



MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

Waagen in der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien

verfasst von / submitted by

Elias Stadlmann, BEd

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Education (MEd)

Wien, 2023 / Vienna 2023

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

UA 199 523 529 02

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

Masterstudium Lehramt Sek (AB)
Unterrichtsfach Physik Unterrichtsfach Spanisch

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf

Mitbetreut von / Co-Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Franz Sachslehner

Zusammenfassung

Seit Jahrtausenden nutzt der Mensch Balkenwaagen, um Massen miteinander zu vergleichen und diese quantitativ zu bestimmen. An deren Grundprinzipien hat sich bis heute nichts geändert, jedoch haben Konstrukteurinnen und Konstrukteure im Laufe der Zeit verschiedene Formen für unterschiedliche Zwecke entworfen und hergestellt. Diese Arbeit widmet sich den Waagen der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien, welche experimentell auf ihre Funktion und die technischen Eigenheiten untersucht, sowie in einen historischen Kontext gestellt wurden.

Präzisions- und Analysenwaagen mit einem Alter zwischen 35 und rund 180 Jahren erlaubten Wägungen mit einer Empfindlichkeit von bis zu $100\text{ }\mu\text{g}$. Auch Erhebungen der Linearität und Wiederholbarkeit der Messergebnisse bestätigten den guten Erhalt einiger Modelle. Gleichzeitig schränken Abnützungserscheinungen an manchen der überprüften Waagen deren Funktion deutlich ein. Eine für die Lehre konstruierte Demonstrationswaage mit großem Zubehörsatz ermöglicht eine Vielzahl an Versuchen für Vorlesungen der Mechanik oder auch den Schulunterricht und könnte somit nach wie vor Verwendung finden. Auch die ungleicharmigen Waagen eignen sich besonders für Anschauungszwecke in Zusammenhang mit dem Hebelgesetz.

Mit verschiedenen Messinstrumenten, die Gewichtskräfte und elektrostatische bzw. elektromagnetische Kräfte vergleichen, konnten zuvor theoretisch formulierte Abhängigkeiten demonstriert und experimentell überprüft werden. Deren Einsatzmöglichkeiten reichen dabei von der Bestimmung von Massen oder elektrischen Maßen bis zur Verknüpfung makroskopischer Größen mit fundamentalen Naturkonstanten.

Abstract

For thousands of years, people have been using beam scales to compare masses and determine their quantity. Their basic principles have not changed to this day, but over the course of time constructors have designed and manufactured various forms for different purposes. This work is dedicated to the balances of the historical physics collection of the University of Vienna, which were experimentally examined for their function and technical peculiarities, as well as placed in a historical context.

Precision and analytical scales with an age between 35 and about 180 years allowed for weighing with a sensitivity of up to 100 μg . Surveys of the linearity and repeatability of the measurement results also confirmed the good preservation of some models. However, signs of wear on some of the tested scales significantly limited their functionality. A demonstration scale specifically designed for teaching, equipped with a large set of accessories, enables a variety of experiments to be carried out for lectures in mechanics or even school lessons, and could therefore still be used for this purpose. Unequal-armed scales are particularly suitable for illustrating the principle of the lever.

Various measuring instruments compare gravitational forces and electrostatic or electromagnetic forces. Previously formulated theoretical dependencies could be demonstrated and experimentally verified for these devices. Their possible applications range from determining masses or electrical measurements to linking macroscopic quantities with fundamental physical constants.

Vorwort

Das Thema der Waagen wurde gewählt, da es sich dabei um einen bisher weitestgehend unbehandelten Teil der physikhistorischen Sammlung handelte. Schnell wurde klar, dass die Aufarbeitung mein fachliches Interesse in der Mechanik und Elektrodynamik umschließt, aber darüber hinaus auch handwerkliches Geschick erfordert und meine Faszination für die Technik berührt. Auch wenn diese Arbeit hauptsächlich die fachlich-physikalischen Zusammenhänge beleuchtet, war es oft möglich, Anregungen für meinen künftigen Unterricht zu finden und auch neues Interesse an den historischen Zusammenhängen zu entdecken.

Ein großer Dank gilt an dieser Stelle meinem Betreuer Ass.-Prof. Mag. Dr. Franz Sachslehner, der mich von Anfang an mit großem Fachwissen, konstruktiven Vorschlägen und einem offenen Ohr für Fragen unterstützt hat. Besonders beim gemeinsamen Durchführen mancher Experimente war die Zusammenarbeit von regem Austausch geprägt. Stets konnte ich mich auf rasches und ausführliches Feedback sowie Hilfsbereitschaft rund um die Erstellung der Arbeit verlassen, wodurch mir ein gutes Vorankommen ermöglicht wurde.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Franz Caetano vom historischen Unternehmensarchiv der Firma Sartorius in Göttingen für die zahlreichen Unterlagen und Daten zu einigen Waagen bedanken. Ebenso gebührt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Bibliothek und des Archivs im Technischen Museum Wien Dank für die Zusendung verschiedener Materialien.

Ein großes Dankeschön gilt allen, die zusammen viel Zeit in das Lektorat dieser Arbeit investiert und damit einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen geleistet haben.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie einen speziellen Dank für die bedingungslose Unterstützung in allen Belangen und die Ermöglichung meines Studiums aussprechen. Danke an meine Partnerin für die ständige Begleitung und wichtige Stütze in den vergangenen Jahren!

Neusiedl am See, 27.06.2023

Elias Stadlmann

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	i
Abstract.....	ii
Vorwort.....	iii
Inhaltsverzeichnis.....	v
1. Einleitung.....	1
2. Physikalische und technische Grundlagen	4
2.1. Masse und Gewicht.....	4
2.2. Hebel – Statik.....	10
2.3. Elektrodynamik.....	20
2.4. Technische Anforderungen und deren Umsetzung	23
3. Präzisions- & Analysenwaagen	34
3.1. Alb. Rueprecht & Sohn – Analytische Gewichte No. 196	34
3.2. Sartorius – USA-Luft	36
3.3. Starke & Kammerer – Analysenwaage Nr. 104	41
3.4. Jos. Nemetz – Universal-Präcisionswaage Nr. 707.....	47
3.5. Alb. Rueprecht & Sohn – Analytische Waage Nr. 8	54
3.6. k. k. Polytechnisches Institut – Analysenwaage	59
3.7. Sartorius – Selecta Semi-Mikro.....	65
3.8. Mettler – Analysenwaage B6 Halbmikro.....	73
3.9. Sartorius – 2255.....	78
4. Waagen mit größerer Tragkraft.....	84
4.1. Alb. Rueprecht & Sohn – Präcisionswaage No. 159	84
4.2. Alb. Rueprecht & Sohn – Demonstrationswaage No. 98.....	87
4.3. H. D. Schmid – Dezimalwaage No. 6403	94
4.4. C. W. Brecknell – Römische Schnellwaage	97
4.5. Kraft – Tafelwaage	100

4.6. C. Schember & Söhne – Tafelwaage	102
5. Spezielle Waagen	105
5.1. G. Westphal – Mohr'sche Waage	105
5.2. J. Eiss – Spannungswaage	108
5.3. Hartmann & Braun – Galvanometer No. 365	115
5.4. Steflitschek – Waltenhofen's Versuch Nr. 1386	120
6. Fazit	126
7. Quellenverzeichnis	129
8. Abbildungsverzeichnis	138
9. Anhang	142
9.1. Tabellarische Übersicht der Waagen	142

1. Einleitung

Die Bestimmung der Masse eines Körpers klingt zunächst banal, ist jedoch bei genauerer Betrachtung kein einfaches Unterfangen. Er besitzt nämlich selbst kein Sinnesorgan für die Masse und darüber hinaus gibt es kein Messgerät, das diese direkt misst (Kochsiek & Gläser, 1997, S. 108). Fordert man beispielsweise jemanden dazu auf, die schwerere von zwei Melonen zu finden, wird die Person die beiden Gegenstände jeweils in die linke und rechte Hand nehmen und diese auf- und abbewegen, um die größere Masse abzuschätzen. Dieses instinktive Vorgehen beruht auf der Tatsache, dass sich die physikalische Größe der Masse nur über den Umweg einer Beschleunigung bzw. der daraus resultierenden Kraft bestimmen lässt. Der Mensch nutzt dabei seinen Tastsinn aus, um über die unterschiedliche Druckempfindung in den Händen beim Schwingen der Körper auf den schwereren der beiden und in weiterer Folge jenen mit der größeren Masse zu schließen (Biétry, 1963, S. 3).

Um nun nicht nur auf Aussagen über das Verhältnis zweier Massen beschränkt zu sein, sondern deren Beträge auch quantifizieren zu können, müssen Normale, also Referenzstücke, festgelegt werden. Gibt es eine dementsprechende Übereinkunft, können Körper mit dieser einfachen Methode gewogen und ihre Massen bestimmt werden. Jedoch ist man schon früh dazu übergegangen, diese Aufgabe nicht dem Menschen mit seinen beiden Armen und dem subjektiven Empfinden zu überlassen, sondern nach dessen Vorbild gleicharmige Balkenwaagen zu bauen. Einfache Holzstöcke wurden an beiden Enden mit Schnüren umwickelt und verschiedene Lasten daran befestigt, sodass diese auf- und abspringen können. Das Vorkommen dieser Messinstrumente kann spätestens in den ersten Hochkulturen im Nahen und Mittleren Osten um etwa 3000 v. Chr. belegt werden. Verschiedene archäologische Funde deuten darauf hin, dass der Ursprung der Waage bereits ab 7000 v. Chr. festgemacht werden kann, wo sie von Anfang an im Handelsverkehr eingesetzt wurde. Gebräuchliche Massennormale waren daher Samenkörner, welche beim Verkauf gegen andere Güter aufgewogen wurden. Als im 7. Jahrhundert v. Chr. die ersten Münzen geprägt wurden, welche vordergründig als Zahlungsmittel dienten, waren damit auch neue, allgemein gültige Maßeinheiten für die Masse geschaffen.

Besonders die Römer machten das Wägen – vor allem aus steuerlichem Interesse – später zu einer staatlichen Angelegenheit und schufen die ersten zentralen Kontrollorgane für die Metrologie (Kochsiek & Gläser, 1997, S. 110 ff.).

Im Laufe der Zeit rückten Waagen auch immer mehr in das naturwissenschaftliche und technische Interesse, wodurch die Weiterentwicklung der Geräte von verschiedenen Seiten angetrieben wurde. Dabei entstanden neben ausgeklügelten Konstruktionen auch neue Wägeverfahren, Normen und Maßsysteme. So konnte die Genauigkeit der Messresultate immer wieder erhöht und damit neue Standards geschaffen werden. Ein weiterer Zeitsprung führt schließlich in das frühe 19. Jahrhundert, als hochauflösende Waagen in der Wissenschaft und Industrie immer mehr zum alltäglichen Gebrauchsgegenstand wurden und sich im Übrigen ihre Schreibweise änderte – seit 1927 „Waage“ statt „Wage“ („Deutsches Wörterbuch“, 2016, S. 1013). Zu dieser Zeit entstanden im deutschsprachigen Raum – aufgrund der nötigen Präzision ursprünglich aus dem Uhrmacherhandwerk – feinmechanische Werkstätten, die oftmals in enger Zusammenarbeit mit Hochschulen technische Instrumente fertigten. Deren Produkte wurden spätestens seit der Einführung eines international einheitlichen Maßsystems Ende des Jahrhunderts weltweit verkauft (Berghoff et al., 2021, S. 166 ff.).

Diese Arbeit widmet sich einer Aufarbeitung ebensolcher Waagen aus dem frühen 19. bis ins späte 20. Jahrhundert, welche zur physikhistorischen Sammlung der Universität Wien gehören. Trotz des weitreichenden technischen Fortschritts und auch verschiedener Anwendungsgebiete der einzelnen Modelle beruhen alle auf den Grundprinzipien der Balkenwaage und damit auch auf dem zu Beginn beschriebenen intuitiven Abschätzen von Massen. Inhaltlich erstreckt sich die Arbeit daher von einer Beschreibung der physikalischen und technischen Grundlagen des Wiegens über die Untersuchung der Funktion und Funktionsweise verschiedener historischer Balkenwaagen bis zu elektrischen Waagen, welche die Grundlage moderner Messgeräte bilden. Die Unterkapitel der einzelnen Modelle fallen dabei unterschiedlich lange aus, da es zur Schonung der Exponate nicht möglich ist, alle Waagen gleichermaßen zu erproben. Darüber hinaus ist die Verfügbarkeit von Originalquellen und Literatur unterschiedlich ausgeprägt.

Da diese Arbeit den Abschluss eines Lehramtsstudiums bildet, soll an dieser Stelle das Thema auch kurz didaktisch verortet bzw. der Nutzen solcher Waagen in der

Lehre erwähnt werden. Der Wiener Hersteller Albert Rueprecht schrieb in seinem Produktkatalog, dass die von ihm vertriebenen Demonstrationswaagen dazu dienen,

„dem Lehrer ein Hilfsmittel abzugeben um seinen Vortrag durch Unterstützung mittels Experimentes zu vereinfachen, [...] was auf die Hörerschaft nicht nur anregender wirkt, sondern auch den oft [...] etwas spröden Lehrstoff der Auffassungskraft [...] der Schüler beträchtlich näher rückt.“

(Alb. Rueprecht & Sohn Wien, 1911, S. 37)

Dieser Kommentar mag im Kontext eines modernen Physikunterrichts veraltet wirken, teilt jedoch grundsätzlich die aktuelle Auffassung eines Experiments als Mittel bzw. Medium, um Phänomene und Zusammenhänge zu veranschaulichen (Girwidz, 2020, S. 265). Insofern können einige exemplarische Zusammenhänge zwischen den historischen Waagen bzw. ihren modernen Nachfolgern und dem schulischen Physikunterricht hergestellt werden.

Wichtige Schlüsselbegriffe für den Unterricht aus dem Themengebiet der Mechanik sind Masse, Massendichte, Gewicht bzw. Gewichtskraft, Drehmoment, Hebelwirkung, Auftrieb und auch Reibung. Dazu kommen noch Begriffe aus der Elektrodynamik wie Ladung, Kondensator, elektrostatische Kraft, Spule und elektromagnetische Kraft, welche die speziellen Waagen betreffen. Diese lassen sich gemäß dem ab Herbst 2023 gültigen österreichischen Lehrplan der AHS in der 7. (Mechanik & Elektrizität und Magnetismus & Energie), 9. (Mechanik I), 10. (Mechanik II & Felder) und 11. (Elektrodynamik) Schulstufe verorten (Lehrplan der Allgemeinbildenden Höheren Schule, 2023). Weiters bietet auch der Wahlpflichtgegenstand Physik die Möglichkeit, fortgeschrittenere Themen, wie die Definition verschiedener Größen mit Fundamentalkonstanten (siehe Kap. 2) auf Basis der Waagen, zu thematisieren.

In erster Linie kann anhand von Demonstrationsmodellen die experimentelle Kompetenz erarbeitet und gefestigt werden, da verschiedene Versuche dazu dienen, Erkenntnisse zu gewinnen und diese zu physikalischem Fachwissen weiterzuverarbeiten (Hopf et al., 2017, S. 7). Hierzu werden in den Unterkapiteln Versuche beschrieben und an verschiedenen Stellen auf weiterführende Materialien verwiesen. Darüber hinaus bietet es sich an, Waagen als Grundlage für mehrteilige Prüfungsaufgaben zu verwenden, bei denen alle drei Kompetenzbereiche (Fachwissen anwenden, Erkenntnisgewinnung und Experimentieren, Standpunkte begründen und aus naturwissenschaftlicher Sicht bewerten) kombiniert werden.

2. Physikalische und technische Grundlagen

Dieses Kapitel widmet sich den theoretischen physikalischen sowie technischen Grundlagen, welche den Waagen und dem Wiegen zugrunde liegen. Dabei wird das Augenmerk besonders auf jene Zusammenhänge gerichtet, die für die jeweiligen Messgeräte und die durchgeführten Versuche relevant sind, welche im empirischen Teil dieser Arbeit beschrieben werden, um dieses umfassende Themengebiet einzugrenzen. Durch die Bezugnahme auf naturwissenschaftliche Standardwerke sowie Quellen, welche sich mit speziellen Teilgebieten auseinandersetzen, werden die herausgegriffenen Inhalte in einem größeren Kontinuum verortet, was weiterführende Recherchen zulässt.

