war also für den Moment befriedigt, behielt aber eine gewisse Reserviertheit gegen die ‚Machsche Philosophie‘ bei.

Wir erinnern uns, daß Einstein in Zürich mit einem der begeistertsten Anhänger Machs, mit Friedrich Adler, befreundet war. Dessen Vater, Viktor Adler, lebte in Wien als Führer der Sozialdemokratischen Arbeiterpartei Österreichs. Einstein benützte seine Anwesenheit in Wien, um den Vater seines Freundes zu besuchen, [...].“

(Frank, 1979, pp. 176-178)

Bei Frank finden wir, dass sich Einstein mit Mach über das Konzept der Ökonomie und der Atomtheorie unterhalten hat. Wie wir gesehen haben, fand nach Weinberg das Treffen um 1910-1911 statt; nach Philipp Frank jedoch im „Herbst 1913“ (Frank, 1979, p. 175) in Wien. Wie Wolters richtig betont:

„Die Datierung bei Frank ist mit Sicherheit falsch, da Mach im Herbst 1913 nicht mehr in Wien lebte, sondern in Vaterstetten bei München, wohin er im Mai 1913 übersiedelt war.“
(Wolters, 1987, p. 130)

Interessant ist, dass Frank noch erwähnt, dass Einstein damals auch Viktor Adler besucht hat. Das gibt einen guten Hinweis darauf, wann das Treffen stattgefunden haben könnte. In Einsteins Notizbuch (Seite 30) finden wir nämlich eine Notiz zu seinen Treffen (CPAE 3; APPENDIX A; p. 578) – siehe Abb. 12.

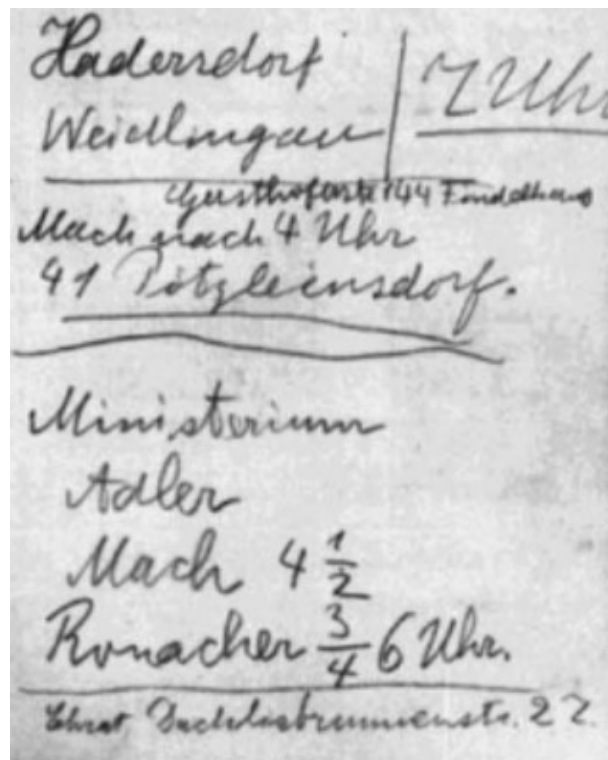


Abbildung 12: Aus Einsteins Notizbuch Seite 30; Quelle: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol3-doc/616> [Zugriff am 22. Mai 2020].

Von oben nach unten finden wir daher folgende Eintragungen:

- „Hadersdorf Weidlingau“ „7 Uhr“: Wie aus der Korrespondenz³⁸⁵ zwischen Anton Lampa und Einstein sichtbar, war das die Adresse von Anton Lampa (in Österreich), der seit 1909 in Prag den Lehrstuhl für Experimentalphysik innehatte. (Dieser Lehrstuhl war der frühere von Ernst Mach.) Einsteins Reise nach Wien war

³⁸⁵ Siehe dazu: (CPAE 9; 267; p. 365) (CPAE 9; 270; p. 369) (CPAE 9; 287; p. 393) (CPAE 9; 291; p. 396) (CPAE 9; 388; p. 461).

demzufolge gegen Ende 1910, weil er nach Prag berufen wurde – diesbezüglich wollte er einige Personen treffen und beim Ministerium formale Angelegenheiten erledigen; wie Philipp Frank kurz berichtet:

„Es gab in Prag zwei Universitäten, eine mit tschechischer und eine mit deutscher Vortragssprache. An der deutschen Universität war im Herbst 1910 der Lehrstuhl der theoretischen Physik zu besetzen. Diese Stellung wurde Einstein angeboten. Die Vorgeschichte dieser Berufung ist in vieler Hinsicht charakteristisch. Die Lehrstellen an den Universitäten wurden auf Vorschlag des Professorenkollegiums besetzt. Die Entscheidung lag aber formell beim Kaiser von Österreich, der natürlich sein Recht nur durch das Ministerium für Unterricht ausübte. Im Falle Einsteins spielten jedoch die individuellen Sympathien oder Antipathien des Kaisers eine gewisse Rolle.

Der entscheidende Mann für die Besetzung der Stelle war der Physiker Anton Lampa. [...] Seine philosophische Weltanschauung war zum größten Teil durch den positivistischen Philosophen und Physiker Ernst Mach bestimmt, dessen Schüler er gewesen war. Lampa betrachtete es als sein Lebensziel, die Ansichten Machs zu verbreiten und Anhänger für sie zu werben.

Als nun die Lehrkanzel für theoretische Physik zu besetzen war, dachte sich Lampa, daß jetzt die Gelegenheit da wäre, einen Mann zu berufen, der die Physik im Sinne Machs und der positivistischen Richtung lehrte.“

(Frank, 1979, p. 135); siehe dazu auch (Wolters, 1987, pp. 131-133)

Insofern ist es daher kein Zufall, dass wir in Einsteins weiterer Notiz ebenso „Mach“ und „Ministerium“ finden.

- „Gersthoferstr 144 Findelhaus“, „Mach nach 4 Uhr“ und „41 Pötzleinsdorf“: Aus dem Brief von Einstein an Mach (im Jahr 1909) (CPAE 5; 175; p. 205) ist ersichtlich, dass Ernst Mach in der Gersthoferstraße 144/18/2 in Wien (18. Bezirk) wohnte. Wie Wolters richtig darauf hinweist, nahm Einstein wohl die Straßenbahnlinie 41 nach Pötzleinsdorf, um nach Gersthof zu gelangen (Wolters, 1987, pp. 132-133).

Im selben Notizbuch finden wir einige Seiten weiter (Seite 58) auch die Eintragung:

„E. Mach Die Entwicklung
der Prinzipien der Dynamik
Zweites Kapitel. Newtons
Ansichten über Zeit, Raum
& Bewegung.“ (CPAE 3; APPENDIX A; p. 592)

- „Ministerium“: Wie bereits oben erwähnt, musste Einstein wegen seiner Berufung nach Prag das österreichische Ministerium aufsuchen (Frank, 1979, pp. 135, 136-137,) (Wolters, 1987, p. 131; fn. 4). Philipp Frank erklärt, dass der Kaiser (Franz Josef)

verlangte, dass ein Angestellter einer Universität einer Glaubensgemeinschaft angehören musste, weshalb Einstein formell „mosaisch“ (Frank, 1979, p. 137) eintrug. Frank bemerkt hierzu: „So verdankt die jüdische Gemeinschaft ihr berühmtes Mitglied der religiösen und orthodoxen Einstellung des Kaisers Franz Josef.“ (Frank, 1979, p. 137)³⁸⁶

- „Adler“: Hier ist Viktor Adler gemeint, der Begründer der Sozialdemokratischen Arbeiterpartei Österreichs. Sein Sohn Friedrich Adler, ein großer Anhänger E. Machs, war seit Studienzeiten mit Einstein befreundet. In einem Brief (am 23. September 1909) schreibt Friedrich Adler an seinen Vater, dass Einstein am 24. September nach Wien kommen werde (Wolters, 1987, pp. 132, fn. 5)³⁸⁷.
- „Mach 4 $\frac{1}{2}$ “: Das Treffen von Einstein mit Mach fand demnach am Nachmittag, um etwa 16:30 Uhr, statt. An welchem Tag lässt sich leider nicht genau sagen. Auf Grund der Korrespondenz zwischen Friedrich Adler und Viktor Adler haben wir eine gute Einschätzung davon, wann das Treffen zwischen Einstein und Mach stattgefunden haben dürfte:

„Der Besuch bei Mach [...] hat demnach *an einem der Tage nach dem 24. September 1910* stattgefunden. Falls man weiter annimmt, daß Einstein sich nicht lange in Wien aufgehalten hat, war der Besuch bei Mach kurz, da Einstein wohl zwei Abende anderswo (bei Lampa und Viktor Adler) verbracht hatte, wenn man seinen Aufzeichnungen und seinem Bericht über seinen Besuch bei Viktor Adler glauben darf.“

(Wolters, 1987, pp. 132-133)

- „Ronacher $\frac{3}{4}$ 6 Uhr“: Da in *The Collected Papers of Albert Einstein* keine Person mit dem Namen „Ronacher“ zu finden ist, können wir mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass Einstein wohl um 17:45 Uhr auch das Concert- und Ballhaus Ronacher besuchen wollte. Diese Notiz könnte theoretisch indirekt einen Hinweis geben, an welchem Tag er das Ronacher besucht hat; und dadurch



Abbildung 13: In der Zeitschrift "Der Floh" (25. September 1910); Quelle: <https://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno?aid=flo&datum=19100925&seite=7&zoom=33&query=%22ronacher%22&ef=anno-search> [Zugriff am 26. September 2020].

³⁸⁶ Siehe dazu auch (CPAE 5; 224; p. 254, fn. 3).

³⁸⁷ Siehe dazu auch (CPAE 5; 227; p. 257, fn. 1).

könnte man besser das Datum einkreisen, an welchem Tag das Treffen zwischen Einstein und Mach stattfand usw.

Leider lassen sich (nach den jetzigen vorhandenen Quellen) aus dieser Notiz gar keine sicheren Schlussfolgerungen ziehen. Der Spielplan des Ronacher aus dieser Zeit ist (trotz aller Mühe) leider weder auffindbar noch gänzlich rekonstruierbar.³⁸⁸ Was sich allgemein sagen lässt, ist, dass das Ronacher, damals wie heute, in Wien sehr bekannt war und ist – seine Vorstellungen erschienen damals in Form von Vergnügungsanzeigen regelmäßig in den meisten Zeitungen und Zeitschriften in Wien.

Wir könnten uns beispielsweise fragen, ob Einsteins Besuch im Ronacher vielleicht am Sonntag, dem 25. September, gewesen sein könnte – also einen Tag nach seiner Ankunft in Wien? An Sonn- und Feiertagen war es im Ronacher Tradition³⁸⁹, dass die Nachmittagsvorstellung bereits um 14:45 anfang.³⁹⁰

Dieser Punkt würde daher eher nicht dafürsprechen, dass Einstein am Sonntag-Nachmittag ein Programm besuchen wollte (auch wenn wir es nicht gänzlich ausschließen können). Da sich damals viele Bürger und Künstler im Ronacher trafen, könnte sich Einstein an einem der Tage dort mit jemandem getroffen haben.

In der humoristisch-satirischen Wochenzeitung *Der Floh*, die am 25. September 1910 erschien³⁹¹, finden wir eine Liste der Aufführungen, die zu jener Zeit stattgefunden haben (siehe Abb. 13). (Diese Auflistung ist im Monat September in mehreren Zeitschriften und Zeitungen als Anzeige zu finden³⁹² und war somit das allgemeine

³⁸⁸ An dieser Stelle meinen herzlichen Dank an Renate Rieder, welche die Leitung des Zentralarchivs innehat, für Ihre Bemühungen.

³⁸⁹ Siehe beispielsweise: „Die Zeit. Nr. 2864. 9. Jahr. 15. September 1910“, p. 5 – hier ist die Anzeige für den 18. September (= Sonntag) zu finden; oder: „Neues Wiener Tagesblatt. Nr. 249. 44. Jahrgang. 11. September 1910“, p. 12 ist die Anzeige für den Sonntag am 11. September usw.

³⁹⁰ Siehe: „Wiener Zeitung. Nr. 214. 20. September 1910“ p. 5.

³⁹¹ Siehe: „Der Floh. Nr. 38/39. 42. Jahrgang. 25. September 1910“ p. 7.

Darin sind die folgenden Aufführungen im Ronacher aufgelistet: „Täglich abends 8 Uhr“: „Hupf mein Mädel!“, „Heute abends 11 Uhr“: „Sensationsprogramm“ und „Künstler-Cercle“.

Quelle: <http://anno.onb.ac.at>

³⁹² Die Anzeige mit demselben Inhalt ist ebenso in der humoristisch-satirischen Wochenzeitschrift *Die Bombe* (erschieden am 25. September 1910) – siehe „Die Bombe. 40. Jahrgang. No. 39“, p. 6; in der Satirezeitschrift *Kikeriki* (erschieden am 25. September 1910) – siehe „Kikeriki. 50. Jahrgang. No. 77.“ p. 8; in der Zeitung „Wiener Neueste Nachrichten“ (erschieden am 26. September 1910) siehe „Wiener Neueste Nachrichten. 17. Jahrgang. No. 39.“ p. 4; und in der Zeitung *Der Morgen. Wiener Morgenblatt* (erschieden am 26. September 1910) – „Der Morgen. Wiener Morgenblatt. 1. Jahrgang. No. 36“, p. 13 zu finden. „Hupf mein Mädel!“ wird auch in *Neues Wiener Journal* (erschieden am 26. September 1910) erwähnt – siehe „Neues Wiener Journal. 18. Jahrgang. Nr. 6079“, p. 36 usw.

Abend-Programm im Ronacher.) Ob Einstein sich womöglich um 20:00 Uhr die Operette „Hupf mein Mäderl“, welches das Hauptprogramm der Saisons im Ronacher war³⁹³, ansah, lässt sich schwer sagen.

5.4.2.2.1. Zusammenfassung der bisherigen Resultate

5.4.2.2.1.1. Grund und Datum für Einsteins Reise nach Wien

Zusammengefasst können wir sagen, dass Einsteins Wien-Reise am 24. September 1910 begann und vor allem damit zusammenhing, dass er an die Universität Prag berufen wurde, weshalb er einige Erledigungen beim Ministerium (in Wien) hatte und sogleich wichtige österreichische Persönlichkeiten traf. Dass diese Reise tatsächlich mit seiner Berufung zusammenhängt, zeigt auch der letzte Brief, den Einstein nach *The Collected Papers of Albert Einstein* im September bekommt: Max Hussarek von Heinlein, der damalige Unterrichtsminister, fragt Einstein am 17. September 1910, ob er die Berufung nach Prag annehmen würde und fasst kurz zusammen, wie hoch sein Gehalt dafür sein werde (CAEP 5; 225; p. 255-256). Überraschenderweise ist der nächste Brief, den wir in *The Collected Papers of Albert Einstein* finden, einer von Einstein an Wilhelm Wien am 7. Oktober 1910, worauf wir noch zurückkommen werden. Jedenfalls gibt es in *The Collected Papers of Albert Einstein* keine Korrespondenz von Einstein während seines Wien-Aufenthaltes, wodurch man mehr Informationen hätte bekommen können. Aus diesem Grund können wir nur spekulieren, wie sein Aufenthalt genau geplant war.

5.4.2.2.1.2. An welchem Tag könnte Einstein Mach besucht haben?

Einsteins Wien-Reise, die am 24. September (Samstag) begann, kann womöglich so ausgesehen haben: Wahrscheinlich hat er, wenn wir der Liste in seinem Notizbuch folgen, zuerst an einem Abend (25. Sept., Sonntag?) um 19:00 Uhr Anton Lampa besucht, an einem der nächsten Tage (26. Sept., Montag?) seine Erledigungen beim Ministerium gemacht und wohl jeweils einen Abend bei Viktor Adler (27. Sept. Dienstag?) und bei Ernst Mach (28. Sept. Mittwoch?) verbracht. An einem weiteren Abend war er schließlich im Ronacher (29./30. Sept. Donnerstag/Freitag?), wo die Hauptattraktion um 20:00 Uhr begann und bis in die Morgenstunden andauerte – Freitag oder Samstag fuhr er wieder zurück nach Zürich? Doch das sind nur Spekulationen, da uns bis dato genauere Quellen fehlen.

³⁹³ Siehe: „Neue Freie Presse. 4. August 1910. Nr. 16505“, p. 11.

Aufgrund der Hinweise von Philipp Frank, der Notizen von Einstein, des Briefs von F. Adler an seinen Vater und durch die Analyse von Wolters können wir somit das Treffen zwischen Einstein und Mach relativ genau angeben: an einem der Nachmittage (16:30 Uhr) nach dem 24. September 1910. Im Falle, dass er am selben Abend nicht das Ronacher besuchte, hatte er somit von Nachmittag bis Abend Zeit sich mit Mach über mit Physik zu unterhalten. Das Treffen fand daher höchstwahrscheinlich Ende September statt.

5.4.2.3. I. Bernhard Cohen über den Besuch Einsteins bei Mach
Cohens Interview mit Einstein fand zwei Wochen vor Einsteins Tod statt (Cohen, 1955, p. 69). Bei diesem letzten Interview wird womöglich indirekt klarer weshalb Einstein Mach unter anderem treffen wollte – einerseits hatte sein Besuch sicher damit zu tun, dass er nach Prag berufen werden würde und er dazu verständlicherweise akademische Unterstützer benötigte, die sich unter den Bewerbern für ihn aussprachen; andererseits wollte Einstein Mach in seiner Debatte mit Planck unterstützen:

„Einstein also expressed great affection for Max Planck. Planck was a religious man, he said, and always sought to reintroduce the absolutes – even on the basis of relativity theory. I asked Einstein whether Planck had ever fully accepted the ‘theory of photons,’ or whether he had continued to restrict his interest to the absorption or emission of light without regard to its transmission. Einstein stared at me for a moment or two in silence. Then he smiled and said: ‘No, not a theory. Not a theory of photons,’ and again his deep laughter enveloped us both – and the question was never answered. I remembered that Einstein’s 1905 paper, for which (nominally) he had been awarded the Nobel prize, did not contain the word ‘theory’ in the title, but referred instead to considerations from a ‘heuristic viewpoint.’

There are fashions in science, Einstein said. When he had studied physics as a young man, one of the major questions being discussed was: Do molecules exist? He remembered how important scientists, men like Wilhelm Ostwald and Ernst Mach, had been explicit in stating that they did not really believe in atoms and molecules. One of the greatest differences between physics then and now, Einstein observed, was that today nobody bothers to ask this particular question any more. Although Einstein did not agree with the radical position adopted by Mach, he told me he admired Mach’s writings, which had had a great influence on him. He had visited Mach, he said, in 1913, and had raised a question in order to test him. He asked Mach what his position would be if it proved possible to predict a property of a gas by assuming the existence of atoms-some property that could not be predicted without the assumption of atoms and yet one that could be observed. Einstein said he had always believed that the invention of scientific concepts and the building of theories upon them was one of the great creative properties of the human mind. His own view was thus opposed to Mach’s, because Mach assumed that the laws of science were only an economical way of describing a large collection of facts. Could Mach accept the hypothesis of atoms under the circumstances Einstein had stated, even if it meant very complicated computations? Einstein told me how delighted he was when Mach replied affirmatively. If an atomic hypothesis would make it possible to connect by logic some observable properties

which would remain unconnected without this hypothesis, then, Mach said, he would have to accept it. Under these circumstances it would be 'economical' to assume that atoms may exist because then one could derive relations between observations. Einstein had been satisfied; indeed more than a little pleased. With a serious expression on his face, he told me the story all over again to be sure that I understood it fully. Wholly apart from the philosophical victory over what Einstein had conceived Mach's philosophy to have been, he had been gratified because Mach admitted that there might, after all, be some use to the atomistic philosophy to which Einstein had been so strongly committed."

(Cohen, 1955, pp. 72-73)

In diesem Interview sind einige Punkte wichtig, die wir gegliedert besprechen werden.

5.4.2.3.1. Die Mach-Planck-Debatte – und Einsteins Verteidigung Machs

Aus dem Interview Cohens mit Einstein ist herauszulesen dass Planck ein Weltbild des „Absoluten“ in der Physik verteidigte – sogar in der Relativitätstheorie.³⁹⁴ Ihren Höhepunkt erreichte die Diskussion über die unterschiedlichen physikalischen Weltbilder bei der Mach-Planck-Debatte.³⁹⁵ Bei dieser Diskussion bekam Mach Unterstützung von Einstein; wie die Korrespondenzen von Einstein und Mach deutlich zeigen (Wolters, 1987, pp. 149, 151-153), verstand Einstein die, sich noch im Entstehen befindliche, Allgemeine Relativitätstheorie als eine Weiterführung von Machs Gedanken. Bekanntlich war Planck von Einsteins Anfangsideen zur ART nicht erfreut und riet ihm sogar davon ab (Pais, 1982, p. 239). Aus dem Interview (zwischen Cohen und Einstein) erfahren wir zudem, dass Planck sich ebenso mit der Photonentheorie von Einstein nicht wirklich anfreunden konnte.³⁹⁶ Sehen wir uns diese Diskussion nun etwas genauer an.

5.4.2.3.2. Einsteins wissenschaftliche Diskussion mit Planck über die Lichtquantenhypothese

Den Höhepunkt der Kontroverse zwischen Einstein und Planck stellt bereits sein Vortrag „Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung“ (Einstein, 1909c) dar, den er am 21. September 1909 in Salzburg (Österreich) bei der 81. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte hielt. Dabei ist einerseits die Konferenz an sich, aber auch der Inhalt des Vortrages höchst interessant. Diese Konferenz ist geschichtlich von Bedeutung, weil sie die erste internationale war, an der Einstein teilnahm und ebenso die Möglichkeit bekam mit führenden Physikern persönlichen Kontakt

³⁹⁴ Siehe dazu beispielsweise „Vom Relativen zum Absoluten“ (Planck, 2001, pp. 110, 115-116) und „Wissenschaftliche Selbstbiographie“ (Planck, 2001, pp. 69-70) von Max Planck.

³⁹⁵ Für eine Einführung in die Mach-Planck-Debatte siehe (Wolters, 1987, pp. 20-49, 112-118, 168-169) (Jost, 1995) (Wegener, 2010) (Siemens, 2010) (Stöltzner, 2010, pp. 116-179).

³⁹⁶ Siehe dazu auch „Early Work on Quantum Hypothesis“ (CAEP 5; _ ; p. 145) (Gearhart, 2010, p. 116).

aufzunehmen (CAEP 2; _ ; p. 147) – über den Vortrag heißt es in *The Collected Papers of Albert Einstein*:

„It is ostensibly merely a review of his work on light over the preceding years. Yet it is much more: it is the first synthetic account of the profound transformation in the concept of light brought about by the theory of relativity and the quantum hypothesis, and of the profound implications of this transformation for the development of physics.“ (CAEP 2; _ ; p. 147)

Und zwar ist Einstein der Quantennatur des Lichtes auf der Spur und beginnt seinen Vortrag mit den Worten:

„Als man erkannt hatte, daß das Licht die Erscheinungen der Interferenz und Beugung zeige, da erschien es kaum mehr bezweifelbar, daß das Licht als eine Wellenbewegung aufzufassen sei. Da das Licht sich auch durch das Vakuum fortzupflanzen vermag, so mußte man sich vorstellen, daß auch in diesem eine Art besonderer Materie vorhanden sei, welche die Fortpflanzung der Lichtwellen vermittelt. Für die Auffassung der Gesetze der Ausbreitung des Lichtes in ponderablen Körpern war es nötig, anzunehmen, daß jene Materie, welche man Lichtäther nannte, auch in diesen vorhanden sei, und daß es auch im Innern der ponderablen Körper im wesentlichen der Lichtäther sei, welcher die Ausbreitung des Lichtes vermittelt. Die Existenz jenes Lichtäthers schien unbezweifelbar. [...]

Heute aber müssen wir wohl die Ätherhypothese als einen überwundenen Standpunkt ansehen. Es ist sogar unleugbar, daß es eine ausgedehnte Gruppe von die Strahlung betreffenden Tatsachen gibt, welche zeigen, daß dem Lichte gewisse fundamentale Eigenschaften zukommen, die sich weit eher vom Standpunkte der NEWTONschen Emissionstheorie des Lichtes als vom Standpunkte der Undulationstheorie begreifen lassen. Deshalb ist es meine Meinung, daß die nächste Phase der Entwicklung der theoretischen Physik uns eine Theorie des Lichtes bringen wird, welche sich als eine Art Verschmelzung von Undulations- und Emissionstheorie des Lichtes auffassen läßt. Diese Meinung zu begründen, und zu zeigen, daß eine tiefgehende Änderung unserer Anschauungen vom Wesen und von der Konstitution des Lichtes unerlässlich ist, das ist der Zweck der folgenden Ausführungen.“ (Einstein, 1909c, pp. 482-483)

Einstein macht hier somit auf die Welle- und Teilcheneigenschaft des Lichtes aufmerksam, die man aber genauer untersuchen müsste, um diese phänomenologischen Erscheinungen physikalisch besser einordnen zu können. Dabei unterstützen die Interferenz- bzw. die Beugungseigenschaft die Wellennatur und die Emissionstheorie die Teilchennatur des Lichtes. Einstein weist dabei auf folgende Punkte hin:

1. Die Resultate des Experimentes von Fizeau und anschließend von Michelson verlangten nach einer in sich konsistenten Theorie, welche schließlich mit der SRT gegeben war (Einstein, 1909c, pp. 484-488); dazu musste aber auf das Äther verzichtet werden:

„Daraus folgt, daß man zu einer befriedigenden Theorie nur dann gelangen kann, wenn man auf die Ätherhypothese verzichtet. Die das Licht konstituierenden elektromagnetischen Felder erscheinen dann nicht mehr als Zustände eines hypothetischen Mediums, sondern als selbständige Gebilde, welche von den Lichtquellen ausgesandt werden, gerade wie nach der NEWTONschen Emissionstheorie des Lichtes. Ebenso wie gemäß letzterer Theorie erscheint ein nicht von Strahlung durchsetzter, von ponderabler Materie freier Raum wirklich als leer.“
(Einstein, 1909c, p. 487)

2. Aufgrund der Äquivalenz von Energie und Masse, nimmt die Energie bzw. die träge Masse eines Körpers ab, wenn Strahlung emittiert wird; oder die träge Masse eines Körpers nimmt zu, wenn Strahlung absorbiert wird. Das Lichtteilchen ist nach Einstein aufgrund der Relativitätstheorie vom Konzept des Äthers befreit und kann als eigenständiger Träger von Energie betrachtet werden:

„Die Relativitätstheorie hat also unsere Anschauungen über die Natur des Lichtes insofern geändert, als sie das Licht nicht als Folge von Zuständen eines hypothetischen Mediums auffaßt, sondern als etwas wie die Materie selbständig Bestehendes. Es hat ferner nach dieser Theorie mit einer Korpuskulartheorie des Lichtes das Merkmal gemeinsam, träge Masse vom emittierenden zum absorbierenden Körper zu übertragen. An unserer Auffassung von der Struktur der Strahlung, insbesondere von der Verteilung der Energie in dem durchstrahlten Raume änderte die Relativitätstheorie nichts. Es ist jedoch meine Meinung, daß wir in bezug auf diese Seite der Frage am Anfange einer noch nicht übersehbaren, jedoch zweifellos höchst bedeutsamen Entwicklung stehen. Was ich im folgenden vorbringen werde, ist größtenteils bloße persönliche Meinung bzw. Ergebnis von Überlegungen, welche eine genügende Nachprüfung durch andere noch nicht erfahren haben. Wenn ich dieselben trotzdem hier vorbringe, so ist dies nicht auf übermäßiges Vertrauen in die eigenen Ansichten zurückzuführen, sondern auf die Hoffnung, den einen oder anderen von Ihnen dazu veranlassen zu können, sich mit den in Betracht kommenden Fragen abzugeben.

Auch ohne tiefer in irgend welche theoretische Betrachtung einzugehen, bemerkt man, daß unsere Lichttheorie gewisse fundamentale Eigenschaften der Lichtphänomene nicht zu erklären vermag. Warum hängt es nur von der Farbe, nicht aber von der Intensität des Lichtes ab, ob eine bestimmte photochemische Reaktion eintritt oder nicht? Warum sind die kurzwelligen Strahlen im allgemeinen chemisch wirksamer als die langwelligen? Warum ist die Geschwindigkeit der lichtelektrisch erzeugten Kathodenstrahlen von der Intensität des Lichtes unabhängig? Weshalb bedarf es hoher Temperaturen, also hoher Molekularenergien, damit die durch die Körper emittierte Strahlung kurzwellige Bestandteile enthalte?

Auf alle diese Fragen gibt die Undulationstheorie in ihrer heutigen Fassung keine Antwort. Insbesondere ist es durchaus nicht begreiflich, warum die lichtelektrisch oder durch Röntgenstrahlen erzeugten Kathodenstrahlen eine so bedeutende, von der Strahlintensität unabhängige Geschwindigkeit erlangen.“

(Einstein, 1909c, pp. 490-491)

3. Mit den Maxwellschen Gleichungen sind einige experimentelle Resultate (wie die Photolimunszenz,) nicht zu erklären (Einstein, 1909c, pp. 490-492).³⁹⁷ Einstein überlegte, welche Modifikationen und Interpretation helfen könnten, um der Natur des Lichtes nahezukommen (Einstein, 1909c, pp. 499-500).

Zusammenfassend können wir sagen, dass einerseits (1. Punkt) aufgrund der SRT das Medium „Äther“ unnötig wurde, weshalb das Licht mit der klassischen Wellentheorie nicht mehr verstehbar ist; andererseits hat der Photoeffekt gezeigt (2. Punkt), dass gewisse Experimente nur mit der Teilchennatur des Lichtes heuristisch verständlich werden. Diese zwei Punkte zeigen nach Einstein, dass die Wellentheorie des Lichtes im Laufe der neueren Entwicklungen daher sehr in Bedrängnis geraten ist. Anschließend bespricht er einen Gedanken, der wiederum gegen eine Wellentheorie des Lichtes sprechen würde:

„Die Grundeigenschaft der Undulationstheorie, welche diese Schwierigkeiten mit sich bringt, scheint mir im folgenden zu liegen. Während in der kinetischen Molekulartheorie zu jedem Vorgang, bei welchem nur wenige Elementarteilchen beteiligt sind, z. B. zu jedem molekularen Zusammenstoß, der inverse Vorgang existiert, ist dies nach der Undulationstheorie bei den elementaren Strahlungsvorgängen nicht der Fall. Ein oszillierendes Ion erzeugt nach der uns geläufigen Theorie eine nach außen sich fortpflanzende Kugelwelle. Der umgekehrte Prozeß existiert als Elementarprozeß nicht. Die nach innen fortschreitende Kugelwelle ist nämlich zwar mathematisch möglich; aber es bedarf zu deren angenäherter Realisierung einer ungeheuren Menge von emittierenden Elementargebilden. Dem Elementarprozeß der Lichtemission als solchem kommt also der Charakter der Umkehrbarkeit nicht zu. Hierin trifft, glaube ich, unsere Undulationstheorie nicht das Richtige. Es scheint, daß in bezug auf diesen Punkt die Emissionstheorie des Lichtes von Newton mehr Wahres enthält als die Undulationstheorie, da nach ersterer die Energie, welche einem Lichtteilchen bei der Aussendung verliehen wird, nicht über den unendlichen Raum zerstreut wird, sondern für einen Elementarprozeß der Absorption disponibel bleibt. Man denke an die Gesetze der Erzeugung der sekundären Kathodenstrahlung durch Röntgenstrahlen.

Fallen primäre Kathodenstrahlen auf eine Metallplatte P_1 , so erzeugen sie Röntgenstrahlen. Fallen diese auf eine zweite Metallplatte P_2 , so werden wieder Kathodenstrahlen erzeugt, deren Geschwindigkeit von derselben Größenordnung ist wie die Geschwindigkeit der primären Kathodenstrahlen. Die Geschwindigkeit der sekundären Kathodenstrahlen hängt, soviel wir heute wissen, weder vom Abstand der Platten P_1 , und P_2 noch von der Intensität der primären Kathodenstrahlen, sondern ausschließlich von der Geschwindigkeit der primären Kathodenstrahlen ab. Nehmen wir einmal an, dies sei streng richtig. Was wird geschehen, wenn wir die Intensität der primären Kathodenstrahlen oder die Größe der Platte P_1 , auf die sie fallen, derart abnehmen lassen, daß man das Auftreffen eines Elektrons der primären Kathodenstrahlen als einen isolierten Prozeß auffassen kann? Wenn das Vorhergehende wirklich richtig ist, so werden wir wegen der Unabhängigkeit der Geschwindigkeit der Sekundärstrahlen von der Intensität der primären Kathodenstrahlen

³⁹⁷ Siehe dazu auch allgemein den Brief von Einstein an Lorentz (am 30. März 1909) (CAEP 5; 146; p. 166), (CAEP 2; _; p. 146-148).

anzunehmen haben, daß an P_2 (infolge des Auftreffens jenes Elektrons auf P_1) entweder gar nichts erzeugt wird, oder aber an P_2 eine sekundäre Emission eines Elektrons erfolgt mit einer Geschwindigkeit, die von derselben Größenordnung ist, wie diejenige des auf P_1 auffallenden Elektrons gewesen ist. Mit anderen Worten, der elementare Strahlungsprozeß scheint derart zu verlaufen, daß er nicht, wie die Undulationstheorie verlangt, die Energie des primären Elektrons durch eine nach allen Seiten sich fortpflanzende Kugelwelle verteilt und zerstreut, sondern es scheint wenigstens ein großer Teil dieser Energie an irgend einer Stelle von P_2 oder anderswo disponibel zu sein. *Der Elementarvorgang der Strahlungsemission scheint gerichtet zu sein.* Es macht ferner den Eindruck, daß der Prozeß der Erzeugung des Röntgenstrahles in P_1 und die Erzeugung des sekundären Kathodenstrahles in P_2 im wesentlichen inverse Prozesse seien.

Die Konstitution der Strahlung scheint also eine andere zu sein, als unsere Undulationstheorie folgern läßt.“ (Einstein, 1909c, pp. 491-492)

Den ersten Absatz können wir nach unserem modernen Verständnis der Quantentheorie vielleicht folgendermaßen verständlich machen: Der Kollaps der Wellenfunktion bzw. die Zustandsreduktion einer (Wahrscheinlichkeits-)Kugelwelle des Lichtes ist nicht zeitumkehrinvariant. Die Maxwell-Gleichungen würden das Licht wie eine Kugelwelle beschreiben, doch bei der Messung verhalten sie sich wie ein Teilchen (bzw. Photonen) – würde man nun wieder die Zeit umkehren, dann müsste aus dem diskreten Teilchen wieder eine kontinuierliche Welle werden, was physikalisch schwer verständlich ist.³⁹⁸ Im zweiten Abschnitt geht er nun näher auf ein Gedankenexperiment ein: Von einer Kathode werden Elektronen auf eine Metallplatte P_1 geschossen und erzeugen daher Röntgenstrahlen bzw. Photonen mit einer großen Energie. Diese Photonen wiederum treffen auf eine Metallplatte P_2 und bewirken, dem Photoeffekt zufolge, dass Elektronen aus der Metallplatte P_2 herausgerissen werden. Einsteins Gedankenexperiment versucht zu zeigen, dass, wenn wir jeweils nur einzelne Elektronen auf die Metallplatte P_1 schießen würden, dann würden

³⁹⁸ Genauer lässt sich das Problem folgendermaßen physikalisch beschreiben, wobei wir die Bra-Ket bzw. Dirac Notation verwenden. Die Wellenfunktion $|\psi\rangle$ stellt den Gesamtzustand dar. Diese ist eine Überlagerung aller möglichen Eigenzustände $|\varphi_i\rangle$ und ihren Wahrscheinlichkeitsamplituden c_i :

$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^n c_i |\varphi_i\rangle$$

Wird nun eine Messung durchgeführt, erhält man aber nur einen Messwert. Die möglichen Eigenzustände $|\varphi_i\rangle$ (und ihre Superposition) haben sich somit auf nur einen einzigen Eigenzustand reduziert – man spricht daher von einer Zustandsreduktion bzw. dem „Kollaps der Wellenfunktion“. Noch heute versuchen verschiedene Interpretationen der Quantenmechanik den Messprozess und die Zustandsreduktion unterschiedlich zu erklären. Dieser Prozess des „Kollaps der Wellenfunktion“ ist, wie Einstein damals betonte, irreversibel.

Ironischerweise konnte sich Einstein später selbst mit einigen Aspekten der Zustandsreduktion wenig anfreunden; beispielsweise können zwei Systeme – wie zwei Photone – miteinander verschränkt sein. Bei einer Messung der Polarisation eines Photons wird dadurch die Polarisation des anderen Photons festgelegt. Der Kollaps der Wellenfunktion verläuft dabei instantan in getrennten Orten, weshalb man auch von einer Quanten-Nichtlokalität spricht.

höchstwahrscheinlich entweder gar kein oder lediglich ein Photon sich herauslösen, welches wiederum auf P_2 entweder gar kein oder ein Elektron herauslöst usw. Es ließe sich daher der ganze Prozess – *Kathodenstrahl* $\rightarrow P_1$ (*Röntgenstrahlen*) $\rightarrow P_2$ (*Elektronenstrahl*) – heuristisch mit dem Teilchenkonzept besser erfassen und eher invers darstellen als mit dem Wellenmodell.

In den nächsten Seiten geht Einstein nun auf das Plancksche Strahlungsgesetz ein (Einstein, 1909c, pp. 493-494) und erklärt:

„Die PLANCKSche Theorie annehmen heißt nach meiner Meinung geradezu die Grundlagen unserer Strahlungstheorie verwerfen.

Daß unsere jetzigen Grundlagen der Strahlungstheorie verlassen werden müssen, habe ich schon vorher zu zeigen versucht. Jedenfalls kann man nicht daran denken, die PLANCKSche Theorie zu refüsieren, weil sie zu jenen Grundlagen nicht paßt. Diese Theorie hat zu einer Bestimmung der Elementarquanta geführt, welche durch die neuesten Messungen dieser Größen auf Grund der Zählung der α -Teilchen glänzend bestätigt worden ist.“ (Einstein, 1909c, p. 495)

Einstein hat offensichtlich keine Zweifel, dass das Plancksche Strahlungsgesetz in Annäherung gilt, da es experimentell verifiziert wurde. Jedoch möchte er darauf hinweisen, dass das Strahlungsgesetz auf eine noch nicht entwickelte Physik referiert, von welcher es wiederum abgeleitet werden könnte (Einstein, 1909c, p. 495), wobei er abermals ein Gedankenexperiment zur Veranschaulichung anbietet (Einstein, 1909c, pp. 496-498). Er geht davon aus, dass es, ähnlich wie Elektronen, auch Photonen als Teilchen gibt, doch diese aufgrund ihrer großen Anzahl bei den Experimenten nicht sichtbar werden und uns daher kontinuierlich erscheinen (Einstein, 1909c, pp. 499-500). Im Anschluss an Einsteins Vortrag beginnt nun die Diskussion, bei welcher Planck sagt:

„Nach den letzten Ausführungen von Herrn Einstein wäre es notwendig, die freie Strahlung im Vakuum, also die Lichtwellen selber, als atomistisch konstituiert anzunehmen, mithin die Maxwellschen Gleichungen aufzugeben. Das scheint mir ein Schritt, der in meiner Auffassung noch nicht als notwendig geboten ist.“ (Planck & et. al., 1909, p. 825)

Heute ist die heuristische Vorstellung von Einstein, dass das Licht aus Photonen besteht, mehrheitlicher Konsens in der Wissenschaft. Diese historische Ablehnung ist jedoch leicht verständlich, da es damals die Quantentheorie noch nicht gegeben hat – man wusste daher noch relativ wenig über die Emission und Absorption des Lichtes und darüber, wie man die Interferenzerscheinungen deuten müsste.