2.1. Masse und Gewicht

2.1.1. Definition der Masse

Da der Begriff Waage in verschiedenen Nachschlagewerken als ein Messgerät zur Bestimmung der Masse (Ortanderl, 2005; „Waage“, 2023; „Waage (Metrologie)“, 2023) bzw. zur Bestimmung des Gewichts (Dudenredaktion, o. J.) definiert wird, ist hier zunächst eine grundlegende Diskussion dieser physikalischen Größen und ihrer Ermittlung nötig. An dieser Stelle soll keine Aussage darüber gemacht werden, welche der Auslegungen präziser oder besser sei, da sich im weiteren Verlauf zeigen wird, dass dies nicht nur eine (fach-)sprachliche Frage ist, sondern zudem von weiteren Aspekten abhängt.

Die physikalische Größe der Masse stellt eine grundlegende Eigenschaft der Materie dar, welche erstmals 1687 durch Newton wissenschaftlich definiert wurde. Er beschrieb, dass die Größe der Materie (ihre Masse m) durch die Messung ihrer (Massen-)Dichte ρ und ihres Volumens V vollständig bestimmt ist (Kane, 2006, S. 36). Somit wurde in dieser, über zwei Jahrhunderte gültigen Definition, der Zusammenhang von drei physikalischen Größen beschrieben und für den Rahmen der heute als klassischen Physik bezeichneten Disziplin festgelegt:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1)$$

Newton beschrieb ebenso zwei Phänomene, in denen die Masse, welche eine extensive Größe ist (Foth, 2006), zu Tage kommt bzw. messbar wird. Genauer handelt es sich dabei auch um zwei verschiedene Formen der Masse. Zunächst ging er von der Beobachtung aus, dass alle Körper von der Erde angezogen werden und dabei die Kraft, die ein Körper auf seine Unterlage ausübt – Gewicht bzw. Gewichtskraft F_G genannt – von dessen schwerer Masse m_S , jener der Erde M_S , dem Abstand r zwischen den beiden und einem konstanten Faktor G abhängt (Fechner, 1998, S. 218):

$$F_G = G \cdot \frac{M_S \cdot m_S}{r^2}. \quad (2)$$

Durch das Newton'sche Gravitationsgesetz (2) wird der Vergleich von Massen durch den Vergleich ihrer gravitativen Anziehung möglich. Setzt man die Masse der Erde und den Abstand zwischen den Massenmittelpunkten als gegeben voraus, indem man Messungen beispielsweise jeweils auf demselben feststehenden Tisch durchführt, so lässt sich das Gesetz auf die direkte Proportionalität zwischen Gewichtskraft und schwerer Masse reduzieren:

$$F_G \sim m_S. \quad (3)$$

Somit kann ein qualitativer Massenvergleich durch die Beobachtung der vertikalen Dehnung einer Spiralfeder, an welche man das zu messende Gut hängt, durchgeführt werden. Eichet man die Feder zuvor mit Hilfe eines Gegenstandes bekannter Masse oder setzt dessen unbekannte Masse schlichtweg als Massennormal voraus, lassen sich nach dem gleichen Schema auch quantitative Vergleiche anstellen.

Newton beschreibt in seinem zweiten Gesetz auch einen anderen Massenbegriff, der mit jenem in (1) zunächst nicht in Verbindung steht. Er formulierte wiederum die Beobachtung, dass ein Körper seinen Zustand der Ruhe oder gleichförmigen Bewegung nur dann ändert, wenn eine Kraft von außen auf diesen einwirkt. Diese sogenannte Trägheitskraft F_T , welche zur Überwindung der Trägheit oder Beharrlichkeit des Körpers aufgebracht werden muss, ist bei geradliniger Bewegung

proportional zur Beschleunigung a , also der Tempoänderung, dieses Körpers und seiner trägen Masse m_T (Bartelmann, 2018, S. 174):

$$F_T = m_T \cdot a . \quad (4)$$

Folgt man dieser Definition, lassen sich die trägen Massen von Körpern vergleichen, indem man auf sie eine gleichgroße und gleichgerichtete Kraft ausübt und die daraus resultierende Bewegungsänderung beobachtet, indem man beispielsweise die Geschwindigkeiten misst. Newton hat damit zwei verschiedene Konzepte von Masse beschrieben und diese zunächst abstrakten Größen mit anderen, welche direkt beobachtet werden können, in Relation gesetzt.

Im folgenden Beispiel sollen die schweren und trägen Massen zweier Körper verglichen werden. Man beobachtet den freien Fall eines Stücks Papier und eines Ziegelsteins aus derselben Höhe im Vakuum. Da in diesem Fall die Gewichtskraft F_G die Beschleunigung a verursacht, erhält man letztere aus den Gleichungen (2) und (4):

$$a = G \frac{M_S m_S}{r^2 m_T} . \quad (5)$$

Bekannterweise ist die Falldauer für beide Körper im Vakuum gleich, ebenso wie die Konstante G , der Abstand r und die Masse der Erde M_S . Aufgrund dessen müssen sich also die schweren und trägen Massen der Gegenstände im gleichen Maß unterscheiden, um den gleichen Wert der Beschleunigung zu erhalten. Durch die Anpassung der Konstanten G kommt man schließlich zum Ergebnis $m_T = m_S$, also dass die Masse eine einzige Eigenschaft der Materie ist (Fechner, 1998, S. 219).

Beim Versuch, den Ursprung der Masse der Materie zu finden, begibt man sich in das Feld der Elementarteilchenphysik und entfernt sich gewissermaßen von der klassischen Physik mit den Erklärungen von Newton. Für ein zusammengesetztes Teilchen ergibt sich die Masse nämlich aus den Ruhemassen der Einzelteilchen, und gemäß Einsteins Energie-Masse-Relation, auch aus ihrer kinetischen und potenziellen Energie. Im Fall der Elementarteilchen macht letztere den größten Anteil an ihrer Masse aus. Die Wechselwirkung der Quarks mit Higgs-Feldern und der darin liegende Grund für die Entstehung der Masse ist aktueller Forschungsgegenstand auf dem Gebiet des Standardmodells der Teilchenphysik bzw. ihren

Erweiterungen durch die Stringtheorie und die Supersymmetrie (Kane, 2006, S. 37 ff.). Da sich diese Arbeit jedoch hauptsächlich mit makroskopischen Effekten befasst, wird für tiefergehende Zusammenhänge an die weiterführende bzw. zitierte Literatur verwiesen.

2.1.2. Einheit der Masse

Die nächste notwendige Definition in diesem Unterkapitel betrifft die physikalische Einheit der Masse. Im Laufe der Geschichte hat sich eine Vielzahl verschiedener Einheiten etabliert, die wiederum auf verschiedenen Normalen bzw. natürlichen Größen unterschiedlicher Qualität fußten. Mit den passenden Konversionsfaktoren bzw. -formeln ist das Wechseln zwischen verschiedenen Einheiten einer Größe problemlos möglich, jedoch können mangelhaft kommunizierte Unterschiede zu Fehlern beim Hantieren mit Zahlenwerten führen. Ein prominentes Beispiel hierfür ist das ungewollte Verglühen des Mars Climate Orbiter der NASA im Jahr 1999, das auf eine fehlerhafte Berechnung der Umlaufbahn zurückzuführen ist. Dabei haben sich zwei parallel arbeitende Teams von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern nicht ausreichend abgestimmt und schließlich den auf metrische Einheiten programmierten Bordcomputer mit Daten im imperialen Standard gespeist, was zu einem millionenschweren Schaden geführt hat (Hanisch et al., 2022, S. 222). Um Fehler wie diese zu verhindern, hat sich 1889 zum ersten Mal die Generalkonferenz für Maß und Gewicht mit dem Ziel versammelt, für – wortwörtliche – Vereinheitlichung zu sorgen. Noch bevor das heutige SI-System mit allen sieben Basiseinheiten beschlossen wurde, konnte das Kilogramm mit dem Einheitenzeichen kg als internationale Maßeinheit für die Masse festgelegt und dementsprechende Prototyp weltweit verteilt werden (Gross & Marx, 2014, S. 976).

Bis vor wenigen Jahren bildete ein Zylinder aus Platin-Iridium, der seit 1875 im Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) in Paris unter höchsten Sicherheitsvorkehrungen lagert, das Massennormal. Die metrologische Praxis sah vor, dass Eichinstitute auf der ganzen Welt Kopien von diesem Ur-Kilogramm anfertigten und zur weiteren Vervielfältigung bzw. zur Justierung diverser Messgeräte und der Ableitung weiterer Einheiten in die jeweiligen Länder brachten. Da hierbei unzählige

Male mit dem Prototyp hantiert werden muss und dieser ständig mit seiner Umgebung wechselwirkt, verändert er selbst bei sehr sorgfältigem Umgang seine Masse. Aus diesem Grund und zur Vereinfachung des Eichwesens hat man Bestrebungen zur Neudefinition der Einheit Kilogramm angestellt, die an eine Fundamentalkonstante geknüpft sein soll. Ein Ansatz war das Verbinden von makroskopischer und mikroskopischer Masse über die Avogadro-Konstante, welche hierfür durch Interferenzmessungen an Siliziumkristallen bestimmt werden sollte (Becker & Nicolaus, 2008, S. 164).

Letztlich hat sich jedoch ein anderes Projekt durchgesetzt, bei dem die Planck'sche Konstante h zur Neudefinition des Kilogramms herangezogen wurde. Der ursprünglich als Watt-Waage bekannte Versuchsaufbau, welcher zu Ehren des Erfinders posthum Kibble-Waage benannt wurde, vergleicht die Gewichtskraft einer Masse mit einer durch eine Spule zwischen Permanentmagneten generierten elektromagnetischen Kraft. Da aufgrund des Quanten-Hall-Effekts sowie des Josephson-Effekts Spannungen und Widerstände auf die Planck'sche Konstante zurückgeführt werden können, ist dies mit der Kibble-Waage ebenfalls mit hoher Präzision möglich (Robinson & Schlamminger, 2016, S. A46).

Zur Messung wird der Aufbau zuerst im statischen Modus betrieben, bei dem die Gewichtskraft einer Masse m , auf welche die Erdbeschleunigung g wirkt, von einer vertikalen Kraft generiert durch den Strom I , der durch eine Spule der Länge l in einem Magnetfeld der magnetischen Flussdichte B fließt, kompensiert wird:

$$m \cdot g = B \cdot l \cdot I . \quad (6)$$

Danach wird im sogenannten dynamischen Modus die Masse entfernt, und die Spule mit einer Geschwindigkeit v im Magnetfeld bewegt, sodass eine Spannung

$$U = B \cdot l \cdot v \quad (7)$$

in der Spule induziert wird. Setzt man voraus, dass $B \cdot l$ in den beiden Modi unverändert bleibt, kann der Ausdruck durch Gleichsetzen von (6) und (7) eliminiert werden, sodass folgender Zusammenhang entsteht:

$$U \cdot I = m \cdot g \cdot v . \quad (8)$$

Dabei werden die Messungen von Strom und Kraft von jenen der Spannung und Geschwindigkeit separiert, was einen Vergleich der virtuellen elektrischen und der

virtuellen mechanischen Leistung ermöglicht. Somit werden Verluste durch Widerstände, Reibung und Wirbelströme umgangen und eine gesamte Unsicherheit in der Größenordnung von 10^{-8} erzielt, was für eine Neudefinition des Kilogramms nötig ist (Robinson & Schlamming, 2016, S. A47). Die Masse eines Kilogramms wird schließlich über folgenden Zusammenhang nur aus den Fundamentalkonstanten der Planck'schen Konstante h , der Übergangsfrequenz der Hyperfeinaufspaltung des Cäsium-133-Isotops $\Delta\nu_{Cs}$ und der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c definiert, wobei einheitenlose Faktoren als k zusammengefasst wurden (Haddad et al., 2016, S. A85):

$$m = k \frac{h \cdot \Delta\nu_{Cs}}{c^2}. \quad (9)$$

Bringt man c^2 auf die linke Seite dieser Gleichung, ergibt sich die bekannte Äquivalenz von Energie und Masse, sodass die Ruheenergie eines Kilogramms Masse der Energie von $1,48 \cdot 10^{40}$ Photonen der Frequenz $\Delta\nu_{Cs}$ entspricht (Rothleitner, 2021, S. 240).

Zusammenfassend ist die Masse eine bestimmende Eigenschaft der Materie, deren genauer Ursprung nach wie vor erforscht wird. Ihre Einheit, das Kilogramm, wurde im Jahr 2019 neu definiert, wobei man das Pariser Urkilogramm durch die Ableitung der Größe auf Basis der Planck'schen Konstante ersetzt hat. Die Masse rückt durch Trägheit bzw. ihr Gewicht in die menschliche Wahrnehmung und kann somit auch technisch bestimmt werden. Der Messvorgang mittels verschiedener Waagen basiert dabei größtenteils auf dem Vergleich der durch eine Masse hervorgerufenen Gewichtskraft mit einer zweiten bekannten Kraft.

Zu guter Letzt sind in diesem Unterkapitel noch Begrifflichkeiten für alle folgenden Teile dieser Arbeit zu klären. Zuerst werden die Wörter „wägen“ und „wiegen“ als Synonyme für den Messvorgang mit einer Waage verwendet, wobei die erste Form eher fachsprachlich bzw. regional in Österreich gebräuchlich ist („wägen“, o. J.). Weiters wird schon im Schulunterricht streng zwischen Masse und Gewicht bzw. Gewichtskraft unterschieden, da die Begriffe physikalisch zwei unterschiedliche Größen beschreiben und auch rein mathematisch verschiedene Eigenschaften besitzen (Apolin, 2017, S. 61; Sexl, 2013, S. 31). Spricht man über Waagen, verschwimmen diese Unterschiede jedoch scheinbar, wenn beispielsweise ein Gewichtssatz aus Massestücken besteht oder von Lauf- und Gegengewichten die

Rede ist. Dabei sei darauf verwiesen, dass in den verschiedenen Kapiteln dieser Arbeit stets die in der Fachliteratur verwendeten Begriffe – mit Ausnahme von veralteten Einheiten wie dem Grammgewicht (Steinke, 1943, S. 8) – genannt werden, selbst wenn diese, strenggenommen, nicht immer der physikalischen Fachsprache entsprechen. Bei einem genaueren Blick auf die Angaben sollten diese jedoch stets eindeutig zuzuordnen sein, da zum Beispiel bei einem Ringgewicht von 10 mg die Einheit klar auf eine Massenangabe hinweist.

2.2. Hebel – Statik

2.2.1. Konstruktive Merkmale

Nach Wilhelm Felgentraeger (1907, S. 3) beruhen alle zur Massenbestimmung verwendeten Waagen auf dem Prinzip der Gewichtskraft und werden in Federwaagen, Auftriebswaagen und Hebelwaagen eingeteilt, wobei letztere die wichtigste Art darstellen, welche auch auf alle in dieser Arbeit beschriebenen Modelle zutrifft. Unter einem physikalischen Hebel, der die Grundlage dieser Messgeräte bildet, versteht man „eine unbiegsame, um eine feste Achse drehbare Stange, an der Kräfte angreifen“ (Guttmann & Vahle, 1932, S. 17). In dieser Definition stecken bereits zwei Anforderungen an eine Waage, auf welche später noch genauer eingegangen wird, nämlich die Festigkeit dieses Hebels und das Vorhandensein einer einzigen Drehachse.

Bei einem zweiarmigen Hebel (siehe Abb. 1 links) greifen Kraft und Last an verschiedenen Hebelarmen an, sodass ein Gleichgewicht besteht, wenn sich Kraft F_1 und Last F_2 umgekehrt wie ihre Hebelarme l_1 und l_2 verhalten (Guttmann & Vahle, 1932, S. 17 f.):

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}. \quad (10)$$

Da die eine Masse, welche an einem Hebelarm befestigt wird, durch die resultierende Gewichtskraft den Hebel dreht, kann der Drehwinkel als Maß für das Gewicht bzw. die Masse bei Berechnung mit dem Ortsfaktor angegeben werden. Diese Messmethode entspricht jener einer sogenannten Neigungswaage (Felgentraeger,

1907, S. 3). Weiters lässt sich auch ein Drehmoment M beschreiben, das durch die Kraft F am Hebelarm der Länge l hervorgerufen wird:

$$M = l \cdot F . \quad (11)$$

Somit kann weiter präzisiert werden, dass am Hebel ein Gleichgewicht herrscht, wenn die beiden angreifenden Drehmomente im Betrag gleich sind, da die Gewichtskräfte je ein linksdrehendes und ein rechtsdrehendes Moment hervorrufen (Guttmann & Vahle, 1932, S. 19). Belastet man den Hebel also einseitig mit einem zu bestimmenden Gewicht, kann das Gleichgewicht erreicht werden, indem man entweder die Längen der Hebelarme gemäß (10) und (11) verändert, oder ein Gegengewicht am zweiten Arm anbringt. Der einfachste und am häufigsten anzutreffende Fall ist die gleicharmige Balkenwaage, für die $l_1 = l_2$ gilt und deshalb ein gleich großes Gegengewicht am zweiten Arm nötig ist. Verschiedene Ausführungen von ungleicharmigen Waagen sollen später diskutiert werden.