Nachdem Einstein nun diesen Welle-Teilchen-Dualismus des Lichtes in die Debatte einbrachte, beschäftigte sich de Broglie 1921-1923 mit den Lichtquanten von Einstein (Sievers, 1998, pp. 20-24) und postulierte den Welle-Teilchen-Dualismus für alle materiellen Teilchen in seiner Doktorarbeit aus dem Jahre 1924, wofür er 1929 den Nobelpreis bekam. Es ist bekannt, dass die Prüfungskommission damals eher kritisch gegenüber de Broglies Doktorarbeit stand (Sievers, 1998, pp. 23-24) und es unter anderem Einsteins indirekter Einfluss war, dass dieser wichtige Beitrag wertgeschätzt wurde (Sievers, 1998, pp. 29-30). Im selben Jahr (1924) erschien zudem eine andere zentrale Arbeit „Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese“ (Bose, 1924), welche auf Einsteins Frage aus dem Jahre 1909 nun eine Teilantwort geben konnte – nämlich eine Ableitung des Planckschen Strahlungsgesetzes von den Quanteneigenschaften der Materie. Bose betrachtete die Photonen als Gas ununterscheidbarer Teilchen und gelangte so zu einer Ableitung des Planckschen Strahlungsgesetzes. Der Übersetzer der Arbeit fügt zum Schluss eine kleine Anmerkung hinzu:

„Anmerkung des Übersetzers. Boses Ableitung der Planckschen Formel bedeutet nach meiner Meinung einen wichtigen Fortschritt. Die hier benutzte Methode liefert auch die Quantentheorie des idealen Gases, wie ich an anderer Stelle ausführen will.“
(Bose, 1924, p. 181)

Der Übersetzer war Einstein, der, wie es bereits bei de Broglie tat, hier Bose den Rücken stärkte. In seinen Arbeiten (Einstein, 1924o) (Einstein, 1925f) (Einstein, 1925i) konnte er die Methode von Bose (mithilfe des Konzepts von de Broglie (Einstein, 1925f, p. 9)) auf massive ununterscheidbare Teilchen anwenden und sagte theoretisch voraus (Einstein, 1925f, p. 4), was heute als Bose-Einstein-Kondensat bekannt ist. Erst siebenzig Jahre später (1995) konnte die Bose-Einstein-Kondensation realisiert werden, wofür Eric Allin Cornell, Wolfgang Ketterle und Carl Edwin Wieman mit einem Nobelpreis (2001) ausgezeichnet wurden.³⁹⁹

³⁹⁹ Aus Platzgründen werden wir nicht näher auf die Geschichte der Bose-Einstein-Kondensation eingehen. Die interessierten Leser verweisen wir hier auf die Arbeiten von Lew Landau (Nobelpreis 1962), Piotr Kapiza (Nobelpreis 1978).

Aus dieser kurzen Zusammenfassung wird ersichtlich, welchen Einfluss Einsteins Vortrag (Einstein, 1909c) auf die Physikgeschichte hatte. Die Frage, die sich natürlich stellt, ist: Was hat all das mit Ernst Mach zu tun?

5.4.3. Einsteins und Machs Unterhaltung über die Atomtheorie – und die Lichtquantenhypothese?

Im Jahre 1905 veröffentlichte Einstein mehrere wichtige Arbeiten zur Physik, weshalb man von seinem „annus mirabilis“ („Wunderjahr“) spricht – siehe dazu (Stachel, 1998). Damals bezeichnete er selbst in einem Brief (am 18. oder 25. Mai 1905) an seinen Freund Conrad Habicht jedoch nur seine erste Arbeit zur Lichtquantenhypothese (Einstein, 1905i) als „sehr revolutionär“ (CAEP 5; 27; p. 31). Bereits in seinen einführenden Worten ist ersichtlich, worum es ihm in diesem Artikel geht: Während wir einen Körper als aus endlichen Atomen bestehend betrachten, glauben wir, dass das Licht aufgrund der Maxwell'schen Theorie ein rein kontinuierliches ist; Experimente zu Photolumineszenz lassen sich jedoch besser mit der Vorstellung von Lichtquanten erklären (Einstein, 1905i, pp. 132-133). Diese Sichtweise bestärkte er in seinem Salzburger Vortrag (Einstein, 1909c). Somit gelang es Einstein zu zeigen, dass das Teilchenmodell nicht nur für die Beschreibung der Materie, sondern auch für das Licht heuristische Vorteile bieten konnte.

Durch die Schriften von (Weinberg, 1937), (Frank, 1949), (Frank, 1979) und (Cohen, 1955) wissen wir, dass Einstein sich bei seinem Treffen mit Mach über die Atomtheorie unterhalten hat. Die Frage ist, ob sie womöglich auch über die Lichtquantenhypothese Einsteins thematisiert haben. Dazu müssen wir uns natürlich zuvor fragen, ob sie einen Anlass dazu gehabt hätten. In *The Collected Papers of Albert Einstein* steht:

„Einstein started to study black-body radiation well before 1905. Mach's *Wärmelehre*, which Einstein read in 1897 or shortly thereafter, contains two chapters on thermal radiation, culminating in a discussion of Kirchhoff's work. Kirchhoff showed that the energy emission spectrum of a perfectly black body (defined as one absorbing all incident radiation) at a given temperature is a universal function of the temperature and wave length. He inferred that equilibrium thermal radiation in a cavity with walls maintained at a certain temperature behaves like radiation emitted by a black body at the same temperature.“ (CAEP 2; _ ; p. 135)

Es lässt sich anhand Einsteins eigenen Worten belegen, dass er sich, auf Rat von Michele Besso, die Werke (wohl unter anderem) *Mechanik* (Mach, 1897) und *Wärmelehre* (Mach, 1896) von Mach ausgeliehen hat und sie für sein Studium verwendete. In *The Collected*

Papers of Albert Einstein finden wir auch eine Fußnote (CAEP 2; _ ; p. 135, fn. 7), die auf das Kapitel „Historische Uebersicht der Entwicklung der Calorimetrie“ (Mach, 1896, pp. 124-152) hinweist. In diesem Kapitel geht Mach unter anderem auf das Konzept der Wärmestrahlung von Pierre Prévost (1751-1839) ein, der eine Emissionstheorie von diskreten Teilchen vertreten hat und argumentierte, dass alle Körper Wärme ausstrahlen (Mach, 1896, pp. 134-137):

„Die Wärme denkt er sich aus discreten Theilchen bestehend, welche verglichen mit ihrem gegenseitigen Abstand sehr klein sind, die sich in den verschiedensten Richtungen mit sehr grosser Geschwindigkeit bewegen, und sehr selten treffen. Jeder Punkt des Raumes, oder die Oberfläche eines warmen Körpers, kann als ein Centrum angesehen werden, von welchem Wärmetheilchen nach allen Richtungen ausgehn, und auf welches solche aus allen Richtungen zukommen. In jedem Punkt durchkreuzen sich also Fäden (filets) oder Strahlen von Wärmestofftheilchen. Zwei Räume sind im Wärmegleichgewicht, wenn sie sich gegenseitig in gleichen Zeiten gleich viel Wärmetheilchen zusenden. Aendert sich der Wärmezustand eines Körpers nicht, so liegt dies nach Prevost's Vorstellung daran, dass derselbe ebenso viele Wärmetheilchen gewinnt, als er in derselben Zeit abgiebt.“

(Mach, 1896, p. 135)

Interessant ist, dass Mach an der Vorstellung Prevosts', dass die Wärmestrahlung aus Teilchen bestehen, keinerlei Kritik übt. Im Gegenteil: Mach scheint dessen Position, solange sie mit den experimentellen Ergebnissen im Einklang sind, sogar zu unterstützen:

„Da Glas die dunkle Wärme abhält das Licht aber hin- durchlässt, vermuthet Prevost, dass es *zwei oder mehrere* Arten von Wärmetheilchen gebe, ahnt also die später von Melloni u. A. constatirten Thatsachen.“ (Mach, 1896, p. 136)

Mit „dunkle Wärme“ ist hier ein Teil der UV-Strahlung gemeint, welcher nicht durch Glas hindurchgeht. Ob man sich das Licht nun als ein Teilchen (Mach, 1896, p. 136) mit unterschiedlichen Wirkungs- bzw. Energiebereichen vorstellen sollte, oder, nachdem Wellenmodell, mit Frequenzen bzw. Wellenlängen (Mach, 1896, p. 140), darüber äußert Mach keine Präferenzen. Die experimentellen Tatsachen zu Wärmestrahlen lassen sich wohl mit beiden Modellen erklären. Doch was sind das für „Tatsachen“, an denen sich Mach orientiert? Beispielsweise schreibt er:

„Das Strahlungsgleichgewicht benachbarter Körper von gleicher Temperatur ist eine der *bestconstatirten* Thatsachen. [...] Die Proportionalität von ‚Emission‘ und ‚Absorption‘ ist also eine nothwendige Bedingung des Strahlungsgleichgewichtes bei Temperaturgleichheit.“

(Mach, 1896, pp. 137-138)

In diesem Zusammenhang bespricht er anschließend das kirchhoffsche Strahlungsgesetz, das die Absorption und die Emission von Körpern im Gleichgewicht beschreibt (Mach, 1896, pp. 140-144). Als Beispiel zur Erläuterung dienen beispielsweise zwei Körper M und N von gleicher Temperatur, die sich gegenüberstehen und Wärmestrahlung austauschen – siehe Abbildung 14 (Mach, 1896, p. 141 (Fig. 53)). Hinten an den Körpern sind Spiegel angebracht, damit die Wärmestrahlung dort nicht entweichen kann. e kennzeichnet das

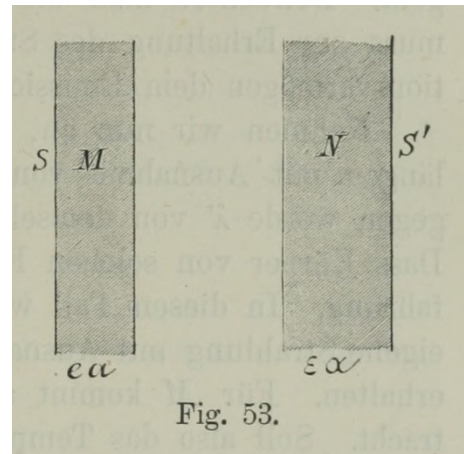


Fig. 53.

Abbildung 14: Quelle:

<https://archive.org/details/dieprincipiender00mach/page/140/mode/2up> [Zugriff am 30. Jänner 2021]

Emissionsvermögen und α das Absorptionsvermögen

beim Austausch. Bei einem thermischen Gleichgewicht beider Körper entspricht das Emissionsvermögen dem Absorptionsvermögen usw. Diese Überlegungen von Kirchhoff waren wichtig, um das Zusammenspiel zwischen Temperatur und Strahlung zu verstehen. Er hat das Verständnis eines Schwarzen Körpers geprägt – siehe (Mach, 1896, p. 143) – dessen Intensität und Frequenzverteilung konnte später Max Planck durch sein Strahlungsgesetz im Jahre 1901 beschreiben, was schließlich als der Beginn der Quantentheorie angesehen wird. Diese Arbeiten von Planck hatte Einstein damals als Student ebenfalls studiert.

Doch wie sind die Nebeninformationen nun mit Mach in Zusammenhang zu bringen?

Offensichtlich hat Einstein sich mit Machs Werken auseinandergesetzt.

Wir wissen aus der aktuellen Mach-Einstein Forschung, dass Letztgenannter aufgrund der Mach-Planck Debatte sein Buch *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit* (Mach, 1872) neu publizieren ließ (Mach, 1909) und in einer Fußnote ausdrücklich darauf hinwies, dass er die Relativitätstheorie wertschätzte (Mach, 1909, pp. 59-60).⁴⁰⁰ Doch wir haben zum Glück die Briefe von Einstein an Mach. In seinem ersten Brief (am 9. August 1909) antwortet Einstein auf Machs freundliche Geste:

„Hoch geehrter Herr Professor!

Ich danke Ihnen bestens für den mir übersandten Vortrag über das Gesetz von der Erhaltung der Arbeit, den ich bereits mit Sorgfalt durchgelesen habe. Im übrigen kenne ich

⁴⁰⁰ Siehe dazu den Abschnitt „3.1.1. (I) Machs erste Äußerung in: ‚Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit‘ (1909)“.

natürlich Ihre Hauptwerke recht gut, von denen ich dasjenige über die Mechanik am meisten bewundere. Sie haben auf die erkenntnistheoretischen Auffassungen der jüngeren Physiker-Generation einen solchen Einfluß gehabt, daß sogar Ihre heutigen Gegner wie z. B. Herr Planck, von einem der Physiker, wie sie vor einigen Jahrzehnten im Ganzen waren, ohne Zweifel für ‚Machianer‘ erklärt würden.

Weil ich nicht weiß, wie ich mich Ihnen sonst dankbar zeigen soll, schicke ich Ihnen einige meiner Abhandlungen. Besonders möchte ich Sie bitten, sich das über die Brown'sche Bewegung kurz anzusehen, weil hier eine Bewegung vorliegt, die man als ‚Wärmebewegung‘ deuten zu müssen glaubt.

Mit aller Hochachtung Ihr ganz ergebener Einstein.“

(CPAE 5; 174; p. 204) (Wolters, 1987, p. 149)

Einstein betont in seinem Brief, dass sogar seine Gegner, wie Planck, früher Machianer waren. Zudem möchte er Mach offensichtlich Abhandlungen senden, unter anderem zur Brownschen Bewegung. Ob er in diesem Zusammenhang auch seine Arbeiten zur Lichtquantenhypothese gesendet hat, wissen wir nicht. Allgemein scheint er ebenso vergessen zu haben die Abhandlungen abzusenden. In seinem nächsten Brief (am 17. August 1909) weist er darauf hin:

„Hoch geehrter Herr Professor!

Ihr freundlicher Brief hat mich ungemein gefreut und nicht minder die Abhandlung. [...] Es scheint, dass ich Ihnen die Abhandlungen zu senden vergessen habe. Aber sie gehen nun zusammen mit der Karte ab. Es freut mich sehr, dass Sie Vergnügen an der Relativitätstheorie haben. Leider habe ich keine Exemplare mehr von der zusammenfassenden Arbeit, die ich im Jahrbuch für Radioaktivität & Elektronik darüber publiziert habe.

Indem ich Ihnen nochmals herzlich danke für Ihren freundlichen Brief verbleibe ich Ihr Sie verehrender Schüler

A. Einstein.“ (CPAE 5; 175; p. 205)

Welche seiner Arbeiten Einstein an Mach gesendet hat, wissen wir nicht. Offensichtlich hat Letztgenannter sein „Vergnügen an der Relativitätstheorie“ geäußert. Jedenfalls zeigen diese zwei Briefe, dass Einstein Mach auf seine Molekulartheorie aufmerksam machen wollte. Zudem zeigte Mach sein Interesse an der Relativitätstheorie. Aus den Berichten wissen wir, dass Einstein mit Mach auch über die Atomtheorie gesprochen hat. Doch Einsteins dritte bedeutende Leistung war jene zur Lichtquantentheorie – hierfür fand er keine große Akzeptanz, z.B.: von Planck. Es würde daher nicht überraschen, dass er auch mit Mach über die Lichtquantenthese sprechen wollte – doch gibt es dafür Hinweise? Es gibt jedenfalls Argumente, basierend auf bestimmten Quellen, die dafürsprechen.

5.4.3.1. Argumente für Einsteins Unterhaltung mit Mach über die Lichtquantenhypothese

5.4.3.1.1. I. Autobiographische Notizen Einsteins

Bereits vor dem Treffen mit Mach hat Einstein zwischen 1905 und 1909 einige wissenschaftliche Beiträge zu Teilchennatur der Materie (Einstein, 1905k) (Einstein, 1907c) (Einstein, 1908c) und zu Quanteneigenschaften des Lichtes (Einstein, 1905i) (Einstein, 1906d) (Einstein, 1907a) (Einstein, 1909b) (Einstein, 1909c) usw. verfasst, wodurch er immer mehr die Wechselwirkung zwischen Materie und Licht zu untersuchen versuchte. Einsteins Arbeiten zur Teilchennatur der Materie waren mit seiner Vorstellung der Teilchennatur des Lichtes eng verwoben. So schreibt er in autobiographischen Notizen:

„Mein Hauptziel dabei war es, Tatsachen zu finden, welche die Existenz von Atomen von bestimmter endlicher Größe möglichst sicherstellten. Dabei entdeckte ich, daß es nach der atomistischen Theorie eine der Beobachtung zugängliche Bewegung suspendierter mikroskopischer Teilchen geben müsse, ohne zu wissen, daß Beobachtungen über die ‚Brownsche Bewegung‘ schon lange bekannt waren. Die einfachste Ableitung beruhte auf folgender Erwägung. Wenn die molekularkinetische Theorie im Prinzip richtig ist, muß eine Suspension von sichtbaren Teilchen ebenso einen die Gasgesetze erfüllenden osmotischen Druck besitzen wie eine Lösung von Molekülen. [...] Die Übereinstimmung dieser Betrachtung mit der Erfahrung zusammen mit der Planckschen Bestimmung der wahren Molekülgröße aus dem Strahlungsgesetz (für hohe Temperaturen) überzeugte die damals zahlreichen Skeptiker (Ostwald, Mach) von der Realität der Atome.“ (Einstein, 1983, p. 18)

Einstein sagt eindeutig:

„Die Übereinstimmung dieser Betrachtung mit der Erfahrung zusammen mit der Planckschen Bestimmung der wahren Molekülgröße aus dem Strahlungsgesetz (für hohe Temperaturen) überzeugte die damals zahlreichen Skeptiker (Ostwald, Mach) von der Realität der Atome.“
(Einstein, 1983, p. 18)

Ihm zufolge war Mach (später) daher kein Skeptiker der Atomtheorie. Offensichtlich spielte bei der Diskussion der Atome die Wärmelehre insgesamt eine Rolle, weshalb dem Planckschen Strahlungsgesetz und seiner Interpretation eine wesentliche Rolle zukam. Einsteins Interpretation war eine andere als die von Planck. Aufgrund der Mach-Planck Debatte wäre es daher nicht überraschend gewesen, dass Einstein mit Mach auch über die Optik sprechen wollte. Gerade wenn man bedenkt, dass Einsteins wichtiger Vortrag dazu ebenfalls in Österreich bzw. in Salzburg etwa ein Jahr vor seinem Besuch bei Mach stattfand.

5.4.3.1.2. II. Machs Beiträge zur Optik

a)⁴⁰¹ Der Doppler-Effekt geht auf den in Salzburg geborenen österreichischen Physiker Christian Doppler zurück. Wir erinnern uns, dass Einsteins Vortrag (Einstein, 1909c) in Salzburg stattfand. Nach Dopplers Tod wird Mach mit seinem Experiment im Jahre 1860 den Doppler-Effekt bestätigen können. Interessant ist aber vor allem, dass auch Mach bei seiner Argumentation für den Doppler-Effekt aus dem Jahre 1860 (Mach, 1873a) nicht auf den Äther eingeht. Im selben Jahr erschien ebenso sein Buch *Optisch-akustische Versuche: die spectrale und stroboskopische Untersuchung tönender Körper* (Mach, 1873b), wo er den Äther-Begriff nicht ein einziges Mal verwendet, obwohl er auf die Interferenzerscheinungen des Lichtes eingeht (Mach, 1873b, pp. 94-108). Indem Mach dem Äther seine bedeutende Rolle abspricht, wird er zum Wegbereiter für Einsteins Spezielle Relativitätstheorie – und ebenso zum Wegbereiter der Lichtteilchentheorie, denn auch diese benötigt keinen Äther. Das ist insofern spannend, weil Mach in *Beiträge zur Doppler'schen Theorie der Ton- und Farbänderungen durch Bewegung* (Mach, 1873a) das Teilchenmodell des Lichtes neben dem mathematischen Wellenmodell verwendet. Die Tatsache, dass Mach Lichtteilchen in die Diskussion einbringt, ist ein genialer Trick, der direkt als Vorstufe zu Einsteins Lichtquantenhypothese angesehen werden kann.⁴⁰²

b)⁴⁰³ Ludwig Mach, der älteste Sohn von Ernst Mach, erfand das Mach-Zehnder-Interferometer (Mach, 1891), wobei er in dessen Weiterentwicklung (Mach, 1892, pp. 92, fn. 3), auf die Arbeiten seines Vaters zurückgriff (Mach, 1873b).

Das Mach-Zehnder-Interferometer wird heute noch in den Experimenten zur Quantentheorie eingesetzt. Wenn Einstein sich später für Experimente interessierte, welche die Eigenschaften des Lichtes genauer untersuchen sollten, dann wusste er, dass er bei L. und E. Mach an der richtigen Adresse gewesen wäre. Dafür spricht auch der nächste Punkt...

c)⁴⁰⁴ Zum 60. Geburtstag von Ludwig Boltzmann wurden von vielen Wissenschaftlern unterschiedlichster Nationalitäten Arbeiten verfasst, wobei 117 davon im Buch *Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstage* (Meyer, 1904) herausgegeben wurden.

⁴⁰¹ Siehe dazu den Abschnitt „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“.

⁴⁰² Diesen Hinweis verdanke ich Bernhard Baumgartner. Siehe zu Machs und Einsteins ähnlichen Ansichten zum Teilchenmodell des Lichtes Seite 158, Fußnote 176.

⁴⁰³ Siehe dazu Abschnitt „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“.

⁴⁰⁴ Siehe dazu Abschnitt „2.1.2.2. Das A: Wissenschaftlicher Dialog zwischen E. Cohn, W. Wien und A. Einstein“.

Einstein kannte dieses Buch, da er die Aufgabe hatte, 3 der 117 Arbeiten zu überprüfen (CPAE 2; _ ; p. 110). Darin ist ebenfalls eine Arbeit von Ernst Mach zu finden: „Objektive Darstellung der Interferenz des polarisierten Lichtes“ (Mach, 1904). Darin erweiterte E. Mach das Experiment zur Polarisierung und Interferenz, welches er gemeinsam mit seinem Assistenten W. Rosicky für seine Vorlesungen entwickelte (Mach, 1904, pp. 441, fn. 1). In der zweiten Fußnote erklärt er:

„Ich mußte mich bei meinem Leiden, welches mir unmöglich machte, selbst zu experimentieren, darauf beschränken, den Plan der Versuche zu entwerfen. Mein ältester Sohn, Dr. med. *Ludwig Mach*, hat die Experimente im Detail sorgfältig ausgeführt, während ich die Aufstellung und die Ergebnisse kontrolliert habe.“ (Mach, 1904, pp. 441, fn. 2)

Aus dieser Fußnote sind zwei Sachen ersichtlich:

1. E. Mach gibt als Wissenschaftler an, wer bei den Experimenten wie mitwirkte.
2. E. Mach erwähnt seinen Sohn L. Mach namentlich.

Beide Punkte werden im gefälschten Vorwort (Mach, 1921) nicht vorhanden sein. Zudem wird klar, dass Mach sich nun (gemeinsam mit seinem Sohn) dem Gebiet der Optik widmete. Interessant ist, dass in dieser Arbeit „Äther“ ebenfalls nicht einmal erwähnt wird.

d) Dass Mach sich in seinen späteren Jahren der Optik widmete, dürfte in der Wissenschaftsgemeinschaft allgemein bekannt gewesen sein. Beispielsweise schreibt Eduard Suess bei der Nominierung Ernst Machs an das Nobelkomitee (am 23. Jänner 1910):

„Ernst *Mach* hat sich schon als Jüngling dadurch hervorgethan, dass er unter dem Widersprechen vieler hervorragender Gelehrten, für die Bedeutung der Doppler'schen Theorie eintrat. Es ist ein offenes Geheimnis, dass er heute mit einem Werke über die Principien der Optik beschäftigt ist.“ (Blackmore & Hentschel, 1985, p. 73)

Wenn wir annehmen, dass Einstein von diesem „offenen Geheimnis“ wusste, liegt es nahe, dass er sich mit Mach zum Thema Optik und zu der Lichtquantenhypothese unterhalten wollte.

5.4.3.1.3. III. Otto Neuraths Briefe an Mach⁴⁰⁵

Von Bedeutung in diesem Zusammenhang ist die Korrespondenz zwischen Ernst Mach und Otto Neurath (1914-1916). Neurath bedankt sich zu Beginn für die „freundlichen Zeilen“ Machs (Haller, 1980, p. 3).⁴⁰⁶ Anschließend erläutert Neurath, dass er ihm seinen Vortrag „Zur Klassifikation von Hypothesensystemen (Mit der besonderen Berücksichtigung der Optik)“ senden werde (Haller, 1980, pp. 3-4). Dieser wurde von Neurath am 2. März 1914 gehalten (Haller, 1980, p. 3) (Haller & Rutte, 1981, p. 85). Daraufhin kommt er zu seinem Anliegen:

„Nur zögernd komme ich mit einer Bitte. Ich wäre Ihnen aufrichtig dankbar, wenn Sie mir – falls Sie dadurch keine Bemühungen haben - mitteilen würden, ob und wo der Versuch gemacht wurde die Entwicklung der Optik mit jener der Akustik in Verbindung zu bringen, ich meine natürlich in etwas eingehender Weise. Ich hatte leider bisher nicht Gelegenheit diesem mich sehr interessierenden Problem näher nachzugehen, jenem Wechsel ‘Das Licht etwas, wie der Schall’, ‘Der Schall etwas, wie das Licht.’ Insbesondere das Auftreten der Interferenzlehre in beiden ziemlich gleichzeitig hat mich schon oft gelockt genauer zu analysieren. Ich konnte zwar über die Interferenzlehre des Lichtes ganz gute historische Hinweise finden, abgesehen von den Originalen, die mir zur Hand waren, aber mit der Geschichte der Interferenz in der Akustik in analysierend-kritischer Richtung bin ich übel daran. Ich habe schon oft daran gedacht, diesem Gegenstand mein Augenmerk zuzuwenden, soweit dies eben meine doch nur recht beschränkten wissenschaftlichen Kenntnisse gestatten. Sollten Sie mir mit zwei Worten vielleicht einen Wink geben können, so wäre ich Ihnen aufrichtig dankbar. Ich bitte Sie aber darum wirklich nur unter der Annahme, dass es Ihnen keine irgendwie geartete Mühe macht.

[...] Ich hätte so vieles zu fragen, so vieles, das doch wohl ausser Ihnen wenige wissen können. [...]“ (Haller, 1980, p. 4)

In einem weiteren Brief (an Mach) schreibt Neurath:

„Ich erlaube mir, Ihnen mit gleicher Post, meine Arbeit ‘Zur Klassifikation von Hypothesensystemen’ zu übersenden. Ich habe in derselben versucht an Ideen anzuknüpfen, die Sie mir früh in mein Denken gesenkt haben. Ich wäre froh, wenn Sie ein und das andere freundlich aufnehmen sollten. In diesem Vortrag habe ich die Philosophischen Ergebnisse breiter ausgeführt. Einige der hier angedeuteten Probleme verfolge ich gegenwärtig weiter.“ (Haller 1980, p. 5)

Sehen wir uns nun Neuraths Schrift „Zur Klassifikation von Hypothesensystemen (Mit der besonderen Berücksichtigung der Optik)“ (Neurath, 1981b) etwas genauer an, von der wir ausgehen können, dass Mach sie gelesen haben dürfte. Neurath analysiert in seinem Vortrag die Geschichte der Optik vom Beginn des 17. bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts (Neurath,

⁴⁰⁵ Siehe dazu Abschnitt „2.1.2.2.3.2. Ad 2.:“.

⁴⁰⁶ Machs Brief an Neurath ist verloren gegangen (Haller, 1980, p. 3).

1981b, p. 88) und versucht darin die „Anschauungen der Physiker“ „in Gruppen“ zu „bringen“ (Neurath, 1981b, p. 86). Beispielsweise „spricht“ man beim Licht „einerseits von einem Fortschreiten der Teilchen [...] – Element der Emissionstheorie – und gleichzeitig von der Fortpflanzung eines Zustandes – Element der Undulationstheorie.“ (Neurath, 1981b, pp. 86-87). Er versucht in seiner Arbeit diese Vorstellung der Dichotomie bzw. Zweiteilung aufzuheben, indem er eine Übersicht über die logisch möglichen Kombinationen der Elementarvorstellungen anbietet (Neurath, 1981b, p. 87):

„Wenn wir bestimmte Elementarbestandteile einer Anschauungsweise gegeben haben, können wir eine Übersicht über die möglichen Kombinationen in einfachster Weise derart erreichen, daß wir jedes Merkmal ebenso wie seine Negation als Element einer Kombination zulassen, etwa: a, b, c und die Negation davon: a_1 , b_1 , c_1 . Wir werden später in dieser Weise die Periodizität, Polarisierbarkeit und Interferierbarkeit von Lichtstrahlen behandeln. Es wird sich zeigen, daß eine Theorie z. B. einen zwar periodischen, aber unpolarisierbaren Lichtstrahl kennen kann, während eine andere zwar die Periodizität nicht kennt, wohl aber die Polarisierbarkeit.“ (Neurath, 1981b, pp. 87-88)

In seinen weiteren Erörterungen geht er auf vier charakteristische Elemente der Lichttheorie ein: „Periodizität“ (Neurath, 1981b, p. 89), „Interferenz“ (Neurath, 1981b, p. 89), „Polarisierbarkeit“ (Neurath, 1981b, pp. 89-90), „Beugung“ (Neurath, 1981b, pp. 90-91). Anschließend bespricht er, wie diese Elemente in der Geschichte der Physik Anwendungen in den verschiedenen Hypothesensystemen fanden (Neurath, 1981b, pp. 91-96), welche wesentliche Rolle unser Weltbild dabei spielte (Neurath, 1981b, pp. 96-98) und welche Bedeutung die Analogien dabei hatten (Neurath, 1981b, pp. 96-99, 100) usw. Das Ergebnis seiner Untersuchung fasst er mit den Worten zusammen:

„Unsere orientierenden Erörterungen haben gezeigt, daß eine *vergleichende Betrachtung von Hypothesensystemen, die als Grundlage aller historischen Forschung anzusehen ist*, in zwei Etappen erfolgen kann. Als *erste Etappe* wäre die reine Analyse des Systems zu bezeichnen, welche zu einer Gruppierung der Elementaranschauungen führt. [...] Die *zweite Etappe* setzt bereits allgemeine Betrachtungen voraus. Sie kann die Bedeutsamkeit mancher Hypothesen gar nicht mehr auf Grund einzelwissenschaftlicher Reflexion erkennen. Das Zurückgehen auf die gesamte Weltanschauung wird zur Pflicht. Den so entstehenden Anforderungen kann man aber nur bei besonderer Begabung und umfassenden Vorstudien genügen. Historiker der Physik in diesem Sinne werden daher philosophisch gebildete Physiker oder physikalisch gebildete Philosophen sein. Es würde sich empfehlen, diese beiden Etappen schärfer als dies bisher zu geschehen pflegte zu trennen.“ (Neurath, 1981b, p. 101)

Und beendet seine Arbeit mit den Worten:

„So wie wir Theorien brauchen, um die Dinge zu ordnen, so brauchen wir Theorien, um die Theorien zu ordnen.“ (Neurath, 1981b, p. 101)

Nach seinem Modell gibt es zwei Ebenen, die man genauer analysieren sollte: Einerseits die Elementaranschauungen (1. Etappe) und andererseits die Weltanschauung des Physikers (2. Etappe) – beide Ebenen beeinflussen in unterschiedlicher Form den Lauf der Physikgeschichte. Es dürfte kein Zufall sein, dass Neurath vor allem das Gebiet der Optik für seinen Untersuchungen wählte. Unter anderem aufgrund der Arbeiten „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ (Einstein, 1905i) und „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) von Einstein hatte sich bis dahin die Vorstellungen des Lichtes, und somit das Weltbild, verändert. Deshalb dürfte es auch kein Zufall sein, dass Neurath in seiner Arbeit die Geschichte der Optik vom Beginn des 17. bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts bespricht – offensichtlich wusste er über die neuesten Entwicklungen und Diskussionen auf diesem Gebiet Bescheid:

„Die elektromagnetische Lichttheorie, wie sie vor allem Maxwell (1831 bis 1879) in seiner Theorie des Lichtes 1865 angeregt und Hertz sie ausgeführt hat, trug dazu bei, einige Ordnung in die ungeheure Mannigfaltigkeit zu bringen. Freilich die letzten Jahre gaben wieder zu vielem Neuen Veranlassung, doch gibt es bereits einen großen Stock des annähernd Gesicherten. Die Vereinigung der elektrischen und optischen Theorien macht die Geschichte der Optik nur bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts für unsere Betrachtungen geeignet. Um von da ab der Optik gerecht zu werden, muß man bereits die gesamten physikalischen Anschauungen mit berücksichtigen. Die relative Isolierbarkeit der Optik hat ihr Ende erreicht.“ (Neurath, 1981b, p. 89)

Da Anfang des 20. Jhdt. Aufgrund der Weiterentwicklung der Gebiete Elektrodynamik und Thermodynamik nun das Licht bzw. die Lichtquantenhypothese verschieden diskutiert wurde, war eine Isolierbarkeit der Optik tatsächlich nicht mehr möglich...

Die Frage, die sich uns stellt, ist: Wofür benötigte er die Kenntnisse von Mach nun genau? Neurath verweist in seiner Arbeit oft auf die Analogie zwischen Schall und Licht (Neurath, 1981b, pp. 91-92, 97) – es ist daher verständlich, dass er über dieses Gebiet mehr von Mach erlernen könnte, der zum Doppler-Effekt wichtige Beiträge geleistet hatte (Mach, 1873a); aber auch zu optischen und akustischen Versuchen (Mach, 1873b). Zudem betont Neurath jedoch, dass sowohl das Teilchenmodell (Emissionshypothese) als auch das Wellenmodell (Undulationshypothese) ihre Berechtigungen in der Physikgeschichte haben (Neurath, 1981b, pp. 93, 97) – jedoch scheint er mehr für das Teilchenmodell des Lichtes argumentieren zu wollen (Neurath, 1981b, p. 99). Womöglich ist es Neurath ebenso nicht entgangen, dass Mach sowohl das Wellenmodell als auch das Teilchenmodell praktischer

Weise anwandte. Jedenfalls schreibt Neurath in einem weiteren Brief, wie wir bereits gelesen haben, an Mach:

„Ich erlaube mir, Ihnen mit gleicher Post, meine Arbeit ‘Zur Klassifikation von Hypothesensystemen’ zu übersenden. Ich habe in derselben versucht an Ideen anzuknüpfen, die Sie mir früh in mein Denken gesenkt haben. Ich wäre froh, wenn Sie ein und das andere freundlich aufnehmen sollten. In diesem Vortrag habe ich die Philosophischen Ergebnisse breiter ausgeführt. Einige der hier angedeuteten Probleme verfolge ich gegenwärtig weiter.“ (Haller, 1980, p. 5)

Es ist daher möglich – aber nicht zwingend –, dass er beabsichtigte, die Geschichte vom gesamten 19. Jahrhundert bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts zu studieren und über Machs aktuelle Arbeiten (Mach, 1904) mehr in Erfahrung bringen wollte. Jedenfalls scheint Neurath auch nach seiner Korrespondenz an Machs Ansichten interessiert gewesen zu sein. Aus diesem Grund war er wohl im Besitz von *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) mit dem gefälschten Vorwort. Auf der ersten Seite des Buches notierte er:

„M. stresses the point, that he is not a forerunner of the theory of relativity, and against the atomistic belief of today p. VIII“.⁴⁰⁷

Eine solche Stellungnahme von Mach hatte er wohl nicht erwartet hat.

5.4.3.1.4. IV. Einsteins Arbeit, seine Visitenkarte und sein Notizbuch

5.4.3.1.4.1. a) Einsteins Arbeit und sein Notizbuch

Bei Cohen haben wir über das Treffen Folgendes erfahren:

„If an atomic hypothesis would make it possible to connect by logic some observable properties which would remain unconnected without this hypothesis, then, Mach said, he would have to accept it. Under these circumstances it would be ‘economical’ to assume that atoms may exist because then one could derive relations between observations. Einstein had been satisfied; indeed more than a little pleased. With a serious expression on his face, he told me the story all over again to be sure that I understood it fully. Wholly apart from the philosophical victory over what Einstein had conceived Mach's philosophy to have been, he had been gratified because Mach admitted that there might, after all, be some use to the atomistic philosophy to which Einstein had been so strongly committed.“

(Cohen, 1955, pp. 72-73)

Wenn die Atomhypothese es ermöglichen würde, dass man einen Zusammenhang zwischen verschiedenen beobachtbaren Eigenschaften herstellt, die ohne diese Hypothese nicht

⁴⁰⁷ Quelle: Exil-Bibliothek Otto Neurath, Wiener Kreis Gesellschaft / Institut Wiener Kreis, Universität Wien, Universitätscampus, Hof 1.

gelingen würde, dann würde Mach sie selbstverständlich akzeptieren, sagte Mach. Die Atomhypothese wäre dann nach seiner Ansicht 'ökonomisch', da man durch sie verschiedene Beobachtungen ableiten könnte. Offensichtlich war Einstein erfreut darüber. Dadurch wusste er nämlich, dass Mach seine Arbeiten unterstützen würde. In seinem Notizbuch (auf der Seite 34) schreibt Einstein: „Quanten | Opaleszenz“ (CPAE 3; APPENDIX A; p. 580). Wir erinnern uns – die Notiz darüber, wann er Mach besuchen wollte, war auf der Seite 30 zu finden. Diese Notiz „Quanten | Opaleszenz“ dürfte womöglich kein Zufall gewesen sein. Nach seiner Rückkehr (von Wien) in Zürich schließt er eine Arbeit „Theorie der Opaleszenz von homogenen Flüssigkeiten und Flüssigkeitsgemischen in der Nähe des kritischen Zustandes“ (Einstein, 1910d) ab und sendet sie sogleich per Brief (am 7. Oktober 1910) an Wilhelm Wien, mit der Bitte sie in den *Annalen der Physik* zu veröffentlichen (CPAE 5; 226; p. 256-257). (Wir erinnern uns, dass er Mach wohl Ende September/Anfang Oktober besucht hat – wenn Einstein mit Mach über die Atomtheorie sprach, dürfte er unter anderem an den Inhalt dieser Arbeit gedacht haben.) Seine Arbeit zur statistischen Physik, wo er sich mit dem Boltzmannschen Prinzip auseinandersetzt, endet mit den Worten:

„Eine quantitative experimentelle Untersuchung der hier behandelten Erscheinungen wäre von großem Interesse. Denn einerseits wäre es wertvoll, zu wissen, ob das Boltzmannsche Prinzip wirklich die hier in Betracht kommenden Erscheinungen richtig ergibt, andererseits könnte man durch solche Untersuchungen zu genauen Werten für die Zahl N gelangen.“

(Einstein, 1910d, p. 1298)

Allgemein zeigt Einstein in dieser Arbeit, wie man vom Boltzmannschen Prinzip zu unterschiedlichen beobachtbaren Aussagen gelangt, die man experimentell überprüfen könnte – unter anderem die Zahl der Moleküle (N). Wir wollen daher kurz Einsteins Beschreibung des Boltzmannschen Prinzips⁴⁰⁸ wiedergeben, um seine Gedanken besser nachvollziehen zu können:

„§ 1. Allgemeines über das Boltzmannsche Prinzip.

Das Boltzmannsche Prinzip kann durch die Gleichung

$$(1) \quad S = \frac{R}{N} \lg W + \text{konst.}$$

formuliert werden. Hierbei bedeutet

⁴⁰⁸ Mehr über das Boltzmannsche Prinzip kann der Leser in „Einstein's Early Work on the Quantum Hypothesis“ (CPAE 2; _; p. 137) in Erfahrung bringen. An dieser Stelle sei nur darauf hingewiesen, dass Einsteins Interpretation des Boltzmannschen Prinzips, von jener Plancks verschieden war (CPAE 2; _; p. 138).

R die Gaskonstante,
 N die Zahl der Moleküle in einem Grammmolekül,
 S die Entropie,
 W ist die Größe, welche als die ‚Wahrscheinlichkeit‘ desjenigen Zustandes bezeichnet zu werden pflegt, welchem der Entropiewert S zukommt.
 Gewöhnlich wird W gleichgesetzt der Anzahl der möglichen verschiedenen Arten (Komplexionen), in welchen der ins Auge gefaßte, durch die beobachtbaren Parameter eines Systems im Sinne einer Molekulartheorie unvollständig definierte Zustand realisiert gedacht werden kann. Um W berechnen zu können, braucht man eine vollständige Theorie (etwa eine vollständige molekular-mechanische Theorie) des ins Auge gefaßten Systems. Deshalb erscheint es fraglich, ob bei dieser Art der Auffassung dem Boltzmannschen Prinzip allein, d.h. ohne eine vollständige molekular-mechanische oder sonstige die Elementarvorgänge vollständig darstellende Theorie (Elementartheorie) irgend ein Sinn zukommt. Gleichung (1) erscheint ohne Beigabe einer Elementartheorie oder – wie man es auch wohl ausdrücken kann – vom phänomenologischen Standpunkt aus betrachtet inhaltlos.
 Das *Boltzmannsche* Prinzip erhält jedoch einen Inhalt unabhängig von jeder Elementartheorie, wenn man aus der Molekularkinetik den Satz annimmt und verallgemeinert, daß die Nichtumkehrbarkeit der physikalischen Vorgänge nur eine scheinbare sei.“ (Einstein, 1910d, p. 1276)

Wir sehen, dass Einstein hier die Beziehung zwischen den Komplexionen und der Größe der Wahrscheinlichkeit W auf molekular-mechanischer Ebene diskutiert. Diese Diskussion hat Einstein in seinem Salzburger Vortrag bereits begonnen, jedoch beim Thema der Strahlung (Einstein, 1909c, pp. 493-494) – siehe dazu (CPAE 3; 9; p. 311, fn. 6). Wir sehen also deutlich, wie Einstein diese Beziehung auf verschiedenen Ebenen der Physik behandeln möchte, um die Thermodynamik insgesamt voranzubringen. Wenn aber die Arbeit (Einstein, 1910d) *prinzipiell* mit (Einstein, 1909c) zusammenhängt, Einstein bei seinem Treffen mit Mach wahrscheinlich an (Einstein, 1910d) dachte und über die experimentelle Überprüfbarkeit der Atomtheorie sprach, dann liegt es nahe, dass er womöglich auch seine Ideen zur Lichtquantentheorie (Einstein, 1909c) erwähnte.

Wenn wir mit unserer Interpretation richtig liegen, dann ist es nicht unwahrscheinlich, dass Einstein mit Mach auch über die Lichtquanten gesprochen hat – denn Einstein lag nicht nur die Atomtheorie am Herzen, sondern ebenso seine Lichtquantentheorie, die von Wissenschaftlern, wie beispielsweise Planck, nicht so richtig akzeptiert wurde. Aufgrund der Mach-Planck-Debatte würde man daher eher erwarten, dass Einstein mit Mach auch gerade über die Lichtquantenhypothese gesprochen hätte. Nun scheint ein Dokument dies auch nahe zu legen.

5.4.3.1.4.2. b) Einsteins Visitenkarte und sein Notizbuch

2019, also über hundert Jahre nach dem Treffen zwischen Einstein und Mach, wurde in einem Münchner Auktionshaus die Visitenkarte von Einstein aus dem Ernst-Mach-Nachlass versteigert⁴⁰⁹, die Einstein Ernst Mach damals wohl übergab. Dieses Dokument (siehe Abb. 15) hat der israelische Journalist Assaf Uni erworben (und hat mich auf die Skizze auf der Hinterseite aufmerksam gemacht).

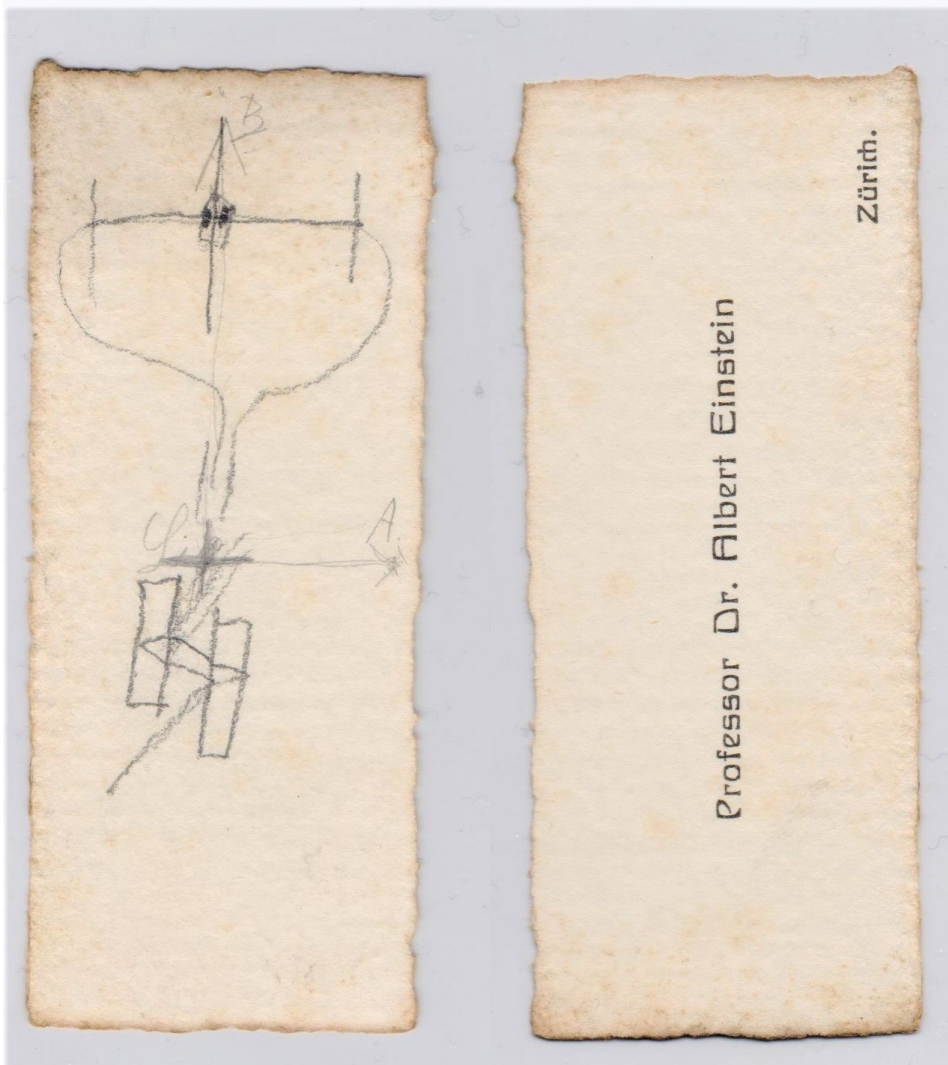


Abbildung 15: Die Visitenkarte wurde vom israelischen Journalisten Assaf Uni entdeckt, der sie 2019 von einem Münchner Auktionshaus erhielt. Sie wurde wahrscheinlich von Einstein an Mach beim Treffen im Jahre 1910 übergeben. Auf der Vorderseite (rechtes Bild) steht „Professor Dr. Albert Einstein“ und „Zürich.“ (Einstein war 1909-1910 außerordentlicher Professor für Theoretische Physik an der Universität Zürich.) Auf der Rückseite (linkes Bild) ist die Zeichnung eines Gedankenexperimentes zu finden.

⁴⁰⁹ Die Versteigerung ist online immer noch zugänglich:
<https://beta.lot-tissimo.com/de-de/auction-catalogues/nusser/catalogue-id-auktio33-10001/lot-c0908a23-faf2-4d0f-9c7d-aa1b00dd47c7>

Es stellt sich natürlich die Frage, was die Zeichnung auf der linken Seite bedeuten könnte. Und wieder werden wir im selben Notizbuch, wo wir Machs Adresse (Seite 30) (CPAE 3; APPENDIX A; p. 578) und die Zeile (Seite 34) „Quanten | Opaleszenz“ (CPAE 3; APPENDIX A; p. 580) fanden, erneut fündig: Wir sehen auf Seite 21 (CPAE 3; APPENDIX A; p. 574) eine Zeichnung, die der auf der Visitenkarte sehr ähnelt (siehe Abb. 16).

Dass zwischen der Seite im Notizbuch von Einstein und seinem Treffen mit Mach ein Bezug besteht, ist aus drei Gründen ersichtlich:

- a) Die zeitliche Nähe der Notiz zum Treffen.
- b) Die große Ähnlichkeit zwischen den Zeichnungen.
- c) Die zweite Skizze im Notizbuch könnte ebenso mit Machs Forschungsschwerpunkten zusammenhängen.

Ad a): Wir haben gleich mehrere Hinweise darauf, dass Einsteins Skizzen in seinem Notizbuch in zeitlicher Nähe zu seinem Besuch bei Mach stehen:

(I) Auf derselben Seite im Notizbuch finden wir nämlich gleich zwei Skizzen. In der unteren sehen wir die Anmerkung „Hopf“. Einstein hat in Zürich mit seinem damaligen Assistenten Ludwig Hopf zwei gemeinsame Arbeiten verfasst – beide sind am 29. August 1910 (Einstein & Hopf, 1910a, p. 1104)⁴¹⁰ (Einstein & Hopf, 1910b, p. 1115) in die *Annalen der Physik* eingegangen

und wurden gegen Ende 1910 veröffentlicht. Wenn wir annehmen, dass Einstein diese Arbeit mit Ludwig Hopf im August 1910 verfasste, dann ist die zeitliche Nähe der Skizze gegeben, da Einstein Mach höchstwahrscheinlich Ende September 1910 besucht hat.

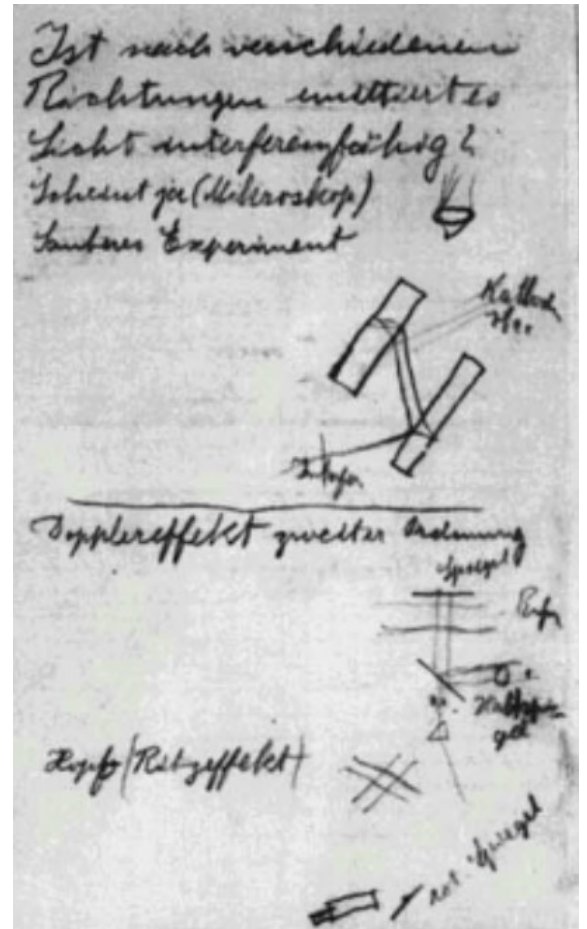


Abbildung 16: Aus Einsteins Notizbuch p. 21; Quelle: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol3-doc/612> [Zugriff am 8. Jänner 2021].

⁴¹⁰ Diese Arbeiten von Einstein und Hopf sind überaus interessant, weil sie zeigen konnten, dass der Gleichverteilungssatz auch für das kanonische Ensemble gilt (Einstein & Hopf, 1910b) – sie verdeutlichen auch, wo ihre Ansichten sich von jenen von Planck unterscheiden (Einstein & Hopf, 1910b, p. 1115).

(II) Eine Seite vorher (Seite 20) (CPAE 3; APPENDIX A; p. 573) notiert sich Einstein eine Arbeit von Walther Nernst (Nernst, 1893)⁴¹¹. In dieser bespricht Nernst unter anderem das Eötvössche Gesetz. Einstein verwendete diesen Artikel (Nernst, 1893) wohl für die Recherchen zu seiner eigenen Arbeit „Bemerkung zu dem Gesetz von Eötvös“ (Einstein, 1911a) – siehe dazu (CPAE 3; 12; p. 407, fn. 2) –, die am 30. November 1910 in den *Annalen der Physik* eingegangen ist (Einstein, 1911a, p. 169). Wenn wir uns noch einmal in Erinnerung rufen, dass Einstein Mach an einem der Tage nach dem 24. September getroffen hat, dann passt auch diese Notiz von Einstein. (Die Seite im Notizbuch (Seite 20) und seine Arbeit (Einstein, 1911a) sind auch die einzigen Belege, wo (Nernst, 1893) einen Zusammenhang bietet.)

Zusammenfassend können wir sagen, dass die Skizzen in Einsteins Notizbuch in zeitlicher Nähe zu Einsteins Treffen mit Mach stehen, welches etwa Ende September 1910 stattgefunden haben dürfte. (Die Notizen auf Seite 20 und 21 legen einen Erstellungszeitraum zwischen August und November 1910 nahe.)

Ad b): Die Ähnlichkeiten zwischen der Zeichnung im Notizbuch und auf Einsteins Visitenkarte sind augenscheinlich (siehe Abb. 17 und 18).

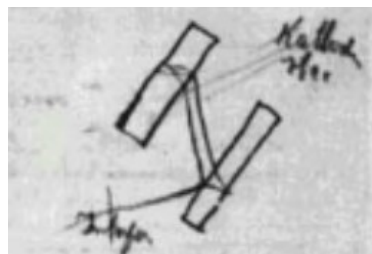


Abbildung 17: Notizbuch p. 21; Quelle: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol3-doc/612> [Zugriff am 8. Jänner 2021].

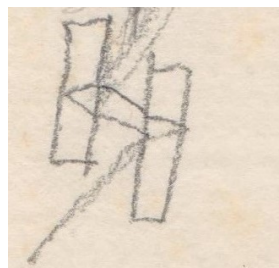


Abbildung 18: Visitenkarte: Mit einer Zeichnung (höchstwahrscheinlich) von E. Mach; Quelle: Assaf Uni.

Aufgrund des Inhaltes im Notizbuch ist es auch möglich, die Bedeutung der Skizze zu verstehen. Und zwar notiert sich Einstein ganz oben im Notizbuch:

⁴¹¹ Siehe dazu auch (CPAE 3; APPENDIX A; p. 597).

„Ist nach verschiedenen
Richtungen emittiertes
Licht interferenzfähig?
Scheint ja (Mikroskop)
Sauberes Experiment“
(CPAE 3; APPENDIX A; p. 574)

Einstein dachte darüber nach, ob in verschiedene Richtungen emittiertes Licht interferenzfähig ist. In moderner Form würde seine Frage wohl lauten: Gilt die Superposition für emittierte Lichtteilchen, die sich in unterschiedliche Richtungen ausbreiten?⁴¹²

Einige Seiten vorher (Seite 13) findet man im selben Notizbuch eine „Messreihe mit Mikroskopablesung“ (CPAE 3; APPENDIX A; p. 570) – woran man bereits erkennt, wie sehr ihn die experimentelle Physik interessiert hat.⁴¹³ Bereits bei der Atomtheorie bzw. Molekulartheorie waren die Mikroskope für Einstein wichtig.⁴¹⁴ Einstein konnte Gesetze für die Brownsche Bewegung⁴¹⁵ herleiten, die später von Jean-Baptiste Perrin experimentell überprüft wurden und somit die Atomtheorie unterstützten.⁴¹⁶ Bei „Mikroskop“ dürfte Einstein wohl an Ultramikroskope⁴¹⁷ gedacht haben, wo das Licht gebeugt wird, oder an ein Polarisationsmikroskop, wo ein polarisiertes Licht für die Abbildung verwendet wird. Insofern war die Interferenz bzw. die Beugung des Lichtes eine theoretische Grundvoraussetzung für die Funktionsweise dieser Mikroskope. Er hatte höchstwahrscheinlich aber eine Idee oder den Wunsch eines „[s]aubere[n] Experiment[s]“ um die Interferenzeigenschaften genauer zu untersuchen.

Bei seiner Zeichnung (siehe Abbildung 17) dachte er womöglich an ein Experiment folgender Art:

„Sehr schief einfallende Kathodenstrahlen *K* erzeugen auf einer von zwei Planplatten gleicher Dicke bei [der ersteren Platte, Anmerkung von E.S.] flächenhaftes Licht. Die Platten erzeugen Interferenz ohne Gangunterschied — wenn Emission in Kugelwelle erfolgt.“

(CPAE 13; 47; p. 134)⁴¹⁸

⁴¹² Siehe zur Verschränkung „Einsteins Schleier: Die neue Welt der Quantenphysik“ (Zeilinger, 2004, pp. 91-101) und „Bell’s Universe: A Personal Recollection“ (Bertlmann, 2017, pp. 39-49, 43-47, 50, 53-55).

⁴¹³ Allgemein interessierte sich Einstein sehr für Experimente und schlug auch selber einige vor – an dieser Stelle seien als Beispiel zwei angegeben: „Über die Möglichkeit einer neuen Prüfung des Relativitätsprinzips“ (Einstein, 1907e), „Ein einfaches Experiment zum Nachweis der Ampèreschen Molekularströme“ (Einstein, 1916d) usw.

⁴¹⁴ Siehe dazu seine Arbeiten „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“ (Einstein, 1905k, p. 549), „Zur Theorie der Brownschen Bewegung“ (Einstein, 1906b, p. 375) und „Theoretische Atomistik“ (Einstein, 1915a, p. 261).

⁴¹⁵ Siehe dazu „Brownian Motion“ (CPAE 2; _; p. 208, 211).

⁴¹⁶ Siehe dazu „Brownian Motion“ (CPAE 2; _; p. 206).

⁴¹⁷ Siehe dazu „Brownian Motion“ (CPAE 2; _; p. 210).

⁴¹⁸ Wir werden auf diese Zeilen von Einstein später wieder zurückkommen.

Das sollte das Experiment zu klären versuchen. Er war nämlich von seiner Lichtquantenhypothese überzeugt. Wenn wir diese Notiz von Einstein mit der Zeichnung auf der Visitenkarte vergleichen, dann erkennen wir, dass das Schema genau dasselbe ist. (Die Zeichnung auf der Visitenkarte dürfte von Ernst Mach persönlich stammen.) Womöglich erhoffte sich Einstein, dass es Mach gelingen könnte, ein Experiment vorzuschlagen oder gemeinsam mit seinem Sohn zu machen, wo die Teilcheneigenschaften des Lichtes viel besser in Erscheinung treten konnten. Wäre Mach ein solches Experiment gelungen, hätte er Planck gegenüber demonstrieren können, dass seine stark an Tatsachen und beobachtbaren Erfahrungen beruhende Gedankenwelt im Stande ist, zur modernen Physik Beiträge zu leisten.

Ad c): Womöglich haben wir noch ein zusätzliches, indirektes Argument dafür, dass diese Skizze in seinem Notizbuch tatsächlich mit der Zeichnung auf seiner Visitenkarte zu tun hat. Wir finden nämlich unterhalb dieser Skizze wieder eine Zeichnung (siehe Abb. 16), die ein weiteres Gedankenexperiment beschreibt. Ganz oben steht „Dopplereffekt zweiter Ordnung“ (CPAE 3; APPENDIX A; p. 574) – diesen hat Einstein in seinem Manuskript zur Speziellen Relativitätstheorie in einer Fußnote genauer erläutert:

„Es gibt nach der Relativitätstheorie einen Dopplereffekt zweiter Ordnung in dem Falle, dass $l = 0$ d. h. dass die Relativgeschwindigkeit des Beobachters (Σ') gegen die Lichtquelle (Σ) senkrecht steht auf der Verbindungslinie Lichtquelle-Beobachter.“
(CPAE 4; 1; p. 105, fn. 70)⁴¹⁹

Mit einfachen Worten: Die Wellennormale des Lichtes wäre aufgrund der Relativgeschwindigkeit zwischen Beobachter und Quelle verändert.

Wie wir bereits erwähnt haben, hat Mach in seinen Arbeiten zum Dopplereffekt sowohl das Teilchen- als auch das Wellenmodell angewendet und ebenso auf den Äther als Konzept verzichtet. Es könnte daher ebenso möglich sein, dass diese Skizze mit Einsteins Treffen mit Mach in Zusammenhang steht. Über die Funktionsweise des Gedankenexperiments lassen sich nur Vermutungen anstellen.⁴²⁰ Elemente des Gedankenexperimentes sind jedenfalls ein „Halbspiegel“, ein „Spiegel“ und ein „rot. Spiegel“ (CPAE 3; APPENDIX A; p. 574). Zudem steht die Anmerkung „(Ritzeffekt)“ und „Hopf“ (CPAE 3; APPENDIX A; p. 574): Einstein hat im

⁴¹⁹ Um mehr über die Wellennormale zu erfahren, siehe (CPAE 4; 1; p. 50-51).

⁴²⁰ Auch ist nicht ganz klar, ob er dabei an ein oder an mehrere Gedankenexperimente dachte.

Jahre 1909 gemeinsam mit Ritz publiziert (Ritz & Einstein, 1909), um darzulegen, wo ihre Standpunkte sich voneinander unterscheiden – und zwar war nach Einstein der Grund für die Nichtumkehrbarkeit der Strahlung der Wahrscheinlichkeit geschuldet, wobei Ritz dachte, dass sie in den Grundgesetzen der Strahlung zu finden wäre (Ritz & Einstein, 1909, p. 324).⁴²¹ Vor seiner Bemerkung „(Ritzeffekt)“ finden wir in diesem Zusammenhang auch seine Notiz „Hopf“ (CPAE 3; APPENDIX A; p. 574). Einstein hat in Zürich gemeinsam mit seinem damaligen Assistenten Ludwig Hopf seine Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Strahlung weiter ausgearbeitet (Einstein & Hopf, 1910a). Jedenfalls sehen wir aufgrund der nächsten Seite in seinem Notizbuch (Seite 22), was Einstein eigentlich beschäftigte:

„Wird Kohärenz durch Absorption
beeinflusst?“⁴²² (CPAE 3; APPENDIX A; p. 574)

Heute würde die Antwort darauf „Ja“ lauten. Mit der Zunahme der Dekohärenz geht eine Abnahme der Verschränkung einher (Bertlmann, 2017, pp. 56-60). Doch damals war die Antwort auf diese Frage nicht klar. Die ersten (zwei unterschiedlichen) physikalisch-mathematischen Formulierungen der Quantentheorie gelangen erst 1925 Werner Heisenberg und 1926 Erwin Schrödinger (Zeilinger, 2004, p. 24) – wobei die Interpretation der Quantentheorie damals wie heute noch nicht abgeschlossen ist.

⁴²¹ Einen kurzen Überblick zu den unterschiedlichen Ansichten zwischen Ritz und Einstein findet der Leser in (Cassini & Levinas, 2019, pp. 65-66).

⁴²² Wir haben bereits feststellen können, dass an einem der Nachmittage (16:30 Uhr) nach dem 24. September 1910 das Treffen zwischen Mach und Einstein stattgefunden haben dürfte. Sehen wir uns nun Machs letztes Notizbuch an. Die Seiten 1-46 dürfte er 1910 geschrieben haben – siehe dazu (Blackmore & Hentschel, 1985, p. 173). Auf Seite 18 lesen wir (ganz oben):

„Raum u Zeit
Verschiedene Auffassungen
d. Relativität.“ (Blackmore & Hentschel, 1985, p. 179)

Und auf der Seite 21 finden die Notiz (wieder ganz oben):

„Kontaktzeit
Ortszeit willkürlich festsetzen
Weltzeit.
Quadratbeständigkeit, Invariante.
Keine Bewegung absolut nachweisbar
aber relativ“ (Blackmore & Hentschel, 1985, p. 21)

Offensichtlich dachte er (Seite 18 und 21) über die Relativitätstheorie nach. Genau dazwischen (Seite 19, ganz oben) finden wir nun die Notiz:

„Aufhebung der Kohärenz.“ (Blackmore & Hentschel, 1985, p. 19)

5.4.4. 1921/1922 – ein turbulentes Jahr für Einstein

Im Jahr 1921 erschien posthum⁴²³ Machs Buch *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921). Darin ist ein Vorwort von E. Mach zu finden, welches auf das Jahr 1913 datiert ist (Mach, 1921, p. IX), wo er erklärt, dass ihm „die Rolle des Wegbereiters der Relativitätslehre zugedacht wird“ (Mach, 1921, p. VIII), er „aber“ „mit Entschiedenheit ablehnen“ „muß“ (Mach, 1921, p. VIII) und vergleicht sie und die „atomistische Glaubenslehre“ mit einer dogmatischen „Kirche“ (Mach, 1921, p. VIII). Außerdem verweist er auf einen zweiten Band, wo er seine Kritik (zur Relativitätstheorie) noch erläutern wird (Mach, 1921, p. IX). Ein solcher ist jedoch nie erschienen. Darüber, was uns im zweiten Band erwarten wird, gibt er Auskunft:

„In meinem hohen Alter und bei meinem Leiden habe ich, dem Drängen meines Verlegers nachgebend, mich gegen meine Gewohnheit entschlossen, diesen Teil des Buches zunächst dem Druck zu übergeben, wogegen in einem weiteren Teil die Strahlung, der Ablauf der Lichtemission, die *Maxwellsche* Theorie nebst der Relativität kurz behandelt werden.“
(Mach, 1921, pp. VII-VIII)

Gerade dieser zweite Band wäre wichtig gewesen – denn wenn Einstein und Mach bei ihrem Treffen über die Lichtquantenhypothese gesprochen haben, dann wäre vor allem Machs Behandlung der Themen „die Strahlung, der Ablauf der Lichtemission, die *Maxwellsche* Theorie nebst der Relativität“ interessant ...

Es hat sich aber durch die Arbeit *Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie. Eine Fälschung und ihre Folgen* (Wolters, 1987) von Gereon Wolters gezeigt, dass das Vorwort eine Fälschung ist, nämlich von seinem ältesten Sohn Ludwig Mach und dass ein zweiter Band wohl nie existiert hat – siehe (Wolters, 1987, pp. 375-402). Ernst Mach hatte im hohen Alter und bei seinen gesundheitlichen Problemen gar kein Interesse mehr daran, einen Beitrag zu den damaligen aktuellen Debatten zu leisten. Das wird aus seiner Korrespondenz deutlich – und zwar sandte Otto Wiener den Artikel „Entwicklung der Wellenlehre des Lichtes“ (Wiener, 1915) an Mach. In dieser Arbeit kritisiert O. Wiener im letzten Abschnitt „28. Ansätze zu einem Rückfall in die Emissionstheorie. Rückblick und Ausblick.“ (Wiener,

⁴²³ Also erst Jahre nach Machs Tod (1916).

1915, pp. 568-572) besonders die Theorien von Einstein – über dessen Lichtquantenhypothese schreibt er:

„M. Planck sah sich 1900 genötigt, zur Erklärung der experimentell gefundenen Strahlungsbeträge anzunehmen, daß die Energie von schwingenden Gebilden der Materie stets als Vielfaches eines bestimmten Einheitsquantums der Energie zur Geltung kommt. Dieses Einheitsquantum ist nach Planck proportional der Schwingungszahl jenes Gebildes. Die Proportionalitätskonstante ist eine von der Schwingungszahl unabhängige Größe und wird als ‚elementares Wirkungsquantum‘ bezeichnet [...].

Dieses Wirkungsquantum hat sich nun zur Erklärung der Wechselwirkung zwischen Röntgen- und Kathodenstrahlen als besonders geeignet erwiesen und man ist schließlich zu der Vorstellung gelangt, daß die Energiequanten frei als unabhängige und selbstständige Gebilde im leeren Raumdurchfliegen, um an ihrer Auftretsstelle absorbiert oder zum Anlaß der Ausstrahlung neuerer Energieeinheiten in veränderter Form zu werden. Manche Vertreter dieser Vorstellungen, nicht Planck selbst, suchen den bewußten Anschluß an die Newtonsche Emissionstheorie, indem sie unmittelbar von ausgeschleuderten Lichtquanten sprechen, und man kann dieses Verhalten fast als eine Art atavistischen Rückfalls auffassen.“
(Wiener, 1915, p. 569)

Auf der nächsten Seite stellt O. Wiener auch klar, dass er eher für ein Konzept des Äthers ist:

„Wenn man auch zugeben muß, daß die aus dem Michelsonschen Versuch sich ergebenden Schwierigkeiten durch die Einsteinsche Theorie in sehr einfacher Weise behoben werden, so kann man doch auch dem von Lorentz vertretenen Standpunkt die Berechtigung nicht aberkennen, daß die Bewegung starrer Körper durch den Äther hindurch nicht ohne Rückwirkung auf die bewegten Körper bleiben wird.“ (Wiener, 1915, p. 570)

Eine Woche vor seinem Tod (19. Februar 1916) schreibt Mach in einem Brief an Otto Wiener (am 12. Februar 1916):

„Sie fragen mich wie es mit der Optik steht?; nun haben Sie mit der Ihrer ‚Lehre vom Licht‘ und dem daran sich knüpfenden weiten theoretischen Ausblick so viel vorweggenommen, daß mir meine Ausführungen nicht mehr gefallen wollen. Mit der ungeahnten Entwicklung der Optik konnte ich, der alternde Mann, nicht mehr Schritt halten!“

(Wolters, 1987, pp. 323-324) (Mach, 2020, p. XVII)

Ernst Mach dachte wohl nicht daran, sich kritisch zur Lichtquantenhypothese von Einstein zu äußern⁴²⁴, geschweige denn ein Experiment dazu zu machen. Er wusste, dass er „[m]it der ungeahnten Entwicklung der Optik“ „nicht mehr Schritt halten“ „konnte“. Einstein hingegen

⁴²⁴ Ernst Machs Äußerung („viel vorweggenommen“) lässt noch etwas Spielraum für unterschiedliche Interpretationen zu. Es könnte sein, dass Mach ebenfalls Kritik an der Lichtquantenhypothese äußern wollte. Da er aber schreibt, dass ihm seine eigenen „Ausführungen nicht mehr gefallen wollen“ und betont, dass er „[m]it der ungeahnten Entwicklung der Optik [...], nicht mehr Schritt halten“ konnte, zeigt er deutlich, dass er dazu nicht wirklich Stellung nehmen möchte. Seine Zeilen (gegenüber O. Wiener) sind insofern wahrscheinlich als wertschätzend, diplomatisch und zurückhaltend einzuordnen.

wusste wohl weder, dass das Vorwort eine Fälschung war, noch von dem Brief von Mach an Wiener.

Jedenfalls reichte er im Dezember des Jahres 1921 seine Arbeit „Über ein den Elementarprozeß der Lichtemission betreffendes Experiment“ (Einstein, 1922a) ein, die zwischen dem Teilchen- und dem Wellenmodell eine Entscheidung bringen sollte. Auch in dieser Schrift spielte der Doppler-Effekt eine wichtige Rolle (Einstein, 1922a, p. 883). Am Ende der Arbeit erklärt er: „Die experimentelle Entscheidung der hier gestellten Frage habe ich mit Hrn. Geiger in Angriff genommen.“ (Einstein, 1922a, p. 883) Schließlich wurde das Experiment durchgeführt – Einstein sah sich in seiner Ansicht bestätigt und die Wellentheorie des Lichtes als widerlegt; jedoch konnte Paul Ehrenfest bald zeigen, dass Einstein sich bei seinen theoretischen Berechnungen dazu geirrt hatte⁴²⁵ und schreibt in einem Brief (am 26. Jänner 1922) an ihn:

„Höre Einstein auf Deinen kleinen Bruder auf dass es Dir gut gehe!!! (Sonst wird aus Einstein ein Weinstein) Und sei überzeugt, dass ich mich sehr freuen würde falls Du doch recht behältst. Sende mir sehr rasch das Manuscript oder Correctur.“ (CPAE 13; 39; p. 118)

In seinem Artikel „Zur Theorie der Lichtfortpflanzung in dispergierenden Medien“ (Einstein, 1922f) wird sodann Einstein seinen Fehler wieder korrigieren:

„In einer jüngst in diesen Berichten erschienenen Notiz habe ich ein optisches Experiment vorgeschlagen, für welches nach meinen Überlegungen die Undulationstheorie ein anderes Ergebnis erwarten ließ als die Quantentheorie. [...]

Da die HH. Ehrenfest und Laue an der Beweiskraft dieser Überlegung zweifelten, habe ich die Lichtfortpflanzung in dispergierenden Medien genauer undulationstheoretisch untersucht und in der Tat gefunden, daß jene Überlegung zu einem unrichtigen Ergebnis führt.“

(Einstein, 1922f, p. 18)



Abbildung 19: Quelle: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol13-doc/230> [Zugriff am 8. Jänner 2021].

Einstein sendet die Korrektur mit einem Brief (am 12. Februar 1922) an Ehrenfest, wo er schreibt:

„Lieber Ehrenfest!

Mit gleicher Post sende ich Dir die Korrektur meiner Notiz über den Strahlengang in dispergierenden Medien. [...] Beim Nachdenken darüber, ob die primäre Emission in einer Kugelwelle erfolgt, ist mir nun folgendes Experiment eingefallen Sehr schief einfallende Kathodenstrahlen *K* erzeugen auf einer von zwei Planplatten gleicher Dicke bei *A* flächenhaftes Licht. Die Platten erzeugen Interferenz ohne Gangunterschied — wenn

⁴²⁵ Siehe dazu (CPAE 13; 31; p. 109-110) (CPAE 13; _ ; p. xxxvi- xxxviii).

Emission in Kugelwelle erfolgt. Besteht ein ähnliches Experiment? Positives Ergebnis allerdings sehr wahrscheinlich.“ (CPAE 13; 47; p. 134)

Das Experiment, welches Einstein hier beschreibt (Abb. 19), kennen wir sowohl aus seinem Notizbuch (siehe Abb. 17) als auch von der Rückseite der Visitenkarte (siehe Abb. 18), die er Mach gegeben hat. In seiner Antwort wird Ehrenfest nicht auf das Experiment eingehen (CPAE 13; 54; p. 142-143). In einem weiteren Brief (am 15. März 1922) an Ehrenfest erläutert Einstein, was ihn zu diesem Thema noch beschäftigt:

„Es ist eigentlich gut, dass ich so viele Ablenkungen habe, denn sonst hätte mich das Quantenproblem längst ins Irrenhaus gebracht. Dass Licht, was nach diametral verschiedenen Richtungen emittiert ist <emittiert> interferieren kann, soll einwandfrei nachgewiesen sein. Wie soll das mit der energetischen Gerichtetheit der Elementarvorgänge zusammengereimt werden?“ (CPAE 13; 87; p. 188)

Im nächsten Brief (am 23. März 1922) präsentiert er dazu nun ein Gedankenexperiment:

„Was die Lichtemission anlangt, so kann sie – undulationstheoretisch betrachtet – nicht monochromatisch sein, wenn das emittierende Teilchen bewegt ist. Dies sieht man so:

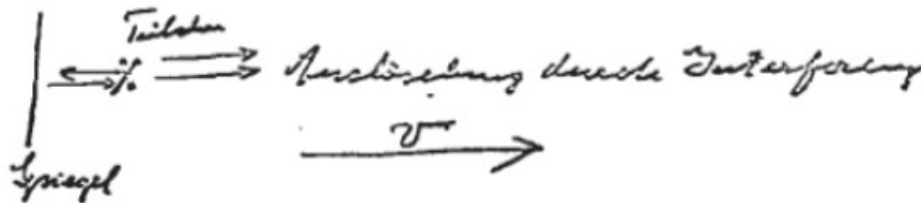


Abbildung 20: Quelle: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol13-doc/299> [Zugriff am 8. Jänner 2021].

Das direkte und reflektierte Licht mögen sich in der Lotrichtung zum Spiegel auslöschen. Dies muss noch dann der Fall sein (wegen Relativität, wenn die ganze Einrichtung in der Pfeilrichtung bewegt ist. Nach der üblichen Theorie kommt dies dadurch heraus, dass man zwei Dopplereffekte hat, nämlich 1) für Emission am bewegten Teilchen, 2) für Reflexion am bewegten Spiegel. Man kann nun offenbar nicht einen dieser Dopplereffekte weglassen, den andern aber beibehalten. Wenn man also verlangt, dass die Emission an bewegten <Teilchen> monochromatisch sei, muss man annehmen, dass das ‚Führungsfeld‘ seine Frequenz durch Reflexion am bewegten Spiegel nicht ändere. Man käme also zu dem Ergebnis, dass bei Reflexion an bewegten Teilchen Spiegeln die Quanten ihre ‚Frequenz‘ ändern, die Führungsfelder dagegen nicht. Dies ist unmöglich. Der Elementarakt der Emission kann also vom Bewegungs-Zustand des Teilchens nicht in dem Sinne unabhängig sein, dass das Emissionsfeld eines bewegten Teilchens durch das eines ruhenden Teilchens von passender Frequenz ersetzt werden kann. – Ich bin nun für das Irrenhaus vollständig reif.“ (CPAE 13; 107; p. 203)

Kurze Erläuterung des Gedankenexperiments: Auf einem Inertialsystem (IS') ist ein Teilchen, welches ein Photon emittiert – nehmen wir an, dass das Teilchen ein Elektron wäre. (Damit das passiert, müsste man sich das Teilchen als beschleunigt denken, worauf Einstein nicht

direkt eingeht.) Das Photon wird anschließend an einem Spiegel reflektiert und vom Elektron wieder emittiert; vom Wellenbild aus betrachtet, interferiert die Welle, welche zum Spiegel hinkommt, mit der am Spiegel reflektierten Welle destruktiv. Es kommt somit auf dasselbe hinaus.

Das Problem, welches Einstein jedoch nach seiner Ansicht sieht, ist: Aus unserem Inertialsystem (IS) aus betrachtet, bewegt sich das Inertialsystem (IS') mit der Geschwindigkeit v von uns weg. Da das Photon zuerst in unsere Richtung emittiert wird, bekommt es aufgrund des Doppler-Effekts eine „Blauverschiebung“ und nach der Reflexion am Spiegel eine „Rotverschiebung“ – somit ändert sich dessen Energie im Grunde nicht und kann wieder vom Elektron aufgenommen werden. Vom Wellenbild aus ist die Situation jedoch nicht ganz so einfach: Denn einerseits dürfte die Welle sich vor und nach dem Spiegel nicht ändern, damit es zu einer destruktiven Interferenz kommt, und andererseits sollte jedoch die Frequenz aufgrund des Dopplereffekts vor und nach dem Spiegel eine andere sein. Hier sieht Einstein offensichtlich nach dem Wellenmodell einen Widerspruch, weshalb er sich humorvoll „vollständig reif“ „für das Irrenhaus“ hält.⁴²⁶

⁴²⁶ In *The Collected Papers of Albert Einstein* heißt es:

„From a letter to Ehrenfest of 23 March 1922, we learn of one idea that Einstein had along these lines. Through a thought experiment, using a reflecting mirror, he tried to prove that light emitted by an accelerating particle cannot be monochromatic, an outcome that would pose a problem for the particle picture. Here Einstein mentioned the idea of a *Führungsfeld* ('leading field'), without, however, seeing a solution to his questions. He concludes his letter, ironically: 'I am now completely ripe for the insane asylum' (Doc. 107).“ (CPAE 13; _; p. xxxviii)

So gesehen könnte man Einsteins Aussagen auch als eine Kritik am Teilchenmodell ansehen. Wir bieten in dieser Arbeit eine alternative Interpretation an, wo Einstein sich eher am Teilchenbild orientiert haben könnte. Darauf deutet vielleicht auch ein Brief von Paul Ehrenfest an Niels Bohr (am 8. Mai 1922) hin:

„Einstein ist wieder hier! [...] Er bohrt und bohrt doch immerzu an der Energie-Impuls-Übertragung durch den Raum. Er kann sich nicht entschließen die Erhaltungssätze für den einzelnen Emissions- oder Absorptionsact fallen zu lassen und *dann* ist nun einmal wirklich ein Conflict zwischen den Int[er]ferenz-Facten einerseits und den großen Energiebeträgen, die local auftauchen andererseits. [...] Er denkt immer neue Experimente aus um, das *Wellenfeld* eines *bewegten* emittierenden Atoms möglichst nahe daraufhin zu kontrollieren ob es sich *klassisch* verhält. Sie haben nichts dagegen, das Atom ungefähr so langsam emittieren zu lassen als es den classischen Anschauungen entspricht. *Er* findet, das in Widerspruch mit den Argumenten, die dafür sprechen, dass die ‚Übergangszeit‘ zwischen zwei Quantenzuständen des Atoms sehr kurz gegenüber der ‚Verweilzeit‘ auf dem höheren Quantenzustande ist, die Emissionsdauer noch auf eine weitere Art kontrollieren, wie das schon die Cohärenzlänge thut: Wenn die Emission lange dauert so muss ein bewegtes leuchtendes Atom excentrische Kugelwellen aussenden. – Diese Excentricität will er durch spezielle Interferenzanordnungen kontrollieren wobei in seinem wunderbaren Gehirn noch immer ein sorgfältiger Unterschied gemacht wird zwischen dem *Factum* der Dopplerverschiebung und seiner *Interpretation* durch excentrische Kugelwellen.