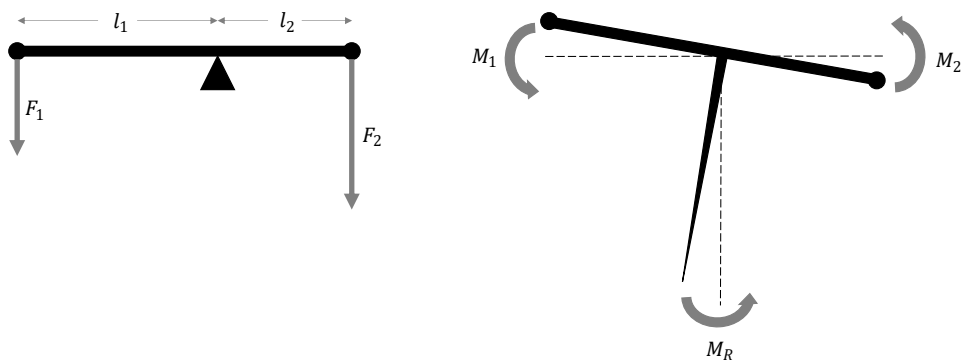


Abb. 1: Prinzipskizzen zum Hebel

links: ungleicharmiger Hebel; rechts: dreiarmliger Hebel

Setzt man also für einen Waagbalken voraus, dass dieser exakt symmetrisch zur Mittelachse ausgeführt ist, kann die Länge der Arme beim Gleichsetzen der Drehmomente eliminiert werden. Beschränkt man $l_1 + l_2$ gleichzeitig so, dass sich der Ortsfaktor g nicht signifikant zwischen den beiden Enden unterscheidet, kann auch dieser aus der Gleichung gestrichen werden und es gilt für die beiden Massen im Gleichgewicht $m_1 = m_2$. Somit wird durch eine Balkenwaage nicht nur ein Vergleich der Gewichtskräfte, sondern ein direkter Massenvergleich möglich.

Die Ruhelage des Balkens kann nun bei gleicher Belastung an beiden Seiten in jedem beliebigen Drehwinkel erreicht werden, da der Schwerpunkt des Systems

gemäß den bisher genannten Bedingungen auf der Drehachse liegt. Für quantitative Vergleiche ist es aber nötig, dass der Balken im unbelasteten Zustand eine bestimmte Position einnimmt, mit welcher im Fall der gleichen oder ungleichen Belastung, also beim Wägen, verglichen werden kann. Im Normalfall ist dies die treffend bezeichnete waagrechte oder horizontale Stellung, die dadurch erreicht wird, dass der Schwerpunkt durch konstruktive Maßnahmen lotrecht unter die Mittelachse versetzt wird. Man nennt dies auch das stabile Gleichgewicht oder die Nullpunktlage (Guttmann & Vahle, 1932, S. 19).

2.2.2. Empfindlichkeit

Die Anbringung einer Zunge unter der Drehachse, also einem senkrechten Zeiger, der in Verbindung mit einer geeigneten Skala Aussagen über die Abweichung des Systems von der Nullpunktlage zulässt, versetzt den Schwerpunkt durch ihre spezifische Masse nach unten. Dadurch kann man nun von einem dreiarmligen Hebel (siehe Abb. 1 rechts) sprechen, dessen dritter Arm, die Zunge, ein weiteres Drehmoment auf das System ausübt, das jeweils zur Nullpunktlage gerichtet ist und deshalb Rückstellmoment M_R genannt wird. Je weiter nach unten man den Massenzentrum der Zunge relativ zur Drehachse des Balkens rückt, desto größer wird das Rückstellmoment und desto schneller wird bei symmetrischer Belastung die Nullpunktlage erreicht. Weichen jedoch die Massen des Wägeguts und des Vergleichsobjekts voneinander ab, kann ein zu hohes Rückstellmoment verhindern, dass die Zunge ausschlägt und so eine korrekte Wägung beeinträchtigen. Im Folgenden kann daher die für eine Waage charakteristische Größe der Empfindlichkeit ε definiert werden, als die Abweichung von der Nullpunktlage in Skalenteilen x in Abhängigkeit des Massenunterschieds an den beiden Hebelarmen $\Delta m = |m_1 - m_2|$ (Steinke, 1943, S. 16 f.):

$$\varepsilon = \frac{x}{\Delta m}. \quad (12)$$

Biétry (1963, S. 3 f.) schlägt eine präzisere Angabe der Empfindlichkeit vor, bei welcher der Ausschlag in Skalenteilen durch den Ausschlag in Winkleinheiten ersetzt wird, da ansonsten ε durch die bloße Verlängerung der Zunge erhöht werden

könnte. Dennoch wird die Empfindlichkeit in der Literatur und von den Herstellern mehrheitlich nach (12) definiert. Diese ist allgemein umso größer, je näher der Schwerpunkt des Systems aus Hebeln an der Drehachse liegt, je geringer dessen Gesamtmasse ist, und je länger die beiden Arme sind (Guttmann & Vahle, 1932, S. 20). Somit ergeben sich wiederum Anforderungen an eine präzise Waage, die jedoch gleichzeitig in Konflikt zueinander stehen. Daher muss ein Kompromiss zwischen einer möglichst großen Balkenlänge und einer dennoch geringen Gesamtmasse bei hoher Stabilität gefunden werden und auch zwischen der möglichst hohen Schwerpunktslage und einem möglichst schnellen Erreichen des stabilen Gleichgewichts durch das nötige Rückstellmoment. Gleichzeitig sinkt die Empfindlichkeit auch mit wachsender Masse des Wägeguts, da dieses zur Gesamtmasse des Systems beiträgt. Zur Anpassung des Schwerpunktes an die aufgelegte Last werden Balkenwaagen mit einer vertikal über der Mittelachse verlaufenden Justierschraube bzw. einem Laufgewicht ausgerüstet. Durch Anheben dieses Teils kann die ursprüngliche Empfindlichkeit auch bei höherer Belastung wiederhergestellt werden, jedoch gilt diese Einstellung jeweils nur für einen bestimmten Lastbereich (Biétry, 1963, S. 5). Die konstruktive Umsetzung der weiteren Forderungen und die Lösung der Problemstellungen soll in Kapitel 2.4 diskutiert werden.

2.2.3. Auftrieb

Die bisher beschriebene Situation der Kräfte bzw. Momente, die auf den Balken einwirken, ist nur für das idealisierte Modell des luftleeren Raums vollständig. Für Präzisionswägungen unter atmosphärischen Bedingungen muss berücksichtigt werden, dass die von Luft umgebenen Körper in dieser einen Auftrieb erfahren, welcher der Gewichtskraft entgegengesetzt wirkt. Die Auftriebskraft F_A entspricht im Betrag der Gewichtskraft des vom Körper verdrängten Mediums, in diesem Fall der Luft. Für einen Körper mit der Masse m_1 und der Dichte ρ_1 ergibt gemäß (1) und (4) sich mit der Dichte der Luft ρ_L folgender Ausdruck für die Auftriebskraft (Schenk et al., 2014, S. 29):

$$F_A = m_1 \frac{\rho_L}{\rho_1} g . \quad (13)$$

Der an der anderen Seite des Hebels angebrachte Vergleichskörper mit der Masse m_2 und der Dichte ρ_2 erfährt ebenso eine Auftriebskraft. Setzt man die Gewichtskräfte und Auftriebskräfte in (10) ein, gilt daher nach Eliminierung von l und g folgende Gleichung:

$$m_1 \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_1}\right) = m_2 \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_2}\right) . \quad (14)$$

Durch weiteres Umformen erhält man folgenden Ausdruck, der als Auftriebskorrektur zum Wert von m_2 addiert werden muss, um m_1 zu erhalten (Steinke, 1943, S. 19), was auch Reduktion auf den luftleeren Raum genannt wird (Kohlrausch & Krüger, 1932, S. 61):

$$m_2 \cdot \rho_L \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}\right) . \quad (15)$$

Für das Beispiel der Messung bei $T = 20^\circ\text{C}$ in Luft mit einer Dichte von $\rho_L = 1,2928 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ eines Wägeguts aus Messing mit einer Dichte von $\rho_1 = 8400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, einem Gegengewicht aus Platin mit einer Dichte von $\rho_2 = 21450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (Schenk et al., 2014, S. 378 ff.) und $m_2 = 50 \text{ g}$ beträgt dieser Korrekturwert rund 4,7 mg. Er liegt damit über der Empfindlichkeit von Präzisions- bzw. Analysenwaagen und muss daher bei diesen Messungen berücksichtigt werden. Der Auftrieb der Hebelarme selbst bzw. aller daran symmetrisch angebrachten und jeweils aus dem gleichen Material bestehenden Teile kann im Übrigen für einen gleicharmigen Balken vernachlässigt werden, da die Beträge je gleich sind und sich die Drehmomente durch die entgegengesetzten Richtungen aufheben. Ebenso spielt die Auftriebskraft der Zunge keine Rolle, da diese in der Nullpunktslage radial zur Drehachse gerichtet ist, was einem Drehmoment von $M = 0$ entspricht.

Eine spezielle Form der Balkenwaagen, welche zu den hydrostatischen Waagen zählt, nutzt die Auftriebskraft von Körpern in Fluiden, um deren Dichte zu ermitteln. Die nach ihren Erfindern benannte Mohr'sche bzw. Mohr-Westphal'sche Waage trägt auf einer Seite ihres ungleicharmigen Hebels einen Senkkörper aus Glas, welcher an einem dünnen Draht befestigt ist, und ein fest montiertes Gegengewicht auf der anderen Seite. Dieses ist so dimensioniert, dass es den Senkkörper im stabilen

Gleichgewicht hält, wenn dieser von Luft umgeben ist (Steinke, 1943, S. 13). Dabei kann die Gleichgewichtslage an zwei horizontalen Dornen, welche am Gegengewicht und an einem Arm an der Säule angebracht sind, abgelesen werden. Wird der Senkkörper für eine Wägung in ein Behältnis mit einer Flüssigkeit getaucht, erfährt dieser einen Auftrieb, welcher durch verschiedene Reiter, also hufeisenförmige Drahtstücke, deren Schwerpunkt unterhalb des Auflagepunkts liegt (Felgentraeger, 1907, S. 164), ausgeglichen werden kann. Deren Massen verhalten sich wie 1:0,1:0,01 und sie können in Kerben am längeren Balkenarm eingehängt werden, die im Abstand von Zehnteln seiner Länge l eingefräst sind. Die genaue Masse des größten Reiters m_R ist durch die Dichte von Wasser ρ_W und dem Volumen des Senkkörpers V_S so festgelegt, dass er auf Position $x = 10$, also der äußersten, den Auftrieb kompensiert (Schenk et al., 2014, S. 35 f.). Für die Drehmomente, welche durch die Auftriebskraft des Senkkörpers der Dichte ρ_S und der Masse m_S in einer Flüssigkeit der Dichte ρ_F und durch die Gewichtskraft des Reiters auf Position x verursacht werden, ergibt sich mit (4) und (13) folgende Gleichung:

$$m_S g \frac{\rho_F}{\rho_S} l = m_R g \frac{x}{10} l. \quad (16)$$

Durch Umstellen der Gleichung und Eliminieren erhält man schließlich folgenden Zusammenhang für die zu bestimmende Dichte in Abhängigkeit der Dichte von Wasser:

$$\rho_F = \rho_W \frac{x}{10} \quad (17)$$

Legt man nun die Dichte von Wasser bei einer bestimmten Temperatur mit $\rho_W = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ fest, ergibt sich beispielsweise für eine Flüssigkeit, bei welcher die Auftriebskraft mit dem größten Reiter auf Position $x = 7$ kompensiert werden kann, bei der gleichen Temperatur eine Dichte von $\rho_F = 700 \text{ kg m}^{-3}$. Somit lässt die Position des Reiters eine direkte Ablesung des Ergebnisses zu, wobei die beiden kleineren Reiter gemäß ihrem Masseverhältnis die Zehner- und Einerstelle angeben (Schenk et al., 2014, S. 36). Auf diese Weise können unter Zuhilfenahme verschiedener Flüssigkeiten auch die Dichten von Materialien im festen Aggregatzustand, die als Pulver oder Splitter vorliegen, bestimmt werden. Man stellt dafür eine Mischung von Flüssigkeiten verschiedener Dichte her, in welcher die Partikel schweben. Die

Dichte dieser Flüssigkeit entspricht dann jener der Festkörper und kann mit der Mohr'schen Waage ermittelt werden (Bergmann & Schaefer, 1961, S. 241).

2.2.4. Korrekturen

Eine weitere wichtige Korrektur für Präzisionswägungen betrifft die Längen der beiden Hebelarme. Bisher wurde vorausgesetzt, dass diese für eine gleicharmige Waage exakt symmetrisch gefertigt sind, was in der Realität nicht immer umsetzbar ist. Einerseits können minimale Abweichungen in der Fertigung der Balken zu falschen Ergebnissen führen, andererseits auch äußere Einflüsse, die eine Wärmeausdehnung hervorrufen. Zur Feineinstellung der Nullpunktslage bzw. der Korrektur von Hebellängenfehlern sind an den meisten Waagbalken entweder direkt über der Mittelachse oder an den Balkenenden horizontal verlaufende Justierschrauben angebracht. Eine Einstellung mit diesen gilt jedoch wiederum nur für einen bestimmten Lastbereich und muss für jede Wägung wiederholt werden. Hinzu kommt, dass die Hebellängen auch von den genauen Positionen der zu vergleichenden Körper abhängen. Dieses Problem wird umgangen, indem man die Massstücke auf sogenannten Schalen ablegt, die über Gestänge oder Schnüre auf den Balkenenden lagern und schwingen können. Unter der Voraussetzung von reibungsfreien Achsen stellen sich die Angriffspunkte der Gewichtskräfte unabhängig von der Platzierung der Körper auf den Schalen stets auf den Lagerstellen ein, die konstruktiv definiert werden (Felgentraeger, 1907, S. 17). Felgentraeger (1907, S. 7) sieht die Konstruktion des Messgeräts erst dann als vollständig an und definiert: „Das aus Balken, Achsen und Schalen bestehende Instrument heißt Wage [sic]“.

Diese Hebellängenfehler können aber auch unabhängig von den Laufgewichten durch eine einfache Methode, der Doppelwägung bzw. Transpositions- oder Vertauschungswägung (Kochsiek & Gläser, 1997, S. 140), berücksichtigt werden, indem man das zu wägende Gut mit der Masse m_1 einmal am linken Arm mit der Länge l_1 befestigt und durch ein Gegengewicht mit der Masse m_2 am rechten Arm mit der Länge l_2 ausgleicht. Diesen Vorgang wiederholt man durch Aufsetzen des Wägeguts auf den rechten Arm und Ausgleich mit der Masse m_3 . Durch Aufstellen der Gleichungen für die Drehmomente im Gleichgewicht in beiden Fällen und

Multiplizieren dieser Ausdrücke erhält man die unbekannte Masse als geometrisches Mittel der beiden Massen der Gegengewichte (18), wobei für geringe Unterschiede auch das arithmetische Mittel (19) herangezogen werden kann (Walcher, 2006, S. 54):

$$m_1 = \sqrt{m_2 \cdot m_3}, \quad (18)$$

$$m_1 = \frac{1}{2}(m_2 + m_3). \quad (19)$$

Ein anderes Verfahren zur Eliminierung von Hebelfehlern, also geringen Längenunterschieden der beiden Hebelarme, ist die Substitutionswägung. Es beruht auf dem mathematischen Prinzip, dass zwei Größen, die einer dritten gleich sind, auch sich selbst gleich sind (Kochsiek & Gläser, 1997, S. 140). Neben einer Vorgehensweise mit wechselnder Belastung besteht eine bequemere Variante, bei der die Belastung des Balkens stets gleichbleibt – und zwar, durch dementsprechendes Auflegen von Massestücken, maximal – wodurch die einmal justierten Werte von Empfindlichkeit und Nullpunktslage für verschiedene Wägungen Gültigkeit behalten. Zur Bestimmung der Masse m_1 eines Objektes wird dieses auf eine Schale aufgelegt und der entsprechende Teil des Gewichtssatzes mit der Masse m_2 von derselben abgehoben, während man die aufgelegten Massen der anderen Schale gleich belässt, so dass sich wieder das Gleichgewicht einstellt. Die unbekannte Masse entspricht dann den abgehobenen Teilen: $m_1 = m_2$ (Biétry, 1963, S. 6).