Einstein wird an diesen Fragen entweder verrückt werden oder noch etwas ganz Tiefes herausfinden. – Er ist unglaublich witzig in dem Ausdenken solcher neuer ‚experimenta crucis‘ [...]“

Das Problem lässt sich jedoch gedanklich relativ einfach lösen: Wenn wir annehmen, dass es sich bei einem Photon (nach dem Wellenbild) um ein Wellenpaket handelt, welches zuerst vom Elektron emittiert und dann absorbiert wird, dann wird die destruktive Interferenz etwas verständlicher.

Interessant ist, dass bei diesem Gedankenexperiment von Einstein der Doppler-Effekt und ein Spiegel wieder eine wichtige Rolle spielen, genau wie in seinem zweiten Gedankenexperiment in seinem Notizbuch (Seite 21), wo es jedoch um den Doppler-Effekt zweiter Ordnung ging.

(CPAE 13; 184 ; p. 300-301). Siehe in diesem Zusammenhang auch allgemein (CPAE 13; 300; p. 423-426) (CPAE 13; _ ; p. xxxix-xl).

6.) Fazit und Ausblick der Arbeit

Im Folgenden werden die Erkenntnisse dieser Arbeit kurz zusammengefasst⁴²⁷ und Hinweise auf weitere mögliche Forschungsschwerpunkte gegeben (Ausblick).

6. Spezielle Relativitätstheorie

6.1. Theoretische Hintergründe: Die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien, Cohn und Abraham

Roman U. Sexl hat in seinem Artikel „Der unerschöpfliche Albert Einstein“ (Sexl, 1985) vor über 35 Jahren darauf aufmerksam gemacht⁴²⁸, dass „gerade rund um die Ursprünge der speziellen Relativitätstheorie einige wesentliche wissenschaftsgeschichtliche Fragen“ noch „offen“ (Sexl, 1985, p. 35) stehen und betont: „Eine der interessantesten Fragen betrifft die Quellen Einsteins.“ (Sexl, 1985, p. 35) Der Grund dafür ist verständlich: Einstein verweist in seinem Artikel „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“ (Einstein, 1905r) auf gar keine Quellen. Insofern ist es nicht einfach zu ermitteln, an wem er sich inhaltlich orientierte. Von Sexl selbst bekamen wir zwei wichtige Hinweise, die wir uns näher angesehen haben:

1. Die Kyoto-Rede von Einstein (Sexl, 1985, pp. 35-36).
2. Die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wilhelm Wien, Emil Cohn und Max Abraham im Jahre 1904:

„Bemerkenswert ist ferner die Parallelität zwischen Einsteins Aussagen und denjenigen von W. Wien, der in einem Artikel ‚Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper‘ ein Jahr zuvor in den *Annalen der Physik* gemeint hatte: [...]

Auch als Wien im nächsten Band der *Annalen der Physik* in eine Polemik mit E. Cohn über seine ‚Differentialgleichungen der Elektrodynamik‘ verwickelt wird, erwähnt er nochmals den ‚Michelson-Morleyschen Interferenzversuch‘, ohne sich veranlagt zu sehen, ein Literaturzitat anzuführen. [...]

In ähnlicher Weise schreibt auch M. Abraham im gleichen Band der *Annalen der Physik*: [...]

Es erscheint plausibel, daß Einstein diese Artikel, die in der Zeitschrift erschienen, in der er seit einigen Jahren publizierte, gekannt hat.“ (Sexl, 1985, pp. 36-37)

⁴²⁷ Detailliertere Zusammenfassungen finden sich am Ende der Kapitel.

⁴²⁸ Siehe dazu Abschnitt „1.1. 100. Geburtstag von Albert Einstein (1979) – bis jetzt“.

Mithilfe dieser beiden Hinweise ließen sich auch drei Forschungslücken⁴²⁹ finden, welche bis dato in der Mach-Einstein-Forschung noch nicht geschlossen wurden:

1. In seinem Artikel behandelt Sexl nicht, wie die Schriften von Wilhelm Wien, Emil Cohn und Max Abraham Einstein genau beeinflusst haben könnten.
2. Sexl hat den Versuch, die gesamte Kyoto-Rede von Einstein zu rekonstruieren, nicht unternommen.
3. Eine genauere Rekonstruktion der Kyoto-Rede könnte vor allem deshalb für die Mach-Einstein-Forschung zentral sein, weil Einstein darin öfter auf Mach hingewiesen hat. (Darauf ist Sexl in seinem Artikel nicht eingegangen.)

Wir haben in unserer Arbeit daher versucht diese Forschungslücken zu schließen und damit Sexls Werk weiterzuführen – jenes Vorgehen war nach unserer Ansicht im Sinne Sexls (Sexl, 1985, pp. 55-56).

Aufgrund der Forschungslücken haben wir drei Hypothesen vertreten:

1. Die Parallelen zwischen Wilhelm Wiens, Emil Cohns und Albert Einsteins Arbeiten zeigen, dass Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“ (Einstein, 1905r) zum Teil als eine Antwort auf die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien und Cohn angesehen werden kann.
2. Im Jahre 1921 erschien das gefälschte Vorwort, welches Mach als einen Relativitätsgegner darstellte und ihn damit nicht als Wegbereiter der Relativitätstheorie ansah. Aufgrund der Korrespondenz (1921) zwischen Einstein und Sommerfeld (bezüglich des gefälschten Vorwortes von Ernst Mach), der zeitlichen Nähe und des Inhalts der Kyoto-Rede ist ersichtlich, dass diese als eine Verteidigungsschrift gegenüber dem gefälschten Vorwort zu lesen ist. Dazu ist es jedoch notwendig sowohl auf den sozial-historischen Kontext der Rede einzugehen, als auch darauf, dass sich der Inhalt der Rede aufgrund der Quellen geschichtlich und wissenschaftlich tatsächlich rekonstruieren lässt.

⁴²⁹ Siehe dazu Abschnitt „1.2. Forschungslücke“.

3. Auf Basis von Punkt eins und zwei lässt sich zeigen, dass Machs Einfluss auf Einstein und die Relativitätstheorie größer war als gedacht. (Was auch aus Einsteins eigenen Aussagen hervorgeht.)

Wir haben daher zuerst im zweiten Kapitel⁴³⁰ die Arbeiten von Wilhelm Wien, Emil Cohn und Albert Einstein verglichen; somit die erste Forschungslücke geschlossen und Argumente für unsere erste Hypothese (und zugleich einen Teil der dritten Hypothese) gegeben.

Beispielsweise haben wir mehrere Argumente aufgezählt, weshalb Einstein von der wissenschaftlichen Diskussion zwischen Wien, Cohn und Abraham in Kenntnis gewesen sein müsste:

1. Einstein hat sich bereits sehr früh für Wiens Arbeit (Wien, 1898) interessiert und mit ihm Kontakt aufgenommen. Seine Überlegungen zu einem Experiment mit Spiegeln dürften davon inspiriert gewesen sein.
2. In der *Festschrift* (Meyer, 1904) zu Boltzmanns Ehren erscheint ein Buch, in welchem Aufsätze, unter anderem von Wien (Wien, 1904a) und Abraham (Abraham, 1904a), zu finden sind. Einstein interessiert sich damals für die Optik bewegter Körper (bzw. Spiegel) (siehe Punkt 1) – aber auch allgemein für die Thermodynamik/Strahlung – weshalb wir davon ausgehen können, dass er über diese Werke in Kenntnis war. Es lässt sich jedenfalls belegen, dass Einstein das Buch *Festschrift* (Meyer, 1904) kannte, da er die Aufgabe hatte, drei der Beiträge selbst zu überprüfen.
3. Im Jahr 1904 werden die Schriften (Wien, 1904b) (Wien, 1904c) (Wien, 1904d), (Wien, 1904f) (Wien, 1904e) von Wien in *Annalen der Physik* veröffentlicht, welche zu einer wissenschaftlichen Diskussion zwischen Wien, Cohn (Cohn, 1904) und Abraham (Abraham, 1904b) (Abraham, 1904c) in der genannten Zeitschrift führen werden. Es gibt gute Gründe anzunehmen, dass Einstein die wichtigsten Beiträge in den *Annalen der Physik* 1903 bis 1905 studierte, um sich auf dem Forschungsstand zu halten, da er auch selber darin publizierte (Einstein, 1901) (Einstein, 1902a) (Einstein, 1902b) (Einstein, 1903) (Einstein, 1904).
4. Weitere Argumente, weshalb Einstein gerade von der wissenschaftlichen Diskussion zwischen Wien, Cohn und Abraham in Kenntnis war, wären:

⁴³⁰ Siehe Abschnitt „2.1. 1. Hypothese: Wien und Cohns Einfluss auf Einstein“ und die dazugehörigen Unterabschnitte.

- a) Wien-Einstein: Aufgrund der Punkte 1-2 können wir annehmen, dass Einstein wohl auch an Wiens Arbeiten (Wien, 1904a) (Wien, 1904b) (Wien, 1904c) (Wien, 1904d) interessiert war.
- b) Wien-Cohn: Darüber hinaus weisen die erste Seite von Wien (Wien, 1904b), Cohn (Cohn, 1904a) und Einstein (Einstein, 1905r) Parallelen auf; aber auch inhaltlich haben die Arbeiten einige Gemeinsamkeiten. Auf Cohns Arbeiten wird Einstein später selber hinweisen – Einstein besaß eine Kopie von (Cohn, 1904a), welche er aufbewahrte.
- c) Wien-Abraham: Dass Einstein diese Diskussion ebenfalls verfolgte, ist auf Grund der Punkte 1-2 sehr wahrscheinlich. Vor allem weil eine Erwiderung von Abraham (Abraham, 1904b) im selben Band erschien, wie eine Arbeit von Einstein (Einstein, 1904). Diese Arbeit von Einstein (Einstein, 1904) zur Wärme und Strahlung passt auch inhaltlich gut zu der Diskussion zwischen Wien und Abraham.
- d) (Abraham-Cohn-Einstein: Sowohl Abraham als auch Cohn waren, wie Einstein, deutsch-jüdische theoretische Physiker. Da eine Wissenschaft stets auch eine soziale Dimension hat, könnte dieser Punkt ebenfalls von Bedeutung sein. Dies mögen weitere Arbeiten genauer analysieren. Allgemein kann man vermuten, dass Einstein sich in seinen Studien vor allem auch die Werke deutsch-jüdischer theoretischer Physiker ansah, da er sich dadurch an erfolgreichen Karrieren orientieren konnte.)

Aufgrund der obigen Argumente (1. – 3.) können wir davon ausgehen, dass Einstein mit hoher Wahrscheinlichkeit die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien, Abraham und Cohn verfolgte. Für die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie konnten wir somit auf vier wichtige Fragen eine Antwort geben⁴³¹:

1. Frage: Weshalb veröffentlichte Einstein seine Arbeit erst im Jahre 1905 in den *Annalen der Physik*?

⁴³¹ Siehe zweites Kapitel, Abschnitt „2.2.1. Zusammenfassung der Ergebnisse“.

Antwort: Einsteins Arbeit (Einstein, 1905r) war (unter anderem) eine Reaktion auf die wissenschaftliche Diskussion (im Jahre 1904) zwischen Wilhelm Wien, Emil Cohn und Max Abraham, ebenso wie auf die experimentellen Ergebnisse, die Alexander Eichenwald in diesem Zusammenhang besprach.

2. Frage: Weshalb lautet der Titel von Einsteins Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r)?

Antwort: Da der Titel eine Anlehnung an die Titel Wiens („Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper“) (Wien, 1904b) und Cohns („Zur Elektrodynamik bewegter Systeme“) (Cohn, 1904a) darstellt.

3. Frage: Weshalb ging Einstein auf der ersten Seite seiner Arbeit nicht genauer auf die Experimente von Fizeau und Michelson ein?

Antwort: Weil W. Wien (Wien, 1904b) bereits in seiner Schrift darauf genügend einging, weshalb auch E. Cohn (Cohn, 1904a) darauf nicht mehr hinwies. Da Wiens Arbeit erst relativ kurz vor Einsteins in den *Annalen der Physik* erschien, sah Letztgenannter dafür wahrscheinlich keine Notwendigkeit mehr. Weshalb Einstein später betonte, dass der Interferenzversuch von Michelson für ihn damals keine große Rolle spielte, liegt daran, dass Eichenwald (Eichenwald, 1904b) auf diesen ebenfalls nicht einging.

4. Frage: Einstein teilt seine Arbeit in zwei Teilbereiche: „Kinematik“ und „Elektrodynamik“ – gibt es wissenschaftsgeschichtlich eine Erklärung für dieses Vorgehen?

Antwort:

„I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907): Der erste Teil der Arbeit ist als eine Antwort auf die Diskussion zwischen Wien und Cohn

anzusehen, da die Arbeiten inhaltlich einige Gemeinsamkeiten haben. Eine nähere Analyse zeigt, dass Einstein wohl vom wissenschaftlichen Dialog zwischen den zwei Physikern profitierte, indem er ökonomisch wie Cohn auf das Konzept eines Äthers verzichtete und Raum und Zeit als physikalische Größen betrachtete.

„II. Elektrodynamischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 907-921): Teil zwei von Einsteins Arbeit kann als eine Antwort auf die Diskussion zwischen Wien und Abraham verstanden werden. Einstein räumt alle Missverständnisse zum Lichtdruck zu idealen Spiegeln aus dem Weg und zeigt zudem die Unmöglichkeit der Überlichtgeschwindigkeit der Elektronen auf.

Wir konnten somit zeigen, dass Sexls Intuition, dass die wissenschaftlichen Diskussionen zwischen Wilhelm Wien, Max Abraham und Emil Cohn auf Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) einen Einfluss hatten, sich als richtig erwiesen hat. Insofern konnten wir genügend Argumente bieten, die für unsere erste Forschungshypothese sprechen.

Im Anschluss haben wir uns auch die Frage gestellt⁴³², welcher dieser Abschnitte

„I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907)

„II. Elektrodynamischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 907-921)

bei der Findung der Speziellen Relativitätstheorie von essentieller Bedeutung war. Oder anders gefragt: In welchem dieser Kapitel liegt der (erkenntnistheoretische) Schlüssel, der in Einsteins Denken den Wendepunkt darstellte, um zur Speziellen Relativitätstheorie zu gelangen?

Da beide Teile in „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) vorkommen, können wir annehmen, dass das Studium beider Teile für Einstein wichtig war. Deshalb ist es möglich, die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie auf mindestens zwei recht unterschiedlichen Wegen zu rekonstruieren, wobei man den Schwerpunkt entweder auf die Reinterpretation der Mechanik legen kann, wodurch die Zusammenführung der

⁴³² Siehe zweites Kapitel, Abschnitt „2.2.2.1. 1. Frage“.

Mechanik und der Elektrodynamik in „I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907) gelingen konnte; oder man vertritt die Ansicht, dass das intensive Studium zur Elektrodynamik und Strahlung („II. Elektrodynamischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 907-921)) Einstein zur Speziellen Relativitätstheorie führte.

Wir haben in dieser Arbeit die erste Ansicht vertreten⁴³³, dass nämlich die Reinterpretation der Mechanik zu ihrer Zusammenführung mit der Elektrodynamik und Einstein schließlich zur Speziellen Relativitätstheorie führte. Nach unserer Ansicht liegt daher die (erkenntnistheoretische) Essenz der SRT in „I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907) – Argumente dafür wären:

1. Einstein sieht selbst die SRT als eine Zusammenführung der Mechanik mit der Elektrodynamik (CPAE 7; 31; p. 245).⁴³⁴
2. Mehrmals verweist Einstein darauf, dass die Interpretation der Zeit bzw. der Gleichzeitigkeit das zentrale Element war, mithilfe dessen er alle Probleme lösen konnte.⁴³⁵ Die Gleichzeitigkeit wird im ersten Abschnitt („I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907)), genauer auf den Seiten (Einstein, 1905r, pp. 892-895), behandelt.
3. Um die Mechanik mit der Elektrodynamik zu verbinden, mussten einige (dogmatische) Konzepte, wie der „absolute Raum“ (Mechanik), die „absolute Zeit“ (Mechanik) und der „Äther“ (Elektrodynamik) aufgegeben werden.⁴³⁶ Die

⁴³³ Siehe dazu Abschnitt „4.4.2.3. Thema III: Die Lösung des Widerspruchs (durch die Neudefinition der Zeit) [26]-[39]“.

⁴³⁴ Siehe dazu auch viertes Kapitel, Abschnitt „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“.

⁴³⁵ Siehe dazu viertes Kapitel, Abschnitt „4.4.2.3. Thema III: Die Lösung des Widerspruchs (durch die Neudefinition der Zeit) [26]-[39]“.

⁴³⁶ Siehe dazu

- zweites Kapitel (Abschnitte „2.1.1. Das O von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“, „2.1.2.1. Die zwei Phasen des A und O“, „2.1.2.2.3.2. Ad 2.:“, „2.2.2.1. 1. Frage“),
- drittes Kapitel (Abschnitte „3.3.1. Das Relativitätsprinzip der Mechanik und das Machsche Forschungsprogramm“, „3.3.2. Die Widersprüche in den Experimenten vor der Speziellen Relativitätstheorie“),
- viertes Kapitel (Abschnitte „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“, „4.4.2.3. Thema III: Die Lösung des Widerspruchs (durch die Neudefinition der Zeit) [26]-[39]“, „4.4.2.3.1 Die Neudefinition der Zeit: Cohns und Machs möglicher Einfluss“, „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“, „4.4.2.3.4. Der Doppler-Effekt als Erklärung für Einsteins Gedankenexperiment ‚Chasing the light‘“, „4.4.2.3.5.1.5. Didaktik“, „4.4.3.1.2. Antwort auf die 5. Frage“.)

physikalisch-philosophischen bzw. erkenntnistheoretischen Untersuchungen zu Raum und Zeit finden sich ebenfalls im ersten Teil Einsteins Arbeit (Einstein, 1905r, pp. 895-905).

4. Auch würde dadurch die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) besser verständlich werden: In der ART behält Einstein die aus dem kinematischen Teil errungenen Erkenntnisse grundsätzlich bei und erweitert diese unter dem Aspekt der gravitativen Wechselwirkung.⁴³⁷

Aus dieser Perspektive kommen physikalisch-philosophischen bzw. erkenntnistheoretischen Untersuchungen in „I. Kinematischer Teil.“ (Einstein, 1905r, pp. 892-907) eine hohe Bedeutung zu, wodurch den Vorarbeiten von Cohn⁴³⁸ und somit wiederum jenen von Mach eine zentrale Rolle zugewiesen werden kann. Insgesamt legt unsere Untersuchung daher nahe, dass Machs Einfluss auf die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie größer war als in der Forschung allgemein bereits angenommen.

Hinzu kommt, dass wir ebenso darauf hingewiesen haben⁴³⁹, dass das Dopplersche Prinzip (und in diesem Zusammenhang die Aberration) bei der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie eine außerordentlich wichtige Rolle eingenommen hat. Das ist insofern von zentraler Bedeutung, da Mach (unter anderem) gerade zum Dopplerschen Prinzip Pionierarbeit geleistet hat, in seinen Arbeiten das Konzept des Äthers ignorierte und sich bei seiner Beschreibung lediglich auf relative Bewegungen bezog.

Sowohl bei der Neuinterpretation der Zeit, die für Einstein den Wendepunkt darstellte, als auch beim Verzicht auf das Konzept des Äthers, dürfte der relativistische Doppler-Effekt jenes Gebiet gewesen sein, in welchem er den Unterschied zur klassischen Physik in Gedanken klar ausarbeiten konnte. Dieser Zugang dürfte für Einstein auch der Grund gewesen sein, weshalb er bei der gravitativen Zeitveränderung im homogenen Schwerfeld

⁴³⁷ Siehe dazu viertes Kapitel (Abschnitte „4.4.4. Die Analyse von Einsteins Rede: Teil II“, „4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]“, „4.4.5.4. Thema IV: Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]“) und allgemein auch „5.3. Anhang III: Das Machsche Prinzip – was meinte Mach?“).

⁴³⁸ Siehe zu Beurteilung von Cohns Vorarbeiten von anderen Forschern zweites Kapitel (Abschnitt „2.2.2.1. 1. Frage“) und drittes Kapitel (Abschnitt „3.2. Entstehungsgeschichte der SRT: Einstein erwähnt Cohn“.) Nach unserer Ansicht hatten Cohns erkenntnistheoretische Ansichten, die er größtenteils von Mach übernahm, enormen Einfluss zur Entstehungsgeschichte der SRT – siehe dazu zweites Kapitel (Abschnitt „2.1.2.1. Die zwei Phasen des A und O“, „2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“), drittes Kapitel und viertes Kapitel (Abschnitt „4.4.2.3.1 Die Neudefinition der Zeit: Cohns und Machs möglicher Einfluss“).

⁴³⁹ Siehe viertes Kapitel (Abschnitt „4.2.1. Hypothesen zur Kyoto-Rede“, Zusatzhypothese).

ebenso den Doppler-Effekt anwendete. Das Dopplersche Prinzip war für ihn somit sowohl bei der Erstellung der SRT als auch der ART⁴⁴⁰ ein wichtiges Instrument. Deshalb haben wir einerseits die Geschichte des Dopplerschen Prinzips und die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie genauer angesehen und andererseits die Beziehung der Entwicklungen zueinander beleuchtet.⁴⁴¹ Drei Punkte, nämlich

- Physikalische Gründe⁴⁴²
- Historische Gründe⁴⁴³

⁴⁴⁰ Siehe Abschnitt „4.4.5.2.3. Gedankenexperiment: Gravitationsbedingte Rotverschiebung“.

⁴⁴¹ John Stachel (Stachel, 1982) (Stachel, 1998) und John Norton (Norton, 2013) (Norton, 2014) haben gute Argumente für die Rolle der Emissionstheorie (von Walter Ritz) bei der Entstehung der speziellen Relativitätstheorie vorgelegt – nach Einsteins eigener Aussage war dies jedoch nicht der Fall – siehe Einsteins Gedanken zur Emissionstheorie in „Conversations with Albert Einstein“ (Shankland, 1963, pp. 49, 56). In dieser Arbeit haben wir daher eine Alternative zu diesem „Dilemma“ angeboten: Der Doppler-Effekt und in diesem Zusammenhang die Aberration waren die Themen, die Einsteins Denken bei der Schaffung der Speziellen Relativitätstheorie begleiteten. Sein Interesse an der Emissionstheorie war unter anderem ein Teil seiner Untersuchung der Aberration (CPAE 6; 7; p. 45 und 49), wie seine Notizen darlegen, die er für seine Vorlesungen in Berlin (1914/1915) angefertigt hat. (Für eine Gesamteinschätzung zu Ritz' Theorie siehe aber auch „Einstein on the Theory of Relativity“ (CPAE 2; _; p. 263), „Einstein's Manuscript on the Special Theory of Relativity“ (CPAE 4; _; p. 5) und (CPAE 4; 1; p. 34-35).)

An dieser Stelle sei kurz angemerkt: Es ist etwas schade, dass sowohl Einsteins „Bemerkungen zu P. Harzers Abhandlung »Über die Mitführung des Lichtes in Glas und die Aberration«“ (Einstein, 1914I) als auch seine Vorlesungsunterlagen (siehe CPAE 6; 7; p. 45 und 49) in *The Collected Papers of Albert Einstein* nicht ins Englische übersetzt wurden. Beide würden die Bedeutung des Dopplerschen Prinzips und der Aberration (Einstein, 1914I, pp. 9-10) (CPAE 6; 7; p. 45 und 49) deutlich zeigen.

Generell gibt es bereits Simulationen, die die Parallelen zwischen dem Doppler-Effekt und der Emissionstheorie erklären – siehe beispielsweise (Poessel, 2011). Dieses Dilemma ist daher relativ einfach zu lösen.

⁴⁴² Siehe dazu die Abschnitte „4.4.2.3.5.1.4. Historischer Zufall oder konzeptionell notwendig?“ und die „4.4.2.3.5.1.5. Didaktik“.

⁴⁴³ Siehe dazu die Abschnitte „2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“, „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“, „4.4.2.3.3. Der Doppler-Effekt als Lösung für die Diskussion zwischen Wien und Abraham“ und die „4.4.2.3.1 Die Neudefinition der Zeit: Cohns und Machs möglicher Einfluss“.

Dass Machs Arbeiten zum Doppler-Effekt für die Entstehungsgeschichte der SRT wahrscheinlich von Bedeutung waren, wurde bereits von Susan G. Sterrett in ihrer Arbeit „Sounds Like Light: Einstein's Special Theory of Relativity and Mach's Work in Acoustics and Aerodynamics“ (Sterrett, 1998) untersucht. In ihrer Arbeit (Sterrett, 1998) fehlt jedoch die Erwähnung, dass Mach dem Äther keine wichtige Rolle gab und neben dem Teilchenmodell auch das Wellenmodell verwendete. Auch wird in ihrem Artikel auf Woldemar Voigt nur am Rande hingewiesen (Sterrett, 1998, pp. 19, fn. 21), der in diesem Zusammenhang aber höchst wichtig ist.

(Leider wurde Voigts wichtiger Beitrag von vielen Wissenschaftlern übersehen, obwohl Lorentz selber darauf hinwies.) Ebenso wird in ihrer Arbeit der österreichische Physiker Emil Kohl nicht besprochen. Gerade Kohls Hinweise in seiner Arbeit „Über ein Integral der Gleichungen für die Wellenbewegung, welches dem Dopplerschen Prinzip entspricht“ auf Machs und Voigts Schriften zum Doppler-Effekt (Kohl, 1903a, pp. 96, fn. 1) dürfte Einstein gekannt haben. Emil Kohl wird ebenso in anderen Arbeiten zur Speziellen Relativitätstheorie gar nicht erwähnt, z.B.: (French, 1985) (Miller, 1998) (Norton, 2004) (Janssen & Stachel, 2004). In *The Collected Papers of Albert Einstein* finden wir Kohl in nur in einem Dokument (CPAE 5; 400; p. 470-474). In diesem Dokument bzw. Referat, das von Einstein geschrieben wurde, werden die Kandidaten und ihre Arbeiten, die Einsteins Nachfolge auf dem Sessel der theoretischen Physik in Prag im Jahre 1912 übernehmen sollen, dem Professoren-Kollegium vorgestellt.

Ebenso wird in Sterretts Schrift nicht auf die Diskussion zwischen Wilhelm Wien und Max Abraham eingegangen, wo das Dopplersche Prinzip eine wichtige Rolle spielt.

- Methodische Gründe,

die unsere Sichtweise (bzw. die Zusatzhypothese) unterstützen, haben wir detailliert besprochen. Ebenfalls haben wir erklärt, weshalb die bedeutende Rolle des Dopplerschen Prinzips in der Forschung größtenteils übersehen wurde.⁴⁴⁴

Wenn man von der Perspektive, dass das Dopplersche Prinzip bei der Entstehungsgeschichte eine wichtige Rolle gespielt hat, ausgeht, kann man zu einem einfachen Überblick über den Aufbau von Einsteins „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) gelangen: Um die Rolle des Äthers zu verstehen, untersuchte Einstein das Thema des Doppler-Prinzips und der Aberration (Einstein, 1905r, p. §7). Dieses Thema hat ihn die ganze Zeit begleitet, weil er sich fragte, wie sich das Licht im luftleeren Raum ausbreiten würde (Einstein, 1905r, p. §6). Dies führte ihn wiederum dazu, die Geschwindigkeitsadditionsformel in der Mechanik zu überdenken (Einstein, 1905r, p. §5). Dafür musste er jedoch zunächst die Transformation von Raum und Zeit physikalisch interpretieren (Einstein, 1905r, pp. §3-4) – Voraussetzung war, dass er die Relativität von Längen und Zeiten (Einstein, 1905r, p. §2) verstand, wofür aber vor allem notwendig ist, der Relativität der Gleichzeitigkeit auf den Grund zu gehen (Einstein, 1905r, p. §1).⁴⁴⁵

6.2. Experimentelle Hintergründe: Spiegel-Experiment, Magnet und Leiter, Experiment von Fizeau und Michelson

6.2.1. *Experiment mit Spiegeln*⁴⁴⁶

Bis jetzt haben wir aus der Perspektive der theoretischen Physik die Entstehungsgeschichte der SRT erläutert. Unsere Untersuchung hat jedoch deutlich gezeigt, dass die damaligen experimentellen Resultate wesentlich zur Entwicklung der SRT beigetragen haben. Wie sowohl aus Einsteins Korrespondenz als auch aus seiner Kyoto-Rede (Haubold & Yasui, 1986, p. 273) hervorgeht, dachte Einstein zu Beginn daran, selbst ein Experiment mit Spiegeln zu machen, um die Eigenschaften des Äthers zu messen. Auf diese Idee kam er

⁴⁴⁴ Siehe dazu viertes Kapitel (Abschnitte „4.4.2.3.5. Wieso wurde die bedeutende Rolle des Dopplerschen Prinzips übersehen?“, 1.- 4.Grund).

⁴⁴⁵ Siehe dazu viertes Kapitel (Abschnitt „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“).

⁴⁴⁶ Siehe dazu zweites Kapitel (Abschnitt „2.1.2. Das A von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“) und viertes Kapitel (Abschnitt „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“).

höchstwahrscheinlich aufgrund der Schrift „Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen“ (Wien, 1898) von Wilhelm Wien, wo Wien empfiehlt:

„Als Experiment, welches für diese Annahme von Wichtigkeit wäre, empfiehlt sich der Versuch, ob der Aether durch die Bewegung reflectirender durchsichtiger Medien in Bewegung gesetzt wird.“ (Wien, 1898, p. XVII)

Wilhelm Wiens Arbeit (Wien, 1898) war daher nicht nur wegweisend, sondern zugleich eine der ursprünglichen Anregungen für Einstein bei der Entwicklung der Relativitätstheorie. Das wird vor allem aus seinem Brief an seine zukünftige Gattin Mileva Marić deutlich, den er (am 28? September 1899) schreibt:

„[...] ich habe viel büchergewurmt & sehr viel ausgetüftelt, zum Teil sehr interessant. Auch hab ich an Professor Wien in Aachen geschrieben über die vom ‚Prinzipal‘ so stiefmütterlich behandelte Arbeit über Relativbewegung des Lichtäthers gegen die ponderable Materie. Ich habe von diesem Mann eine sehr interessante Abhandlung vom Jahr 1898 über diesen Gegenstand gelesen. Er wird mir via Polytechnikum schreiben (wenns gewiß ist!).“
(CPAE 1; 57; p. 233-234)

Etwa zur selben Zeit begann er auch Boltzmanns und Machs Werke zu lesen – siehe dazu Einsteins Brief (am 10. September 1899) (CPAE 1; 54; p. 230) an Mileva Maric, die aus Österreich-Ungarn stammte. Dass Einstein sich an österreichischen Physikern orientierte, war wohl kein Zufall, weil er sich nämlich (Jänner-März) 1901 offenbar in Wien für eine Stelle bewarb (während auch Mach in Wien war) – siehe dazu den Brief (8 Jänner – 19 März 1901) von seiner zukünftigen Gattin Mileva Maric an eine Freundin (Helene Savić) (CPAE 1; 87; p. 274-275). Aus einem weiteren Brief von Einstein an Maric, wissen wir, dass er sich für „Relativbewegungen“ interessiert:

„Wie glücklich und stolz werde ich sein, wenn wir beide zusammen unsere Arbeit über die Relativbewegung siegreich zu Ende geführt haben!“⁴⁴⁷ (CPAE 1; 94; p. 282)

Aus einem späteren Brief von Einstein an seinen Freund Marcel Großmann (6? September 1901) erfahren wir, dass er in diesem Zusammenhang an Interferenzversuche dachte (CPAE 1; 122; p. 315-316). Insofern ist es nicht unwahrscheinlich, dass Einstein sich auch Ernst Machs Studien zu Akustik und Optik ansah, wie *Beiträge zur Doppler'schen Theorie der Ton-*

⁴⁴⁷ Allgemein wären wissenschaftliche Arbeiten, welche die Rolle von Maric genauer untersuchen, für die Einstein-Forschung nicht von Nachteil.

und Farbbänderungen durch Bewegung. *Gesammelte Abhandlungen* (Mach, 1873a) und *Optisch-akustische Versuche: die spectrale und stroboskopische Untersuchung tönender Körper* (Mach, 1873b); oder auch die Arbeit „Ein neuer Interferenzrefraktor“ (Mach, 1891) von Ernst Machs Sohn Ludwig Mach usw. Es ist daher nicht unwahrscheinlich, dass er seine Gedanken mit Hilfe von Emil Cohns (Cohn, 1900a) (Cohn, 1900b) (Cohn, 1901) und Ernst Machs Arbeiten (Mach, 1873a) (Mach, 1873b) weiterentwickelte. Interessant ist beispielsweise, dass wir bei Mach ebenso einen Vorschlag für ein Experiment mit Spiegeln finden (Mach, 1873a, p. 32) – wir erinnern uns an Einsteins Brief an Maric (CPAE 1; 54; p. 230) – und wenn wir uns Einstein Buch *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie* (1917) (Einstein, 2009) ansehen, dann sind Parallelen zu Machs Arbeiten gegeben. Auch dort bespricht Einstein ein Gedankenexperiment mit Spiegeln (Einstein, 2009, p. 35). Ein paar Seiten zuvor (Einstein, 2009, p. 33) erklärt er, wie man anhand der Spektrallinien den Doppler-Effekt bestimmen kann. Interessant ist, dass es zuerst Mach war, der den Vorschlag machte (Mach, 1873a, pp. 17-18), wie man mit Spektrallinien den Doppler-Effekt messen könnte. Eine Seite zuvor bespricht Mach in seiner eigenen Arbeit die Machsche Pfeife (Mach, 1873a, p. 31) – ganz analog argumentiert Einstein über den „Ton einer Orgelpfeife“ (Einstein, 2009, p. 10).⁴⁴⁸ Doch kommen wir nun zurück zu Machs experimentellen Überlegung mit den Spiegeln (Mach, 1873a, p. 32). Dieses Experiment schlug er vor, um mit dem Doppler-Effekts die *relative Bewegung der Erde zur Sonne* zu messen – siehe dazu die möglichen Parallelen in (Einstein, 2009, p. 36) und [16] in Einsteins Rede. Bemerkenswert ist, dass auch Mach bei seiner Argumentation für den Doppler-Effekt aus dem Jahre 1860 (Mach, 1873a) nicht auf den Äther eingeht, was keinen Einzelfall darstellt; denn im selben Jahr erschien auch sein Buch *Optisch-akustische Versuche: die spectrale und stroboskopische Untersuchung tönender Körper* (Mach, 1873b) – in diesem Buch verwendet Mach den Begriff „Äther“ nicht ein einziges Mal, obwohl er detailliert auf die Interferenzerscheinungen des Lichtes eingeht (Mach, 1873b, pp. 94-108), weil er die Eigenschaften von Licht- und Schallwellen (in Körpern) untersucht. Da Mach dem Äther die bedeutende Rolle abspricht, wird er eindeutig zum Wegbereiter für Einsteins Spezielle Relativitätstheorie. Somit kann man Mach zuschreiben, dass er sowohl dem absoluten Raum, der absoluten Zeit, als auch dem Äther „eine Abfuhr erteilte“ und die wichtigsten Puzzlestücke zur Verfügung stellte. Doch es gibt noch einen weiteren Punkt,

⁴⁴⁸ Siehe in diesem Zusammenhang allgemein auch (Sterrett, 1998, pp. 18, 20).

welcher einen Hinweis verdient: in *Optisch-akustische Versuche* (Mach, 1873b) geht Mach auf die Molekulartheorie ein (Mach, 1873b, pp. 26-27, 33, 38-39, 43, 51, 53, 55-59). Für ihn ist es offensichtlich kein Problem, die Molekulartheorie zusätzlich zur Wellentheorie anzuwenden. In *Beiträge zur Doppler'schen Theorie der Ton- und Farbänderungen durch Bewegung* (Mach, 1873a) verwendet er zudem das Teilchenmodell und das mathematische Wellenmodell. Die Tatsache, dass Mach Lichtteilchen in die Diskussion einbringt, ist ein genialer Trick, der direkt als Vorstufe zu Einsteins Lichtquantenhypothese angesehen werden kann.⁴⁴⁹

6.2.2. Relativbewegung von Magnet und Leiter⁴⁵⁰

Einstein erläutert gleich zu Beginn seiner Arbeit das Gedankenexperiment⁴⁵¹ über die Relativbewegung von Magnet und Leiter (Einstein, 1905r, p. 891). Aus *The Collected Papers of Albert Einstein* erfahren wir (CPAE 2; 23; p. 306, fn. 1), dass Einstein wahrscheinlich sein Gedankenexperiment mit dem Magneten und einem Leiter aus dem Buch *Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität* (Föppl, 1894) von Föppl übernommen und analysiert hat. Jedoch scheint das eine zu verkürzte Darstellung zu sein; denn 1.) ist nicht klar, welche Rolle es bei der Entstehungsgeschichte der SRT tatsächlich gespielt hat, und 2.) dürfte er sich bei diesem Gedankenexperiment auf die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien, Cohn, Abraham und Eichenwald bezogen haben. Geben wir nun nähere Erläuterungen zu den genannten zwei Punkten:

Ad 1.) Welche Rolle dieses Gedankenexperiment bei der Entstehungsgeschichte der SRT hatte, ist nicht ganz klar – beispielsweise erläutert Einstein in seiner Schrift (aus dem Jahre 1920) „Gedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt“ (CPAE 7; 31; p. 245)⁴⁵² im Kapitel „I. Die spezielle Relativitätstheorie.“ (CPAE 7; 31; p. 245-

⁴⁴⁹ Diesen Hinweis verdanke ich Bernhard Baumgartner.

⁴⁵⁰ Siehe dazu zweites Kapitel (Abschnitt „2.1.2.2.3. Der Diskurs und seine experimentelle Ebene: Magnet und Leiter“).

⁴⁵¹ Das Gedankenexperiment spielt unter anderem in der Rekonstruktion „Einstein's Special Theory of Relativity and the Problems in the Electrodynamics of Moving Bodies that Led him to it“ (Norton, 2004) von John Norton eine wesentliche Rolle. In dieser Arbeit (Norton, 2004) kommen aber weder Wilhelm Wien, Emil Cohn, Max Abraham noch Alexander Eichenwald vor – unsere Rekonstruktion ist daher grundsätzlich von Nortons verschieden. (Das soll jedoch nicht bedeuten, dass Nortons Rekonstruktion nicht richtig ist – unsere bietet eine ebenso auf Fakten basierende Alternative an.)

⁴⁵² Der Titel dürfte eine Anlehnung an Machs Buch *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt* gewesen sein – siehe (CPAE 7; 31; p. 279, fn. 2).

264) detailliert die Entwicklungen, welche zur Speziellen Relativitätstheorie geführt haben. Darin wird sein Gedankenexperiment von Leiter und Magnet jedoch nicht thematisiert. Überraschenderweise taucht es jedoch im zweiten Kapitel „II. Die allgemeine Relativitätstheorie.“ auf (CPAE 7; 31; p. 264-265). Es ist jedenfalls seltsam, weshalb Einstein dieses Gedankenexperiment von Leiter und Magnet erst im Kapitel zur Allgemeinen Relativitätstheorie erwähnt bzw. es zuvor vergessen hat, wenn es so wichtig war.

Ad 2.) Einstein hat wohl erst 1903/1904 begonnen sich mit diesem Thema Relativbewegung von Magnet und Leiter intensiv zu beschäftigen. In den *Annalen der Physik* – der ganzen Reihe 316. Band; Folge 5 – ist Einsteins Arbeit „Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik“ (Einstein, 1903) erschienen⁴⁵³. Der erste Artikel in diesem Band (und in derselben Folge) der *Annalen der Physik* ist die Arbeit „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1903a) von Alexander Eichenwald⁴⁵⁴, wo er gleich zu Beginn auf bewegte Leiter eingeht – siehe Abschnitt „I. Bewegte Leiter“ (Eichenwald, 1903a, pp. 1-4). In seiner nächsten Arbeit mit demselben Titel „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1903b) (im selben, der ganzen Reihe, 316. Band, Folge 6) fasst er die Ergebnisse seiner Untersuchungen zusammen (Eichenwald, 1903b, p. 441). Einstein, der stets auch die experimentelle Lage verfolgte, dürfte sich wahrscheinlich vor allem nach 1903 durch die Ergebnisse von Eichenwald für Relativbewegung von Leiter und Magnet (Einstein, 1905r, p. 891) interessiert haben. Die Experimente von Eichenwald zeigten, dass man von einem überall ruhenden Äther ausgehen sollte. Wenn der Äther überall ruht, so ist der Schritt die Gleichwertigkeit von Inertialsystemen und somit das Relativitätsprinzip zu postulieren, nicht mehr weit, denn ein überall ruhender Äther hat (in gewissem Sinne) denselben Einfluss, wie gar kein Äther. Doch der Beitrag von Eichenwalds Arbeiten (Eichenwald, 1903a) (Eichenwald,

⁴⁵³ Dieser Band der *Annalen der Physik* ist überaus interessant und wichtig – siehe dazu auch den Abschnitt „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“.

⁴⁵⁴ Arthur I. Miller geht in seinem Buch nur auf diese Arbeit (Eichenwald, 1903a) von Eichenwald mehrmals ein (Miller, 1998, pp. 14, 149-150, 168). Er bringt Eichenwalds Schrift mit Einsteins Arbeit (Einstein, 1905r) nicht direkt in Verbindung. Der Grund dürfte sein, dass Miller die späteren Arbeiten von Eichenwald nicht thematisiert. In anderen Schriften zur Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie wird Eichenwald gar nicht erwähnt, z.B.: (French, 1985) (Stachel, 2002) (Norton, 2004) (Janssen & Stachel, 2004). In *The Collected Papers of Albert Einstein* finden wir einige Seiten zu Eichenwald. Beispielsweise geht Einstein in seinem Manuskript zur Speziellen Relativitätstheorie, welches er zwischen 1912-1914 fertigte – das aber nie veröffentlicht wurde – zuerst auf Magnet und Leiter ein (CPAE 4; 1; p. 15-27) und in diesem und weiterem Zusammenhang verweist er auch auf die Arbeit(en) von Eichenwald (CPAE 4; 1; p. 17).

1903b) für die Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie dürfte weitaus größer sein. Wir haben darauf hingewiesen⁴⁵⁵, dass 1904 in den *Annalen der Physik* zwei Arbeiten „Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper“ (Teil I) (Wien, 1904b) und „Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper. II.“ (Teil II) (Wien, 1904c) von Wilhelm Wien erschienen sind, wo Wien die Arbeiten von Emil Cohn und Max Abraham diskutierte, woraufhin es zu einer wissenschaftlichen Diskussion zwischen E. Cohn, M. Abraham und W. Wien kam, wovon Einstein maßgeblich profitierte⁴⁵⁶. Beide Arbeiten (Wien, 1904b) (Wien, 1904c) von Wien erschienen in den *Annalen der Physik* in (der ganzen Reihe) 318. Band (Folge 4). Im selben Band (der ganzen Reihe 318. Band, Folge 4) finden wir auch die Arbeit „Ueber das innere Feld der Elektronen“ (Eichenwald, 1904a), wo Eichenwald, ausgehend von Max Abrahams Elektronentheorie, versucht das innere Feld des Elektrons zu beschreiben (Eichenwald, 1904a, pp. 770, 776-777, 782). Dass die Diskussion um Abrahams Elektronentheorie für die Entstehungsgeschichte eine Rolle gespielt hat, haben wir detailliert erläutert. Im selben Band (der ganzen Reihe 318. Band, Folge 5) wird eine weitere Schrift von Eichenwald erscheinen – diese trägt denselben Titel „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1904b) wie seine früheren Artikel (Eichenwald, 1903a) (Eichenwald, 1903b) und ist somit von großer Bedeutung. Gleich auf der ersten Seite verweist er darauf, dass ihn Emil Cohn auf einen Fehler in seiner Arbeit (Eichenwald, 1903b) aufmerksam machte, „wofür“ er „ihm“ seinen „verbindlichsten Dank“ ausspricht (Eichenwald, 1904b, p. 919). Auch in dieser Arbeit wird er die „Unbeweglichkeit des Äthers“ (Eichenwald, 1904b, p. 923) betonen usw. Interessant ist, dass Eichenwald im nächsten und letzten Abschnitt „**Zur Theorie.**“ (Eichenwald, 1904b, pp. 937-943) nun drei Theorien miteinander vergleicht; und zwar jene

- von H. Hertz, wo der Äther mit der Materie zusammen bewegt wird (Eichenwald, 1904b, p. 938),
- von H. Lorentz, wo bei bewegter Materie der Äther ruht (Eichenwald, 1904b, p. 938) und

⁴⁵⁵ Siehe dazu zweites Kapitel (Abschnitt „2.1.2.2. Das A: Wissenschaftlicher Dialog zwischen E. Cohn, W. Wien und A. Einstein“).

⁴⁵⁶ Siehe dazu zweites Kapitel (Abschnitte „2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“ und „2.1.2.2.2. Der Diskurs zwischen Abraham und Wien: Optik/Elektrodynamik und Thermodynamik“).

- von E. Cohn, wo die elektrische bzw. die magnetische Feldintensität der bewegten Körper etwas anders definiert wird als bei Lorentz (Eichenwald, 1904b, p. 938)⁴⁵⁷.

Anschließend erklärt Eichenwald, dass aufgrund der Messgenauigkeit seiner Versuche eine experimentelle Unterscheidung zwischen der Lorentzschen und der Cohnschen Theorie nicht möglich ist (Eichenwald, 1904b, p. 939) – weshalb er von da an von einer „Lorentz-Cohnschen Theorie“ (Eichenwald, 1904b, p. 939) spricht (Eichenwald, 1904b, pp. 938-939).

Da die Experimente nur eine Genauigkeit von erster Ordnung $\left(\frac{v}{c}\right)$ erreichen können, kann man nach Eichenwald E_0 mit E gleichsetzen, was gleichbedeutend ist mit der Aussage, dass ein Äther nicht benötigt wird, um die experimentellen Resultate erklären zu können – in dem Fall wäre ebenso $M_0 = M$.⁴⁵⁸ Das elektrische Feld und das magnetische Feld, wie bei einem Leiter und einem Magnet, würden dann nur von der Relativbewegung zueinander abhängen. Danach bespricht Eichenwald zwei (experimentelle) Fälle, wo er die Hertzsche Theorie der Lorentz-Cohnschen Theorie gegenüberstellt. In beiden Fällen gewinnt (nach seiner Ansicht) die Theorie von Lorentz-Cohn und die Hertzsche verliert (Eichenwald, 1904b, pp. 940-941); er beendet seine Arbeit mit den Worten:

„Wir haben gesehen, daß nach der Hertzschen Theorie dem Äther dieselbe Geschwindigkeit wie der Materie zugeschrieben wird; nach *H. Lorentz* bleibt der Äther in Ruhe; und auch *E. Cohn* kommt zu der Anschauung eines überall ruhenden Äthers. *Da unsere Versuche gegen die Hertzsche Annahme sprechen, so müssen wir den Äther auch in den bewegten Dielektrika als ruhend annehmen.*

Ganz analoge Bedeutung für die rein optischen Erscheinungen haben die bekannten Versuche von Fizeau und von Michelson und Morley mit dem strömenden Wasser; aber auch hier ist die Genauigkeit nicht groß genug, um zwischen den Theorien von *H. Lorentz* und *E. Cohn* zu entscheiden.“ (Eichenwald, 1904b, p. 943)

Das Experiment von Fizeau, welches von Michelson und Morley wiederholt wurde, hat ebenso nur eine Genauigkeit erster Ordnung $\left(\frac{v}{c}\right)$, betont Eichenwald, und kann somit ebenfalls nicht zwischen den Theorien von Lorentz und Cohn unterscheiden. Somit dürfte

⁴⁵⁷ Wir haben bereits im Abschnitt „2.1.2.2.1. Der Diskurs zwischen Cohn und Wien: Mechanik und Elektrodynamik“ darauf hingewiesen, dass Cohn bei seinen Konzepten auf einen Äther verzichtet.

⁴⁵⁸ Für ein besseres Verständnis seien an dieser Stelle die physikalischen Symbole erklärt:

M_0 = magnetische Feldintensität im Äther

E_0 = elektrische Feldintensität im Äther

M = magnetische Feldintensität im bewegten Körper

E = elektrische Feldintensität im bewegten Körper

Siehe dazu (Eichenwald, 1904b, p. 937).

Einstein endgültig klar geworden sein, dass man auf einen Äther, ähnlich wie Mach und Cohn, verzichten konnte. Geben wir nun Einsteins einleitende Worte wieder:

„Daß die Elektrodynamik *Maxwells* – wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt⁴⁵⁹ – in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber – Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt – zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.⁴⁶⁰

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum 'Lichtmedium' zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung⁴⁶¹ bereits erwiesen ist. [...]“ (Einstein, 1905r, p. 891)

Wenn wir Eichenwalds Arbeit (Eichenwald, 1904b) heranziehen, werden die Zeilen von Einstein verständlich. Vor allem wird auch klar, weshalb Einstein (später) oft betonte, dass der Michelson-Morley Interferenzversuch für ihn nicht wichtig war, sondern das Experiment von Fizeau (Shankland, 1963, p. 48). Er hatte sich nämlich zum Schluss wohl mehr an Eichenwald orientiert und dieser hatte vor allem auf das Experiment von Fizeau hingewiesen.

Wir haben bereits darauf aufmerksam gemacht: Aus *The Collected Papers of Albert Einstein* (CPAE 2; 23; p. 306, fn. 1) erfahren wir, dass Einstein wahrscheinlich sein Gedankenexperiment mit dem Magneten und einem Leiter aus dem Buch *Einführung in die*

⁴⁵⁹ Eichenwald erklärt: „Allen drei Theorien ist dasselbe Maxwellsche Gleichungssystem zugrunde gelegt [...]“ (Eichenwald, 1904b, p. 937), nur einige Begriffe, welche die Feldlinien physikalisch definieren, haben eine andere Bedeutung (Eichenwald, 1904b, p. 938).

⁴⁶⁰ Mit elektrischen Kräften ist das elektrische Feld gemeint – denken wir hier an (Eichenwald, 1904b, pp. 938-939): $E = E_0$.

⁴⁶¹ Siehe dazu Eichenwalds Erklärung zu experimentellen Resultaten erster Ordnung (Eichenwald, 1904b, pp. 938-939, 943) und den Abschnitt „4.4.2.2. Thema II: Der Widerspruch [16]-[25]“.

Maxwell'sche Theorie der Elektrizität (Föppl, 1894) von Föppl übernommen und analysiert hat. Diese Darstellung ist, wie wir zeigen konnten, etwas zu knapp.⁴⁶² In Föppls Buch *Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität* (Föppl, 1894) gibt es einen fünften Abschnitt „Die Elektrodynamik bewegter Leiter“ (Föppl, 1894, pp. 307-355). Dort diskutiert Föppl tatsächlich gleich zu Beginn „§ 114. Relative und absolute Bewegung im Raume“ (Föppl, 1894, pp. 307-311) und erklärt seine Gedanken zur Relativbewegung zwischen Magnet und Leiter. Damals tendierte Föppl zu einem mit Äther ausgefülltem absoluten Raum (Föppl, 1894, pp. 307-308) und vertrat offensichtlich die absolute Bewegung, weshalb er dem Relativitätsprinzip skeptisch gegenüber stand (Föppl, 1894, p. 309). Diese Sichtweise konnte für Einstein nicht dienlich gewesen sein. Das überrascht auch wenig, weil Föppl damals kein Machianer (im engsten Sinne) war – sondern den Überlegungen von C. Neumann folgte (Föppl, 1894, p. 309) usw.⁴⁶³ Erst später ließ er sich in seiner Arbeit „Über absolute und relative Bewegung“ (Föppl, 1904b, p. 383) von Machs Überlegungen leiten: Er gab den absoluten Raum auf und unterstützte das Relativitätsprinzip (Föppl, 1904b, p. 383). Es ist sehr wahrscheinlich, dass Einstein sich von diesem Wandel (1904/1905) hat mitreißen lassen. So begann sich Einstein 1903 bis 1905 für die relative Bewegung von Magnet und Leiter und somit für „§ 114. Relative und absolute Bewegung im Raume“ (Föppl, 1894, pp. 307-311) zu interessieren. Wenn wir uns an die wissenschaftliche Diskussion zurückerinnern, dürfte es Einstein interessiert haben, dass Max Abraham das Buch *Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität* (Föppl, 1894) von Föppl im Jahre 1904 in überarbeiteter Form in zweiter Auflage herausgegeben hat – siehe dazu Max Abrahams Vorwort zur zweiten Auflage (Föppl, 1904, pp. XII-XIV). Dafür sprechen nun mindestens drei Argumente:

1. Die Arbeiten von Eichenwald (Eichenwald, 1903a) (Eichenwald, 1903b) und vor allem dessen letzte Arbeit „Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde“ (Eichenwald, 1904b) führten Einstein letztendlich dazu elektrische und magnetische Felder (von Magnet und Leiter) nur auf Relativbewegungen zurückzuführen und wie Cohn auf das Konzept eines Äthers zu

⁴⁶² Siehe für eine detailliertere Diskussion zweites Kapitel (Abschnitt „2.1.2.2.3.2. Ad 2.“).

⁴⁶³ Siehe zu Machs Kritik an Neumann (Mach, 2012, pp. 267, 306, 309-310).

verzichten. (Womöglich studierte Einstein auf Grund der Schrift „Ueber das innere Feld der Elektronen“ (Eichenwald, 1904a) auch intensiver Abrahams Ansichten...)

2. Einstein interessierte sich durch Föppls Arbeit (Föppl, 1904b) um 1904/1905 immer mehr für das Gedankenexperiment zur Relativbewegung von Magnet und Leiter.
3. Unter anderem die wissenschaftliche Diskussion zwischen Wien und Abraham im Jahre 1904 ebnete für Einstein den Weg zur Speziellen Relativitätstheorie, weshalb er die von Abraham überarbeitete Ausgabe (Föppl, 1904) studierte.

Im letzten Abschnitt des Buches „§ 91. Relative und absolute Bewegung“ stellt Max Abraham klar, dass die Relativbewegung und somit das Relativitätsprinzip nicht nur für die Mechanik, sondern auch für die Elektrodynamik als gültig angesehen werden könnten (Föppl, 1904, p. 431). Wenn Einstein nun gleich zu Beginn seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) die Gültigkeit des Relativitätsprinzips anhand der Relativbewegung zwischen Magnet und Leiter vor Augen führt (Einstein, 1905r, p. 891), dann dürfte er dazu durch Föppls Äußerungen (Föppl, 1894, pp. 307-308) und Abrahams überarbeitete Diskussion (Föppl, 1904, p. 431) motiviert worden sein.

6.2.3. Die Experimente von Fizeau und von Michelson

Einen guten Überblick über die Entstehungsgeschichte der SRT bietet das Buch

Physikalisches über Raum und Zeit (1911) von Emil Cohn, welches Ernst Mach gewidmet wurde (Cohn, 1913, p. 0 (Vorsatz)) (Cohn, 1920, p. 3). Offensichtlich sah Cohn zwischen Machs Ansichten und der SRT keinen Widerspruch – man könnte sogar sagen: die historisch-kritische Erarbeitung der SRT und ihre Verteidigung diene dem Andenken Machs. Der Inhalt des Buches ist wissenschaftsgeschichtlich gesehen, von äußerster Wichtigkeit, da Einstein in seiner Schrift „Die Relativitätstheorie“ (1915) nur eine einzige Literaturquelle zu dem Thema SRT empfiehlt:

„Eine vorzügliche Darstellung des Gegenstandes enthält: *Physikalisches über Raum und Zeit* von E. COHN, 2. Aufl. B. G. Teubner. 1913.“ (CPAE 4; 21; p. 546)

In gewissem Sinne steht also diese Darstellung der Entstehungsgeschichte der SRT von Cohn für Einstein also konkurrenzlos dar.

Nach Cohns Erläuterung standen vor der SRT zwei Experimente in Widerspruch⁴⁶⁴ zueinander (Cohn, 1920, p. 9): Das Experiment⁴⁶⁵ von Fizeau (Cohn, 1920, pp. 7-8), welches die Aberration des Lichtes betraf (Cohn, 1920, p. 29), schien dem Relativitätsprinzip zu widersprechen und das Experiment von Michelson⁴⁶⁶ (Cohn, 1920, pp. 8-9) bestätigte hingegen das Relativitätsprinzip.

Dieser Knoten lässt sich entwirren, wenn man, auf Grund des Michelson-Experiments, am Relativitätsprinzip festhält und diesem eine noch fundamentalere Rolle zuweist, nämlich dass auch unser Verständnis von Raum, Zeit und Gleichzeitigkeit ebenso relativiert bzw. relationalisiert werden sollte (Cohn, 1920, p. 9). Der Weg dorthin gelang über das Synchronisieren der Zeit mit Hilfe des Lichtes (Cohn, 1920, pp. 9-11) usw. Aus dieser Perspektive hat sich die neue theoretische Physik, wie die SRT, auf den Erfahrungen bzw. Ergebnissen der experimentellen Physik aufbauend, weiterentwickelt, indem sie lediglich versuchte den Widerspruch zwischen den Experimenten auf eine einfache Weise zu lösen, um die klassische Mechanik mit der Elektrodynamik zu vereinen. Beim Fizeau-Experiment spielt nicht der Äther eine Rolle, sondern die relativistische Geschwindigkeitsaddition, wie Cohn erklärt (Cohn, 1920, pp. 29-30). Das Problem lag also darin zur relativistischen Transformationsgleichung zu gelangen. Dafür musste unser klassisches Verständnis der Raum- und Zeitmessung dem relativistischen weichen. Von der relativistischen Transformation gelangte man anschließend zu der relativistischen Geschwindigkeitsaddition, womit man die theoretischen Widersprüche in den Experimenten in einer einfachen Form auflösen konnte.

6.3. Ausblick

Wie der Titel von Sexls Artikel „Der unerschöpfliche Albert Einstein“ (Sexl, 1985) hinweist, wird wohl die Forschung um Einstein unerschöpflich bleiben. Zwar konnten wir die Spezielle Relativitätstheorie anhand der Quellenlage relativ gut rekonstruieren, doch werden in Zukunft sicher immer neue Herausforderungen entstehen. Beispielsweise bietet zurzeit *The Collected Papers of Albert Einstein* Dokumente bis in das Jahr 1927. Da zu dieser Zeit die Relativitätstheorie abgeschlossen war, scheint die Quellenlage zum jetzigen Zeitpunkt für

⁴⁶⁴ Siehe dazu viertes Kapitel (Abschnitt „4.4.2.2. Thema II: Der Widerspruch [16]-[25]“).

⁴⁶⁵ Zu Einsteins Erklärung des Fizeauschen Experiments siehe beispielsweise (CPAE 4; 1; p. 27-28) und (CPAE 4; 1; p. 103, fn. 36).

⁴⁶⁶ Siehe zu Einsteins Erklärung des Relativitätsprinzips und des Michelson Morley Versuchs (CPAE 4; 1; p. 30-32).

ihre Rekonstruktion ausreichend zu sein – jedoch könnten Dokumente aus späteren Jahren wieder gänzlich neue und wichtige Erkenntnisse erbringen.⁴⁶⁷

Wir haben in unserer Arbeit die Ansicht vertreten, dass für Einstein das Dopplersche Prinzip und die Aberration bei der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie eine wichtige Rolle gespielt haben. Andere Einstein-Forscher, wie John Stachel (Stachel, 1982) (Stachel, 1998) und John Norton (Norton, 2013) (Norton, 2014), haben gute Argumente für die Rolle der Emissionstheorie bei der Entstehung der speziellen Relativitätstheorie vorgelegt. Es wäre in Zukunft interessant eine Arbeit zu verfassen, die untersuchen würde, ob unsere Sichtweise mit jener von John Stachel und John Norton kombinierbar wäre. Somit hätte man verschiedene Perspektiven, um unterschiedliche theoretische Aspekte besser erklären zu können. Allgemein ist durch das Dopplersche Prinzip die Emission des Lichtes erklärbar.⁴⁶⁸

Unsere Zusatzhypothese schließt daher die Emissionstheorie nicht aus, sondern mit ein. Generell gibt es bereits Simulationen, die die Parallelen zwischen dem Doppler-Effekt und der Emissionstheorie erklären – siehe beispielsweise (Poessel, 2011).

Es ist etwas schade, dass sowohl Einsteins „Bemerkungen zu P. Harzers Abhandlung »Über die Mitführung des Lichtes in Glas und die Aberration«“ (Einstein, 1914I) als auch seine Vorlesungsunterlagen (siehe CPAE 6; 7; p. 45 und 49) in *The Collected Papers of Albert*

⁴⁶⁷ Ein gutes Beispiel ist der Briefwechsel zwischen Besso und Einstein aus den Jahren 1947/1948, auf den wir eingegangen sind – siehe dazu viertes Kapitel (Abschnitt „4.4.2.3.1 Die Neudefinition der Zeit: Cohns und Machs möglicher Einfluss“) – der verständlicherweise in *The Collected Papers of Albert Einstein* noch nicht vorhanden ist.

⁴⁶⁸ Dies sei an der Stelle kurz erläutert: Nehmen wir an, dass eine Quelle (A) sich von einem Beobachter (B) mit einer konstanten Geschwindigkeit v wegbewegt. Nun sendet (A) ein Photon mit der Energie $E = c \cdot p$. Nach der Speziellen Relativitätstheorie bleibt die Beziehung zwischen Energie (E) und Impuls (p) erhalten, weshalb (B) Photonen ebenfalls mit der Energie $E' = c \cdot p'$ empfängt. Da (A) sich jedoch von (B) mit der Geschwindigkeit v entfernt, muss sich der Impuls nach der Lorentz-Transformation verändern und wir erhalten:

$$p' = p \cdot \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = p \cdot \frac{(1 - \beta)}{\sqrt{1 - \beta^2}} = p \cdot \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

Insofern ändert sich die Energie:

$$E' = E \cdot \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = E \cdot \frac{(1 - \beta)}{\sqrt{1 - \beta^2}} = E \cdot \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

Aufgrund des Terms $\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$ ist ersichtlich, dass $E > E'$ gilt, das heißt beim sichtbaren Photon hätten wir eine Rotverschiebung. Nach dieser Herleitung sehen wir, dass wir für den relativistischen Dopplereffekt das Konzept eines Äthers gar nicht benötigen. Wichtig ist nur die relative Geschwindigkeit zwischen der Quelle (A), wo das Photon emittiert wird, und (B). Insofern setzt die Emissionstheorie das Verständnis des Dopplerschen Prinzips voraus.

Einstein nicht ins Englische übersetzt wurden. Beide würden die Bedeutung des Dopplerschen Prinzips und der Aberration (Einstein, 1914I, pp. 9-10) (CPAE 6; 7; p. 45 und 49) deutlich zeigen.

Allgemein lässt sich auch sagen, dass man die Forschung mehr ausdehnen müsste; z.B.: wäre es wichtig, wenn die zukünftige Forschung mehr über Mileva Maric⁴⁶⁹, Michele Besso, Woldemar Voigt, August Föppl, Wilhelm Wien, Emil Cohn, Max Abraham, Alexander Eichenwald, Emil Kohl, Ferdinand von Lindemann, Walter Ritz, H. A. Lorentz, Henri Poincare, Philipp Frank, Ernst Mach, Ludwig Mach usw. in Erfahrung bringen könnte, sei es deren Biografie, Arbeiten oder Korrespondenz. Unsere Abhandlung konnte zeigen, dass einige dieser Personen in der Forschung der SRT zum Teil (gänzlich) übersehen und vernachlässigt wurden. Die Wissenschaftsgeschichte scheint insofern nicht wie ein Weg zu sein, welchen man einfach rückläufig rekonstruieren könnte, sondern mehr ein komplexes Netzwerk darzustellen, das zeitlich, örtlich, sozial und inhaltlich unterschiedlich verknüpft ist. Eine Wissenschaftstheorie, welche versucht die SRT zu rekonstruieren, sollte daher vielschichtig und enorm flexibel sein. Wir konnten beispielsweise auf der Ebene der wissenschaftlichen Disziplinen zeigen, dass dafür verschiedene Perspektiven möglich sind – je nachdem, ob man bei der Rekonstruktion die Schwerpunktsetzung auf die Ergebnisse der experimentellen Physik legt, sich auf die Ebene der theoretischen Physik begibt, oder erkenntnistheoretische Sichtweisen untersucht usw.

7. Allgemeine Relativitätstheorie⁴⁷⁰

Dass Ernst Machs Konzepte einen starken Einfluss auf die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie hatten, ist allgemein bekannt.⁴⁷¹ Wissenschaftstheoretisch und -geschichtlich war jedoch wichtig die Frage zu stellen, worin er genau bestand. Um einen Beitrag zu dieser Fragestellung leisten zu können, war es wesentlich den zweiten Teil von Einsteins Kyoto-Rede, wo es um die Entstehungsgeschichte der ART geht, zu

⁴⁶⁹ Ebenso wäre es wichtig mehr über die „Akademie Olympia“ und ihren Mitgliedern (z.B.: Maurice Solovine, Conrad Habicht) in Erfahrung zu bringen.

⁴⁷⁰ Siehe dazu Abschnitt „4.4.4. Die Analyse von Einsteins Rede: Teil II“.

⁴⁷¹ Einen Vortrag zu diesem Thema, wo ich besonders auf die Astronomiegeschichte eingegangen bin, habe ich 2018 auf der Kuffner-Sternwarte gehalten – der Artikel „The First and Second Mach Principle – How Einstein Created the Theory of General Relativity“ (Simsek, 2020) dazu wurde bereits veröffentlicht.

rekonstruieren, da er darin Mach mehrmals erwähnt (CPAE 13; 399; p. 638-639)⁴⁷². Dieser Teil seiner Rede lässt sich in unterschiedliche Themen unterteilen:

- Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]
- Thema II: Das Äquivalenzprinzip [49]-[65]
- Thema III: Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]
- Thema IV: Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]

Das letzte Thema (IV) betrifft die erkenntnistheoretische Ebene, wo er offen ausspricht, dass er die Konzepte von Mach, so wie er sie verstand, in einer relativistischen Kosmologie umzusetzen versuchte. Interessanterweise zeigte jedoch die inhaltliche Rekonstruktion der Kyoto-Rede und somit die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie, dass Mach ebenfalls auf die anderen Themen einen Einfluss hatte.

7.1. Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]⁴⁷³

Einstein erklärt in seiner Rede, dass er im Jahre 1907 auf den Denkansatz kam, welcher in weiterer Entwicklung zur Allgemeinen Relativitätstheorie wurde. Und zwar störte es ihn, dass das Konzept der Relativität die beschleunigten Bezugssysteme nicht einbeziehen konnte. Die Spezielle Relativitätstheorie galt nur für Inertialsysteme – mit dieser theoretischen Einschränkung war er nicht zufrieden und dachte ständig daran, wie sie aufgehoben werden könne. Einige Sätze weiter betont er: „[66] MACH war derjenige, der behauptete, daß alle Systeme, die Beschleunigung aufweisen, einander gleichwertig seien.“ (Haubold & Yasui, 1986, p. 276). Diese Äußerung Einsteins deckt sich auch mit anderen Zeilen aus seinen Artikeln – siehe beispielsweise (Einstein, 1914o, pp. 1031-1032) (Einstein, 1916e, pp. 771-772). Auf den „fundamentalen Mangel“ (Einstein, 1914h, p. 344) hat also offensichtlich Mach hingewiesen und dadurch Einstein den Weg geebnet, worauf er auch in „Autobiographisches“ (Einstein, 1983, pp. 10, 24-26) eingeht.⁴⁷⁴ Aus Einsteins Erläuterungen ist entnehmbar, dass er durch die Kritik von Mach einen erkenntnistheoretischen Mangel in

⁴⁷² Interessant ist, dass es in *The Collected Papers of Albert Einstein* gar keine Kommentare dazu gibt, wodurch wir einen Beitrag zum Forschungsstand leisten konnten.

⁴⁷³ Siehe dazu Abschnitt „4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]“.

⁴⁷⁴ Siehe dazu auch (Reichenbach, 1928, pp. 247-248).

der klassischen Physik (aber auch in der Speziellen Relativitätstheorie) erkannte. Als Quelle verweist Einstein (Einstein, 1916c, p. 102) auf das Buch *Die Mechanik in ihrer Entwicklung* (Mach, 2012, pp. 142-310) – genauer auf das zweite Kapitel „Die Entwicklung der Prinzipien der Dynamik“, Abschnitte „6. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung“ (Mach, 2012, pp. 250-273) und „7. Übersichtliche Kritik der Newtonschen Aufstellungen“ (Mach, 2012, pp. 273-280). Diese sind überaus interessant:

Im sechsten Abschnitt, woraus Einstein selbst zitiert⁴⁷⁵, finden wir:

- Machs Kritik an Newtons Interpretation des Eimer-Versuchs (Mach, 2012, pp. 257, fn. 202);
- seinen konzeptionellen Ansatz (Mach, 2012, p. 261), welcher später als eine Voraussage der Allgemeinen Relativitätstheorie theoretisch von Josef Lense und Walter Thirring ausgearbeitet wurde und heute als Thirring-Lense Effekt bezeichnet wird (Mach, 2012, pp. 261, fn. 206);
- das Machsche Prinzip (Mach, 2012, pp. 262, fn. 208);
- den Wunsch eines Gravitationsgesetzes nach dem Ideal der elektrischen Fernwirkung bzw. eine Nahwirkungstheorie der Gravitation (Mach, 2012, pp. 272, fn. 215).

Im siebten Abschnitt ist unter anderem Machs Hinweis auf Poincarés Buch *La Science et l’Hypothèse* im Zusammenhang mit seinen eigenen Konzepten (Mach, 2012, pp. 279, fn. 223) usw. gegeben.

Insofern ist es stimmig, wenn Einstein verdeutlicht:

„Die zitierten Zeilen zeigen, daß Mach die schwachen Seiten der klassischen Mechanik klar erkannt hat und nicht weit davon entfernt war, eine allgemeine Relativitätstheorie zu fordern, und dies schon vor fast einem halben Jahrhundert! [...] Die Betrachtungen über Newtons Eimerversuch zeigen, wie nahe seinem Geiste die Forderung der Relativität im allgemeineren Sinne (Relativität der Beschleunigungen) lag.“
(Einstein, 1916c, p. 103)

⁴⁷⁵ Vergleiche (Einstein, 1916c, pp. 102-103) mit (Mach, 2012, pp. 250-252, 254-255, 258-259, 261).

Er betont aber zum Schluss, was bei Mach noch gefehlt hat:

„Allerdings fehlt hier das lebhafteste Bewußtsein davon, daß die Gleichheit der trägen und schweren Masse der Körper zu einem Relativitätspostulat im weiteren Sinne herausfordert, indem wir nicht imstande sind, durch Versuche darüber zu entscheiden, ob das Fallen der Körper relativ zu einem Koordinatensystem auf das Vorhandensein eines Gravitationsfeldes oder auf einen Beschleunigungszustand des Koordinatensystems zurückzuführen sei.“ (Einstein, 1916c, p. 103)

Nach Einsteins Ansicht fehlte bei Mach die wichtige Postulierung des Äquivalenzprinzips, welches einen der Grundpfeiler der Allgemeinen Relativitätstheorie darstellt. Gereon Wolters kommentiert jene Zeilen jedoch mit den Worten:

„Einstein hat Mach entweder nicht genau gelesen oder Machs Bemerkungen zu dieser Frage wieder vergessen. Denn in Machs Vision der Themata einer erkenntnistheoretisch befriedigenden Physik taucht, wenn auch nicht explizit ausgesprochen, auch das *Äquivalenzprinzip*, d. h. die These von der Gleichheit von träger und schwerer Masse, auf.“ (Wolters, 1987, pp. 62-63)

Wie er zu seiner Idee über des Äquivalenzprinzips kam, erläutert Einstein in seiner Kyoto-Rede als nächstes.

7.2. Das Äquivalenzprinzip [49]-[65]⁴⁷⁶

Einstein erklärt, dass er auf Anfrage von Johannes Stark den Artikel „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) für das „Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik“ verfasste – dies lässt sich durch Quellen tatsächlich belegen – siehe (CPAE 5; 58; p. 74) und (CPAE 5; 63; p. 77-78). Genau diese Arbeit (Einstein, 1907j) wird zudem in einer Karte (17. August 1909) von Einstein an Mach erwähnt (CPAE 5; 175; p. 205). Mach erkannte den wichtigen Hinweis von Einstein und vermerkte die Arbeit in seinem Notizbuch (CPAE 5; 175; p. 205, fn. 5).

Einstein erläutert, dass er beim Schreiben der Arbeit bemerkte, dass in der Speziellen Relativitätstheorie das Gravitationsgesetz nicht miteinbezogen wurde. Zwar gelangte man durch die SRT zur Äquivalenz von (träger) Masse und Energie; aber weshalb das Äquivalenzprinzip zwischen träger und schwerer Masse gegeben war, konnte damit nicht gelöst werden. Seit wann Einstein dieses Problem der Äquivalenz von schwerer und träger

⁴⁷⁶ Siehe dazu Abschnitt „4.4.5.2. Thema II: Das Äquivalenzprinzip [49]-[65]“.

Masse beschäftigte, lässt sich schwer sagen. Wir haben im 2. Kapitel⁴⁷⁷ gezeigt, dass für Einstein die Arbeit „Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen“ (Wien, 1898) nicht nur wegweisend, sondern zugleich eine der ursprünglichen Anregungen für Einstein bei der Entwicklung der Relativitätstheorie war – siehe seinen Brief an Marić (am 28? September 1899) (CPAE 1; 57; p. 233-234). Etwa zu jener Zeit fing er auch an unter anderem Machs Bücher zu lesen – siehe seinen Brief (10. September 1899) an Marić (CPAE 1; 54; p. 230). Wenn wir uns Wiens Arbeit wieder ansehen, erkennen wir, dass er sein letztes Kapitel dem Äquivalenzprinzip der trägen und schweren Masse widmet (Wien, 1898, p. XVI). Wien bespricht dort sowohl die Ausnahmestellung der Gravitation als auch die theoretisch nicht begründete Äquivalenz der trägen und der schweren Masse. Nach seiner Ansicht müsste eine (neue, erweiterte) Theorie der Gravitation dieses Problem lösen können (Wien, 1898, p. XVI). Diese Zeilen von Wien – aber auch Machs Äußerungen, auf die wir noch kommen werden – könnten Einstein als eine theoretische Herausforderung, die auf eine Lösung wartete, im Gedächtnis geblieben sein. Weshalb genau nun Einstein das Jahr 1907 wählt, um sich dazu zu äußern, hatte wohl verschiedenste Gründe. Einen Anreiz dazu gab ihm wohl Plancks Schrift „Zur Dynamik bewegter Systeme“ (Planck, 1908), in welcher Planck nahelegt, dass die Erklärung der Äquivalenz zwischen träger und schwerer Masse über den Energiebegriff gegeben wäre (Planck, 1908, p. 32). Diese Arbeit wurde der „Sitzungsber. d. k. preuß. Akad. der Wissensch. vom 13. Juni 1907“ bereits von Planck mitgeteilt (Planck, 1908, p. 1). Einstein kannte die Schrift, da er in einem anderen Zusammenhang auch darauf hinweist (Einstein, 1907j, pp. 452, fn. 1). Jedenfalls macht Einstein in seiner Schrift „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ (Einstein, 1907j) in jenem Kontext einen weiteren Schritt und erläutert das erste Mal das Äquivalenzprinzip (Einstein, 1907j, p. 454). Nach dem Äquivalenzprinzip kann man ein homogenes Gravitationsfeld als einem gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem äquivalent ansehen. In seiner Kyoto-Rede verweist Einstein darauf, welche wichtige Rolle dabei seinem Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip zukam, was wir uns als nächstes angesehen haben.

⁴⁷⁷ Siehe Abschnitt „2.1.2. Das A von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“.

7.2.1. Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip⁴⁷⁸

Das Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip, welches Einstein in seiner Rede bespricht, hat er bereits 1920 in seiner Schrift „Gedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt“ (CPAE 7; 31; p. 245)⁴⁷⁹ näher erläutert (CPAE 7; 31; p. 265-266). Darin bezeichnet er das Gedankenexperiment als „[den] glücklichste[n] Gedanke[n] meines Lebens“ (CPAE 7; 31; p. 265); und zwar geht es dabei um einen „frei herabfallenden Beobachter“ (CPAE 7; 31; p. 265) und die daraus sich ergebenden Folgerungen. In aller Deutlichkeit erklärt er, wie wichtig dieses Gedankenexperiment für den Ansatz der Allgemeinen Relativitätstheorie war:

„Die Erfahrungsthat­sa­che von der Un­ab­hän­gig­keit der Fall­be­schleu­ni­gung vom Ma­te­ri­al ist also ein mäch­ti­ges Ar­gu­ment da­für, dass das Re­la­ti­vi­täts­pos­tu­lat auf re­la­tiv zu einan­der un­gleich­förmig be­we­gte Ko­or­di­na­ten­sys­te­me aus­zu­dehnen ist.“
(CPAE 7; 31; p. 265)

Denn, indem man dieses Gedankenexperiment für unterschiedliche Fälle anwendet, kann man auf „spekulativem Wege“ (CPAE 7; 31; p. 266) zu verschiedenen Voraussagen gelangen. (Wir werden noch darauf zurückkommen.)