2.2.5. Spezielle Wägeverfahren

Diese Methode der Wägung ermöglicht auch eine andere Konstruktionsweise der Balkenwaage, welche ‚einarmige‘ Waage genannt wird. Der Begriff wird unter Anführungszeichen gesetzt, da der Balken dabei trotzdem aus zwei Armen besteht, jedoch nur einer davon variabel belastbar ist. Am zweiten Arm ist ein festes Gegengewicht angebracht, das durch das Auflegen des gesamten dafür vorgesehenen Gewichtssatzes am zweiten Arm bzw. der Schale aufgewogen wird. Weiters erlaubt die Festlegung der Masse des Gegengewichts die Ausführung eines

ungleicharmigen Balkens. Gemäß (10) kann das feste Gewicht dann am längeren Arm angebracht und kleiner dimensioniert werden, was den Vorteil einer geringeren Gesamtmasse mit sich bringt und damit das Lager der Mittelachse weniger stark beansprucht. Weiters wird die Gesamtanzahl der Achsen von drei auf zwei reduziert, was den Einfluss der Reibung ebenfalls verringert (Biétry, 1963, S. 6).

Analog zur Konstruktion einer ‚einarmigen‘ Substitutionswaage können auch andere ungleicharmige Waagen unter Berücksichtigung von (10) gebaut werden. Ein wichtiger Vertreter ist die römische Schnellwaage, bei der das zu wägende Objekt am kurzen Arm fester Länge l_1 aufgehängt und der Balken mittels eines verschiebbaren Gegengewicht der festen Masse m_2 am längeren Arm in ein Gleichgewicht gebracht wird (Bergmann & Schaefer, 1961, S. 132 f.). Die unbekannte Masse m_1 wird dann über folgenden Zusammenhang mit dem Abstand zwischen Drehachse und Gegengewicht l_2 bestimmt:

$$m_1 = l_2 \frac{m_2}{l_1}. \quad (20)$$

Bei einer passend angebrachten Teilung des längeren Arms kann die zu ermittelnde Masse direkt abgelesen werden. Ebenso ermöglicht die geeignete Wahl des Verhältnisses der beiden Armlängen das Wiegen großer Lasten mit einem im Vergleich dazu kleinen und leichten Aufbau. Das gleiche Ziel verfolgt die Konstruktion der sogenannten Dezimal- bzw. Zentesimalwaage (siehe Abb. 2), die ihren Namen dem Verhältnis von Last und Gegengewicht zur Erreichung des Gleichgewichts verdankt. Dementsprechend sind die beiden Hebelarme so gewählt, dass beispielsweise zur Wägung eines Objektes mit einer Masse von höchstens 100 kg lediglich mit Gegengewichten bis 10 kg hantiert werden muss, also bei einer Dezimalwaage im Verhältnis 1:10 bzw.

$$\overline{BC} : \overline{AB} = 10. \quad (21)$$

Ein weiteres besonderes Merkmal dieser Waagenbauart ist, dass das Wägegut nicht auf eine Schale, sondern eine Plattform oder Brücke aufgelegt wird und die genaue Platzierung auf dieser zwischen den Punkten F und G keine Rolle spielt. Dieser Umstand wird dadurch erreicht, dass die Brücke als einarmiger Hebel auf einem zweiten einarmigen Zusatzhebel lagert, wodurch sie durch die Gewichtskraft eines aufgelegten Objekts ausschließlich in vertikaler Richtung verschoben werden

kann. Die Armlängen sind dabei in folgendem Verhältnis zu wählen (Guttman & Vahle, 1932, S. 20 f.):

$$\overline{BC} : \overline{BD} = \overline{HG} : \overline{HF} . \quad (22)$$

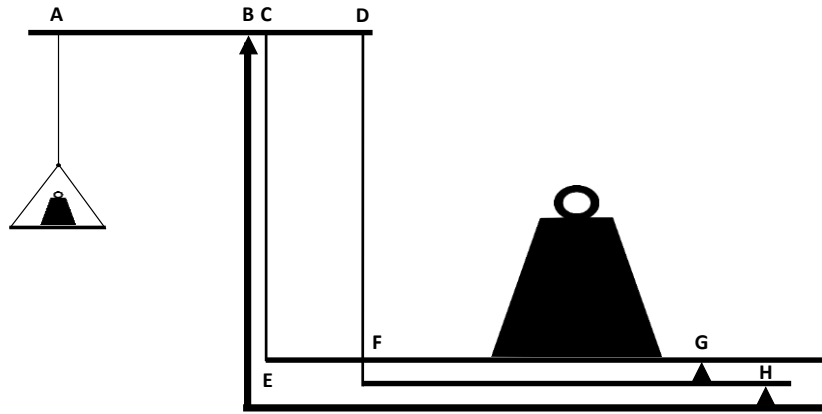


Abb. 2: Skizze zur Dezimalwaage

2.2.6. Kenngrößen

Unabhängig von der Anzahl der Hebel und der Anwendung verschiedener Verfahren zur Kompensation von Fehlern sind neben der bereits beschriebenen Empfindlichkeit zwei weitere wichtige Kenngrößen zur Charakterisierung von Waagen zu nennen. Zunächst ist die Linearität eine Eigenschaft, welche den Zusammenhang zwischen der aufgelegten Masse und dem angezeigten Wägewert beschreibt. Fällt dieser über den gesamten oder einen bestimmten Lastbereich linear aus, spricht dies für die Qualität des Geräts, wobei im umgekehrten Fall von Nichtlinearität mit einer gewissen Linearitätsabweichung auszugehen ist (Nater et al., 2008, S. 130). Letztere ist definiert als die größte Abweichung eines Messwerts von der Geraden zwischen Nulllast und Höchstlast (Nater et al., 2008, S. 154 f.).

Weiters sind die Begriffe Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit, welche oft als Synonyme verwendet werden, zu definieren. Beide beschreiben die Streuung der Ergebnisse aufeinanderfolgender Messungen. Im Leitfaden wägetechnischer Begriffe wird jedoch zwischen Messungen derselben Größe unter verschiedenen Bedingungen, deren Streuung bzw. Standardabweichung als Reproduzierbarkeit

bezeichnet wird (Nater et al., 2008, S. 185), und Messungen derselben Größe unter gleichbleibenden Bedingungen, was mit der Wiederholbarkeit beschrieben wird (Nater et al., 2008, S. 239), unterschieden. In jedem Fall müssen bei der Angabe einer der Eigenschaften alle Bedingungen wie Messverfahren, Ort, Zeitpunkt, Experimentator, usw. genannt werden. Die Wiederholbarkeit einer Waage ist dann zufriedenstellend, wenn folgender Zusammenhang zwischen der Standardabweichung der Messreihe σ und der kleinsten gewünschten Nettomasse m_{kNM} , welche bestimmbar sein soll, besteht (Europäisches Direktorat für die Qualität von Arzneimitteln, o. J., S. 8681):

$$\frac{2\sigma}{m_{kNM}} \cdot 100 \leq 0,1 . \quad (23)$$

Zuletzt besteht zwischen der Empfindlichkeit und der Reproduzierbarkeit bzw. Wiederholbarkeit einer Waage ein Zusammenhang, welcher unterschiedlich angegeben wird. Kurtenacker (1956, S. 200) schreibt als Ergebnis einer Studie, dass die Standardabweichung einer Messreihe des gleichen Wägeguts, mit steigender Empfindlichkeit der Waage bis zu einer gewissen Grenze sinke, ab der sie als konstant angesehen werden. Dagegen folgert Biétry (1963, S. 7) nach einem theoretischen Vergleich der Rückstellmomente von Waagen verschiedener Empfindlichkeiten, dass es sinnlos wäre, diese beliebig zu steigern, da letztlich die Reproduzierbarkeit darunter leide. Unabhängig von der Korrelation, wird dafür plädiert, der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ein größeres Gewicht in Bezug auf die Qualität einer Waage einzuräumen und diese anstatt der Empfindlichkeit anzugeben.

2.3. Elektrodynamik

Einige der in Kapitel 5 vorgestellten Waagen vergleichen an den beiden Hebelarmen anstatt zwei verschiedener Massen bzw. deren Gewichtskräfte, eine Gewichtskraft mit einer elektrostatischen bzw. elektromagnetischen Kraft, wodurch in weiterer Folge auf die zu bestimmende Masse geschlossen werden kann. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle Grundlagen der Elektrostatik bzw. Elektrodynamik erläutert, welche zum Verständnis der Funktionsweise solcher Messgeräte nötig sind.

Zunächst kann im Rahmen der Elektrostatik, welche als Spezialfall der Elektrodynamik ebenfalls in diesem Kapitel behandelt wird, von der Kraft F ausgegangen werden, die ein Körper der Ladung Q in einem elektrischen Feld der Stärke E erfährt (Meschede, 2015, S. 316):

$$F = Q \cdot E . \quad (24)$$

Mit der elektrischen Feldstärke $E = U/d$ zwischen zwei Elektroden im Abstand d , an denen eine Spannung U angelegt wird, der Kapazität $C = \varepsilon A/4\pi d$ eines Plattenkondensators der Fläche A , und der Permittivität $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ lässt sich der Zusammenhang weiter umformen (Meschede, 2015, S. 328). Für den praktischen Kräftevergleich dient das absolute Plattenelektrometer nach Thomson bzw. Kelvin, das auch als Spannungswaage oder Kirchhoff-Waage bezeichnet wird. Es entspricht einer Balkenwaage mit einer Schale für Massestücke an einem Arm und einer Kondensatorplatte am zweiten Arm. Unter dieser befindet sich eine zweite, fest montierte Platte größeren Durchmessers. Da am Rand der Kondensatorplatten Feldverzerrungen auftreten, wird um die bewegliche Platte ein Schutzring aus dem gleichen Material montiert, sodass der zuvor beschriebene Zusammenhang für die Kapazität im homogenen Feld mit dem Durchmesser bzw. der Fläche der kleineren Platte ohne Einschränkungen gilt (Palm, 1934a, S. T68). Berücksichtigt man letztlich noch, dass die Stärke des Feldes, das die eine Platte an der anderen verursacht, halb so groß ist wie das gesamte elektrische Feld im Kondensator (Becker, 1973, S. 64), gelangt man zu folgendem Zusammenhang für die Kraft, mit der die am Balken befestigte Platte nach unten gezogen wird (Lecher & Smekal, 1928, S. 87; Palm, 1934a, S. T68):

$$F = \frac{\varepsilon}{2} \frac{U^2}{d^2} A . \quad (25)$$

Setzt man einen gleicharmigen Balken voraus, können die Armlängen wiederum eliminiert und folgender Zusammenhang zwischen der Spannung an den Kondensatorplatten und der aufgelegten Masse auf der Schale gefunden werden:

$$U = \sqrt{\frac{2 d^2}{\varepsilon A} m g} . \quad (26)$$

Dabei lässt sich feststellen, dass die auftretende elektrische Kraft bzw. in weiterer Folge die Masse, welche nötig ist, um das System im Gleichgewicht zu halten, direkt proportional zum Quadrat der Spannung ist. Diese Anordnung ist daher zum Messen hoher Spannungen geeignet, was in der Vergangenheit auch üblich war (Palm, 1934b, S. T78), jedoch können bei bekannter Spannung auch feine Wägungen vorgenommen bzw. bei bekannter Spannung und Masse auch ε bestimmt werden (Meschede, 2015, S. 327).

Eine weitere Kraft, welche zum Vergleich mit der Gewichtskraft an einer Balkenwaage herangezogen werden kann, ist jene, die aus dem Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter bzw. dessen Wechselwirkung mit ferromagnetischen Materialien resultiert. Ausgangspunkt der mathematischen Beschreibung ist das Biot-Savart'sche Gesetz, das die Änderung der magnetischen Feldstärke $d\vec{H}$ an einem Punkt im Abstand $\vec{r}$ zu einem Leiterelement der Länge $d\vec{l}$, das von einem Strom I durchflossen wird, angibt (Meschede, 2015, S. 377):

$$d\vec{H} = \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^3}. \quad (27)$$

Für das Feld im Inneren einer langen Zylinderspule – der Durchmesser der Spule soll dabei klein gegenüber ihrer Länge sein – der Länge l mit der Anzahl der Windungen n und der Vakuumpermeabilität $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V s A}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ergibt sich gemäß dem Zusammenhang $B = \mu_0 \cdot H$ zwischen der magnetischen Feldstärke und der Flussdichte B folgender Ausdruck (Demtröder, 2017, S. 88 ff.):

$$B = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{n}{l}. \quad (28)$$

Verschiedene Waagen mit elektrischen Einrichtungen haben gemein, dass an einer Seite des Balkens ein Metallzylinder bzw. -stab angebracht ist, der durch das induzierte Magnetfeld in eine darunter befindliche Zylinderspule gezogen wird. Zum Vergleich mit einer Gewichtskraft am anderen Balkenarm ist daher ein Zusammenhang zwischen dem Strom in der Spule, deren Dimensionen und der resultierenden axialen Kraft F_z gesucht. Betrachtet man die Stirnseite der Spule als Magnetpol, ergibt sich für die Kraft zwischen dieser und einem Eisenkern mit gewisser Remanenz, welcher als äquivalentes Solenoid beschrieben wird (Raith et al., 2006, S. 151)

$$F_Z = \frac{B^2 \cdot A}{\mu_0}, \quad (29)$$

wobei A die Querschnittsfläche der Spule mit deren Innendurchmesser d_i bezeichnet (Chang-Woo, 2015, S. 599; Lüders & Oppen, 2015, S. 60 ff.). Durch Einsetzen von (28) und $A = d_i^2 \pi / 4$ in (29) – allerdings versehen mit einem Korrekturfaktor k für das äquivalente Solenoid und der relativen Permeabilität μ_r für den Eisenkern – gelangt man schließlich zu folgendem Ausdruck für die Kraft entlang der Achse der Zylinderspule:

$$F_Z = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I^2 \cdot n^2 \cdot d_i^2 \cdot \pi \cdot k}{8 \cdot l^2}. \quad (30)$$

Setzt man wiederum Gleicharmigkeit voraus, kann die Stromstärke, durch welche der Balken mit der aufgelegten Zusatzmasse m im Gleichgewicht gehalten wird, durch die Masse, die Fallbeschleunigung und die übrigen gerätespezifischen Größen ausgedrückt werden:

$$I = \sqrt{\frac{8 \cdot m \cdot g \cdot l^2}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot n^2 \cdot d_s^2 \cdot \pi \cdot k}}. \quad (31)$$

Für die Gültigkeit der vorangehenden Ausdrücke wird vorausgesetzt, dass das Magnetfeld innerhalb der Wicklungen homogen auftritt, was durch die bereits erwähnte Näherung für lange Spulen umgesetzt wird. Da im Experiment dennoch Feldverzerrungen an den beiden Enden auftreten, auf deren aufwendige mathematische Beschreibung an dieser Stelle verzichtet wird, gilt der Zusatz, dass die magnetische Flussdichte und in weiterer Folge auch die magnetische Kraftwirkung in der Mitte der Zylinderspule am größten ist (Ebrahimi, 2021, S. 42). Aus diesem Grund muss der Metallzylinder einer solchen Waage im unbelasteten Zustand zentral in der Spule positioniert werden, um die Störeinflüsse möglichst gering zu halten.

2.4. Technische Anforderungen und deren Umsetzung

Einige Anforderungen an die Konstruktion einer präzisen Waage wurden bereits in den vorangehenden Kapiteln erwähnt. Unter dieser Überschrift soll es um diese und

weitere Eigenschaften gehen, welche Einfluss auf die Qualität der Wägungen haben, und auch um deren technische Umsetzungen bei verschiedenen Modellen.

2.4.1. Balken

Das zunächst wichtigste Element einer Balkenwaage, nämlich den Balken selbst, betreffen die folgenden grundlegenden Anforderungen an die Fertigung und das Material:

- a. Für eine gleicharmige Waage soll der Balken exakt symmetrisch ausgeführt sein, um die beiden Armlängen beim Wägen nicht berücksichtigen zu müssen.
- b. Das Material muss eine hohe Festigkeit bzw. geringe Elastizität aufweisen, sodass sich die Lage der drei Achsen zueinander bei Belastung nicht verändert.
- c. Es soll eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, damit sich keine Temperaturgradienten einstellen, die eine ungleichmäßige thermische Expansion oder Kontraktion hervorrufen,
- d. wobei der thermische Ausdehnungskoeffizient generell möglichst gering sein soll.
- e. Daneben soll die Massendichte des Materials klein sein, um die Gesamtmasse zu verkleinern und damit die Empfindlichkeit der Waage zu erhöhen (Felgentraeger, 1907, S. 42).
- f. Um kleine Massendifferenzen zwischen den beiden Armen bzw. Schalen feststellen zu können, sollen Balken auch möglichst lange konstruiert werden (Kochsiek & Gläser, 1997, S. 138).