Es stellt sich natürlich die Frage, wie er genau zu diesem Gedanken kam. Nach seiner Äußerung in der Kyoto-Rede „saß“ er „im Berner Patentamt in einem Sessel, als“ ihm „plötzlich ein Gedanke kam“. Da Einstein jedoch selten seine Quellen angibt, könnte es ebenso sein, dass er zu diesem Gedankenexperiment von jemand anderem inspiriert wurde. Gleich auf der nächsten Seite stellt er fest, dass er das Äquivalenzprinzip vor allem mit Mach nicht in Verbindung bringt (CPAE 7; 31; p. 267-268). Nach seiner Erläuterung blieb Mach das Äquivalenzprinzip bzw. die Äquivalenzhypothese verborgen. Dass er diese Ansicht vertritt, ist etwas überraschend, da selbst sein Schüler und Freund Reichbach betonte:

„Die Äquivalenz von Trägheit und Schwere ist die strenge Formulierung des Machschen Prinzips im engeren Sinne.“ (Reichenbach, 1928, p. 260)

Weshalb Einstein die „Äquivalenzhypothese“ (CPAE 7; 31; p. 268) mit Mach nicht in Verbindung bringt, ist aber verstehbar. Für Einstein war die Erkenntnis der Äquivalenz von

⁴⁷⁸ Siehe dazu Abschnitt „4.4.5.2.1. Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip und Machs möglicher Einfluss“.

⁴⁷⁹ Dabei dürfte der Titel eine Anlehnung an Machs Buch *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt* gewesen sein – siehe (CPAE 7; 31; p. 279, fn. 2).

Energie und Masse ($E = m \cdot c^2$) ausschlaggebend – siehe dazu (Einstein, 1907j, p. 442).

Wenn man also die Masse über die Energie definieren kann, dann kommt der Klassifizierung von träger oder schwerer Masse keine primäre Rolle mehr zu (Einstein, 1907j, pp. 443-444).

Zusammengefasst gibt es daher (mindestens) zwei Gründe, weshalb Einstein Mach mit dem Äquivalenzprinzip nicht in Verbindung bringen wollte:

1.) Höchstwahrscheinlich wurde er vor allem durch Wiens (Wien, 1898, p. XVI) und Plancks (Planck, 1908, p. 32) Schriften motiviert, sich genauer mit dem Äquivalenzprinzip auseinanderzusetzen.

2.) In Machs Arbeiten fehlt ein mathematisch-physikalisches Konzept, welche die Äquivalenz von Energie und Masse ($E = m \cdot c^2$) manifestiert. Infolgedessen sah er diese Errungenschaft wohl als seine eigene an.⁴⁸⁰

Das schließt jedoch nicht zwingend aus, dass er sich zu einem Gedankenexperiment womöglich von Mach inspirieren ließ. Jedenfalls ist ein ähnliches Gedankenexperiment in Machs *Mechanik* zu finden (Mach, 2012, p. 234). Das Gedankenexperiment von Mach kommentiert Wolters mit den Worten: „Mit diesen Überlegungen steuert Mach auf die Gleichheit von träger und schwerer Masse zu, welche einen Eckstein der allgemeinen Relativitätstheorie bildet.“ (Mach, 2012, pp. 234-235, fn. 186). Eine eingehende Untersuchung kann der Leser in (Wolters, 1987, pp. 63-65) finden. Dass es bei diesem Gedankenexperiment Mach tatsächlich um die Äquivalenz von träger und schwerer Masse geht, wird ersichtlich, da er eine Seite davor frei fallende Körper bespricht auf welche Trägheitskräfte ausgeübt werden – dabei spricht er von einer „Relativbeschleunigung“ (Mach, 2012, p. 233)⁴⁸¹ usw. Nach dem Erläuterten überrascht es daher nicht, dass der Gedanke nahe liegt, dass Einstein zu seinem Gedankenexperiment wohl von jenem Machs inspiriert wurde – siehe dazu (Heller, 1991) (Staley, 2013) (Staley, 2019, pp. 360-363).

Zusammengefasst haben sind wir in diesem Abschnitt auf zwei Fragestellungen eine einfache Antwort geben können:

⁴⁸⁰ Siehe dazu auch (Einstein, 1983, p. 24).

⁴⁸¹ Für ein besser Verständnis der Seiten (Mach, 2012, pp. 233-234) sei der Leser auf (Wolters, 1987, pp. 63-65) (Reichenbach, 1928, pp. 257-262) hingewiesen.

1.) Weshalb hat Einstein Ernst Mach nicht mit dem Äquivalenzprinzip in Verbindung gebracht? Die Antwort auf diese Frage ist relativ einfach: Bei Mach hat, nach Einstein, das mathematisch-physikalische Konzept der Äquivalenz von Masse und Energie gefehlt oder, mit anderen Worten, die Formel: $E = m \cdot c^2$. Möchte man für das Äquivalenzprinzip (der trägen und der schweren Masse) eine Allgemeingültigkeit für alle Gebiete der Physik manifestieren, dann wäre eine Formel jedoch eine Voraussetzung gewesen.

2.) Wurde Einstein zu seinem Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip von einem Gedankenexperiment von Mach inspiriert? Diese Frage lässt sich anhand der Quellen nicht mit Sicherheit beantworten. Es spricht jedoch nichts dagegen, wissenschaftsgeschichtlich den Standpunkt zu vertreten – siehe (Wolters, 1987) (Heller, 1991) (Staley, 2019) –, dass er von Mach dazu inspiriert wurde. Dass das Äquivalenzprinzip für das Machsche Prinzip und somit für Mach eine wichtige Rolle spielte, wurde allgemein bereits sehr früh erkannt (Reichenbach, 1928, p. 260).

Wie wir gesehen haben, hat Einstein selbst mehrmals darauf hingewiesen, welche wichtige Rolle diesem Gedankenexperiment zukam. Bei richtiger Anwendung wird es zu einem mächtigen Instrument, mit dem man physikalische Voraussagen machen kann, die experimentell überprüft werden können – dies haben wir als nächstes besprochen.

7.2.2. Gedankenexperiment: Lichtablenkung am Gravitationsfeld⁴⁸²

Einstein betont in seiner Schrift „Gedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt“ (1920):

„Kennen wir die Naturgesetze inbezug auf das (gravitationsfreie) System K , so können wir durch blosse Umrechnung die inbezug auf K' herrschenden Gesetze kennen lernen, d. h. wir lernen auf rein spekulativem Wege die physikalischen Eigenschaften des Gravitationsfeldes kennen.“ (CPAE 7; 31; p. 266)

Anhand von Gedankenexperimenten zum Äquivalenzprinzip kann man nach Einsteins Erläuterung auf „spekulativem Wege“ zu „physikalischen Eigenschaften des Gravitationsfeldes“ (CPAE 7; 31; p. 266) gelangen und Voraussagen machen (Einstein, 1907j, p. 461). Ein Beispiel bzw. Gedankenexperiment ist die berühmte Lichtablenkung im

⁴⁸² Siehe Abschnitt „4.4.5.2.2. Gedankenexperiment: Lichtablenkung am Gravitationsfeld“.

Gravitationsfeld (CPAE 7; 31; p. 268-269) (Einstein, 1907j, p. 461). Hat man also durch das Gedankenexperiment das Äquivalenzprinzip verinnerlicht, so ist es relativ einfach eine Lichtablenkung vorauszusagen. Seine Überlegung, dass das Licht eines „Fixsternes“ (Einstein, 1911h, p. 898) an der Sonne eine Ablenkung erfährt und experimentell bei der Sonnenfinsternis überprüft werden könnte (Einstein, 1911h, pp. 906-908), beschreibt er zum ersten Mal als Prager Professor in seiner Schrift „Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes“ (Einstein, 1911h, p. 908). Im Jahre 1919 wurden Einsteins theoretische Voraussagen experimentell überprüft und machten ihn weltberühmt.

7.2.3. Gedankenexperiment: Gravitationsbedingte Rotverschiebung⁴⁸³

Anhand eines weiteren Gedankenexperimentes zum Äquivalenzprinzip kann man ebenfalls zur gravitationsbedingten Rotverschiebung gelangen. Dabei kommt es in einem gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem aufgrund des Doppler-Effekts zu einer Frequenzverschiebung – siehe dazu (Einstein, 1911h, p. 904). In einem im Gravitationsfeld ruhenden System lässt sich dieser Effekt wiederum mithilfe der gravitativen Zeitveränderung im homogenen Schwerfeld erklären – siehe dazu (Einstein, 1911h, pp. 903-906) (CPAE 7; 19; p. 147).

Allgemein interessant ist, dass bei konzeptuellen Überlegungen Einstein sich dabei mit den Themen wie „Ortszeit“ von Lorentz (Einstein, 1907j, p. 413) und dem Doppler-Effekt auseinandersetzte, die bereits bei der Entstehungsgeschichte der SRT eine wichtige Rolle spielten.

7.3. Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]⁴⁸⁴

Dass Mach eine allgemeine Kovarianz forderte haben wir bereits besprochen⁴⁸⁵. Einstein fährt in seiner Rede fort und erklärt, dass er einen Widerspruch zwischen Machs Forderung und der euklidischen Geometrie sah (Haubold & Yasui, 1986, p. 276). Er meint damit, dass die physikalische Beschreibung von rotierenden Systemen unter der Voraussetzung des Äquivalenzprinzips mit der euklidischen Geometrie nicht in Einklang zu bringen sind – bereits in seiner Schrift „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1916e) ist er darauf detailliert eingegangen (Einstein, 1916e, pp. 773-776). Da die Naturgesetze in

⁴⁸³ Siehe Abschnitt „4.4.5.2.3. Gedankenexperiment: Gravitationsbedingte Rotverschiebung“.

⁴⁸⁴ Siehe Abschnitt „4.4.5.3. Thema III: Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]“.

⁴⁸⁵ Siehe Abschnitt „4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]“.

rotierend beschleunigten Bezugssystemen gelten sollten, erkannte Einstein (anhand seiner Gedankenexperimente), dass Längen und Zeiten nach der euklidischen Geometrie nicht mehr gültig sein konnten (Einstein, 1916e, p. 775). Dabei könnte auch eine Rolle gespielt haben, dass Mach in seinen Publikationen ein Befürworter von Minkowskis Ansichten (Mach, 1909, pp. 59-60) (Mach, 1910a, p. 605) (Mach, 1910b, pp. 264, fn. 1) war⁴⁸⁶. Ebenso wie Mach hat offensichtlich auch Einstein den Beitrag von Minkowski als wichtig erachtet. In seinen Überlegungen, die später zur Allgemeinen Relativitätstheorie führten, wurde nun die Überzeugung einer vierdimensionalen Raum-Zeit zu einem der Eckpfeiler. Ob man tatsächlich unbedingt Einsteins Konzept der vierdimensionalen Raum-Zeit folgen muss, um die Machschen Gedanken umsetzen zu können, ist aber derzeit strittig. Beispielsweise meint Julian Barbour, dass man eine relationale Physik nach Machs Ansichten ohne die Annahme einer vierdimensionalen Raum-Zeit entwickeln kann, die zu denselben theoretischen Ergebnissen führt, wie die Allgemeine Relativitätstheorie – siehe dazu „General Relativity as a Perfectly Machian Theory“ (Barbour, 1995c) von J. Barbour bzw. die anschließende Diskussion (Barbour, 1995c, p. 232).

7.4. Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]⁴⁸⁷

In seiner Kyoto-Rede erklärt Einstein, dass er sich ab 1915 unter anderem den kosmologischen Problemen widmete. Dabei ging es um die Grenzbedingungen (des Universums) nach der relativistischen Kosmologie und in diesem Zusammenhang um das Trägheitskonzept von Mach, welches heute als das „Machsche Prinzip“ bekannt ist. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass bereits der Begriff des „Machschen Prinzips“ von Einstein in die theoretische Physik eingeführt wurde – in „Prinzipielles zur Allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1918e) schreibt er gleich zu Beginn:

„Eine Reihe von Publikationen der letzten Zeit, insbesondere die neulich in diesen Annalen 53. Heft 16 erschienene scharfsinnige Arbeit von *Kretschmann*, veranlassen mich, nochmals auf die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie zurückzukommen. Dabei ist es mein Ziel, lediglich die Grundgedanken herauszuheben, wobei ich die Theorie als bekannt voraussetze.

Die Theorie, wie sie mir heute vorschwebt, beruht auf drei Hauptgesichtspunkten, die allerdings keineswegs voneinander unabhängig sind. Sie seien im folgenden kurz angeführt und charakterisiert und hierauf im nachfolgenden von einigen Seiten beleuchtet:

⁴⁸⁶ Siehe dazu drittes Kapitel (Abschnitt „3.1. E. Machs publizierte Äußerungen zu Einsteins Relativitätstheorie“).

⁴⁸⁷ Siehe Abschnitt „4.4.5.4. Thema IV: Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]“.

a) Relativitätsprinzip: Die Naturgesetze sind nur Aussagen über zeiträumliche Koinzidenzen; sie finden deshalb ihren einzig natürlichen Ausdruck in allgemein kovarianten Gleichungen.

b) Äquivalenzprinzip: Trägheit und Schwere sind wesensgleich. Hieraus und aus den Ergebnissen der speziellen Relativitätstheorie folgt notwendig, daß der symmetrische ‚Fundamentaltensor‘ ($g_{\mu\nu}$) die metrischen Eigenschaften des Raumes, das Trägheitsverhalten der Körper in ihm, sowie die Gravitationswirkungen bestimmt. Den durch den Fundamentaltensor beschriebenen Raumzustand wollen wir als ‚G-Feld‘ bezeichnen.

c) Machsches Prinzip¹: Das G-Feld ist *restlos* durch die Massen der Körper bestimmt. Da Masse und Energie nach den Ergebnissen der speziellen Relativitätstheorie das Gleiche sind und die Energie formal durch den symmetrischen Energietensor ($T_{\mu\nu}$) beschrieben wird, so besagt dies, daß das G-Feld durch den Energietensor der Materie bedingt und bestimmt sei.“ (Einstein, 1918e, pp. 241-242)

In der Fußnote 1 (zum Machschen Prinzip) erklärt Einstein⁴⁸⁸:

„Bisher habe ich die Prinzipie a) und c) nicht auseinandergehalten, was aber verwirrend wirkte. Den Namen ‚Machsches Prinzip‘ habe ich deshalb gewählt, weil dies Prinzip eine Verallgemeinerung der Machschen Forderung bedeutet, daß die Trägheit auf eine Wechselwirkung der Körper zurückgeführt werden müsse.“ (Einstein, 1918e, pp. 241, fn. 1)

Wir sehen hier deutlich, wie Einstein (aus theoretischen Gründen) nun das Relativitätsprinzip vom Machschen Prinzip unterscheidet. Das hat mitunter dazu geführt, dass Machs Bedeutung für die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie als weitaus geringer betrachtet wurde – siehe dazu auch (Wolters, 1987, pp. 49-50).

Wir haben gelesen, dass Einstein eine Theorie vorschwebte, die auf drei Prinzipien gründen soll – wie bereits besprochen, waren die Ansätze für diese Prinzipien bereits bei Mach zu finden:

*Das Relativitätsprinzip*⁴⁸⁹ bzw. die Allgemeine Kovarianz: Gerade bei der Idee der allgemeinen Kovarianz hatte Einstein in seinen früheren Arbeiten (Einstein, 1914h, p. 344) (Einstein, 1914o, pp. 1031-1032) (Einstein, 1916e, pp. 771-772) und Schriften (Einstein, 1916c, p. 103) auf Mach hingewiesen.

Das Äquivalenzprinzip:⁴⁹⁰ Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip (CPAE 7; 31; p. 265) war in ähnlicher Form bereits bei Mach gegeben (Wolters, 1987, pp. 63-65) (Heller,

⁴⁸⁸ Siehe zum Machschen Prinzip den Anhang „5.3. Anhang III: Das Machsche Prinzip – was meinte Mach?“ und allgemein auch (Meinl, 2016, pp. 21-22, 86-88, 260).

⁴⁸⁹ Siehe dazu Abschnitt „4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]“ und „Allgemeine Kovarianz“ (Wolters, 1987, pp. 57-63).

⁴⁹⁰ Siehe dazu Abschnitt „4.4.5.2.1. Einsteins Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip und Machs möglicher Einfluss“ und „Äquivalenzprinzip“ (Wolters, 1987, pp. 63-65).

1991, p. 177) (Mach, 2012, p. 234) (Staley, 2013, p. 47) (Staley, 2019, pp. 360-363) und dass das Machsche Konzept (bzw. das Machsche Prinzip) mit dem Äquivalenzprinzip konzeptionell eng verbunden ist, wurde ebenso früh erkannt (Reichenbach, 1928, p. 260).

*Das Machsche Prinzip:*⁴⁹¹ Nach Mach lässt sich die Trägheitsbewegung eines Körpers auf die restlichen Massen im Universum zurückführen (Mach, 2012, pp. 262 (II. Kapitel – 6. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung)). Deutlich ist dort herauszulesen, dass er sein Konzept für ein „durch die Erfahrung nahe gelegte[s] hypothetische[s]“ (Mach, 2012, p. 262) hält – siehe dazu auch (Wolters, 1987, p. 52). Mach spricht seiner Darlegung daher keine Gewissheit zu, sondern sieht sie als eine mögliche, alternative Erklärung, um Argumente gegen die Vorstellung eines absoluten Raumes, einer absoluten Zeit oder einer absoluten Bewegung zu geben. Er möchte durch sein Programm die Physik von Dogmatismus befreien und einen vorurteilsfreien Fortschritt ermöglichen (Mach, 2012, pp. 271-272 (II. Kapitel – 6. Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung)). Mach erklärt, dass man an Alternativen denken sollte – beispielsweise, dass man die gravitative Wechselwirkung ähnlich wie die „elektrische Fernwirkung“⁴⁹² konstruieren sollte, betont jedoch:

„Wir müssen sogar dem Gedanken Raum geben, dass die Massen, die wir sehen und nach welchen wir uns zufällig orientieren, vielleicht gar nicht die eigentlich entscheidenden sind. [...] Greift der Forscher auch freudig nach dem zunächst Erreichbaren, so schadet ihm gewiss nicht der zeitweilige Blick in die Tiefe des Unerforschten.“ (Mach, 2012, p. 272)

Dass Einstein eine Arbeit mit dem Titel „Gibt es eine Gravitationswirkung, die der elektrodynamischen Induktionswirkung analog ist?“ (Einstein, 1912e) verfasst, ist daher kein Zufall – da er darin genau auf jenes Kapitel hinweist (Einstein, 1912e, pp. 39, fn. 1), welches wir von Mach zitiert haben.⁴⁹³

Allgemein konnten wir ebenso anhand der Quellen zeigen, dass die Relativität der Trägheit bzw. das Machsche Prinzip Einstein bei der Entstehungsgeschichte offensichtlich in den Jahren 1912-1916 (Einstein, 1912e), 1913 (Einstein & Grossmann, 1913) (Einstein, 1913c), 1914 (Einstein, 1914o, pp. 1031-1032, 1085) (Einstein, 1916e, pp. 771-772) beschäftigte.

⁴⁹¹ Siehe dazu „*Machsches Prinzip und Relativität der Trägheit*“ (Wolters, 1987, pp. 52-57).

⁴⁹² Siehe dazu „*Nahwirkungstheorie*“ (Wolters, 1987, pp. 65-70).

⁴⁹³ Siehe dazu Abschnitt „4.4.5.3. Thema III: Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]“.

In einem Brief (am 1. November 1916) machte jedoch Willem de Sitter Einstein darauf aufmerksam, dass die Allgemeine Relativitätstheorie das Machsche Prinzip nicht zwangsläufig erfüllte (CPAE 8, Part A; 272; p. 357-358). Einstein antwortet darauf (am 4. November 1916) und betont, welche psychologisch bedeutende Rolle das Machsche Prinzip für ihn gespielt hat: Es gab ihm Mut weiterzuarbeiten, bis er die Allgemeine Relativitätstheorie in kovarianter Form schreiben und somit abschließen konnte. Nun, wo sie fertig ist, erklärt er, bräuchte man an der Relativität der Trägheit bzw. am Machschen Prinzip nicht unbedingt festzuhalten – es ist lediglich eine Geschmacksfrage, ob man die Grenzbedingungen des Universums so angibt, dass sie mit dem Machschen Prinzip im Einklang stehen. Deutlich jedoch ist zu erkennen, dass er selbst am Machschen Prinzip noch festhalten wollte – denn es hatte ihn von Beginn an begleitet (CPAE 8, Part A; 273; p. 359-360). Aus diesem Grund begann nun Einstein in seinem Artikel „Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie“ (Einstein, 1917b) ein räumlich geschlossenes Modell des Universums vorzuschlagen, um das Problem der Grenzbedingung zu lösen (Einstein, 1917b, pp. 144-145). Somit war das Machsche Prinzip nach Einstein wieder gerettet. Dieses spezielle Modell eines geschlossenen und somit endlichen, aber unbegrenzten Universums, welches Einstein hier vertritt, ist jedoch nicht selbstverständlich – beispielsweise geht er von einem statischen Universum aus, worauf er zum Schluss noch ausdrücklich hinweist (Einstein, 1917b, p. 152). Um zu diesem kosmologischen Modell zu gelangen, musste Einstein die Allgemeine Relativitätstheorie jedoch um die „universelle Konstante λ “ erweitern (Einstein, 1917b, pp. 144-152). Peter C. Aichelburg erklärt in „Mach’s Influence on Einstein’s ‘Biggest Blunder’ and the Consequences for Modern Cosmology“ (Aichelburg, 2019), dass Einstein sich aus drei Gründen für die Konstante λ entschied (Aichelburg, 2019, p. 315):

1. Sie ermöglichte ein statisches Universum.
2. Das Trägheitsproblem konnte dadurch überwunden werden, da das Universum geschlossen, aber zugleich unbegrenzt war. (Die Masse eines Körpers konnte somit nicht in einer unendlichen Entfernung zu den anderen Massen im Universum betrachtet werden.)
3. Durch die Konstante λ erhoffte sich Einstein, dass keine Vakuumlösungen mehr gegeben wären. (Ein Universum ohne Massen bzw. ohne Körper darin würde somit physikalisch keinen Sinn machen.)

Es war vor allem seine eigene Überzeugung, dass das Machsche Prinzip bzw. die Relativität der Trägheit kosmologisch ihre Gültigkeit bewahren sollte. Wie sich bald zeigen sollte, konnte man mit der Allgemeinen Relativitätstheorie unterschiedliche Modelle ableiten (CPAE 8, Part A; 317; p. 353-354). Einstein jedoch blieb (noch längere Zeit) bei seiner Überzeugung, auf das (von ihm mathematisch formulierte) Machsche Prinzip, nicht verzichten zu wollen.⁴⁹⁴ In seiner Arbeit „Prinzipielles zur Allgemeinen Relativitätstheorie“ heißt es daher:

„c) Machsches Prinzip: Das *G*-Feld ist *restlos* durch die Massen der Körper bestimmt. Da Masse und Energie nach den Ergebnissen der speziellen Relativitätstheorie das Gleiche sind und die Energie formal durch den symmetrischen Energietensor ($T_{\mu\nu}$) beschrieben wird, so besagt dies, daß das *G*-Feld durch den Energietensor der Materie bedingt und bestimmt sei.“ (Einstein, 1918e, pp. 241-242)

Und in „Kritisches zu einer von Hrn. de Sitter gegebenen Lösung der Gravitationsgleichungen“ erklärt er:

„Nach meiner Meinung bildet die allgemeine Relativitätstheorie nämlich nur dann ein befriedigendes System, wenn nach ihr die physikalischen Qualitäten des Raumes allein durch die Materie *vollständig* bestimmt werden. Es darf also kein $g_{\mu\nu}$ -Feld, d. h. kein Raum-Zeit-Kontinuum, möglich sein ohne Materie, welche es erzeugt.“ (Einstein, 1918c, p. 271)

Auf die weiteren kosmologischen Diskussionen, die Einstein mit Willem de Sitter, Hermann Weyl und Felix Klein führte, werden wir nicht weiter eingehen und verweisen den Leser auf (CPAE 8, Part A; _ ; p. 355-357). Erwähnt sei an dieser Stelle, dass de Sitter (1917/1918) zeigen konnte, dass die Allgemeine Relativitätstheorie mit einer universellen Konstante auch Lösungen bot, die das Machsche Prinzip nicht erfüllten (CPAE 8, Part A; _ ; p. 356-357). Das Prinzip blieb daher eine Geschmacksfrage – aber eben ein *Prinzip* nach Einsteins Geschmack, wie die Arbeit „Spielen Gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle?“ (Einstein, 1919a) verdeutlicht (Einstein, 1919a, pp. 353-356). In seinen Notizen für seinen Vortrag „Allgemeine Relativität Sommersemester 1919. Berlin“, die er von Mai bis Juni 1919 hielt, schreibt er:

⁴⁹⁴ Siehe dazu den Brief von Einstein an de Sitter (am 24.3.17) (CPAE 8, Part A; 317; p. 421-422) und an Gustav Mie (CPAE 8, Part B; 460; p. 638-640).

„Kosmologisches Problem.

Genäherte Lösung zeigt, dass genäherte Massen Trägheit vergrößern, Induktion im Sinne der Beschl. erzeugen, sowie Kor. Kräfte. Einheit der Auffassung führt dazu, jegliche Trägheit, d. h. das $g_{\mu\nu}$ -Feld als durch Materie bedingt anzusehen. (Allg. Relativitäts-Gedanke (Mach)“ (CPAE 7; 19; p. 170)

Aus diesen Gründen wundert es nicht, dass Einstein in seiner Kyoto-Rede erklärt:

„[80] Aus den Arbeiten, die nach 1915 geleistet wurden, sei lediglich das kosmologische Problem erwähnt. [...] Ihnen zugrunde gelegt sind die Behandlung der Grenzbedingungen in der Allgemeinen Relativitätstheorie und auch die MACHschen Überlegungen über die Trägheit. [...]

[85] Die Grenzbedingungen für die Gravitationsgleichung sollten invariant gehalten werden. [86] Zu diesem Zweck betrachtete ich die Welt als einen geschlossenen Raum und konnte so die Grenzen beseitigen, wodurch die Lösung des kosmologischen Problems ermöglicht wurde. [87] Infolgedessen erscheint die Trägheit nunmehr nur als Eigenschaft zwischen den Körpern, so daß die Trägheit der Körper auch verschwinden muß, wenn keine relativ gegeneinanderstehende Materie vorhanden ist. [88] Durch diesen Schluß, so glaube ich, erlangte die Allgemeine Relativitätstheorie auch die erkenntnistheoretische Vollständigkeit.

[89] In diesem kurzen historischen Rückblick habe ich versucht, Ihnen zu zeigen, wie die Hauptpunkte der Relativitätstheorie aufgestellt worden sind.“

(Haubold & Yasui, 1986, pp. 277-278)

Tatsächlich war Einstein nach der Fertigstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie bemüht, das Machsche Prinzip in das kosmologische Konzept einzuführen, zu begründen und zu verteidigen. Das Machsche Prinzip war eben eine Geschmacksfrage – sie war also nicht unbedingt notwendig. Einstein hoffte, dass dadurch „die Allgemeine Relativitätstheorie auch die erkenntnistheoretische Vollständigkeit“ erlangen konnte [88]. Erkenntnistheoretisch hatte ihn nämlich das Machsche Prinzip (in unterschiedlichen Formulierungen) jahrelang bei der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie begleitet – offensichtlich tat er sich später schwer, davon abzugehen. Wir können daher sehen, dass Einsteins Erläuterungen in seiner Kyoto-Rede mit den Quellen in Übereinstimmung sind.

7.5. Ausblick

Bis dato reichen die Dokumente aus *The Collected Papers of Albert Einstein* bis in das Jahr 1927. Da zu dieser Zeit die Allgemeine Relativitätstheorie abgeschlossen war, scheinen sie zum jetzigen Zeitpunkt für ihre Rekonstruktion ausreichend zu sein. Betrachtet man jedoch die Entwicklung der relativistischen Kosmologie, wird es gerade ab den 30er Jahren wichtig herauszufinden, wie Einstein sich zum Machschen Prinzip positionierte – hierzu wird eine

ständige Aktualisierung des Themas in der Forschung (aufgrund neuerer Quellen) notwendig sein.

Allgemein lässt sich sagen, dass man die Forschung mehr erweitern wird müssen; z.B.: wäre es wichtig, wenn die zukünftige Forschung mehr über Friedrich Adler, Marcel Grossmann, Michele Besso, Max Abraham, Hugo von Seeliger⁴⁹⁵, Karl Schwarzschild, Hans Thirring, Josef Lense, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, Erwin Freundlich, August Kopff, Ernst Mach, Ludwig Mach usw. in Erfahrung bringen könnte, sei es deren Biografie, Arbeiten oder Korrespondenz.

Wir haben uns in dieser Arbeit auch die Frage gestellt, was man nach Machs eigenen Worten unter einem „Machschen Prinzip“ verstehen könnte⁴⁹⁶ und anschließend besprochen, welche Variationen des Machschen Prinzips es heute mindestens gibt. Ich habe in diesem Zusammenhang auch ein Interview mit Julian Barbour geführt, um mehr darüber zu erfahren, welche dieser Machschen Prinzipien seine neue Theorie *Shape dynamics* (SD) erfüllt bzw. erfüllen wird. Wir können daher voller Spannung warten, was die zukünftige Physik zu diesem Thema noch beitragen wird. Je nach aktuellem Wissensstand wird es daher notwendig sein, die Rolle des Machschen Prinzips stets neu zu bewerten. Da unser Wissen über die theoretische Physik und somit über die Kosmologie nicht abgeschlossen ist – beispielsweise gibt es noch keine Theorie der Quantengravitation und ebenso wenig Kenntnis über die Natur der dunklen Energie und der dunklen Materie usw. –, sind wir noch weit entfernt von einer abschließenden Betrachtung.

⁴⁹⁵ Ich habe in meiner Arbeit „The First and Second Mach Principle – How Einstein Created the Theory of General Relativity“ (Simsek, 2020) bereits unter anderem darauf hingewiesen, dass über die Korrespondenz zwischen Hugo von Seeliger (einem der wichtigsten Astronomen seiner Zeit) und Karl Schwarzschild (Begründer der Astrophysik) usw. keine Untersuchungen durchgeführt wurden (Simsek, 2020, p. 286). Eine Forschung in diesem Bereich wäre interessant, weil Mach wahrscheinlich einen Einfluss auf Seeliger hatte, da sie in freundschaftlicher Korrespondenz standen und Seeliger Mach als Person und ebenso seine Arbeit schätzte (Simsek, 2020, pp. 284-285).

⁴⁹⁶ Siehe dazu Abschnitt „5.3. Anhang III: Das Machsche Prinzip – was meinte Mach?“.

8. Das intuitive Machsche Forschungsprogramm⁴⁹⁷

Gereon Wolters vertitt in seinem Buch *Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie* (Wolters, 1987) die Ansicht, dass die Allgemeinen Relativitätstheorie vom (intuitiv) Machschen Forschungsprogramm wichtige konzeptionelle Impulse erhalten haben könnte. In der Ernst-Mach-Studienausgabe von *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt* (Mach, 2012) fassen Wolters und Giora Hon als Herausgeber in der Einleitung das Machsche Forschungsprogramm noch einmal zusammen:

„Eine genauere Lektüre der Mechanik lässt sogar etwas wie ein Forschungsprogramm ‚Allgemeine Relativität‘ erkennen. Dessen Komponenten sind: (a) Relativität der Trägheit, (b) allgemeine Kovarianz, (c) Äquivalenz von träger und schwerer Masse, (d) Nahwirkungscharakter physikalischer Wirkungen.“ (Wolters & Hon, 2012, p. XXI)

Unsere Forschungsfrage lautete daher:

Zeigt die historisch-kritische Rekonstruktion des zweiten Teils der Kyoto-Rede, dass die Konzepte

- Relativität der Trägheit,
- allgemeine Kovarianz,
- Äquivalenz von träger und schwerer Masse
- und der Nahwirkungscharakter physikalischer Wirkungen

bei der Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie eine Rolle gespielt haben?

Diese Frage kann teilweise mit einem Ja beantwortet werden. Dabei sei nur festgehalten, dass die Nahwirkungstheorie Mach konzeptionell höchstwahrscheinlich als Ideal vorschwebte, er sie aber begrifflich nicht klar definiert hat – siehe dazu (Wolters, 1987, pp. 65-70); den Abschnitt, in welchem Mach in seiner *Mechanik* darauf eingeht, hat Einstein mit Sicherheit gekannt. In Einsteins Rede wird die Nahwirkungstheorie aber nicht direkt besprochen – ob er sich dazu also von Mach inspirieren ließ, lässt sich allgemein nicht eindeutig sagen. (Fest steht, dass Einstein Machs Kritik der Mechanik gefolgt ist.) Zudem wird das Äquivalenzprinzip bei Mach zwar vorausgesetzt und in seinem

⁴⁹⁷ Siehe dazu die Abschnitte „4.4.4.1. 9. Frage“ und „4.4.6.4. Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]“ (Tabelle 2: Einsteins Kyoto-Rede und das intuitive Machsche Forschungsprogramm im Vergleich).

Gedankenexperiment angewendet, doch wird es erst durch Einstein zu einem Prinzip erhoben und in Gedankenexperimenten derart instrumentalisiert, dass er damit physikalische Voraussagen machen konnte. Insofern hatten diese Elemente – „Äquivalenz von träger und schwerer Masse“ und „Nahwirkungscharakter physikalischer Wirkungen“ – des Machschen Forschungsprogramm wohl weniger direkten Einfluss auf Einstein, sondern entstanden mehr aus dem Versuch der Erweiterung der SRT.

Nach Einsteins eigenen Aussagen war der größte Einfluss von Mach auf ihn und somit auf die Entstehungsgeschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie vor allem durch die *Allgemeine Kovarianz* und das *Machsche Prinzip* (bzw. die *Relativität der Trägheit*) gegeben.

Zusammenfassend spricht insofern wissenschaftsgeschichtlich nichts dagegen, dass Einstein wohl einem „*intuitive[n]*“ „*Machschen Forschungsprogramm*“ (Wolters, 1987, p. 50) konzeptionell gefolgt sein könnte. Ebenso kann man Mach als den „geistigen Vater der ART“ (Rosenberger, 2002, p. 88) ansehen, obwohl die fertige Allgemeine Relativitätstheorie über die Erwartungen und Voraussagen von Mach hinausreicht.

8.1. Ausblick

Gereon Wolters Arbeit *Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie* (Wolters, 1987), wo er aus verschiedenen Perspektiven den Einfluss von Mach auf Einstein zeigt, wurde im angelsächsischen Bereich kaum zur Kenntnis genommen, worauf er in seinem Artikel „Mach and Relativity Theory: A Neverending Story in HOPOSia?“ (Wolters, 2019, pp. 380-384) kurz eingeht. Weitere (kulturwissenschaftliche) Forschung wäre hierzu wichtig, um zu verstehen, welche Dynamiken zu einer derartigen Verzerrung der Ansichten in der Forschungsgemeinschaft führen können.

Allgemein wäre ebenso eine Untersuchung darüber interessant, nach welchem wissenschaftstheoretischen Modell (z.B.: nach Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend ...) eine Rekonstruktion der Relativitätstheorie geeignet wäre, um den Einfluss von Mach konkreter darstellen zu können.⁴⁹⁸

⁴⁹⁸ Siehe dazu „5.1. Anhang I: Lakatos' Vermutung“.

9. Die Rekonstruktion von Einsteins Kyoto-Rede⁴⁹⁹

Unsere zweite Forschungshypothese lautete:⁵⁰⁰

Im Jahre 1921 erschien das gefälschte Vorwort, welches Mach als einen Relativitätsgegner darstellte und ihn damit nicht als Wegbereiter der Relativitätstheorie ansah. Aufgrund der Korrespondenz (1921) zwischen Einstein und Sommerfeld (bezüglich des gefälschten Vorwortes von Ernst Mach), der zeitlichen Nähe und des Inhalts der Kyoto-Rede ist ersichtlich, dass diese als eine Verteidigungsschrift gegenüber dem gefälschten Vorwort zu lesen ist. Dazu ist es jedoch notwendig sowohl auf den sozial-historischen Kontext der Rede einzugehen als auch darauf, dass sich der Inhalt der Rede aufgrund der Quellen geschichtlich und wissenschaftlich tatsächlich rekonstruieren lässt.

Aus diesem Grund war eines der wichtigsten Ziele unserer Arbeit die Kyoto-Rede von Einstein zu analysieren und ihren Inhalt anhand historischer Quellen historisch-kritisch und rational zu rekonstruieren. Die Wichtigkeit dieser Rede für die Mach-Einstein-Forschung ergibt sich aus zwei Umständen:

- 1.) eine zeitliche Nähe zum im Jahr 1921 posthum erschienenen Werk *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) von Ernst Mach, mit einem gefälschten Vorwort, in welchem Mach als ein Relativitätsgegner dargestellt wurde,
- 2.) Einsteins mehrmaliger Verweis auf Mach in seiner Rede.

Wir haben uns in diesem Kontext kurz die Vorgeschichte von Einsteins Japan-Reise genauer angesehen, um ein wenig die geschichtliche Atmosphäre einatmen zu können.⁵⁰¹ Vor allem die antisemitische Haltung in Deutschland und Einsteins hohe Popularität nach 1919⁵⁰² trugen dazu bei, das gefälschte Vorwort zu veröffentlichen. Ironischerweise bekam Einstein 1922 – rückwirkend für das Jahr 1921 – den Nobelpreis für Physik für seine Beiträge zur Optik (und seine Verdienste um die theoretische Physik). Er war währenddessen auf seiner Asienreise, um sich von der politischen Situation in Deutschland zu erholen⁵⁰³ – siehe dazu seinen Brief an Heinrich Zangger (am 18. Juni 1922) (CPAE 13; 241; p. 370). Nach dem Ersten Weltkrieg verstärkte sich nämlich der Antisemitismus in Deutschland. Am 24. Juni 1922

⁴⁹⁹ Siehe „4.) Kapitel: Die Rekonstruktion von Einsteins Kyoto-Rede“.

⁵⁰⁰ Siehe dazu erstes Kapitel (Abschnitt „1.3. Hypothesen zu den Forschungslücken“).

⁵⁰¹ Siehe dazu Abschnitt „4.1. Einsteins Japan-Reise und ihre Vorgeschichte“.

⁵⁰² 1919 konnte Arthur Stanley Eddington zeigen, dass Einsteins Voraussagen mit den Messwerten während der Sonnenfinsternis übereinstimmten. Diese experimentelle Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie machte Einstein anschließend weltberühmt. Für eine kurze Einführung siehe „Einstein, Eddington and the 1919 eclipse“ von Peter Coles (Coles, 2019).

⁵⁰³ Siehe dazu seinen Brief an Heinrich Zangger (am 18. Juni 1922) (CPAE 13; 241; p. 370).

wurde zudem der jüdisch-deutsche Reichsaußenminister Walther Rathenau bei einem Attentat von Rechtsradikalen ermordet – ab nun begann Einstein, aufgrund seiner Popularität, um sein eigenes Leben zu fürchten (CPAE 7; _ ; p. 113), weshalb er gerade die Reise nach Japan umso mehr genoss⁵⁰⁴.

Die Kyoto-Rede „How I created the theory of relativity“⁵⁰⁵ war, nach Einsteins eigenen Worten, ein „Vortrag von mir über Entstehung der Relativitätstheorie (auf Wunsch)“ (CPAE 13; 379; p. 551) von Kitaro Nishida (CPAE 13; 379; p. 573, fn. 148).⁵⁰⁶ Diesen hielt er *spontan* am 14. Dezember 1922 an der Universität Kyoto in Japan; weshalb keinerlei Notizen von Einstein zu dieser Rede existieren. Ihr Inhalt ist uns durch die Mitschrift von Jun Ishiwara erhalten geblieben – jedoch nur auf Japanisch. Die Rede wurde bereits von vielen Forschern⁵⁰⁷ untersucht, wobei der Fokus auf dem Michelson-Experiment lag, welches Einstein darin erwähnte. Es wurden unterschiedliche Übersetzungen aus dem Japanischen verfasst⁵⁰⁸, von denen manche einander an relevanten Stellen teilweise widersprechen. In der vorliegenden Arbeit wird die deutsche Übersetzung (Haubold & Yasui, 1986) herangezogen – Gründe, die diese Übersetzung favorisieren, habe ich in den Fußnoten bei der Wiedergabe der Rede angeführt.

Die Kyoto-Rede gibt einen guten Überblick über die Entstehungsgeschichte der (Speziellen und Allgemeinen) Relativitätstheorie, die wir in unserer Arbeit mit Hilfe von Einsteins Arbeiten, Briefen, Interviews inhaltlich Satz für Satz rekonstruiert haben. Der Inhalt ist somit mit der Quellenlage in Übereinstimmung.⁵⁰⁹

Selbstverständlich hat jede Rede inhaltlich ebenso eine Vorgeschichte – auch auf diese sind wir eingegangen und haben versucht die Motivation und die Intention von Einstein besser

⁵⁰⁴ Siehe dazu seinen Brief an Wilhelm Solf, den deutschen Botschafter in Tokio (am 20. Dezember 1922) (CPAE 13; 402; p. 643). Für einen Überblick über Einsteins spannende Japan-Reise siehe (CPAE 13; _ ; p. xxxiii, xliii-xliv, lvi-lviii, lx-lxiv).

⁵⁰⁵ Oder „How Did I Create the Theory of Relativity?“ – siehe (CPAE 13; 379; p. 573, fn. 148).

⁵⁰⁶ Siehe dazu Abschnitt „4.2. Einsteins-Kyoto Rede und Forschungsstand“.

⁵⁰⁷ (Pais, 1982), (Stachel, 1982), (Sextl, 1985, pp. 35-36), (Holton, 1988), (Itagaki, 1999), (Abiko, 2000), (Dongen, 2009)

⁵⁰⁸ (Ogawa, 1979), Ukawa zitiert in (Stachel, 1982), (Ono, 1982), (Haubold & Yasui, 1986) usw.

⁵⁰⁹ Siehe im vierten Kapitel die Abschnitte „4.4.2.1. Thema I: Das spezielle Relativitätsprinzip [3]-[15]“, „4.4.2.2. Thema II: Der Widerspruch [16]-[25]“, „4.4.2.3. Thema III: Die Lösung des Widerspruchs (durch die Neudefinition der Zeit) [26]-[39]“, „4.4.2.4. Thema IV: Die erkenntnistheoretische Ebene der SRT [40]-[44]“, wo wir den ersten Teil der Rede rekonstruiert haben, in welchem die Spezielle Relativitätstheorie behandelt wird; und die Abschnitte „4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]“, „4.4.5.2. Thema II: Das Äquivalenzprinzip [49]-[65]“, „4.4.5.3. Thema III: Der Widerspruch: Machs Ansatz und die vierdimensionale Raum-Zeit [66]-[77]“, „4.4.5.4. Thema IV: Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]“, wo die Allgemeine Relativitätstheorie besprochen wird.

nachzuvollziehen.⁵¹⁰ In diesem Zusammenhang haben wir auf die Mach-Einstein-Koalition⁵¹¹, wie wir sie in dieser Arbeit bezeichnen, hingewiesen, die durch die Briefe Einsteins an Mach (Wolters, 1987, pp. 148-163), durch Machs Befürwortung von Einsteins Relativitätstheorie als einen Fortschritt seiner eigenen Gedanken (Wolters 2019, §28.5), und durch Einsteins ständigen Hinweis auf Mach in seinen Arbeiten zur Relativitätstheorie sehr gut dokumentiert ist. (Womöglich ungewollt)⁵¹² auf infame Weise erschien 1921 posthum E. Machs Buch *Die Prinzipien der physikalischen Optik. Historisch und erkenntnispsychologisch entwickelt* (Mach, 1921) mit einem gefälschten Vorwort. Darin (im Vorwort) erklärt er, dass ihm „die Rolle des Wegbereiters der Relativitätslehre zugedacht wird“ (Mach, 1921, p. VIII); er „muß“ „aber“ „mit Entschiedenheit ablehnen“ (Mach, 1921, p. VIII) und vergleicht (unter anderem) die Relativitätstheorie mit einer dogmatischen „Kirche“ (Mach, 1921, p. VIII). (Außerdem verweist er auf einen zweiten Band, wo er seine Kritik noch erläutern wird (Mach, 1921, p. IX). Sich selbst beschreibt er als einen „unbefangene[n] Spaziergänger mit eigenen Gedanken“ (Mach, 1921, p. VIII). Dieses von Ludwig Mach gefälschte Vorwort hat einige Forscher getäuscht – darunter auch Einstein. Wir haben untersucht, wie er wohl zum ersten Mal auf die Fälschung reagiert hat. Arnold Sommerfeld macht Einstein in einem Brief auf das Vorwort aufmerksam (4. Juli 1921):

„Sehr lustig ist es, dass Mach in seinem sehr schönen nachgelassenen Werk zur Optik gegen die Rel. Th. Stellung nimmt (vgl. Einleitung) u. dass Sie nach Ehren-Weiland trotzdem von ihm abgeschrieben⁵¹³ haben.“ (CPAE 12; 168; p. 212)

Es ist nicht überraschend, dass Sommerfeld in seinem Brief Paul Weyland (Weiland) erwähnt. Weyland war bekanntlich nicht nur ein Antisemit, sondern auch der Vorsitzende der 1920 gegründeten „*Arbeitsgemeinschaft deutscher Naturforscher zur Erhaltung reiner Wissenschaft e.V.*“ (Grundmann, 2004, p. 98).⁵¹⁴ Die Arbeitsgemeinschaft/Verein ist als ‘Anti-Einstein-Liga’ in die Geschichte eingegangen (Grundmann, 2004, p. 98), welche die

⁵¹⁰ Siehe dazu „4.3. 2. Hypothese: Die Vorgeschichte zu Einsteins Kyoto-Rede“.

⁵¹¹ Eine Koalition im Sinne gegenseitiger Unterstützung aufgrund (teilweiser) Überschneidungen von erkenntnistheoretischen Ansichten.

⁵¹² Es ist möglich, dass der Fälscher Ludwig Mach dachte, dass aufgrund der politischen Situation es besser wäre, E. Mach als Relativitätstheorie-Gegner zu positionieren. Einiges spricht jedoch dafür, dass es ihm unter anderem um Geld ging – siehe dazu (Wolters, 1987, pp. 10, 347, 380, 402, 414, 445).

⁵¹³ Siehe dazu „Einstein’s Encounters with German Anti-Relativists“ (CPAE 7; _; p. 106) – es gab auch schon früher Plagiatsvorwürfe von Ernst Gehrcke an Einstein (CPAE 7; _; p. 103-104).

⁵¹⁴ Siehe dazu auch „Einstein’s Encounters with German Anti-Relativists“ (CPAE 7; _; p. 105-111), die Diskussion in Bad Nauheim (CPAE 7; 46; p. 351-359) und Einsteins Artikel „Meine Antwort. Ueber die anti-relativitätstheoretische G. m. b. H.“ (Einstein, 1920f) (CPAE 7; 45; p. 345-349).

Relativitätstheorie und Einstein zu diffamieren versuchte. Jedenfalls war das die Situation, in der *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921) mit einem gefälschten Vorwort von Mach publiziert wurde. Ernst Mach war aber ein Gegner des Antisemitismus und galt zu Lebzeiten als Wegbereiter der Relativitätstheorie. Deswegen kam seine posthume, angebliche Ablehnung ziemlich überraschend. Einstein hätte nun natürlich Sommerfeld antworten können, dass seine Theorie mit Machs Gedanken wenig Gemeinsamkeiten hätten – dadurch hätte er sowohl Weylands Kritik des „Abschreibens“ abweisen als auch sich aus dem Schatten von Ernst Mach befreien können. Doch schauen wir uns nun Einsteins Brief an Sommerfeld (13. Juli 1921) an, der, auch Einsteins menschliche Größe widerspiegelt:

„Es wundert mich, dass Mach nicht für die Relativitätstheorie war. Dieser Gedankengang liegt nämlich ganz in seiner Denkrichtung. Ich bin neugierig, wie er zu seinem ablehnenden Standpunkt kommt.“ (CPAE 12; 175; p. 218)

Einstein wunderte sich über den Inhalt des Vorworts, weil aufgrund der Mach-Planck-Debatte sich eine Mach-Einstein-Koalition gebildet hatte und er sich als ein Verteidiger Machs verstand.⁵¹⁵ (Planck und Einstein waren sehr gute Freunde – nur in Bezug auf Mach, Lichtquantenhypothese⁵¹⁶ und die Allgemeine Relativitätstheorie hatten sie unterschiedliche Ansichten.)⁵¹⁷ Was genau Einstein mit „Dieser Gedankengang liegt nämlich ganz in seiner Denkrichtung“ gemeint hat, lässt sich eben aus der Kyoto-Rede „How I created the theory of relativity“, am 14. Dezember 1922 an der Kyoto Universität gehalten, verstehen. Die Rede

⁵¹⁵ Mach war nach dem Angriff von Planck bemüht, sich mit der modernen Physik auseinanderzusetzen. In einem Brief (am 23. März 1909) an Friedrich Adler schreibt Mach, dass er den Vortrag von Minkowski (zur Raum-Zeit) bereits bekommen habe (Blackmore & Hentschel, 1985, p. 56). Am 26. Juli 1909 schreibt er wieder an F. Adler:

„Sie erhalten diese Tage einen neuen unveränderten Abdruck von ‚Erhaltung d Arbeit‘. Die Sache mit Planck ist mir doch zu dumm geworden. Ich habe ihm im Vorwort nur gesagt, dass man doch wenigstens kennen muss, was man zur Belehrung anderer kritisieren will. Vielleicht findet er, dass meine Ansichten von 1872 etwas moderner sind, als er sich vorgestellt hat. Ist Einstein noch in Bern? Ich möchte ihm auch ein Exemplar senden.“

(Blackmore & Hentschel, 1985, p. 58)

⁵¹⁶ Siehe dazu „5.4. Anhang IV: Einsteins Unterhaltung mit Ernst Mach über die Atomtheorie – und die Lichtquantenhypothese?“.

⁵¹⁷ Einstein schreibt an Heinrich Zangger (20. Januar 1914):

„In Berlin sind die Mittel für die Sonnenfinsternis-Unternehmung schön zusammengefloßen. Planck hat sich sehr schön in der Angelegenheit benommen, trotzdem er an die Theorie nicht glaubt, und trotzdem die Sache ihm wegen der Mach-Polemik gegen den Strich gehen muss. Alle Achtung!“

(CPAE 5; 507; p. 595)

besteht aus zwei Teilen (I und II):⁵¹⁸ Im ersten [3]-[44] erklärt Einstein, wie er zur Speziellen Relativitätstheorie kam und im zweiten [45]-[89] spricht er über die Allgemeine Relativitätstheorie. Weiters kann man den Abschnitt über die Spezielle Relativitätstheorie wiederum in unterschiedliche Themen unterteilen:

- Thema I: Das spezielle Relativitätsprinzip [1]-[15]
- Thema II: Der Widerspruch [16]-[25]
- Thema III: Die Lösung des Widerspruchs (durch die Neudefinition der Zeit) [26]-[39]
- Thema IV: Die erkenntnistheoretische Ebene der SRT [40]-[44]

Anhand des vierten Themas, in welchem er die erkenntnistheoretische Ebene erwähnt, wird Einsteins Intention klarer: die Relativitätstheorie ist mit den Machschen Gedanken kompatibel. Im Zusammenhang mit der Vorgeschichte ist das auch verständlich. In seiner Kyoto-Rede sagt er in aller Deutlichkeit⁵¹⁹:

„[40] Ich hegte keinen Zweifel daran, dass sie auch vom philosophischen Standpunkt aus richtig ist. [41] Sie stimmt auch mit der MACHschen Theorie überein.“
(Haubold & Yasui, 1986, p. 275)

Folgende Punkte untermauern seine Ansicht:

1. Einstein und Mach pflegten eine freundliche und gegenseitig wertschätzende Korrespondenz, in welcher Mach Vergnügen und Interesse an der Speziellen Relativitätstheorie zeigte.⁵²⁰
2. Im Abschnitt „3.1. E. Machs publizierte Äußerungen zu Einsteins Relativitätstheorie“ haben wir gesehen, dass Mach sich zu Lebzeiten nur positiv zur Speziellen Relativitätstheorie geäußert hat, sie mit seinen eigenen Ansichten in Verbindung brachte und Einstein dies auch wissen ließ.
3. Im Abschnitt „3.3. Entstehungsgeschichte der SRT: Cohns Verteidigung der SRT als Andenken an Mach“ konnten wir sehen, dass man, aufgrund der Rekonstruktion der Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie von Emil Cohn, Machs

⁵¹⁸ Siehe dazu Abschnitt „4.4.1. Die Analyse von Einsteins Rede: Teil I“.

⁵¹⁹ Siehe dazu Abschnitt „4.4.2.4. Thema IV: Die erkenntnistheoretische Ebene der SRT [40]-[44]“.

⁵²⁰ Siehe dazu (Wolters, 1987, pp. 148-163).

Konzepte ohne Probleme mit der SRT in Verbindung bringen kann, da auch die Spezielle Relativitätstheorie auf die unterschiedlichen experimentellen Resultate eine möglichst einfache Antwort zu bieten versuchte.

Ein weiterer Punkt ist, dass Einstein in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Einstein, 1905r) nur seinem Freund Besso dankt, der in der Einstein-Forschung bekannt dafür ist, dass er Einstein Machs Ideen näherbrachte – das wurde im Abschnitt „2.1.1. Das O von Einsteins ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘“ behandelt. Zusätzlich haben wir versucht in „4.4.2.1.1. Das Relativitätsprinzip: Cohns und Machs möglicher Einfluss“, „4.4.2.3.1. Die Neudefinition der Zeit: Cohns und Machs möglicher Einfluss“, „4.4.2.3.2. Der Doppler-Effekt: Machs und Voigts möglicher Einfluss auf Einstein“, „4.4.2.3.5. Wieso wurde die bedeutende Rolle des Dopplerschen Prinzips übersehen?“ und in „4.4.2.4. Thema IV: Die erkenntnistheoretische Ebene der SRT [40]-[44]“ den möglichen Einfluss von Mach auf Einstein bei der Entstehungsgeschichte der Speziellen Relativitätstheorie zu zeigen.

Auch im zweiten Teil der Rede, wo es um die Allgemeine Relativitätstheorie geht, erwähnt Einstein Mach mehrmals. Beispielsweise sagt er gleich zu Beginn:⁵²¹ „[66] MACH war derjenige, der behauptete, daß alle Systeme, die Beschleunigung aufweisen, einander gleichwertig seien.“ (Haubold & Yasui, 1986, p. 276) Diese Äußerung Einsteins deckt sich auch mit anderen Zeilen aus seinen Artikeln. Offensichtlich war es Mach, der auf diesen „fundamentalen Mangel“ (Einstein, 1914h, p. 344) hingewiesen und dadurch Einstein den Weg geebnet hat – worauf er ebenso in „Autobiographisches“ (Einstein, 1983, pp. 10, 24-26) eingeht. Aber auch zum Schluss betonte er, wie im Teil (I), Machs Bedeutung für die erkenntnistheoretische Ebene der ART;⁵²² und zwar geht es dabei um die Grenzbedingungen (des Universums) nach der relativistischen Kosmologie und in diesem Zusammenhang um das Trägheitskonzept von Mach, welches heute als das „Machsche Prinzip“ bekannt ist. Eine historische Rekonstruktion hat gezeigt, dass Machs Einfluss auf die Entstehungsgeschichte der ART vielseitig war. Ganz klar ist, dass Einstein auch in seiner Rede darauf aufmerksam machen wollte.

⁵²¹ Siehe dazu Abschnitt „4.4.5.1. Thema I: Die Allgemeine Kovarianz [45]-[48]“.

⁵²² Siehe dazu Abschnitt „4.4.5.4. Thema IV: Erkenntnistheoretische Ebene der ART: Relativistische Kosmologie [80]-[89]“.

Zusammenfassend können wir sagen, dass wir, aufgrund der obigen Punkte, genügend Argumente haben, um unsere zweite Hypothese vertreten zu können.

Aufgrund des Inhalts von Einsteins Rede und durch die Rekonstruktion ihrer Vorgeschichte haben wir ebenso genügend Quellen und Argumente angegeben, die für unsere dritte Forschungshypothese sprechen.

9.1. Ausblick

Einsteins spontane ‚inoffizielle Nobelpreisrede‘ bzw. die Kyoto-Rede, welche einerseits einen guten Überblick über die Entstehungsgeschichte der (Speziellen und der Allgemeinen) Relativitätstheorie bietet, und andererseits eine zeitliche Nähe zum gefälschten Vorwort in (Mach, 1921) aufweist, ist aufgrund ihrer Vorgeschichte womöglich Einsteins interessanteste als auch wichtigste Rede überhaupt. Wir haben darauf hingewiesen, dass jedoch keinerlei Notizen von Einstein zu dieser Rede existieren, aber uns der Inhalt durch die Mitschrift (von Jun Ishiwara) erhalten geblieben ist – jedoch nur auf Japanisch.⁵²³ Es wurden unterschiedliche Übersetzungen aus dem Japanischen verfasst⁵²⁴, von denen manche einander an einigen Stellen teilweise widersprechen. Womöglich können weitere Forschungen und Übersetzungen genauer erläutern, weshalb es zu diesen Widersprüchen in den Übersetzungen kommen konnte.

Zudem wurde die Rede bereits von vielen Forschern⁵²⁵ untersucht, wobei der Fokus auf dem Michelson-Experiment lag, welches Einstein in der Rede erwähnte.⁵²⁶ Es wäre philosophisch und kulturwissenschaftlich interessant zu untersuchen, weshalb man im angelsächsischen Bereich lange Zeit dachte, dass das Michelson-Experiment bei der Entstehungsgeschichte keine Rolle spielte, obwohl die Bedeutung des Michelson-Experimentes für deutsche und japanische Forscher offensichtlich war.

Ebenso wäre es wichtig in Zukunft zu beleuchten, ob neue Quellen auftauchen (oder alte übersehen wurden), die bezüglich der Kyoto-Rede von Einstein mehr Kenntnis bringen würden.

⁵²³ Siehe dazu Abschnitt „4.2. Einsteins-Kyoto Rede und Forschungsstand“.

⁵²⁴ (Ogawa, 1979), Ukawa zitiert in (Stachel, 1982), (Ono, 1982), (Haubold & Yasui, 1986) usw.

⁵²⁵ (Pais, 1982), (Stachel, 1982), (Sextl, 1985, pp. 35-36), (Holton, 1988), (Itagaki, 1999), (Abiko, 2000), (Dongen, 2009)

⁵²⁶ Alejandro Cassini und Marcelo Leonardo Levinas geben einen Überblick darüber, wo das Michelson-Experiment von Einstein erwähnt und diskutiert wird (Cassini & Levinas, 2019, pp. 55, fn. 2).

Literaturverzeichnis

- Abiko, S., 2000. Einstein's Kyoto Address: 'How I Created the Theory of Relativity'. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 31(1), pp. 1-35.
- Abraham, M., 1903. Prinzipien der Dynamik des Elektrons. *Annalen der Physik*, 10(Vierte Folge), pp. 105-179.
- Abraham, M., 1904a. Der Lichtdruck auf einen bewegten Spiegel und das Gesetz der schwachen Strahlung. In: S. Meyer, Hrsg. *Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstag*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Abraham, M., 1904b. Theorie der Strahlung und des Strahlungsdruckes. *Annalen der Physik*, Band 14. (Der ganzen Reihe 319. Band.)(Vierte Folge), pp. 236-287.
- Abraham, M., 1904c. Kritik der Erwiderung des Hrn. W. Wien. *Annalen der Physik*, Band 14. (Der ganzen Reihe 319. Band.)(Vierte Folge), pp. 1039-1040.
- Aichelburg, P. C., 2019. Mach's Influence on Einstein's "Biggest Blunder" and the Consequences for Modern Cosmology. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach – Life, Work, Influence*. Cham: Springer.
- Aichelburg, P. C. & Sexl, R. U. Hrsg., 1979. *Albert Einstein: His Influence on Physics, Philosophy and Politics*. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn.
- Aichelburg, P. & Sexl, R., 1971. On the Gravitational field of a massless particle. *General Relativity and Gravitation*, Band 2, pp. 303-312.
- Andersson, G., 1998. *Kritik und Wissenschaftsgeschichte. Kuhns, Lakatos' und Feyerabends Kritik des Kritischen Rationalismus*. Tübingen: J.C.B..
- Baatz, U., 2019. Ernst Mach: Science and Buddhism. A Misunderstanding Under Globalization's Signature. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach - Life, Work, Influence*. Cham: Springer, pp. 111-122.
- Barbour, J., 1974. Relative-distance Machian theories. *Nature*, 249(5455), pp. 328-329.
- Barbour, J., 1992. Einstein and Mach's Principle. In: J. Eisenstadt & A. Kox, Hrsg. *Studies in the History of General Relativity*. Boston/Basel/Berlin: Birkhäuser.
- Barbour, J., 1995c. General Relativity as a Perfectly Machian Theory. In: *Mach's principle: From Newton's bucket to quantum gravity*. s.l.:Birkhäuser.
- Barbour, J., 1999. *The End of Time: The Next Revolution in our Understanding of the Universe*. London: Weidenfeld and Nicolson.
- Barbour, J., 2001. *The Discovery of Dynamics: A study from a Machian point of view of the discovery and the structure of dynamical theories*. Oxford: University Press.
- Barbour, J., 2010. The definition of Mach's Principle. *Foundation Physics*, 40(1263-1284).
- Barbour, J., 2020. *The Janus Point: A New Theory of Time*. s.l.:Basic Books.
- Barbour, J. & Bertotti, B., 1982. Mach's principle and the structure of dynamical theories. *Proceedings of the Royal Society London*, A 383(295), pp. 295-306.
- Barbour, J. & et al., 1995b. General Discussion: What is the Machian Program?. In: *Mach's principle: From Newton's bucket to quantum gravity*. Boston-Basel-Berlin: Birkhäuser, pp. 91-105.
- Barbour, J., Foster, B. & Murchadha, N., 2002. Relativity without relativity. *General Relativity and Quantum Cosmology*, 19(3217).
- Barbour, J., Koslowski, T. & Mercati, F., 2014. Identification of a Gravitational Arrow of Time. *Physical Review Letters*, 113(181101).
- Barbour, J. & Pfister, H. Hrsg., 1995a. *Mach's principle: From Newton's bucket to quantum gravity*. Boston-Basel-Berlin: Birkhäuser.

Bergia, S., 1985. Einstein und die Geburt der speziellen Relativitätstheorie. In: A. French, Hrsg. *Albert Einstein Wirkung und Nachwirkung*. Braunschweig: Vieweg & Sohn.

Bertlmann, R., 2017. Bell's Universe: A Personal Recollection. In: R. Bertlmann & A. Zeilinger, Hrsg. *Quantum [Un]Speakables II: Half a Century of Bell's Theorem*. s.l.:Springer.

Blackmore, J., 1989. Ernst Mach Leaves 'The Church of Physics'. *The British Journal for the Philosophy of Science*, December.4(4).

Blackmore, J. & Hentschel, K., 1985. *Ernst Mach als Aussenseiter. Machs Briefwechsel über Philosophie und Relativitätstheorie mit Persönlichkeiten seiner Zeit*. Wien: Wilhelm Braumüller.

Blackmore, J. T., 1989. Ernst Mach Leaves 'The Church of Physics'. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 40(4), pp. 519-540.

Bondi, H. & Samuel, J., 1997. The Lense-Thirring effect and Mach's principle. *Physics Letters A*, 228(3), pp. 121-126.

Bose, S., 1924. Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese. *Zeitschrift für Physik*, Issue 26.

Brans, C. H., 1961. *Mach's Principle and a Varying Gravitational Constant*. Princeton : Princeton University.

Brenner, A., 2019. Mach, Duhem and the Historical Method in Philosophy of Science. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach – Life, Work, Influence*. Cham: Springer, pp. 637-650.

Brown, J. R. & Fehige, Y., 2019. *Thought Experiments*. [Online]
Available at: <https://plato.stanford.edu/entries/thought-experiment/>
[Zugriff am 22 Februar 2020].

Bucherer, A. H., 1903. Über den Einfluß der Erdbewegung auf die Intensität des Lichtes. *Annalen der Physik*, Band 11 (Der ganzen Reihe 316. Band.)(Vierte Folge), pp. 270-283.

Buzzoni, M., 2019. Duhem on Thought Experiments. Or: Did Duhem Really Rejct Mach's Thought Experiments?. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach - Life, Work, Influence*. Cham: Springer, pp. 651-662.

Buzzoni, M., 2019. Duhem on Thought Experiments. Or: Did Duhem Really Reject Mach's Thought Experiments?. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach – Life, Work, Influence*. Cham: Springer, pp. 651-662.

Capria, M. M. & Manini, M.-G., 2013. On the relativistic unification of electricity and magnetism. *arXiv: 1111.7126*.

Carrier, M., 2009. *Raum-Zeit*. Berlin: Walter de Gruyter.

Cassini, A. & Levinas, M. L., 2019. Einstein's reinterpretation of the Fizeau experiment: How it turned out to be crucial for special relativity. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Band 69, pp. 55-72.

Chalupecký, I., 2009. Aurel Stodola. In: *Österreichisches Biographisches Lexikon* . s.l.:s.n.

Cohen, I. B., 1955. An Interview with Einstein. *Scientific American*, Issue 193, pp. 69-73.

Cohn, E., 1900a. *Das Elektromagnetische Feld. Vorlesungen über die Maxwell'sche Theorie*. Leipzig: S. Hirzel.

Cohn, E., 1900b. Über die Gleichungen der Electrodynamik für bewegte Körper. *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, Band 5, pp. 516-523.

Cohn, E., 1901. Ueber die Gleichungen des elektromagnetischen Feldes für bewegte Körper. *Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-physikalische Klasse*, Band Heft 1, pp. 74-99.

Cohn, E., 1904. Antikritisches zu Hrn. W. Wiens „Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper". *Annalen der Physik*, Band 14. (Der ganzen Reihe 319. Band.)(Vierte Folge), p. 208.

- Cohn, E., 1904a. Zur Elektrodynamik bewegter Systeme. In: *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften. Jahrgang 1904. Zweiter Halbband. Juli bis December.*. Berlin: Verlag der königlichen Akademie der Wissenschaften, pp. 1294-1303.
- Cohn, E., 1904b. Zur Elektrodynamik bewegter Systeme. II.. In: *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften. Jahrgang 1904. Zweiter Halbband. Juli bis December.*. Berlin: Verlag der königlichen Akademie der Wissenschaften, pp. 1404-1417.
- Cohn, E., 1913. *Physikalisches über Raum und Zeit*. Zweite, verbesserte Auflage Hrsg. Leipzig/Berlin: B.G. Teubner.
- Cohn, E., 1920. *Physikalisches über Raum und Zeit*. 4. Auflage Hrsg. Wiesbaden: Springer.
- Coles, P., 2019. Einstein, Eddington and the 1919 eclipse. *Nature*, Band 568, pp. 306-307.
- Couture-Mingheras, A., 2019. Mach's Post-Kantian Empiricism. For a New Concept of Givenness. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach – Life, Work, Influence*. Cham: Springer.
- Dahmen, D., Villa, R. & Campis, R. J., 2019. The Transdisciplinary Legacy of Ernst Mach: From the Analysis of Sensations to the GPS Inside the Brain. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach - Lief, Work, Influence*. Cham: Springer.
- Dongen, J. v., 2009. On the role of the Michelson-Morley experiment: Einstein in Chicago. *Arch. Hist. Exact Sci.*, Band 63, pp. 655-663.
- Doppler, C., 2000. *Schriften aus der Frühzeit der Astrophysik. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften*. Frankfurt am Main: Heinrich Deutsch.
- Doyle, W. T., 1988. Recognition for Woldemar Voigt. *Physics Today*.
- Duhem, P., 1908. *Ziel und Struktur der physikalischen Theorien*. s.l.:Johann Ambrosius Barth.
- Dvorak, R., 2019. Ernst Mach in Prague and the Dawn of Gas Dynamics. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach – Life, Work, Influence*. Cham: Springer.
- Earman, J., Janssen, M. & Norton, J. D. Hrsg., 1993. *The Attraction of Gravitation: New Studies in the History of General Relativity*. Boston/Basel/Berlin: Birkhäuser.
- Ehrenhaft, F., 1926. Ernst Machs Stellung im wissenschaftlichen Leben. *Neue Presse*, 12 Juni.
- Eichelberg, G., 1959. *Schweizerische Bauzeitung*. Zürich: W. Jegher & A. Ostertag.
- Eichenwald, A., 1903a. Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde. *Annalen der Physik*, 11. Der ganzen Reihe 316. Band(5), pp. 1-30.
- Eichenwald, A., 1903b. Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde. *Annalen der Physik*, 11. Der ganzen Reihe 316. Band.(6), pp. 421-441.
- Eichenwald, A., 1904. Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde. *Annalen der Physik*, Band 13. (Der ganzen Reihe 318. Band.)(Vierte Folge), pp. 919-943.
- Eichenwald, A., 1904a. Ueber das innere Feld der Elektronen. *Annalen der Physik*, 13. Der ganzen Reihe 318. Band(4), pp. 770-790.
- Eichenwald, A., 1904b. Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde. *Annalen der Physik*, 13. Der ganzen Reihe 318. Band(5), pp. 919-943.
- Einstein, A., 1901. Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen. *Annalen der Physik*, Band 4, pp. 513-523.
- Einstein, A., 1902a. Über die thermodynamische Theorie der Potentialdifferenz zwischen Metallen und vollständig dissociirten Lösungen ihrer Salze und über eine elektrische Methode zur Erforschung der Molecularkräfte. *Annalen der Physik*, Band 8, pp. 798-814.
- Einstein, A., 1902b. Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. *Annalen der Physik*, Band 9, pp. 417-433.
- Einstein, A., 1903. Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik. *Annalen der Physik*, Band 11. Der ganzen Reihe 316. Band(5), pp. 170-187.

Einstein, A., 1904. Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme. *Annalen der Physik*, Band 14. (Der ganzen Reihe 319. Band.)(Vierte Folge), pp. 354-362.

Einstein, A., 1905i. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, Band 17, pp. 132-148.

Einstein, A., 1905k. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*, Band 17, pp. 549-560.

Einstein, A., 1905r. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, Band 17, pp. 891-921.

Einstein, A., 1906b. Zur Theorie der Brownschen Bewegung. *Annalen der Physik*, Band 19, pp. 371-381.

Einstein, A., 1906d. Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption. *Annalen der Physik*, Band 20, pp. 199-206.

Einstein, A., 1907a. Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme. *Annalen der Physik*, Band 22, pp. 180-190.

Einstein, A., 1907c. Theoretische Bemerkungen über die Brownsche Bewegung. *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*, 13(6), pp. 41-42.

Einstein, A., 1907e. Über die Möglichkeit einer neuen Prüfung des Relativitätsprinzips. *Annalen der Physik*, Band 23, pp. 197-198.

Einstein, A., 1907j. Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, Band 4, pp. 411-462.

Einstein, A., 1908c. Elementare Theorie der Brownschen Bewegung. *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*, Band 14, pp. 235-239.

Einstein, A., 1909b. Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems. *Physikalische Zeitschrift*, Band 10, pp. 185-193.

Einstein, A., 1909c. Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung. *Deutsche Physikalische Gesellschaft, Verhandlungen 7*, pp. 482-500.

Einstein, A., 1910d. Theorie der Opaleszenz von homogenen Flüssigkeiten und Flüssigkeitsgemischen in der Nähe des kritischen Zustandes. *Annalen der Physik*, Band 30, pp. 1275-1298.

Einstein, A., 1911a. Bemerkung zu dem Gesetz von Eötvös. *Annalen der Physik*, Band 34, pp. 165-169.

Einstein, A., 1911h. Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Annalen der Physik*, Band 35, pp. 898-908.

Einstein, A., 1911i. Die Relativitäts-Theorie. *Naturforschende Gesellschaft in Zürich. Vierteljahrsschrift*, Band 56, pp. 1-14.

Einstein, A., 1912e. Gibt es eine Gravitationswirkung, die der elektrodynamischen Induktionswirkung analog ist?. *Vierteljahrsschrift für gerichtliche Medizin und öffentliches Sanitätswesen*, Band 44, pp. 37-40.

Einstein, A., 1913c. Zum gegenwärtigen Stande des Gravitationsproblems. *Physikalische Zeitschrift*, Issue 14, pp. 1249-1262.

Einstein, A., 1914h. Zum Relativitäts-Problem. *Scintia*, Band 15, pp. 337-348.

Einstein, A., 1914l. Bemerkungen zu P. Harzers Abhandlung »Über die Mitführung des Lichtes in Glas und die Aberration«. *Astronomische Nachrichten*, Band 199, pp. 7-10.

Einstein, A., 1914o. Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte*, pp. 1030-1085.

Einstein, A., 1914o. Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte*, pp. 1030-1085.

Einstein, A., 1914o. Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte*, pp. 1030-1085.

Einstein, A., 1915a. Theoretische Atomistik. In: E. Warburg, Hrsg. *Die Kultur der Gegenwart. Ihre Entwicklung und ihre Ziele*. Leipzig: Teubner, pp. 251-263.

Einstein, A., 1915b. Die Relativitätstheorie. In: E. Warburg, Hrsg. *Die Kultur der Gegenwart. Ihre Entwicklung und ihre Ziele*. Leipzig: Teubner, pp. 703-715.

Einstein, A., 1915f. Zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte*, pp. 778-786.

Einstein, A., 1916c. Ernst Mach. *Physikalische Zeitschrift*, Band 17, pp. 101-104.

Einstein, A., 1916d. Ein einfaches Experiment zum Nachweis der Ampèreschen Molekularströme. *Deutsche Physikalische Gesellschaft. Verhandlungen*, Band 18, pp. 173-177.

Einstein, A., 1916e. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, Band 49, pp. 769-822.

Einstein, A., 1917b. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte*, pp. 142-152.

Einstein, A., 1918c. Kritisches zu einer von Hrn. De Sitter gegebenen Lösung der Gravitationsgleichungen.. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte*, pp. 270-272.

Einstein, A., 1918e. Prinzipielles zur Allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, Band 55, pp. 241-244.

Einstein, A., 1918k. Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie. *Die Naturwissenschaften*, Band 6, pp. 697-702.

Einstein, A., 1918l. Bemerkung E. Gehrecks Notiz „Über den Äther“. *Deutsche Physikalische Gesellschaft. Verhandlungen*, Band 20, p. 261.

Einstein, A., 1919a. Spielen Gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle?. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte*, pp. 349-356.

Einstein, A., 1920f. Meine Antwort. Ueber die anti-relativitätstheoretische G. m. b. H.. *Berliner Tageblatt*, 27 August, pp. 1-2.

Einstein, A., 1922a. Über ein den Elementarprozeß der Lichtemission betreffendes Experiment. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte*, pp. 882-883.

Einstein, A., 1922f. Zur Theorie der Lichtfortpflanzung in dispergierenden Medien. *Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Physikalisch-mathematische Klasse. Sitzungsberichte*, pp. 18-22.

Einstein, A., 1923. Grundgedanken und Probleme der Relativitätstheorie. In: *Les Prix en 1921-1922..* Stockholm: Norstedt & Fils.

Einstein, A., 1923q. Grundgedanken und Probleme der Relativitätstheorie. In: *Les Prix Nobel en 1921-1922.* Stockholm: Norstedt & Fils.

Einstein, A., 1924o. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften.*, pp. 261-267.

Einstein, A., 1925f. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Zweite Abhandlung.. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften. Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 8. Januar.*, pp. 3-14.

Einstein, A., 1925i. Zur Quantentheorie des idealen Gases. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften*, pp. 18-25.

Einstein, A., 1979. Last Lecture of Albert Einstein. In: P. C. Aichelburg & R. U. Sexl, Hrsg. *Albert Einstein: His Influence on Physics, Philosophy and Politics*. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn, pp. 207-211.

Einstein, A., 1983. Autobiographisches. In: P. A. Schilpp, Hrsg. *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher - eine Auswahl*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn, pp. 1-36.

Einstein, A., 1986. Autobiographische Skizze. In: C. Seelig, Hrsg. *Helle Zeit - dunkle Zeit: in memoriam Albert Einstein*. Braunschweig: Vieweg & Sohn.

Einstein, A., 2009. *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*. 24. Auflage Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer.

Einstein, A. & Grossmann, M., 1913. *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation*. Leipzig/Berlin: B. G. Teubner.

Einstein, A. & Hopf, L., 1910a. Über einen Satz der Wahrscheinlichkeitsrechnung und seine Anwendung in der Strahlungstheorie. *Annalen der Physik*, Band 33, pp. 1096-1104.

Einstein, A. & Hopf, L., 1910b. Statistische Untersuchung der Bewegung eines Resonators in einem Strahlungsfeld. *Annalen der Physik*, Band 33, pp. 1105-1115.

Embacher, F., 2013. Erde, Mond und G. *PhyDid*, Issue 1/12, pp. 36-47.

Embacher, F., kein Datum [Online]
Available at:
<https://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/SRT/Lorentztransformation.html>
[Zugriff am 3 August 2020].

Ernst, A. & Hsu, J.-P., 2001. First Proposal of the Universal Speed of Light by Voigt in 1887. *Chinese Journal of Physics*, 39(3).

Föppl, A., 1894. *Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität*. Leipzig: B.G. Teubner.

Föppl, A., 1904b. Über absolute und relative Bewegung. In: *Akademie der Wissenschaften, München, Mathematisch-Wissenschaftliche Klasse, Sitzungsberichte*, 5.11.1904. s.l.:s.n.

Föppl, A., 1904. *Theorie der Elektrizität. Erster Band: Einführung in die Maxwellsche Theorie der Elektrizität. Zweiter, vollständig umgearbeitete Auflage*. Leipzig: B.G. Teubner.

Försterling, K., 1951. Woldemar Voigt zum hundertsten Geburtstage. Band Heft 10 (Zweites Maifest).

Füßl, W. & Johannes-Geert, H., 2016. Interferenzen mit Mach 2. Ernst Mach und sein Sohn Ludwig bildeten ein ambivalentes Forscherduo. *Physik Journal*, November.

Fäsi & Beer, 1905. *Annalen der schweizerischen meteorologischen Central-Anstalt*. Zürich: Zürcher & Furrer.

Feyerabend, P. K., 1983. *Wider den Methodenzwang*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Feyerabend, P. K., 1988. Machs Theorie der Forschung und ihre Beziehung zu Einstein. In: F. Stadler & R. Haller, Hrsg. *Ernst Mach – Werk und Wirkung*. Wien: Hölder-Pichler-Tempsky.

Feynman, R., 2010. *The Feynman Lectures on Physics, Volume III: The New Millennium Edition: Quantum Mechanics*. New York: Basic Books.

FitzGerald, G. F., 1889. The Ether and the Earth's Atmosphere. *Science*, Band 13.

Fließbach, T., 2007. *Mechanik. Lehrbuch zur theoretischen Physik I*. München: Elsevier GmbH.

Fließbach, T., 2016. *Allgemeine Relativitätstheorie*. 7. Auflage Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer.

Fotowettbewerb, 2019. *Meine Forschung in einem Bild*. [Online]
Available at: <https://doktorat.univie.ac.at/phd-corner/meine-forschung-in-einem->

[bild/fotowettbewerb-2019/](#)

[Zugriff am 3 Juli 2019].

Frank, P., 1949. *Einstein. Sein Leben und seine Zeit*. München/Leipzig/Freiburg: Paul List Verlag.

Frank, P., 1979. *Einstein: sein Leben und seine Zeit. Mit einem Vorwort von Albert Einstein*. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn.

French, A., Hrsg., 1979. *Einstein: A Centenary Volume*. In: London: Heinemann Educational Book Ltd..

French, A. P., Hrsg., 1985. *Albert Einstein Wirkung und Nachwirkung*. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn.