Die Symmetrie ist zunächst ein rein handwerklicher Aspekt, der in den feinmechanischen Werkstätten des 19. und 20. Jahrhunderts bereits mit hoher Genauigkeit umgesetzt werden konnte (Jenemann, 1987, S. 9). Die geforderten Eigenschaften b. bis e. hingegen können nicht allesamt von einem einzigen Material erfüllt werden, da beispielsweise die geringe spezifische Dichte und die hohe Wärmeleitfähigkeit in Konkurrenz zueinander stehen und deshalb Kompromisse eingegangen werden müssen. Grundsätzlich kommen Metalle wie Aluminiumlegierungen, Kupferlegierungen und Stahl, sowie für spezielle Konstruktionen auch Glas in Frage. Aluminium

zeichnet sich durch seine geringe Dichte aus, was jedoch mit einer geringeren Festigkeit einhergeht, die zwar durch verschiedene Legierungselemente verbessert werden kann, aber dennoch nicht die mechanischen Eigenschaften von Messing oder Bronze erreicht. Stahl bietet hervorragende thermische und mechanische Qualitäten, ist jedoch aufgrund der ferromagnetischen Effekte für die meisten Waagen ungeeignet. Messing- und Bronzebalken, welche am häufigsten bei Präzisions- und Analysenwaagen verbaut wurden, sind zum Schutz des Materials meist mit Lack oder einer galvanischen Beschichtung aus Gold, Platin oder Nickel überzogen (Fellgentraeger, 1907, S. 43 ff.).

Gegen die Forderung f. spricht, dass lange Balken eine vergleichsweise hohe Schwingungsdauer aufweisen, was die Dauer des Wägevorgangs erhöht und auch zu Ablesefehlern führen kann. Die übliche Vorgehensweise war dabei die Ermittlung der Masse während der Bewegung des Balkens durch die Ablesung von Umkehrpunkten. Diese Methode wurde angewandt, da die Wartezeit bis zum Abklingen der Schwingung zu lange war und die Endposition aufgrund vergleichsweise hoher Reibung an den Lagern nicht jener eines idealisierten reibungsfreien Hebels entsprach. Dabei werden fünf aufeinanderfolgende dieser Punkte P_1 , P_2 , P_3 , P_4 und P_5 , bei denen der Zeiger auf der Skala umschlägt, beobachtet und notiert. Anschließend bildet man das arithmetische Mittel jener drei Umkehrpunkte P_1 , P_3 und P_5 der einen Seite und jener zwei Punkte P_2 und P_4 der anderen Seite. Diese werden am Ende nochmals gemittelt und daraus das Endresultat

$$P = \frac{1}{2} \left(\frac{P_1 + P_3 + P_5}{3} + \frac{P_2 + P_4}{2} \right) \quad (32)$$

bestimmt (Steinke, 1943, S. 17). Da auch diese Methode bei langarmigen Waagen viel Zeit in Anspruch nahm, ging man in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts zur Fertigung kurzer Balken über, was die Messdauer durch die Reduktion von Masse und Trägheitsmoment verkürzte (Kochsiek & Gläser, 1997, S. 144). Gleichzeitig spielte dadurch die elastische Verformung bei hohen Belastungen eine geringere Rolle, wodurch letztendlich höhere Empfindlichkeiten über den gesamten Wägebereich erreicht werden konnten (Steinke, 1943, S. 17).

Weiters kann neben der Wahl des Materials und der richtigen Balkenlänge durch die entsprechende konstruktive Gestaltung des Querschnitts gegen die Biegung

des Balkens vorgegangen werden (Biétry, 1963, S. 4). In der geometrischen Form der Balken gibt es einerseits im historischen Verlauf, andererseits auch zwischen den einzelnen Herstellern und Modellen Unterschiede. Zunächst existierten die primitiven Balken aus einem Stab, welche jedoch später durch zusammengesetzte bzw. durchbrochene Balken in Form von Fachwerken ersetzt wurden. Diese werden ebenfalls aus einem Stück Metall gefertigt, was eine gleichmäßige thermische Verformung begünstigt, haben aber den Vorteil einer geringeren Masse und, bei geschickter Wahl der Geometrie, gleicher Stabilität. Dabei muss neben dem Finden eines konstruktiven Kompromisses zwischen den angeführten Anforderungen auch darauf geachtet werden, dass der Schwerpunkt des Systems auf bzw. vertikal unter die Mittelachse fällt (Felgentraeger, 1907, S. 49 ff.).

2.4.2. Achsen und Lager

Die nächsten wichtigen Details betreffen die Achsen des schwingenden Systems bzw. deren Lagerstellen, welche durch sogenannte Schneiden und Pfannen gebildet werden. Obwohl bereits erwähnt wurde, dass große Schwingungsdauern nicht wünschenswert sind, wird von einer präzisen Waage gefordert, dass vor allem die Mittelachse eine möglichst reibungsfreie Schwingung zulässt, da diese mit der Empfindlichkeit des Messgeräts einhergeht. Bis zum Ende des 17. Jahrhunderts wurden üblicherweise runde Achsen in halbrunden Gegenstücken, den Pfannen, gelagert, welche dann durch keilförmige Lagerelemente ersetzt wurden (Jenemann, 1982, S. 132). Durch die verkleinerte Auflagefläche, welche im Idealfall einer völlig scharfen Schneide nur auf eine Kante reduziert wird, konnte die Reibung minimiert und damit die Präzision der Waagen erhöht werden. Die Pfannen blieben zur Aufrechterhaltung des Kraftschlusses weiterhin konkav (Felgentraeger, 1907, S. 75).

Da durch die Konzentration der Berührungsfläche die gesamte Gewichtskraft des Balkens auf eine Kante wirkt, muss das Material von Schneide und Pfanne einer hohen Beanspruchung standhalten, da jede Abnutzung die Qualität des Geräts beeinträchtigt. Dabei müssen die Lagerelemente eine hohe Festigkeit bzw. Härte aufweisen, dürfen aber gleichzeitig nicht zu spröde sein, da sie sonst zum Brechen neigen. Ebenso darf die Schneide nicht härter als ihre Unterlage sein, da sie sich

sonst nach wiederholten Wägungen in die Pfanne hineingräbt. Letztlich kommen nur Materialien wie gehärteter Stahl und gewisse Edel- und Halbedelsteine wie Achat, Chalzedon oder Feuerstein aufgrund ihrer Eigenschaften für die Fertigung in Frage. Auch der Schneidenwinkel ist entscheidend für deren Haltbarkeit und liegt je nach maximaler Belastbarkeit der Waage und verwendetem Material für das Lager zwischen 45° und 120° (Felgentraeger, 1907, S. 76 ff.). Im 20. Jahrhundert konnte durch die Herstellung synthetischer Edelsteine mit hoher Reinheit und dementsprechend verbesserten mechanischen Eigenschaften, die Qualität der Lager weiter erhöht werden (Kochsiek & Gläser, 1997, S. 149). Weiters konnte dadurch die Reibung nochmals verkleinert werden, was Voraussetzung für die später übliche ruhende Ablesung war (Walcher, 2006, S. 56).

Man entdeckte auch die Vorteile einer planen Pfanne, meist aus synthetischem Saphir, gegenüber einer konkaven, da diese einfacher und mit größerer Genauigkeit gefertigt werden kann. Um die minimale Berührungsfläche gewährleisten zu können, sind zur exakten Ausrichtung der beiden Lagerelemente meist Stellschrauben angebracht, mit denen die Position und Ausrichtung der Schneide exakt justiert werden kann. Gegen ein Abrutschen des Balkens, das wegen der fehlenden Führung durch die halbrunde Auflage möglich wird, müssen andere Zusatzeinrichtungen eingesetzt werden, die später beschrieben werden (Felgentraeger, 1907, S. 75 f.).

Die Schalen bzw. deren Schnüre oder Gestänge werden ebenfalls frei schwingend an den Balkenenden gelagert, wo sie die Endachsen bilden. Dort werden analog zur Mittelachse Schneiden und Pfannen angebracht, um die Reibung zu minimieren und den gemeinsamen Schwerpunkt von aufgelegter Masse und Schale vertikal unter die Achsen zu versetzen. Da jedoch die Eigenschwingungen der Schalen störende Einflüsse auf die Wägung ausüben können, ist es notwendig diese durch die sogenannten Gehänge zu kompensieren. Solche Gelenke werden unterhalb der Endachsen angebracht und erlauben Schwingungen in zwei Raumrichtungen. Hierfür existieren verschiedene Ausführungen und Macharten je nach Anwendung und Hersteller, jedoch basieren alle auf dem Grundprinzip eines Kreuzgelenks bzw. Kardanischen Gelenks (Jenemann, 1982, S. 318). Für einfachere Waagen können die Gehänge bzw. auch die Lager der Endachsen auch aus einem Gelenk gebildet werden, das aus einem einfachen Metallring und einem Haken als Gegenstück besteht. Die Schalen selbst werden aus Leichtmetallen ähnlich dem Balken gefertigt, um

Forderung f. zu erfüllen. Daneben müssen diese aber auch resistent gegen Reaktionen mit verschiedenen Substanzen sein, die gewogen werden, weswegen nicht alle Leichtmetalle in Frage kommen bzw. diese wiederum lackiert oder galvanisch beschichtet werden müssen. Zum Schutz der Schalen gegen mechanische und chemische Einflüsse werden außerdem meist dünne Glasplatten im passenden Durchmesser beigelegt. Weiters erfahren die Schalen während des Schwingens auch einen Luftwiderstand, der entgegen einer intuitiven Annahme nicht zur Dämpfung beiträgt, sondern durch die entstehenden Strömungen zu einer Erhöhung der Schwingungsdauer führen kann. Aus diesem Grund sollen die Schalen nur so groß wie nötig konstruiert werden (Felgentraeger, 1907, S. 112 ff.).

2.4.3. Dämpfung

Da eine Dämpfung der annähernd reibungsfreien Schwingung des Balkens gewünscht ist, um die Dauer des Wägevorgangs zu verkürzen und damit größere Effizienz zu ermöglichen, können an Präzisions- und Analysenwaagen verschiedene Einrichtungen zu diesem Zweck verbaut werden. Zu diesen gehören die sogenannten Luftbremsen oder auch Arzberger'schen Gebläse, die aus einem Gummi- oder Metallgebläse und einer feinen Düse unter einer der Waagschalen bestehen. Betätigt man das Gebläse, wird ein nach oben gegen den Schalenboden gerichteter Luftstoß erzeugt. Im richtigen Moment eingesetzt wirkt dieser dem Absinken der Schale entgegen und verringert damit die Schwingungsamplitude (Felgentraeger, 1907, S. 124). Später wurden diese manuellen Dämpfungssysteme von anderen abgelöst, die ebenfalls mit Luft arbeiten, aber einen anderen Effekt ausnützen. Als Erfinder der Luftdämpfung wird oft Pierre Curie genannt, der unter den Waagschalen je einen Dämpfungszylinder aus Metall montierte, welche in Hohlzylindern an der Grundplatte der Waage eintauchen (Jenemann, 1982, S. 319). Die Dämpfung basiert dabei sowohl auf der Kompression von Luft zwischen den beiden Zylindern als auch auf der Luftreibung, welche beim Strömen durch die kleinen Öffnungen an beiden Zylindern, sowie im feinen Spalt zwischen diesen auftritt (Walcher, 2006, S. 58). Dabei ist darauf zu achten, dass die Differenz der Durchmesser ausreichend groß gewählt wird, sodass es unter keinen Umständen zur Reibung zwischen den

Metallteilen kommt. Die Konstruktion von Curie wurde von verschiedenen Herstellern weiterentwickelt und später meistens direkt unter den Endachsen montiert (Sartorius, 1938, S. 8). Anfang des 20. Jahrhunderts wurden auch Wirbelstrombremsen zum Erreichen von nahezu aperiodischen Schwingungen eingesetzt. Da dabei die Magnetisierung der metallischen Teile der Waage und damit eine Beeinflussung der Gleichgewichtslage nicht ausgeschlossen werden kann, kamen diese Einrichtungen jedoch nur vereinzelt zum Einsatz (Jenemann, 1982, S. 319).

2.4.4. Arretierung

Aufgrund des Einsatzes der bereits beschriebenen planen Pfannen – vor allem jener der Mittelachse – wurde es notwendig Einrichtungen zur Arretierung des Balkens zu verbauen. Diese hatten neben der gegenseitigen Ausrichtung der beiden Lagerelemente auch die Aufgabe, diese bei Nichtbenutzung der Waage zu trennen und somit das Material zu schonen (Nater et al., 2008, S. 27). Meist wird dabei durch ein Hebelsystem der Balken von seiner Auflage lotrecht abgehoben, sodass dieser auf der Arretierungseinrichtung ruht (Kochsiek & Gläser, 1997, S. 138). Ferner werden auch die Gehänge der Endachsen vom Balken getrennt und gleichzeitig mit diesem arretiert. Man unterscheidet grundsätzlich zwei Typen der Arretierung, nämlich die Parallelträgerarretierung, bei der die Angriffspunkte auf vertikalen Linien auf und ab bewegt werden, und die schwingende Arretierung oder auch Kreisbogenarretierung, bei der sich die Angriffspunkte auf Kreisbahnen mit der Mittelachse im Zentrum bewegen. Letztere bietet den Vorteil, dass der Balken auch in einer Position außerhalb der Nullpunktlage exakt an den Arretierungspunkten aufgenommen und so schonend arretiert werden kann, ohne dass Schneide und Pfanne auseinandergleiten. Beiden Vorrichtungen gemein ist die Übersetzung einer Rotationsbewegung am Arretierungsknopf für die Bedienerin oder den Bediener in eine Translationsbewegung der Arretierungsbügel, welche meistens durch ein Kurbelschubgetriebe erreicht wird (Felgentraeger, 1907, S. 129 ff.).

Hauptsächlich zur Erhöhung des Komforts bei einer Wägung können auch Schalenarretierungen verbaut werden, die dazu dienen, die schwingenden Schalen zu beruhigen, um die Lager zu schonen und das Auflegen bzw. Abnehmen des

Wägeguts zu erleichtern. Die einfachste Ausführung stellt dabei die Pinselarretierung dar, bei der unter beiden Schalen je ein Pinsel beweglich angebracht wird, der beim Anheben an diesen reibt. Verbreiteter ist jedoch die Konusarretierung nach Arzberger, bei welcher sich unter den Schalen je ein Hohlkonus bewegt, der beim Arretieren angehoben wird und eine nach unten gerichtete Spitze am Schalenboden umschießt. Diese Konstruktion ermöglicht es, die Schale auch aus dem schwingenden Zustand in die Ruhelage zu bringen und anschließend aus dieser wieder freizugeben (Felgentraeger, 1907, S. 143 ff.). Einfachere Abwandlungen nutzen lediglich einen Bolzen mit halbrundem Kopf, der gelegentlich auch gefedert ist, von unten gegen die Schale drückt, und diese fixiert. Je nach Modell werden alle verbauten Teileinrichtungen der Arretierung gleichzeitig oder, durch eine spezielle Mechanik, in einer geeigneten Reihenfolge beim Drehen des Arretierungsknopfes- bzw. -hebel betätigt.

2.4.5. Gehäuse

Ein Detail, das wesentlich zur Genauigkeit einer Waage beiträgt, ist das Gehäuse, in dem sich alle bisher beschriebenen Teile befinden. Die hauptsächlich aus Glas gefertigte Abdeckung schützt die empfindlichen Bauelemente vor äußeren Einflüssen (Kochsiek & Gläser, 1997, S. 138). Dazu gehören Staub, Feuchtigkeit und sonstige Fremdkörper, welche die Beweglichkeit und die Struktur – vor allem der metallischen Teile – des Messgeräts beeinträchtigen können, sowie Luftströmungen und Temperaturschwankungen, die den Messvorgang selbst beeinflussen und das Ergebnis verfälschen. Das Glas bietet Einsicht, hat jedoch die Eigenschaft, die langwelligeren Anteile der von der Waage emittierten Strahlung daran zu hindern, nach außen zu dringen. Das als Glashaus- oder Treibhauseffekt bekannte Phänomen führt zu einer allmählichen Erhöhung der Temperatur im Inneren des Gehäuses, wenn es Sonneneinstrahlung ausgesetzt wird (Häckel, 2021, S. 173). Abhilfe schafft hier der Einsatz von Spiegelglas, welches die transmittierte Strahlungsintensität verringert und für hochwertige Geräte verwendet wird. Auch für die Rahmenteile gelten bestimmte Anforderungen, wie die Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit und Vermeidung von Reaktionen mit den Metallteilen der Waage. Aus diesem Grund kommt

beispielsweise Eiche, welche zwar hohe Festigkeit aufweist, nicht in Frage, jedoch sind die Hölzer von Kiefer, Mahagoni und auch naturbelassenem Nussbaum geeignet. Für besonders hochwertige Modelle bieten sich auch Glaseinfassungen aus Messing, Aluminium oder Zink an, welche bessere thermische Eigenschaften aufweisen, aber schwieriger zu bearbeiten sind (Felgentraeger, 1907, S. 197 ff.).

2.4.6. Ablesung

Für die Zunge einer Balkenwaage gilt, wie bereits erwähnt, die Forderung nach einer geringen Masse, da hierdurch ein kleines Rückstellmoment und eine dementsprechend hohe Empfindlichkeit erreicht werden können. Eine besonders geringe Masse kann erzielt werden, indem man die Zunge statt aus Vollmaterial aus Blech herstellt und so einen Hohlkörper erzeugt. Als Materialien eignen sich analog zum Balken Metalle wie Stahl, Aluminium oder Messing. Um eine ausreichende Stabilität zu gewährleisten, werden die Teile nach unten hin konisch gefertigt, wodurch eine feine Skalierung mittels der Spitze ermöglicht wird und gleichzeitig der Schwerpunkt nach oben versetzt werden kann. Die zur Ablesung nötigen Skalen, welche hinter oder unter der Spitze der Zunge angebracht werden, sind meist aus Elfenbein gefertigt und mit schwarzen Teilstrichen versehen, um für einen guten Kontrast zu sorgen. Als Abstand zwischen den Strichen eignet sich ein Maß von mindestens einem Millimeter, um noch problemlos mit freiem Auge ablesen zu können (Felgentraeger, 1907, S. 117 f.). Zusätzlich werden den meisten Waagen auch Ableselupen beigelegt, welche fest montiert oder lose und mit einem Standfuß versehen eine bessere Lesbarkeit ermöglichen.

Um noch feinere Winkel bzw. Skalenstriche erkennen zu können und damit die Empfindlichkeit der Messgeräte zu erhöhen, ging man auch dazu über optische Systeme aus mehreren Linsen und auch Kollimatoren zu verbauen, welche eine Vergrößerung von Zeiger und Skala bewirken. Durch solche fest montierten Fernrohre werden auch Parallaxenfehler vermieden bzw. verringert, welche bei frei aufgestellten Lupen auftreten können und das Messergebnis verfälschen. Die nächste Steigerung der Ablesbarkeit ermöglichte die Anwendung der Spiegelablesung, welche von den hochempfindlichen Galvanometern aus dem frühen 19. Jahrhundert

für die Präzisionswaagen übernommen wurde und eine optische Verdoppelung des Ausschlagswinkels lieferte. Daraus folgten schließlich Projektionsablesungen, die auf einem ähnlichen Prinzip beruhen. Eine auf der Zunge montierte Glasplatte mit Skalierung, die sogenannte Strichplatte, wird vom Licht einer Glühlampe durchschienen und über ein optisches System aus Spiegeln und Linsen auf eine Mattscheibe mit fester Strichmarke projiziert. Durch einen Vergleich zwischen dieser und den Teilstrichen kann das Ergebnis der Wägung bzw. eine bestimmte Dezimale davon abgelesen werden (Jenemann, 1982, S. 319 f.). Dieser Fortschritt wird unter anderem auch der ruhenden Ablesung durch die reibungsarmen Lager aus synthetischen Kristallen in Kombination mit einer geeigneten Dämpfungseinrichtung verdankt.

2.4.7. Wägevorgang

Zuletzt soll in diesem Kapitel beschrieben werden, wie der Wägevorgang an einer Balkenwaage abläuft, welche Vorbereitungen zu treffen sind und welche Aspekte es dabei zu beachten gilt. Vor der Aufstellung einer Waage sind zunächst alle Teile von Staub zu befreien, wobei beim Einsatz von Reinigungsmitteln aufgrund der verschiedenen Materialien und Beschichtungen Vorsicht geboten ist. Danach wird das Gerät an einer geeigneten Stelle, die erschütterungsfrei und in passender Arbeitshöhe sein soll, am besten einer steinernen Konsole an der Wand, platziert und mittels der Stellschrauben an den Füßen und einem Lot bzw. einer Libelle horizontal ausgerichtet. Nach dem langsamen Auslösen der Arretierung im unbelasteten Zustand kann die stabile Gleichgewichtslage des Balkens überprüft und gegebenenfalls mit dem Laufgewicht korrigiert werden (Kohlrausch & Krüger, 1932, S. 55). Für feine Wägungen – der Begriff ist nicht klar definiert – setzt man die zu vergleichenden Massen auf die Schalen und lässt dann das Waagengehäuse mindestens eine halbe Stunde offen stehen, damit sich das thermische Gleichgewicht einstellen kann. Vor dem Beginn der Wägung im geschlossenen Gehäuse, also vor dem Entarretieren, sollte die Masse schon grob vorbestimmt sein, etwa durch eine Schnellwaage, um große Ausschläge des Balkens zu vermeiden. So können die Wägedauer verkürzt und die Lager geschont werden (Felgentraeger, 1907, S. 271 f.). Des Weiteren sollen die Massestücke zum Aufwiegen einer unbekannten Masse bzw.

Pulver oder Flüssigkeiten zum Einwiegen immer auf jener Schale der Seite der bevorzugten Hand des Bedieners platziert werden (Kohlrausch & Krüger, 1932, S. 56).

Die sogenannte summarische Prüfung einer Waage dient dazu, die Funktionstüchtigkeit des Geräts festzustellen und Aussagen über deren Qualität tätigen zu können. Hierfür bestimmt man kurzerhand die Empfindlichkeit bei mindestens zwei verschiedenen Belastungen, wobei die zuvor beschriebene Vorbereitung zu treffen ist. Weiters wird eine mögliche Ungleicharmigkeit durch Auflegen der größtmöglichen Masse und wiederholtes Auslösen des Balkens sowie Verschieben der Körper auf den Schalen überprüft. Dabei werden die genauen Positionen der Ruhelage verglichen bzw. deren Streuung diskutiert (Felgentraeger, 1907, S. 268).

3. Präzisions- & Analysenwaagen

In diesem Kapitel werden insgesamt neun Waagen beschrieben, die den Präzisions- bzw. Analysenwaagen zugeordnet werden, welche allesamt als Balkenwaagen ausgeführt sind. Nach Kochsiek & Gläser (1997, S. 147) wurden rund um die Jahrhundertwende vom 19. zum 20. Jahrhundert die bis dahin besten Waagen, welche als Präzisionswaagen bezeichnet wurden, durch Modelle mit einer nunmehr gesteigerten Auflösung bzw. einer Ablesbarkeit von 0,1 mg für sehr genaue Wägungen in den chemisch-analytischen Laboratorien abgelöst und fortan mit dem Prädikat Analysenwaagen versehen. Somit entstand eine Unterscheidung nach der Genauigkeit der jeweiligen Messgeräte, welche auch für die folgenden Beschreibungen übernommen wird.

3.1. Alb. Rueprecht & Sohn – Analytische Gewichte No. 196

Zu Beginn des Kapitels über die verschiedenen Waagen der Sammlung soll ein Gewichtssatz aus dieser beschrieben werden, welcher für die durchgeführten Versuche herangezogen wurde. Dabei handelt es sich um die Analytischen Gewichte II. Qualität No. 196 des Herstellers Alb. Rueprecht & Sohn Wien, aus dem Jahr 1959 (siehe Abb. 3). Diese reichen von 1 mg bis 100 g und bestehen aus insgesamt 23 Teilen, wobei die ganzen Gramme aus hartgezogenem und vernickeltem Messing bestehen und in Samt eingelegt sind. Die Stücke mit einer Masse von 10 g und 0,1 g kommen je zwei Mal vor, jene mit 1 g drei Mal. Alle Bruchgramme liegen unter einem Deckel aus Glas, wobei jene von 10 mg bis 500 mg aus Platin gefertigt sind und alle darunter aus Aluminium (Alb. Rueprecht & Sohn Wien, 1911, S. 70 f.). Das Set wird durch einen 10 mg-Reiter aus Aluminium und einer Pinzette mit Elfenbeinspitzen vervollständigt und wird in einem Etui aus poliertem Mahagoniholz aufbewahrt, das mit einem Kassettenverschluss versehen ist.



Abb. 3: Rueprecht – Analytische Gewichte No. 196

Der gesamte Satz, mit Ausnahme der fragilen Teile unter 10 mg, wurde auf der digitalen Analysenwaage ED224S des Herstellers Sartorius gewogen, um exakte Referenzwerte für die verschiedenen Versuche zu erhalten bzw. den Zustand der Teile zu überprüfen. Das Gerät ist in den Räumen des Anfängerpraktikums der Fakultät für Physik vibrationsarm auf einem fest montierten Wägetisch aufgestellt. Laut den technischen Daten ist im Bereich bis 220 g eine Ablesbarkeit von 0,1 mg bei einer Reproduzierbarkeit bzw. Standardabweichung von $\leq \pm 0,1$ mg und einer Linearitätsabweichung von $\leq \pm 0,2$ mg möglich (Sartorius AG, 2005, S. 52). Alle in Tab. 1 folgenden Messergebnisse sind mit der genannten Ablesbarkeit als Unsicherheit zu verstehen.

Tab. 1: Analytische Gewichte: Messergebnisse

Nennwert in g	Messergebnis in g ($\pm 0,0002$ g)
100	100,0033
50	50,0013
20	20,0005
10	10,0005
10	10,0004
5	5,0004
2	2,0004
1	0,9999
1	1,0002
1	1,0000
0,5	0,5000
0,2	0,1999
0,1	0,1001
0,1	0,100
0,05	0,0500
0,02	0,0202
0,01	0,0101
10 mg-Reiter	0,0101

3.2. Sartorius – USA-Luft

3.2.1. Aufbau und Beschreibung

Die vom deutschen Hersteller Sartorius in Göttingen hergestellte Waage (siehe Abb. 4) wurde im Jahr 1988 vom Institut für Festkörperphysik der Universität Wien angeschafft. Laut der am Typenschild angegebenen Ablesbarkeit von 0,1 mg bei einer Höchstlast von 200 g ist sie, wie auch in den Produktunterlagen von Sartorius (1938, S. 17) angegeben wird, den Analysenwaagen zuzuordnen. Die Grundplatte aus schwarzem Spiegelglas steht auf drei spitz zulaufenden Füßen, wovon die beiden an der Vorderseite in der Höhe verstellbar sind, während der hinten in der Mitte

angebrachte Fuß starr ist. Zur Schonung der Unterlage sind drei Scheiben aus schwarzem Kunststoff beigelegt, die eine Vertiefung zum Einsetzen des Metalldorns aufweisen. Als Referenz zur horizontalen Ausrichtung der Waage dient eine vor der Waagsäule befindliche Dosenlibelle.



Abb. 4: Sartorius – USA-Luft (ohne Frontscheibe)

(a) Dosenlibelle, (b) Drehknopf für Arretierung, (c) Federzug, (d) Reiterverschiebung, (e) Laufgewichte, (f) Dämpfungszyylinder

Auf der Grundplatte ist das Gehäuse aus Glas und Rahmenteilen aus lackierter Rotbuche fest montiert. Die Frontscheibe ist als Vorderschieber ausgeführt, der in zwei seitlichen Nuten geführt und mittels eines Seilzuges ausbalanciert wird, sodass die Scheibe in jeder gewünschten Stellung arretiert werden kann. Hierfür sind im Gehäuse Federzüge angebracht, welche die Türe an zwei Nylonfäden festhalten. An den beiden Seiten der Waage befinden sich Schiebetüren, die sich nach hinten öffnen, jedoch entweder durch die Vorbenutzer beabsichtigt oder wegen des Verzugs des Holzes nicht mehr beweglich sind.

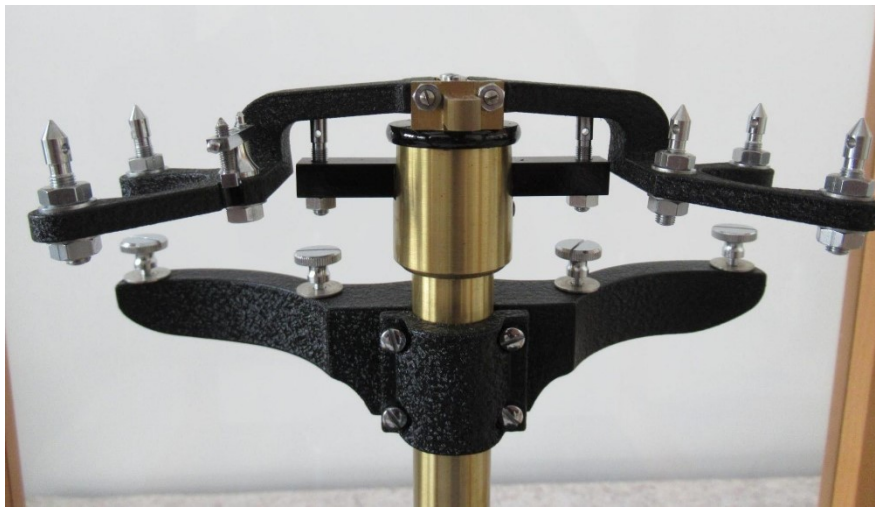


Abb. 5: Sartorius – USA-Luft: Kreisbogenarretierung

Vorne in der Mitte der Grundplatte ist ein Drehknopf zum Betätigen der Arretierung angebracht, welcher in zwei verschiedene Stellungen (arretiert, entarretiert) gebracht werden kann. Durch Drehen werden die bei dieser Waage verbaute Kreisbogenarretierung (siehe Abb. 5), die den Balken und die Gehänge anheben, und die Schalenarretierung gleichzeitig bewegt, was sehr leichtgängig vonstattengeht.

Weiters gibt es oben an der rechten Seite einen Hebel zur Bedienung der Reiterverschiebung, die auf zwei parallellaufenden Metallstangen geführt wird. Durch Drehen des Knopfs am Hebel wird ein Zahnstangenantrieb bewegt, der einen Haken im Inneren des Gehäuses hebt und senkt. Ein spezielles Merkmal bei dieser Konstruktion ist die Anbringung eines Hohlkörpers mit den Innenmaßen des Reiters, in welchen dieser beim Anheben hineingezogen wird, wodurch Schwingungen desselben gedämpft bzw. verhindert werden. So soll einerseits das Herabfallen des Reiters verhindert und andererseits das Aufsetzen auf das Reiterlineal mit höchster Genauigkeit ermöglicht werden (Sartorius, 1938, S. 6).

Der dreieckige Balken aus Aluminium ist mit dem bereits beschriebenen Reiterlineal versehen, das mit zwei Schrauben links und rechts der Mittelachse montiert ist. Je 100 Teilstriche auf beiden Seiten erlauben zusammen mit einem 10 mg-Reiter eine Gewichtsauflage in Schritten von 0,1 mg, was der höchstmöglichen Auflösung dieser Waage entspricht. An der Spitze des Dreiecks befinden sich nach beiden Seiten ausgerichtete Laufgewichte, welche auf Gewindespindeln geführt sind, und zur Einstellung der Gleichgewichtslage dienen. Die spitzwinkeligen Schneiden und flachen Pfannen der Mittel- und Endachsen sind aus Achat gefertigt (Sartorius, 1960a, S. 4) und mit verschiedenen Stellschrauben zur Justierung der Lage der Achsen und der Hebellänge versehen.

Eine weitere Besonderheit dieser Waage ist die Umsetzung einer „Luftdämpfungs-Einrichtung nach Sartorius-Original-Konstruktion durch je zwei mit großem Abstand ineinandergehende [sic] flache Aluminium-Zylinder, die symmetrisch unterhalb des Balkens angeordnet sind“ (Sartorius, 1938, S. 17). Die äußeren Zylinder mit einem Innendurchmesser von $(80,0 \pm 0,1)$ mm und einem kreisrunden Loch im Mittelpunkt des Bodens mit einem Durchmesser von $(6,2 \pm 0,1)$ mm werden mit je zwei Rändelschrauben an einem Querbalken, der an der Waagsäule montiert ist, befestigt, wobei die dafür vorgesehenen Langlöcher zur Zentrierung einen größeren Durchmesser als die Schrauben aufweisen. Die inneren Zylinder mit einem Außendurchmesser von $(77,4 \pm 0,1)$ mm werden mit einer Öse an einem Haken am Gehänge befestigt. Beim Aufbau der Waage hat sich gezeigt, dass die konzentrische Ausrichtung der Dämpfungszyylinder nur mithilfe eines sehr kurzen Schraubendrehers möglich ist, da die Rändelschrauben aufgrund ihrer Lage hinter dem Balken mit bloßer Hand schwer erreichbar sind.

Der Waage beigelegt sind zwei massive Metallscheiben mit einem etwas geringeren Durchmesser als jenem der Schalen. Diese dienen der Schonung der Waagschalen bzw. dem Durchführen von Wägungen bei höherer Belastung und einer dementsprechend veränderten Empfindlichkeit. Weiters wurde eine rechteckige Ableselupe mit schwarz beschichtetem Metallfuß vorgefunden, deren Neigungswinkel stufenlos verstellt werden kann.