Galilei, G., 1891. *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische. Aus dem Italienischen übersetzt und erläutert von Emil Strauss*. Leipzig: B.G. Teubner.

Gearhart, C. A., 2010. Max Planck und die Wärmestrahlungstheorie. In: D. Hoffmann, Hrsg. *Max Planck und die moderne Physik*. Berlin/Heidelberg: Springer.

Giesen, B. & Schmid, M., 1974. Rationalität und Erkenntnisfortschritt: Kritische Bemerkungen zur Methodologie der wissenschaftlichen Forschungsprogramme. *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*, Band vol. 5, pp. 256-284.

Grundmann, S., 2004. *The Einstein Dossiers. Science and Politics – Einstein's Berlin Period with an Appendix on Einstein's FBI File*. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.

Gutfreund, H. & Renn, J., 2015. *The road to relativity: The history and meaning of Einstein's "The foundation of general relativity" featuring the original manuscript of Einstein's masterpiece*. Princeton: Princeton University Press.

Hagmann, J.-G., 2019. Light and Shadow – The Experimental Collaboration Between Ernst Mach and Ludwig Mach, Father and Son. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach - Life, Work, Influence*. Cham: Springer.

Haller, R., 1980. Zwei Briefe von Otto Neurath an Ernst Mach. *Grazer philosophische Studien*, Band Vol. 10.

Haller, R. & Rutte, H. Hrsg., 1981. *Otto Neurath. Gesammelte philosophische und methodologische Schriften. Band 1*. Wien: Hölder-Pichler-Tempsky.

Hashi, H., 2007. The Significance of Einstein's Theory of Relativity in Nishida's "Logic of Field". *Philosophy East and West*, 57(4), pp. 457-481.

Haubold, H. J. & Yasui, E., 1986. Jun Ishiwaras Text über Albert Einsteins Gastvortrag an der Universität zu Kyoto am 14. Dezember 1922 (Eine Übersetzung aus dem Japanischen). *Archive for History of Exact Sciences*, 36(3), pp. 271-279.

Heisenberg, W., 1969. *Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik*. München: R. Piper & Co.

Heller, M., 1991. The happiest thought of Einstein's life. *The Astronomy quarterly*, 8(Heft 4), pp. 177-180.

Hentschel, K., 1988. Die Korrespondenz Duhem-Mach: Zur "Modellbeladenheit" von Wissenschaftsgeschichte. *Annals of Science*, Band 45, pp. 73-91.

Hentschel, K., 1988. *Die Korrespondenz Duhem-Mach: Zur 'Modellbeladenheit' von Wissenschaftsgeschichte*. Annals of Science: s.n.

Heras, R., 2017. A review of Voigt's transformations in the framework of special relativity. *History and Philosophy of Physics*. <https://arxiv.org/abs/1411.2559>.

Herneck, F., 1966. Die Beziehungen zwischen Einstein und Mach dokumentarisch dargestellt. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Friedrich-Schiller-Universität Jena, mathematisch-naturwissenschaftliche Reihe* 15, pp. 1-14.

- Herrmann, D. B., 2004. *Astronomiegeschichte. Ausgewählte Beiträge zur Entwicklung der Himmelskunde*. Berlin-Frankfurt a. M.: Paetec.
- Hertz, H., 1890. Ueber die Grundgleichungen der Electrodynamik für bewegte Körper. *Annalen der Physik*, 41 (XLI)(Nr. 11), pp. 369-399.
- Hertz, H., 1894. *Die Prinzipien der Mechanik. In neuem Zusammenhange dargestellt*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Hoffmann, D., 2010. Max Planck in seinem Wirken für die Physikalische Gesellschaft und die Annalen der Physik. In: D. Hoffmann, Hrsg. *Max Planck und die moderne Physik*. Berlin-Heidelberg: Springer.
- Hoffmann, D., 2020. Einleitung des Herausgebers. In: D. Hoffmann & J. Pircher, Hrsg. *Die Prinzipien der Optik: historisch und erkenntnispsychologisch entwickelt*. Berlin: Xenomoi.
- Holman, W. F., 1909. Die piezoelektrische Erregung von Rohrzucker. *Annalen der Physik*, 334(6), pp. 160-178.
- Holton, G., 1988. *Thematic origins of scientific thought, Kepler to Einstein*. Cambridge/Massachusetts: Harvard University Press.
- Holton, G., 1992. More on Mach and Einstein. In: J. Blackmore, Hrsg. *Ernst Mach - a deeper look*. s.l.:Springer.
- Hubble, E., 1929. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Band 15, pp. 168-173.
- Itagaki, R., 1999. Einstein and the Michelson experiment – Concerning his speech at the Imperial University of Kyoto. *Kagakushi Kenkyuu*, Band 38, pp. 173-177.
- Janssen, M. & Renn, J., 2015. Supplementary Information to: Einstein was no lone genius (Comment in Nature). *Nature*, Band 527, pp. 298-300.
- Janssen, M. & Stachel, J., 2004. *THE OPTICS AND ELECTRODYNAMICS OF MOVING BODIES**. [Online]
Available at: <https://www.mpiwg-berlin.mpg.de/Preprints/P265.PDF>
[Zugriff am 11 Juli 2020].
- Jost, R., 1995. Ernst Mach und Max Planck. In: K. Hepp, W. Hunziker & W. Kohn, Hrsg. *Das Märchen vom Elfenbeinturm: Reden und Aufsätze*. Heidelberg: Springer.
- Jost, R., 1995. Ernst Mach und Max Planck. In: K. Hepp, W. Hunziker & W. Kohn, Hrsg. *Das Märchen vom Elfenbeinturm. Reden und Aufsätze*. Berlin/Heidelberg: Springer, pp. 53-66.
- Kühne, U., 1997. Gedankenexperiment und Erklärung. *Bremer Philosophica*, Band 5, pp. 1-51.
- Küpper, H.-J., 2000-2018. *Einstein-webseite.de*. [Online]
Available at: https://www.einstein-website.de/z_information/verschiedenes.html
[Zugriff am 2 Februar 2021].
- Kalähne, A., 1903. Schallgeschwindigkeit und Verhältnis der spezifischen Wärmen der Luft bei hoher Temperatur. *Annalen der Physik*, Vierter Band (Der ganzen Reihe 316. Band.)(Vierte Folge), pp. 225-256.
- Kanitschneider, B., 1979. Einstein's Treatment of Theoretical Concepts. In: P. C. Aichelburg & R. U. Sexl, Hrsg. *Albert Einstein: His Influence on Physics, Philosophy and Politics*. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn.
- Kohl, E., 1903a. Über ein Integral der Gleichungen für die Wellenbewegung, welches dem Dopplerschen Prinzip entspricht. *Annalen der Physik*, Band 11. Der ganzen Reihe 316. Band(5), pp. 96-113.
- Kohl, E., 1903b. Über das dem Dopplerschen Prinzip entsprechende Integral der Gleichungen für die Wellenbewegung. *Annalen der Physik*, Band 11. Der ganzen Reihe 316. Band(7), pp. 515-528.

- Kohl, E., 1903c. Über die Gültigkeit des Massensatzes von Gauss für bewegte elektrische Massen. *Annalen der Physik*, Band 12. Der ganzen Reihe 317. Band(12), pp. 842-848.
- Kohl, E., 1904. Über die elektromagnetischen Feldgleichungen innerhalb bewegter elektrischer Massen. In: *Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstage*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth, pp. 678-686.
- Kollros, L., 1986. Erinnerungen eines Kommilitonen. In: Carl Seelig, Hrsg. *Helle Zeit - Dunkle Zeit. In memoriam Albert Einstein*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn, pp. 17-31.
- Kuhn, T., 1974. Bemerkungen zu Lakatos. In: I. Lakatos & A. Musgrave, Hrsg. *Kritik und Erkenntnisfortschritt. Abhandlungen des Internationalen Kolloquiums über die Philosophie des Wissenschaft*. Braunschweig: Vieweg.
- Kuhn, T., 2012. *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Löbe, L.-P. & Hoffmann, R., 2019. Ernst Mach and Johannes Kessel in Prague 1871–1874. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach - Life, Work, Influence*. Cham: Springer.
- Lakatos, I., 1982. *Die Methodologie der wissenschaftlichen Forschungsprogramme. Philosophische Schriften*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Laub, J., 1907. Zur Optik der bewegten Körper. *Annalen der Physik*, Band 23.
- Laue, M., 1907. Die Mechanik des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip. *Annalen der Physik*, Band 23.
- Laue, M., 1992. On Mach's The Principles of Physical Optics. In: J. Blackmore, Hrsg. *Ernst Mach – a deeper look: documents and new perspectives*. Dordrecht: Springer.
- Laue, M. V., 1919. *Die Relativitätstheorie. Erster Band: Das Relativitätsprinzip der Lorentztransformation..* Braunschweig: Vieweg & Sohn.
- LEIFIphysik (Online), 2021. *leifiphysik.de (Spezielle Relativitätstheorie)*. [Online] Available at: <https://www.leifiphysik.de/relativitaetstheorie/spezielle-relativitaetstheorie/ausblick/minkowski-diagramme#headline-342> [Zugriff am 1 Juli 2021].
- Lemaître, G., 1927. Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques. *Ann. Soc. Sci. Brux.*, Band A47, pp. 49-59.
- Lorentz, H., 1893. De relatieve beweging van de aarde en den aether. In: *Verslagen van de gewone vergaderingen der Wis- en Natuurkundige Afdeeling*. Amsterdam: Johannes Müller.
- Lorentz, H., 1895. *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*. Leipzig: B.G. Teubner.
- Lorentz, H., 1913. Elektromagnetische Erscheinungen in einem System, das sich mit beliebiger, die des Lichtes nicht erreichender Geschwindigkeit bewegt. In: *Das Relativitätsprinzip. Eine Sammlung von Abhandlungen*. Leipzig/Berlin: B.G. Teubner.
- Lorentz, H. A., kein Datum Elektromagnetische Erscheinungen in einem System, das sich mit beliebiger, die des Lichts nicht erreichender Geschwindigkeit bewegt. In: s.l.:s.n.
- Louis, K., 1986. Erinnerungen eines Kommilitonen. In: Carl Seelig, Hrsg. *Helle Zeit - Dunkle Zeit. In memoriam Albert Einstein*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn, pp. 17-31.
- Müller, J., 1903. Über Schallgeschwindigkeit in Röhren. *Annalen der Physik*, Band 11 (Der ganzen Reihe 316. Band.)(Vierte Folge), pp. 331-354.
- Mach, E., 1866. *Einleitung in die Helmholtz'sche Musiktheorie*. Graz: Leuschner und Lubensky.
- Mach, E., 1872. *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit. Vortrag gehalten in der k. Böhmisches Gesellschaft der Wissenschaften am 15. November*. Prag: Calve.

- Mach, E., 1873a. *Beiträge zur Doppler'schen Theorie der Ton- und Farbänderungen durch Bewegung. Gesammelte Abhandlungen*. Prag: J.G. Calve'sche Buchhandlung.
- Mach, E., 1873b. *Optisch-akustische Versuche: die spectrale und stroboskopische Untersuchung tönender Körper*. Prag: Calve.
- Mach, E., 1896. *Die Prinzipien der Wärmelehre: Historisch-kritisch entwickelt*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Mach, E., 1897. *Über Gedankenexperimente. Sonder-Abdruck aus der: Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht. Zehntes Jahrgang..* Berlin: Julius Springer.
- Mach, E., 1897. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*. Leipzig: F.A. Blockhaus.
- Mach, E., 1904. Objektive Darstellung der Interferenz des polarisierten Lichtes. In: S. Meyer, Hrsg. *Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstage*. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth, pp. 441-447.
- Mach, E., 1908. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung: historisch-kritisch dargestellt*. Sechste und verbesserte Auflage Hrsg. Leipzig: Brockhaus.
- Mach, E., 1909. *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*. 2. Auflage Hrsg. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Mach, E., 1910a. Die Leitgedanken meiner naturwissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen. *Physikalische Zeitschrift*, Band 11, pp. 599-606.
- Mach, E., 1910b. Sinnliche Elemente und naturwissenschaftliche Begriffe. In: *Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*. Bonn: Martin Hager.
- Mach, E., 1921. *Die Prinzipien der physikalischen Optik. Historisch und erkenntnispsychologisch entwickelt*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Mach, E., 1921. *Die Prinzipien der physikalischen Optik: historisch und erkenntnispsychologisch entwickelt*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Mach, E., 1988. Die Leitgedanken meiner naturwissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen. In: R. Wahsner & H. Borzeszkowski, Hrsg. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*. Berlin: Akademie-Verlag.
- Mach, E., 2012. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*. Berlin: Xenomoi.
- Mach, E., 2016. *Die Prinzipien der Wärmelehre: Historisch-kritisch entwickelt. Ernst-Mach-Studienausgabe, Band 5*. s.l.:Xenomoi.
- Mach, E., 2020. *Die Prinzipien der physikalischen Optik. Historisch und erkenntnispsychologisch entwickelt*. Berlin: Xenomoi.
- Mach, L., 1891. Ein neuer Interferenzrefraktor. In: E. Abbe & a. et., Hrsg. *Zeitschrift für Instrumentenkunde*. s.l.:Julius Springer, pp. 275-285.
- Mach, L., 1892. Ueber einen Interferenzrefraktor. In: E. Abbe & et. al., Hrsg. *Zeitschrift für Instrumentenkunde*. Berlin: Julius Springer.
- Maier, M. & Maderthaner, W., 2006. *Physik und Revolution. Friedrich Adler - Albert Einstein - Briefe - Dokumente - Stellungnahmen*. Wien: Löcker.
- Mansouri, R. & Sexl, R. U., 1977a. A test theory of special relativity: I. Simultaneity and shock synchronization. *General Relativity and Gravitation*, Band 8, pp. 497-513.
- Mansouri, R. & Sexl, R. U., 1977b. A test theory of special relativity: II. First order tests. *General Relativity and Gravitation*, Band 8, pp. 515-524.
- Mansouri, R. & Sexl, R. U., 1977c. A test theory of special relativity: III. Second-order tests. *General Relativity and Gravitation*, Band 8, pp. 809-814.
- Mathelitsch, L. & Verovnik, I., 2016. Die Machsche Pfeife. *Physik in unserer Zeit*, 47(5), pp. 238-239.

Mehra, J. & Einstein, A., 1971. Albert Einsteins erste wissenschaftliche Arbeit/"Mein lieber Onkel"/Über die Untersuchung des Ätherzustandes im magnetischen Felde. *Physikalische Blätter*, 27(9), pp. 386-391.

Meinl, R., 2016. *Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie für Bachelorstudenten*. Berlin/Heidelberg: Springer.

Mercati, F., 2017. A Shape Dynamics Tutorial. <https://arxiv.org/abs/1409.0105>.

Meyer, S., Hrsg., 1904. *Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstage*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.

Meyer, S., Hrsg., 1904. *Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstage*. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth.

Miller, A. I., 1998. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*. New York: Springer Verlag.

Minkowski, H., 1909. *Raum und Zeit*. Leipzig/Berlin: B. G. Teubner.

Motz, H., 1988. Ernst Mach als Physiker und Historiker der Physik mit Zukunft. In: R. Haller & F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach - Werk und Wirkung*. Wien: Hölder-Pichler-Tempsky.

Moulines, C. U., 2008. *Die Entwicklung der modernen Wissenschaftstheorie (1890-2000). Eine historische Einführung*. Hamburg: LIT.

Nernst, W., 1893. Physikalische Chemie. *Jahrbuch der Chemie*, pp. 1-42.

Neurath, O., 1981b. Zur Klassifikation von Hypothesensystemen. (Mit besonderer Berücksichtigung der Optik). In: R. Haller & H. Rutte, Hrsg. *Otto Neurath. Gesammelte philosophische und methodologische Schriften. Band 1*. Wien: Hölder-Pichler-Tempsky.

Nordmeyer, P., 1903. Über den Einfluß der Erbewegung auf die Verteilung der Intensität der Licht- und Wärmestrahlung. *Annalen der Physik*, Band 11 (Der ganzen Reihe 316. Band.)(Vierte Folge), pp. 284-302.

Norton, J., 2004. Einstein's Investigations of Galilean Covariant Electrodynamics prior to 1905. *Archive for History of Exact Sciences*, Band 59, pp. 45-105.

Norton, J., 2013. Chasing the light: Einstein's Most Famous Thought Experiment. In: M. Frappier, L. Meynell & J. R. Brown, Hrsg. *Thought Experiments in Philosophy, Science, and the Arts*. New York & London: Routledge.

Norton, J., 2014. Einstein's Special Theory of Relativity and the Problems in the Electrodynamics of Moving Bodies that Led him to it. In: M. Janssen & C. Lehner, Hrsg. *The Cambridge Companion to Einstein*. s.l.:Cambridge University Press, pp. 72-102.

Norton, J., 2019. *The Hole Argument*. [Online]
Available at: <https://plato.stanford.edu/entries/spacetime-holearg/>
[Zugriff am 5 Jänner 2021].

Ogawa, T., 1979. Japanese evidence for Einstein's knowledge of the Michelson-Morley's experiment. *Japanese Studies in the History of Sciences*, Band 18, pp. 73-81.

O'Riافةartaigh, C. & Mitton, S., 2018. Investigating the legend of Einstein's "biggest blunder". *Physics in Perspective*, Band 20, pp. 318-341.

Ono, Y., 1982. How I created the theory of relativity. *Physics Today*.

Pais, A., 1982. *Subtle is the Lord: The Science and the life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press.

Patton, L., 2019. New Water in Old Buckets: Hypothetical and Counterfactual Reasoning in Mach's Economy of Science. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach - Life, Work, Influence*. Cham: Springer.

Pfister, H., 1995. Dragging Effects Near Rotating Bodies and in Cosmological Models. In: *Mach's principle: From Newton's bucket to quantum gravity*. Boston-Basel-Berlin: Birkhäuser.

Planck, M., 1904. Über die mechanische Bedeutung der Temperatur und der Entropie. In: S. Meyer, Hrsg. *Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstage*. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth, pp. 113-122.

Planck, M., 1908. Zur Dynamik bewegter Systeme. *Annalen der Physik*, Band 26.

Planck, M., 1909. *Die Einheit des physikalischen Weltbildes. Vortrag gehalten am 9. Dezember 1908 in der naturwissenschaftlichen Fakultät des Studentenkörpers an der Universität Leiden*. Leipzig: S. Hirzel.

Planck, M., 1988. Zur Machschen Theorie der physikalischen Erkenntnis. Eine Erwiderung.. In: R. Walsner & H. Borzeszkowski, Hrsg. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*. Berlin: Akademie-Verlag.

Planck, M., 2001. Die Physik im Kampf um die Weltanschauung. In: H. Roos & A. Hermann, Hrsg. *Vorträge Reden Erinnerungen*. Berlin/Heidelberg: Springer.

Planck, M., 2001. Vom Relativen zum Absoluten. In: *Vorträge Reden Erinnerungen*. Berlin/Heidelberg: Springer.

Planck, M., 2001. Wissenschaftliche Selbstbiographie. In: H. Roos & A. Hermann, Hrsg. *Vorträge Reden Erinnerungen*. Berlin/Heidelberg: Springer.

Planck, M. & et. al., 1909. Diskussion. *Physikalische Zeitschrift*, Issue 10, pp. 825-826.

Poessel, M., 2011. Waves, motion and frequency: the Doppler effect. In: *Einstein Online Band 05*. <https://www.einstein-online.info/en/spotlight/doppler/#author:s.n>.

Poincare, H., 1904. *Wissenschaft und Hypothese. Autorisierte deutsche Ausgabe mit erläuternden Anmerkungen von F. und L. Lindemann*. Leipzig: Teubner.

Popper, K., 2005. *Logik der Forschung*. Tübingen: Mohr Siebeck.

Reichenbach, H., 1928. *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*. Berlin/Leipzig: Walter de Gruyter & Co.

Renn, J., Hrsg., 2007. Classical Physics in Disarray: The Emergence of the Riddle of Gravitation. In: *The Genesis of General Relativity, Vol. 1 Einstein's Zurich Notebook: Introduction and Source*. Dordrecht: Springer.

Ritz, W. & Einstein, A., 1909. Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems. *Physikalische Zeitschrift*, Band 10, pp. 323-324.

Rosenberger, L., 2002. *Das Problem der Rotation in der Allgemeinen Relativitätstheorie*. Berlin: Planck-Inst. für Wissenschaftsgeschichte.

Rowbottom, D., 2011. *Popper's Critical Rationalism. A Philosophical Investigation*. New York-London: Routledge.

Santone, M. A., 1992. Ernst Mach's Influence on Four Japanese Thinkers. In: J. Blackmore, Hrsg. *Ernst Mach – a deeper look: documents and new perspectives*. Dordrecht: Springer.

Schröder, W., 1988. Albert Einstein in seinen Beziehungen zu Mitgliedern der Gesellschaft der Wissenschaften in Göttingen. *Archive for History of Exact Sciences*, 39(2), pp. 157-171.

Schumann, R., 1891. *Gesammelte Schriften über Musik und Musiker. Erster Band*. 4 Hrsg. Leipzig: Breitkopf und Härtel.

Sextl, R. U., 1985. Der unerschöpfliche Albert Einstein. In: A. P. French, Hrsg. *Albert Einstein Wirkung und Nachwirkung*. Braunschweig: Vieweg & Sohn.

Sextl, R. U., 1985. Vorwort zur deutschen Ausgabe. In: A. French, Hrsg. *Albert Einstein Wirkung und Nachwirkung*. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn.

Shankland, R., 1963. Conversations with Albert Einstein. *American Journal of Physics*, Band 31, pp. 47-57.

Siemens, H., 2010. The Mach-Planck debate revisited: democratization of science or elite knowledge?. *Sage Journals*, Band 19.

Siemsen, H. & Siemsen, K. H. S., 2019. Transforming Thinking: Can Mach's Pedagogy Be Replicated?. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach - Life, Work, Influence*. Cham: Springer.

Sievers, H., 1998. Louis de Broglie und die Quantenmechanik.
<https://arxiv.org/pdf/physics/9807012.pdf>.

Simsek, E., 2014. *Principia Philosophiae, Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. [Online]
 Available at: <http://othes.univie.ac.at/34535/>
 [Zugriff am 20 Juni 2020].

Simsek, E., 2020. *On thought experiments: Mach and Einstein (Part I)*. [Online]
 Available at: <https://arxiv.org/pdf/2003.04764.pdf>
 [Zugriff am 6 Juni 2020].

Simsek, E., 2020. The First and Second Mach Principle – How Einstein Created the Theory of General Relativity. In: W. Gudrun, Hrsg. *Internationalität in der astronomischen Forschung (18. bis 21. Jahrhundert)*. Hamburg: tredition, pp. 274-293.

Sorensen, R. A., 1992. *Thought Experiments*. New York: Oxford University Press.

Speziali, P., 1972. *Albert Einstein, Michele Besso: Correspondance 1903-1955*. Paris: Hermann.

Springer Online, kein Datum [Online]
 Available at: <https://www.springer.com/de/book/9783663158486>
 [Zugriff am 29 August 2020].

Stöltzner, M., 2010. Das Prinzip der kleinsten Wirkung als Angelpunkt der Planck'schen Epistemologie. In: D. Hoffmann, Hrsg. *Max Planck und die moderne Physik*. Berlin/Heidelberg: Springer.

Stachel, J., 1982. Einstein and Michelson: The Context of Discovery and the Context of Justification. *Astron. Nachr.*, Band 303, pp. 47-53.

Stachel, J., 1998. *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics*. Princeton: Princeton University.

Stachel, J., 2002. *Einstein from 'B' to 'Z'*. Boston: Birkhäuser.

Stadler, F., 1988. Ernst Mach – Zu Leben, Werk und Wirkung. In: R. Haller & F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach – Werk und Wirkung*. Wien: Hölder-Pichler-Tempsky.

Stadler, F., 2015. *Der Wiener Kreis. Ursprung, Entwicklung und Wirkung des Logischen Empirismus im Kontext*. s.l.:Springer.

Stadler, F., 2019a. Nur ein philosophischer „Sonntagsjäger“? – Der Naturforscher Ernst Mach. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach - Zu Leben, Werk und Wirkung*. Cham: Springer, pp. 1-20.

Stadler, F., 2019b. *Only a Philosophical "Holiday Sportsman"? – Ernst Mach as a Scientist Transgressing the Disciplinary Boundaries*. Cham: Springer.

Staley, R., 2013. Ernst Mach on bodies and buckets. *Physics Today*, Band 66, pp. 42-47.

Staley, R., 2019. Revisiting Einstein's Happiest Thought. From the Physiology of Perception to Experimental Propositions and Principles in the History of Relativity. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach - Life, Work, Influence*. Cham: Springer.

Sterrett, S. G., 1998. Sounds Like Light: Einstein's Special Theory of Relativity and Mach's Work in Acoustics and Aerodynamics.. *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.*, Band 29, pp. 1-35.

The Nobel Prize, [online]. *The Nobel Prize in Physics 1921*. [Online]
 Available at: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/>
 [Zugriff am 6 März 2019].

Thiele, J., 1971. Zur Wirkungsgeschichte des Dopplerprinzips im Neunzehnten Jahrhundert. *Annals of Science*.

- Thiele, J., 1978. *Wissenschaftliche Kommunikation. Die Korrespondenz Ernst Machs*. Kasellaun: Henn.
- Thiele, J., 1978. *Wissenschaftliche Kommunikation. Die Korrespondenz Ernst Machs*. Kastellaun: Aloys Henn.
- Tipler, P. A. & Llewellyn, R. A., 2010. *Moderne Physik*. 2., verbesserte und aktualisierte Auflage Hrsg. München: Oldenbourg.
- Tipler, P. A. & Mosca, G., 2012. *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. 6. Auflage Hrsg. Heidelberg: Springer.
- Trail, R. R., 2008. Ueber die Gleichungen des elektromagnetischen Feldes für bewegte Körper. Translated, typeset, and edited. *General Science Journal*.
- Treder, H.-J., 1982. Der MICHELSON-Versuch als experimentum crucis. *Astronomische Nachrichten*, Band 303.
- Voigt, W., 1887. Ueber das Doppler'sche Princip. In: *Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften und der Georg-Augusts Universität zu Göttingen. Aus dem Jahr 1887*. Göttingen: Dieterichsche Verlags-Buchhandlung, pp. 41-51.
- Walk, J., 1988. *Kurzbiographien zur Geschichte der Juden: 1918-1945*. München: K. G. Saur.
- Wegener, D., 2010. De-anthropomorphizing energy and energy conservation: The case of Max Planck and Ernst Mach. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Band 41.
- Weinberg, C. B., 1937. *Mach's Empirio-Pragmatism in Physical Science, Diss.*. New York: Columbia University.
- Weizsäcker, C. F. v., 1979. Einstein's Importance to Physics, Philosophy, and Politics. In: P. C. Aichelburg & R. U. Sexl, Hrsg. *Albert Einstein: His Influence on Physics, Philosophy and Politics*. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn.
- Wertheimer, M., 2019. *Produktives Denken*. s.l.:Springer.
- Wiener, O., 1915. Entwicklung der Wellenlehre des Lichtes. In: E. Warburg, Hrsg. *Die Kultur der Gegenwart*. Leipzig/Berlin: B.G. Teubner, pp. 517-574.
- Wien, W., 1898. Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen. *Annalen der Physik*.
- Wien, W., 1904a. Theorie eines leuchtenden Punktes. In: S. Meyer, Hrsg. *Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum sechzigsten Geburtstage*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Wien, W., 1904b. Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper. I.. *Annalen der Physik*, Band 13. (Der ganzen Reihe 318. Band.)(Vierte Folge), pp. 641-662.
- Wien, W., 1904b. Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper. I.. *Annalen der Physik*, Band 13. Der ganzen Reihe 318. Band.(4), pp. 641-662.
- Wien, W., 1904c. Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper. II.. *Annalen der Physik*, Band 13. (Der ganzen Reihe 318. Band.)(Vierte Folge), pp. 663-668.
- Wien, W., 1904c. Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper. II.. *Annalen der Physik*, Band 13. Der ganzen Reihe 318. Band.(4), pp. 663-668.
- Wien, W., 1904d. Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik des Herrn E. Cohn. *Annalen der Physik*, Band 14. (Der ganzen Reihe 319. Band.)(Vierte Folge), pp. 632-634.
- Wien, W., 1904e. Erwiderung auf die Kritik des Hrn. M. Abraham. *Annalen der Physik*, Band 14. (Der ganzen Reihe 319. Band.)(Vierte Folge), pp. 635-637.
- Wien, W., 1904f. Poyntingscher Satz und Strahlung. *Annalen der Physik*, Band 15. (Der ganzen Reihe 320. Band.)(Vierte Folge), pp. 412-414.
- Wilczek, F., 2001a. Scaling Mount Planck I: A View from the Bottom. *Physics Today*, Band 54, pp. 12-13.
- Wilczek, F., 2001b. Scaling Mount Planck II: Base Camp. *Physics Today*, Band 54.
- Wilczek, F., 2002. Scaling Mount Planck III: That All These Is?. *Physics Today*, Band 55.

- Wilhelm, F. & Hagmann, J.-G. Hrsg., 2017. *Licht und Schatten : Ernst Mach - Ludwig Mach*. München: Deutsches Museum.
- Winternitz, J., 1923. *Relativitätstheorie und Erkenntnislehre*. Wiesbaden: Springer Fachmedien GmbH.
- Wolters, G., 1987. *Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Wolters, G., 1988. Atome und Relativität - Was meinte Mach?. In: R. Haller & F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach - Werk und Wirkung*. Wien: Hölder-Pichler-Tempsky.
- Wolters, G., 1988. Atome und Relativität – Was meinte Mach?. In: R. Haller & F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach – Werk und Wirkung*. Wien: Hölder-Pichler-Tempsky.
- Wolters, G., 2012. Mach and Einstein, or, Clearing Troubled Waters in the History of Science. In: C. Lehner, J. Renn & M. Schemmel, Hrsg. *Einstein and the Changing Worldviews of Physics*. New York-Dordrecht-Heidelberg-London: Springer.
- Wolters, G., 2019. Mach and Relativity – A Never-Ending Story?. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach - Work, Life, Influence*. s.l.:Springer.
- Wolters, G., 2019. Mach and Relativity Theory: A Neverending Story in HOPOSia?. In: F. Stadler, Hrsg. *Ernst Mach – Life, Work, Influence*. Cham: Springer.
- Wolters, G. & Hon, G., 2012. Einleitung der Herausgeber. In: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*. Berlin: Xenomoi.
- Zeilinger, A., 2004. *Einsteins Schleier: Die neue Welt der Quantenphysik*. München: C. H. Beck.
- Zoubek, G. & Lauth, B., 1992. Zur Rekonstruktion des Bohrschen Forschungsprogramms. September.Issue vol. 37.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Quelle: https://archive.org/details/theoriederelekt05fpgooq [Zugriff am 22. August 2020].	60
Abbildung 2: Ernst Mach Büste im Rathauspark.	137
Abbildung 3: Einsteins Zeichnung und die dichterischen Zeilen zu jener Rede. Quelle: https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol13-doc/746 [Zugriff am 22. Februar 2020] (CPAE 13; 407; p. 650).	142
Abbildung 4: Quelle: https://reader.digitale-sammlungen.de/de/fs1/object/display/bsb11160317_00038.html [Zugriff am 18. September 2020].	155
Abbildung 5: Quelle: https://archive.org/details/zeitschriftfrin11gergoog/page/n291/mode/2up [Zugriff am 18. September 2020].	159
Abbildung 6: Quelle: https://archive.org/details/zeitschriftfrin14gergoog/page/n107/mode/2up [Zugriff am 18. September 2020].	159
Abbildung 7: Quelle: https://www.meteoschweiz.admin.ch/product/input/documents/annals/annalen-1905.pdf [Zugriff am 8. Jänner 2021]	169
Abbildung 8: Quelle: Exil-Bibliothek Otto Neurath, Wiener Kreis Gesellschaft / Institut Wiener Kreis, Universität Wien, Universitätscampus, Hof 1.	212
Abbildung 9: Die Resultate von Experimenten in einem gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem (I) sind dieselben, wie die sich in einem homogenen (= gleichförmigen) Gravitationsfeld befindenden Bezugssystem (II). Ein Gedankenexperiment zur Veranschaulichung: Würde man beispielsweise einen Körper loslassen, dann würde er in beiden Bezugssystemen mit gleicher Beschleunigung auf den Boden treffen.	255
Abbildung 10: Das Bezugssystem (I) bzw. K wird mit $a=-g$ beschleunigt (1. und 2.) und das Bezugssystem (II) bzw. K' ruht im Gravitationsfeld der Erde (3.). Siehe dazu auch (Reichenbach, 1928, p. 263: Fig. 42) und (Tipler & Llewellyn, 2010, p. 124: Abb.2.17).	264
Abbildung 11: Das Bezugssystem (I) bzw. K wird mit $a=-g$ beschleunigt und das Bezugssystem (II) bzw. K' ruht im Gravitationsfeld der Erde. Siehe dazu auch (Reichenbach, 1928, p. 265: Fig. 44) und (Tipler & Llewellyn, 2010, p. 129: Abb. 2.21)).	266
Abbildung 12: Aus Einsteins Notizbuch Seite 30; Quelle: https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol3-doc/616 [Zugriff am 22. Mai 2020].	349
Abbildung 13: In der Zeitschrift "Der Floh" (25. September 1910); Quelle: https://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno?aid=flo&datum=19100925&seite=7&zoom=33&query=%22ronacher%22&ref=anno-search [Zugriff am 26. September 2020].	351
Abbildung 14: Quelle: https://archive.org/details/dieprincipiender00mach/page/140/mode/2up [Zugriff am 30. Jänner 2021].	364
Abbildung 15: Die Visitenkarte wurde vom israelischen Journalisten Assaf Uni entdeckt, der sie 2019 von einem Münchner Auktionshaus erhielt. Sie wurde wahrscheinlich von Einstein an Mach beim Treffen im Jahre 1910 übergeben. Auf der Vorderseite (rechtes Bild) steht „Professor Dr. Albert Einstein“ und „Zürich.“ (Einstein war 1909-1910 außerordentlicher Professor für Theoretische Physik an der Universität Zürich.) Auf der Rückseite (linkes Bild) ist die Zeichnung eines Gedankenexperimentes zu finden.	375

Abbildung 16: Aus Einsteins Notizbuch p. 21; Quelle: https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol3-doc/612 [Zugriff am 8. Jänner 2021].	376
Abbildung 17: Notizbuch p. 21; Quelle: https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol3-doc/612 [Zugriff am 8. Jänner 2021].	377
Abbildung 18: Visitenkarte: Mit einer Zeichnung (höchstwahrscheinlich) von E. Mach; Quelle: Assaf Uni.	377
Abbildung 19: Quelle: https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol13-doc/230 [Zugriff am 8. Jänner 2021].	383
Abbildung 20: Quelle: https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol13-doc/299 [Zugriff am 8. Jänner 2021].	384

Figurenverzeichnis

Figure 1: Quelle: https://archive.org/details/physikalischesub00cohn/page/8/mode/2up [Zugriff am 26. September 2020].	100
Figure 2: Quelle: https://ia800805.us.archive.org/35/items/physikalischesub00cohn/physikalischesub00cohn.pdf [Zugriff am 26. September 2020].	101
Figure 3: Quelle: https://ia800805.us.archive.org/35/items/physikalischesub00cohn/physikalischesub00cohn.pdf [Zugriff am 26. September 2020].	103
Figure 4: Quelle: https://ia800805.us.archive.org/35/items/physikalischesub00cohn/physikalischesub00cohn.pdf [Zugriff am 26. September 2020].	103
Figure 5: Quelle: https://ia800805.us.archive.org/35/items/physikalischesub00cohn/physikalischesub00cohn.pdf [Zugriff am 26. September 2020].	112
Figure 6: Quelle: https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol4-doc/558 [Zugriff am 18. September 2020].	160
Figure 7: Quelle: https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol7-doc/318 [Zugriff am 22. Mai 2020].	269
Figure 8: Quelle: „(Originalzeichnung Einsteins im Brief vom 25. 6.1913)“ (Wolters, 1987, p. 151).	281

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die Sichtweisen von Wien, Einstein und Cohn im Vergleich	39
Tabelle 2: Einsteins Kyoto-Rede und das intuitive Machsche Forschungsprogramm im Vergleich	317

Abstract

(Abstract auf Deutsch)

Roman U. Sexl schreibt in seinem Artikel „Der unerschöpfliche Albert Einstein“ (Sexl, 1985), dass „gerade rund um die Ursprünge der speziellen Relativitätstheorie einige wesentliche wissenschaftsgeschichtliche Fragen“ noch „offen“ (Sexl, 1985, p. 35) stehen und betont: „Eine der interessantesten Fragen betrifft die Quellen Einsteins.“ (Sexl, 1985, p. 35). In diesem Zusammenhang kommt von ihm der wichtige Hinweis darauf, sich Einsteins Kyoto-Rede (1922) bzw. die „inoffizielle Nobelpreisrede“ (Sexl, 1985, p. 36) näher anzusehen. Diese Rede, in welcher Einstein die Entstehungsgeschichte der (Speziellen und der Allgemeinen) Relativitätstheorie erläutert, ist für die Mach-Einstein-Forschung von größerem Interesse, weil Einstein darin oft auf Mach hinweist. Weder der historische Kontext der Rede wurde bis jetzt in der Mach-Einstein-Forschung untersucht, noch der Versuch unternommen den Inhalt der Rede (anhand der derzeitigen Quellen) zu rekonstruieren. Betrachtet man den historischen Kontext, stellt dieser Vortrag nämlich zum Teil Einsteins Reaktion auf das (gefälschte) Vorwort in *Die Prinzipien der physikalischen Optik* (Mach, 1921), worin E. Mach als Relativitätstheorie-Gegner dargestellt wurde, dar, indem Einstein aufmerksam macht, welche wichtige erkenntnistheoretische Rolle Machs Arbeiten für ihn hatten. Aufgrund der neuen Ergebnisse in der Mach-Einstein-Forschung (Sexl, 1985) (Wolters, 1987) (Barbour & Pfister, 1995a) (Mach, 2012) (Wolters, 2019) (Mach, 2020) haben wir in dieser Arbeit daher die Entstehungsgeschichte der (Speziellen und der Allgemeinen) Relativitätstheorie und ebenso den Inhalt der Kyoto-Rede, anhand zurzeit gegebener Quellen, wissenschaftsgeschichtlich rekonstruiert und Machs Einfluss darauf genauer analysiert.

(Abstract in English)

In Roman U. Sexl's article "Der unerschöpfliche Albert Einstein" (Sexl, 1985) he states that some key questions about the origins of the special theory of relativity are yet to be answered. Particularly Einstein's sources have not been examined extensively (see Sexl, 1985, p. 35). Sexl proposes that essential information concerning this matter can be found in Einstein's Kyoto Speech (1922) also known as his unofficial Nobel Prize Speech (see Sexl, 1985, p. 36). He therein explains the origin story of the special and the general theory of relativity and thereby also refers to some of Mach's ideas. Thus, the content of Einstein's speech constitutes

an interesting source for any Mach-Einstein studies. However, up until today neither research on the historical context nor a reconstruction of the content of the speech based on the available sources has been conducted.

A closer look at Einstein's talk reveals his opinion on the (falsified) preface of the book "Die Prinzipien der physikalischen Optik" (Mach, 1921), which depicts Mach as an opponent of Einstein's theory of relativity. Einstein, however, emphasizes the significance of Mach's insights for his own work.

Considering these new findings in the Mach-Einstein studies (Sextl, 1985) (Wolters, 1987) (Barbour & Pfister, 1995a) (Mach, 2012) (Wolters, 2019) (Mach, 2020), the paper at hand aims to investigate the origin story of the special and general theory of relativity, the content and historical context of Einstein's Kyoto Speech as well as Mach's influence on the speech in more detail by processing the currently available sources.