3.2.2. Versuch und Diskussion

Bei der Nullpunkteinstellung der Waage ist aufgefallen, dass eine Waagschale schwerer ist als die zweite. Bei näherer Betrachtung wurde bemerkt, dass an der Unterseite offensichtlich von den Vorbenutzerinnen und Vorbenutzern ein kleines Massestück aufgeschraubt wurde, wobei der Zweck dessen nicht nachvollzogen werden konnte. Da dieses Ungleichgewicht durch die Laufgewichte und den Reiter allein nicht kompensiert werden konnte, wurde die leichtere Waagschale mit entsprechenden Massestücken von $(1,605 \pm 0,0001)$ g belegt und der Reiter auf die elfte Position, d.h. 0,1 mg gebracht, um die Gleichgewichtslage herzustellen. Des Weiteren rutschen die Gehänge im entarretierten Zustand leicht aus ihrer vorgesehenen Position bzw. verdrehen sich, was darauf hindeutet, dass die Schneiden der Endachsen bereits abgenutzt sind oder einer genauen Justierung durch Fachpersonal bedürften. Durch Arretieren der Waage lassen sich die Gehänge und der Balken wieder relativ zueinander ausrichten, da die Konstruktion mit Spitzen an den Trägerpunkten und konischen Vertiefungen an den Gegenstücken leichte Abweichungen der Position korrigieren kann.

Bei Wägungen im Bereich von rund 10 g konnte durch Auflegen von kleinen Massestücken und unabhängig von der Dämpfung eine Empfindlichkeit von 1 mg beobachtet werden, was vom angegebenen Wert abweicht und vermutlich Alterserscheinungen wie der Abnutzung der Schneiden und Pfannen geschuldet ist. Mit der aktiven Luftdämpfungs-Einrichtung wurde eine nahezu aperiodische Schwingung beobachtet, während nach der Demontage der Dämpfungszylinder eine Schwingungsdauer von $(18,0 \pm 0,5)$ s gemessen wurde.

Zur Schonung des Exponats wurden keine weiteren Messungen durchgeführt, jedoch kann zusammengefasst werden, dass das Modell gut erhalten ist, da es keine sichtbaren Abnutzungserscheinungen aufweist. Die Funktion der Waage ist mit einer gemessenen Empfindlichkeit von 1 mg zwar eingeschränkt, könnte aber vermutlich nach einer Überholung durch eine geschulte Fachkraft wieder vollumfänglich eingesetzt werden. Alleinstellungsmerkmal ist die Luftdämpfung, welche einfach konstruiert ist, und dennoch das Wiegen deutlich bequemer macht und gleichzeitig die Qualität der Wägungen durch die Zeitersparnis und einfachere Ablesbarkeit verbessert. Dazu kommt auch die Besonderheit der Kreisbogenarretierung, welche die

Bedienung erleichtert bzw. gewisse Fehler bei der Handhabung ausschließt, und die Waage damit auch für ihren ursprünglichen Einsatz im Anfängerpraktikum des Instituts für Festkörperphysik der Universität Wien (heutige Fakultät für Physik), der mit dementsprechend geringen messtechnischen Kenntnissen der Benutzerinnen und Benutzer einhergeht, rechtfertigt.

3.3. Starke & Kammerer – Analysenwaage Nr. 104

3.3.1. Aufbau und Beschreibung

Die von der Wiener Firma Starke & Kammerer hergestellte Waage (siehe Abb. 6) wurde um das Jahr 1935 vom II. Physikalischen Institut der Universität Wien (ab 1977 Institut für Festkörperphysik) angeschafft. Da am Exponat keinerlei Typenschild oder Hersteller- bzw. Modellbezeichnung angebracht ist – abgesehen vom Monogramm „WP“ am Balken, das auf die Namen Welharticky und Pachner hindeutet – wurde das Modell durch einen Vergleich mit den Abbildungen und technischen Daten im Katalog des Herstellers zugeordnet. Demnach handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um die Analysenwaage Nr. 104, die bei einer Höchstlast von 200 g bis 0,1 mg auflöst (Starke & Kammerer A.-G., 1924, S. 5). Da die Gesellschafter Rudolf Welharticky und Franz Pachner im Jahr 1921 in das Unternehmen der Starke & Kammerer GmbH eingetreten sind, dort ihre eigene Abteilung für Präzisionswaagen einrichteten und dieselbe Firma 1937 in Liquidation ging sowie 1940 aus dem Firmenregister gelöscht wurde (Jenemann, 1987, S. 69 ff.), kann die Herstellung der Waage mit Sicherheit auf diesen Bereich eingegrenzt werden. Zwei optisch entsprechende Waagen aus der Sammlung des Technischen Museums in Wien werden mit ca. 1935 (Jenemann, 1987, S. 71) und ca. 1940 ([TMW] 2023) datiert, was auf die letzten Jahre des Firmenbestehens als Produktionszeitraum hindeutet.

Die Grundplatte aus schwarzem Spiegelglas steht auf zwei vorne angebrachten Stellfüßen und einem hinten mittig platzierten starren Fuß. Zur horizontalen Ausrichtung der Waage mit den Stellfüßen sind weder Lot noch Libelle angebracht.



Abb. 6: Starke & Kammerer – Analysenwaage Nr. 104

(a) Drehknöpfe für Arretierung und Justierung der Empfindlichkeit, (b) Drehknöpfe für Bruchgrammauflage, (c) Bruchgrammanzeige, (d) Reiterverschiebung, (e) Säulen mit Gegengewichten des Vorderschiebers, (f) Gewichtsplatten, (g) Bruchgrammauflage.

Auf der Grundplatte ist das Gehäuse aus Mahagoniholz montiert, das einen Zugriff auf das Innere von vier Seiten zulässt. Dabei ist der Vorderschieber durch Gegengewichte ausbalanciert, die sich unsichtbar in zwei schwarzen Säulen in den hinteren beiden Ecken der Waage bewegen. Der Rückwandschieber ist dagegen mit einem seitlichen Schnapper versehen, der die Scheibe in verschiedenen Positionen arretiert. Beide können mit einem Schlüssel von oben versperrt werden. An beiden Seiten der Waage sind die Scheiben geteilt, wobei die unteren zwei Drittel als Türen

ausgeführt sind, welche mit je einem drehbaren Knauf, der einen Vorreiber (schwenkbarer Verschlusshebel) bewegt, geöffnet werden können.

Am unteren Rand des hölzernen Gehäuses, hinter dem sich die Mechanik befindet, sind seitlich verschiedene Bedienelemente angebracht. Der äußere linke Drehknopf bedient die Arretierung, welche über die beiden Stellungen arretiert und entarretiert verfügt. Dabei werden die Parallelträgerarretierung des Balkens und die Konusarretierung der Schalen gleichzeitig bewegt. Daneben liegt konzentrisch ausgerichtet ein Drehknopf, mit dem die Empfindlichkeit der Waage reguliert werden kann. Hierfür befindet sich an der Zunge ein Konus, auf welchen je ein silberfarbenes und ein goldenes Plattengewicht aufgesetzt werden können, welche den Schwerpunkt des Hebels nach unten verschieben und damit die Empfindlichkeit der Waage reduzieren (siehe Abb. 7). Das Drehen des Knopfes wird dabei in eine vertikale Bewegung eines doppelarmigen Bügels übersetzt, der die Platten einzeln aufhebt bzw. absenkt, wodurch die normale Empfindlichkeit der Waage um zwei Stufen verringert werden kann.

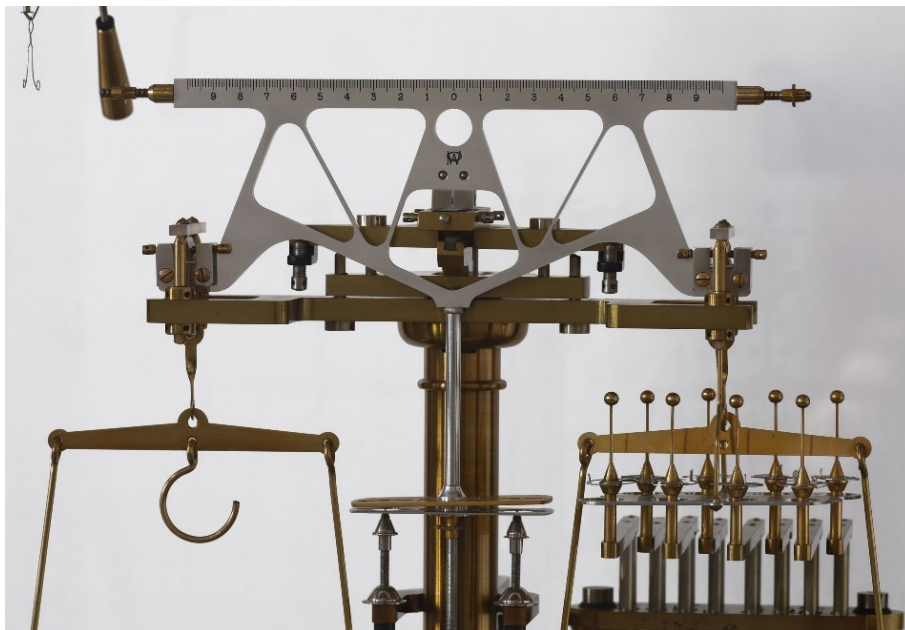


Abb. 7: Starke & Kammerer – Analysenwaage Nr. 104: Balken und Gewichtsplatten

Auf der rechten Seite befinden sich die Drehknöpfe zur Auflegung der Bruchgramme, wobei der äußere für den Bereich der ersten Nachkommastelle (0,1 g) und der innere für die zweite Nachkommastelle (0,01 g) dient. Laut dem Produktkatalog des Herstellers ist die Waage mit einem Zenti- und Milligrammanzeiger ausgestattet (Starke & Kammerer A.-G., 1924, S. 5), von welchem man die aufgelegten

Bruchgramme direkt ablesen kann, jedoch handelt es sich hierbei wohl um einen Druckfehler, da analog zu den Drehknöpfen und gemäß der Zählrollen der Anzeige Dezi- und Zentigramm dargestellt werden, während Milligramm mittels des Reiters an der Skala am Balken abgelesen werden. Die mechanische Auflegung (siehe Abb. 8) entspricht zum Teil der von Rueprecht entwickelten Aufsetzvorrückung, bei der senkrechte Stangen Ringgewichte aus Draht abheben oder auf einen Teller legen, welcher mit dem Gehänge der rechten Schale verbunden ist (Felgentraeger, 1907, S. 180). Für eine vollständige Dekade sind je vier Gewichte (0,1 g, 0,2 g, 0,2 g, 0,4 g bzw. 0,01 g, 0,02 g, 0,02 g, 0,04 g) nötig, die addiert werden. Durch die verbaute Mechanik, welche über die Rueprecht'sche Konstruktion hinausgeht, müssen die Ringgewichte nicht einzeln mittels einer Tastatur aufgelegt werden, da die eingebaute Mechanik diese Aufgabe übernimmt. Dabei werden die Stangen über Exzenterwellen bewegt, die mit den Drehknöpfen verbunden sind, und damit automatisch die zum Stand der Zählrolle passende Kombination an Gewichten auflegen.



Abb. 8: Starke & Kammerer: Bruchgrammauflegung,

(0,09 g aufgelegt)

Hinter den Rädern zur Bruchgrammauflegung befindet sich ebenfalls an der rechten Seite ein Druckknopf, mit dem ein Metallgebläse im Inneren des Gehäuses betätigt wird. Unter der rechten Schale ist hierfür eine Düse angebracht, welche die Luftstöße freigibt, die – im jeweils richtigen Moment eingesetzt – dazu dienen, die Schwingung zu dämpfen bzw. das System zum Stillstand zu bringen.

Laut Herstellerangaben beträgt die Länge des Balkens 140 mm, welcher aus Magnalium (Starke & Kammerer A.-G., 1924, S. 5), einer Legierung aus Aluminium und Magnesium, gefertigt ist. An beiden Enden sind Laufgewichte auf kurzen Gewindespindeln angebracht. Dazwischen ist an der waagrechten Oberkante des Balkens eine Teilung zu je 100 Schritten links und rechts der Mittelachse eingraviert, welche gleichsam das Reiterlineal darstellt. Somit ist zusammen mit einem 10 mg-Reiter eine Wägung mit einer Auflösung bis 0,1 mg möglich. Der Reiter aus dünnem Draht kann wiederum über eine von außen bedienbare Reiterverschiebung aufgesetzt werden, deren Haken durch Drehen des Hebels gehoben und gesenkt wird. Sowohl an der Mittelachse als auch an den Endachsen sind die Schneiden und Pfannen aus steinernem Material ausgeführt, über welches keine näheren Informationen bekannt sind.

Der Waage beigelegt sind eine messingfarbene Pinzette mit gebogenen Spitzen zum Auflegen von Gewichten bzw. Justieren des Reiters. Auch eine rechteckige Ableselupe mit stufenloser Neigungseinstellung war im Waagenkasten vorhanden. Weiters gehören vier Glasscheiben zum Modell, welche auf die Schalen aufgelegt werden können. Diese sind in zwei unterschiedlichen Stärken ausgeführt und jeweils paarweise austariert, sodass keine Korrekturen bei der Wägung nötig sind.

3.3.2. Versuch und Diskussion

Beim Durchführen verschiedener Wägungen mit diesem Modell wurde festgestellt, dass die Arretierung der linken Schale klemmt und deswegen nicht gemeinsam mit der rechten freigegeben wird. Erst im Laufe des Experimentierens und dementsprechend wiederholten Betätigungen der Arretierung löste die Schale wieder langsam aus, wobei sich die linke im Vergleich zur rechten Schale sichtbar gedämpft hinab bewegt hat. Ebenso bewegen sich die Ringgewichte von 0,02 g und 0,04 g

schwergängig, was darauf hindeutet, dass die Mechanik professionell gereinigt und geschmiert werden müsste. Alle übrigen Bedienelemente funktionieren wie vorgesehen und lassen sich ohne übermäßigen Widerstand bewegen.

Zur Justierung der Empfindlichkeit liegen keine Daten des Herstellers vor, weswegen sich an der Beschreibung einer sehr ähnlichen Einrichtung von Rueprecht orientiert wird. Dabei sind die beiden Plattengewichte so dimensioniert, dass durch Auflage des ersten auf die Zunge die Empfindlichkeit auf ein Zehntel und durch Zugabe der zweiten Platte wiederum um den Faktor Zehn reduziert wird (Alb. Rueprecht & Sohn Wien, 1928, S. 11). Diese Apparatur erlaubt es innerhalb eines begrenzten Bereiches bzw. unter Ausschluss der Bruchgramme approximative Vorwägungen auszuführen, bei denen der Wägevorgang beschleunigt werden kann. Durch Abheben der beiden Platten kann danach mit einem Handgriff zur Feinwägung übergegangen werden (Jenemann, 1987, S. 49).

Im Versuch hat sich gezeigt, dass die Plattengewichte bzw. die gesamte Vorrichtung bei dieser Waage anders dimensioniert sind, als bei Rueprecht beschrieben. Die dünne silberne Platte mit einer Masse von $(0,735 \pm 0,002)$ g verringert beim Auflegen auf die Zunge die Empfindlichkeit grob um den Faktor 3, während die dickere messingfarbene Platte mit einer Masse von $(7,893 \pm 0,002)$ g zusammen mit der zweiten die Empfindlichkeit genau um den Faktor 10 herabsetzt. Weiters wurde festgestellt, dass der Drehknopf zum Heben und Senken der Plattengewichte zwar drei spürbare Rasten für die möglichen Einstellungen aufweist, jedoch kollidiert bei der Mittelstellung die Zunge mit der oberen Platte. Da so der Bewegungswinkel des Systems eingeschränkt würde und die letzten Skalenteile nicht mehr angezeigt werden könnten, muss der Knopf etwas weiter als vorgesehen gedreht werden.

Bei den durchgeführten Wägungen konnte bei einer Belastung von 50 g auf beiden Schalen ohne die beiden Plattengewichte auf der Zunge eine Empfindlichkeit von 0,002 g festgestellt werden. Dabei beträgt die Periodendauer ohne aufgelegte Plattengewichte rund 8 s, während sie bei verminderter Empfindlichkeit (beide Platten) nur rund 2 s beträgt. Die im Vergleich zur Herstellerangabe um den Faktor 20 verminderte Empfindlichkeit lässt sich durch Abnutzungen der Schneiden erklären, die sichtbare Scharten und Abflachungen aufweisen.

Die Luftbremse dieses Modells hat sich als sehr nützlich erwiesen, da sie bei richtigem Einsatz die Dauer des Wägevorgangs deutlich reduziert. Dabei muss der Knopf jeweils bei der Abwärtsbewegung der rechten Schale mit angepasster Stärke gedrückt werden, um der Schwingung entgegenzuwirken. Gleichzeitig kann der Luftstoß aber auch dazu eingesetzt werden, im Falle des Stillstands nach dem Entarretieren, eine Schwingung zu provozieren, welche für eine gültige Wägung erforderlich ist. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die Waage in einem dem Alter entsprechend guten Zustand befindet und abgesehen von den schwergängigen mechanischen Teilen der Schalenarretierung und der Bruchgrammauflegung, welche geschmiert werden müssen, voll funktionsfähig erhalten ist. Bei der Recherche hat sich herausgestellt, dass die spezielle Ausführung der Bruchgrammauflegung mit integrierter Anzeige eine Seltenheit darstellt, die zur damaligen Zeit einen großen Fortschritt in Richtung der halbautomatischen Waagen angedeutet hat, bei denen die Bedienerin oder der Bediener nur noch wenige manuelle Eingriffe vornehmen muss, um zum Ergebnis der Wägung zu gelangen.

3.4. Jos. Nemetz – Universal-Präcisionswaage Nr. 707

3.4.1. Aufbau und Beschreibung

Die Analysenwaage des Wiener Herstellers Josef Nemetz (siehe Abb. 9) wurde im Jahr 1894 vom Physikalischen Institut der Universität Wien unter Ludwig Boltzmann angeschafft. Laut einer Einschätzung von Mitgliedern der International Society of Antique Scale Collectors handelt es sich bei diesem Modell um die Patent-Universal-Präcisionswaage Nr. 707 aus dem Katalog von 1893 (Allgeier, 2016, S. 4224). Diesem zufolge gibt die Waage bei einer Höchstlast von 250 g bis 0,1 mg genau an (Nemetz, 1893, S. 219) und ist somit den Analysenwaagen zuzuordnen.

Die Grundplatte, welche aus einem Unterbau für die Mechanik und einer Grundplatte aus Marmor besteht, steht auf drei Füßen, wovon die vorderen beiden als Stellfüße ausgeführt sind. Zur horizontalen Ausrichtung ist rechts neben der Waagsäule ein Senklot angebracht, dessen Spitze mit einem auf der Grundplatte montiertem Dorn übereingestimmt werden soll. Das Gehäuse der Waage ist aus Glas

gefertigt, das in poliertem Mahagoniholz eingefasst wurde. Oben an der Frontscheibe befindet sich eine Plakette des Herstellers, der als k. u. k. Hof-Mechaniker angeführt wird. Zum Zugriff auf das Innere ist ein versperrender Vorderschieber, der über, verdeckt hinter Messingsäulen laufende, Gegengewichte ausbalanciert wird, verbaut. Zudem gibt es zwei seitliche Türen mit Vorreibern, die sich in der Höhe über etwas mehr als die Hälfte der Seitenwände erstrecken.



Abb. 9: Jos. Nemetz – Universal-Präcisionswaage Nr. 707

(a) Drehknopf für Arretierung, (b) Druckknopf für Luftbremse, (c) Drehknöpfe für Grammauflegung, (d) Drehknöpfe für Bruchgrammauflegung, (e) Drehknopf für Reiterverschiebung, (f) Reiterverschiebung, (g) Bruchgrammauflegung „Karussell“, (h) Grammauflegung.

Sämtliche Bedienelemente der Waage sind vorne unten angebracht und in Messing ausgeführt, das sich gut sichtbar vom schwarz beschichteten Metall dahinter

abhebt. Ein schräg gestellter Drehknopf links betätigt die Parallelträger- und Konusarretierung gleichzeitig, wobei nur die linke Schale arretiert werden kann. Rechts daneben liegt ein schwarzer Druckknopf in einer Messingrosette, welcher mit dem Metallgebläse für die Luftbremse nach Prof. Josef Stefan verbunden ist (Nemetz, 1893, S. 222). Unter der linken Waagschale befindet sich hierfür eine feine Düse sowie ein Loch in der Trägerplatte der Konusarretierung, um den Luftstrom zu lenken.



Abb. 10: Nemetz: Bruchgrammauflegung

Am rechten Rand befinden sich vier Drehknöpfe zur Gramm- und Bruchgrammauflegung, welche mit Beschriftungen der Dekaden am Gehäuse und je einer zehnteiligen Skala am Griff versehen sind. Von links nach rechts sind die Bereiche 10 g, 1 g, 100 mg und 10 mg angeführt. Die mechanische Auflage im 10 g-Bereich arbeitet mit vier Ringgewichten (siehe Abb. 11) mit unterschiedlichem Durchmesser zu je 10 g und einem zu 50 g, welche konzentrisch in Form eines Kegelstumpfes angeordnet sind. Sie liegen auf einer Halterung, die fest mit dem linken Gehänge verbunden ist. Über dünne Bügel können die Ringe einzeln angehoben und aufgelegt werden, was durch eine Mechanik mit Exzentern geschieht. Auf diese Weise werden je nach Einstellung des Drehknopfes die passenden Stücke aufgelegt und deren Gewicht addiert. In der Mitte des obersten Ringes liegen vier Scheibengewichte zu je 1 g und eines zu 5 g, die der zweiten Gewichtsdekade zugeordnet sind. Diese sind mit einem zentralen Loch versehen, in das je ein Elfenbeinstift von unten eintauchen und die Scheibe von der Schale abheben kann. Analog zur vorherigen

Beschreibung wird die Auflegung im 1 g-Bereich durch die Exzenter-Mechanik vorgenommen. Zur Wägung von Objekten über 100 g sind Zusatzgewichte aufzusetzen, welche auf die dafür vorgesehene Platte oberhalb der Ringgewichte auf der rechten Waagschale gelegt werden können.



Abb. 11: Nemetz: Ringgewichte

Die Auflage der Bruchgramme erfolgt bei dieser Waage über eine, von den Waagenbenutzern als Karussell bezeichnete (Jenemann, 1987, S. 58), Mechanik, die Reiter aus Draht benutzt (siehe Abb. 10). Neun Reiter zu je 100 mg hängen auf Stiften wachsender Länge, welche kreisförmig auf einem drehbaren Stern befestigt sind, dessen Achse parallel zu jener des Waagbalkens liegt (siehe Abb. 10). Auf einem zweiten gegenüberliegenden Stern hängen neun Reiter zu je 10 mg. Die Drehbewegung der Knöpfe an der Vorderseite wird mit Kegelradgetrieben auf die

Sterne übertragen, welche sodann nacheinander die einzelnen Reiter auf ein Doppellineal mit sägezahnförmigen Einkerbungen ablegen bzw. bei Drehung in die andere Richtung diese wieder abheben. So können die Bruchgramme wiederum in Abstufungen von 100 mg bzw. 10 mg von außen aufgelegt werden.

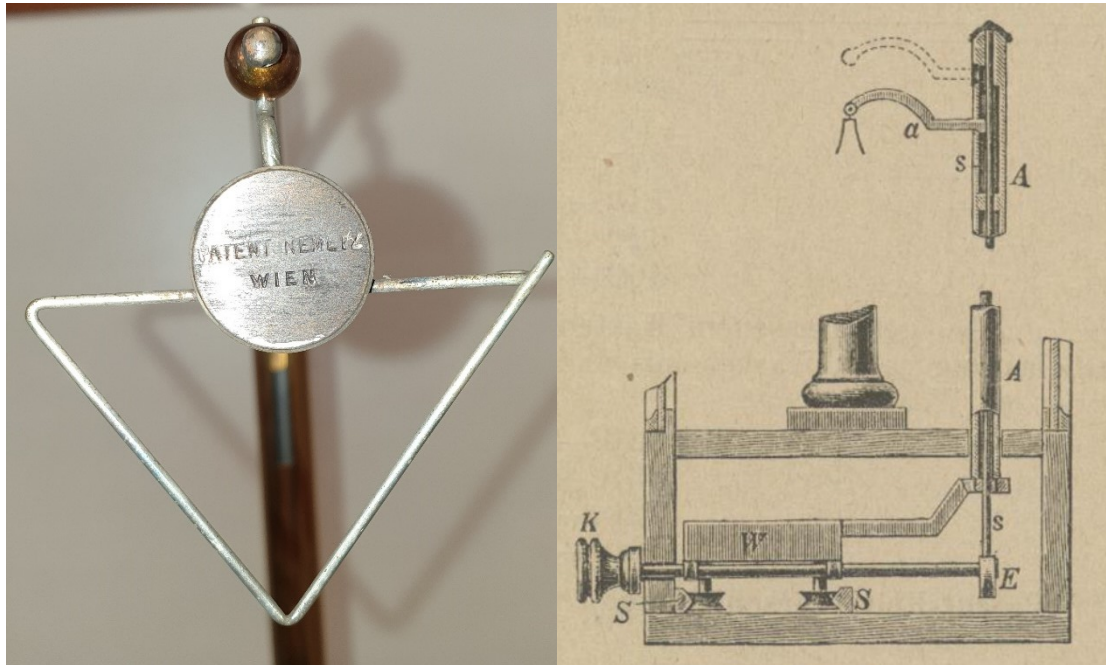


Abb. 12: Nemetz: Reiterverschiebung

links: dreieckiger Drahtbügel; rechts: schematische Skizze (Nemetz, 1893, S. 220)

Ein weiteres Bedienelement an der Vorderseite der Waage ist der Drehknopf für die Reiterverschiebung, für welche die Firma Nemetz ein eigenes Patentsystem entwickelt hat. An einer zum Balken parallelen, von zwei Metallschienen unter der Grundplatte gebildeten, Führung kann sich eine Säule in horizontaler Richtung bewegen. Diese ragt durch einen Schlitz in der Marmorplatte, welcher durch verschiebbare Metallplatten in jeder Position links und rechts der Säule verschlossen wird, wodurch Luftströmungen und der Eintritt von Staub verhindert werden sollen. Der Knopf, welcher sich am unteren Rand des Gehäuses verschieben lässt, bewegt bei der Drehung ein aus dickem Draht gebogenes und an einem Eckpunkt offenes Dreieck am oberen Ende der Säule auf und ab (siehe Abb. 12). Ein passender Reiter kann an seiner Öse in dieses Dreieck eingehängt werden und lässt sich so über das Reiterlineal, welches an der Oberkante des Balkens eingraviert ist, bewegen und in der gewünschten Position aufsetzen. Dabei muss der Reiter nicht wie bei den meisten anderen Konstruktionen zum Verschieben wieder mit einem kleinen Haken

aufgenommen werden, da er während des gesamten Wägevorgangs am Metallbogen verbleibt und dadurch auch beim Transport der Waage nicht herabfallen kann. Die Differenz zwischen dem Durchmesser der Öse und jenem des Drahts der Aufhängung gibt den nötigen Abstand vor, der beim Absenken des Dreiecks den Reiter frei auf dem Lineal aufsitzen lässt.

Zum Material des Balkens, welcher in Form eines Brückenfachwerks ausgeführt ist, liegen keine Informationen vor, aufgrund der äußeren Erscheinung wird aber Messing bzw. eine ähnliche Legierung vermutet. Die Schneiden und vermutlich auch Pfannen der Firma Nemetz werden laut einem Prospekt (1886, S. 4) ausschließlich aus Bergkristall oder Feuerstein hergestellt, was zu dieser Zeit ein Alleinstellungsmerkmal im Vergleich zu den sonst üblichen Stahlschneiden darstellte. An den Enden des Balkens sind keine Verstellmöglichkeiten angebracht, jedoch ist oberhalb der Mittelschneide eine kurze Gewindestange mit einem Laufgewicht montiert, das vertikal bewegt werden kann, um die Empfindlichkeit des Systems zu variieren. Das an der Oberkante eingravierte Reiterlineal weist wiederum 100 Teile zu beiden Seiten auf.

3.4.2. Versuch und Diskussion

Bevor Messungen mit der Waage durchgeführt werden konnten, musste festgestellt werden, dass die zweite Dekade der Grammauflage nicht bewegt werden konnte. Da die Mechanik von unten zugänglich ist, konnte dieses Problem durch händisches Bewegen der verschiedenen Hebel und Exzenter behoben werden, was aufgrund des anhaftenden Schmiermittels nur mit Gummihandschuhen möglich war. Hierbei ist interessant anzumerken, dass der Hersteller in seinem Katalog in fetten Lettern ausführt, dass aufgrund der speziellen Konstruktion „ein Nichtfunctionieren [*sic*] beziehungsweise Steckenbleiben der Gewichtsauflegungs-Vorrichtung [...] absolut ausgeschlossen“ (Nemetz, 1893, S. 218) wird. Offensichtlich wurde nicht bedacht, dass eine Fehlfunktion über 100 Jahre nach der Herstellung nicht unwahrscheinlich ist. Gleichzeitig wurde jedoch auch vermerkt, dass die Exzenter je nach Material mit Uhrmacheröl bzw. Schmierwachs einzufetten sind, um die Störungen zu verhindern (Nemetz, 1893, S. 223). Der Optik und Haptik nach zu urteilen wurde also entweder

in der Vergangenheit ein falsches Schmiermittel eingesetzt oder aber die beschriebenen Substanzen haben im Laufe der Zeit ihre Eigenschaften verändert.

Die Reiter für die Bruchgrammauflegung wurden als Zubehör in einer Kunststoffdose vorgefunden. Von den 10 mg-Gewichten waren nur 7 von 9 Stück vorhanden, von den 100 mg-Gewichten nur 8 von 9, wodurch eine Wägung nicht im gesamten Lastbereich möglich ist bzw. gegebenenfalls approximiert werden muss. Auch der Reiter, welcher am Waagbalken aufgesetzt wird, fehlt. Weiters konnte die Schale nicht mittels des Drehknopfes entarretiert werden, sondern der Konus links musste von außen hinuntergedrückt werden.

Bei verschiedenen Wägungen mit diesem Modell konnte eine maximale Auflösung von 100 mg erreicht werden. Dieser um drei Größenordnungen von den Herstellerangaben abweichende Wert ist dem Umstand geschuldet, dass die Schneiden ebenso wie die übrige Mechanik starke Abnutzungserscheinungen aufweisen. Der Balken reagierte beim Entarretieren generell schwergängig und konnte bei geringen Gewichtsunterschieden zwischen der rechten und linken Schale nicht in Schwingung versetzt werden. Darüber hinaus zeichnet sich an vielen Stellen der metallischen Teile Korrosion ab, welche teilweise nicht nur optische, sondern auch funktionale Makel hervorruft.

Zusammenfassend entspricht der Zustand der Waage nicht mehr den höchsten Anforderungen, jedoch ist dies für eines der ältesten Exponate der physikhistorischen Sammlung nicht überraschend. Das Modell sticht durch die komplizierten Auflagemechanismen hervor, welche dem Hersteller zu weltweiter Bekanntheit verholfen haben. Durch diese Neuerungen für die damalige Zeit war es nun möglich, feine Wägungen nur durch das Bewegen von außen angebrachten Knöpfen und Hebeln durchzuführen, was den Komfort und auch die Genauigkeit erhöhten. Diese Sonderstellung unter den ansonsten einfacher gehaltenen Modellen führt auch dazu, dass die Firma Nemetz die Modelle aus dieser Reihe als „Professorenwaage“ (Allgeier, 2016, S. 4220) bewarb und ihnen damit eine Eignung für die höchsten Ansprüche an akademischen Einrichtungen zusprach. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal dieser Waage ist die von vorne bedienbare Reiterverschiebung. Der rollengelagerte Mechanismus ermöglicht die Bedienung von ausschließlich einer Seite und schafft damit links und rechts des Geräts Platz, welcher in den damaligen Laboratorien für weitere Wiegeplätze genutzt werden konnte.

3.5. Alb. Rueprecht & Sohn – Analytische Waage Nr. 8

3.5.1. Aufbau und Beschreibung

Die Analysenwaage der Firma Alb. Rueprecht & Sohn aus Wien (siehe Abb. 13) wurde um das Jahr 1910 vom II. Physikalischen Institut der Universität Wien angekauft. In einem Katalog des Herstellers (1928, S. 14) wird ein den Abbildungen nach übereinstimmendes und zu den Angaben am Schild der Sammlung passendes Modell als feinste analytische Waage Nr. 8 bezeichnet, worauf sich folgende Vergleiche beziehen werden. Bei einer Tragkraft in jeder Schale von 600 g wird eine Empfindlichkeit von 0,1 mg angegeben.

Die Glasscheiben des Gehäuses sind in lackiertem Mahagoniholz eingefasst, wobei die Grundplatte dieser Waage ebenfalls aus Holz gefertigt ist. Diese steht auf zwei Stellfüßen an der Vorderseite und einem, welcher hinten mittig platziert ist, die in Verbindung mit dem hinter der Waagsäule angebrachten Senklot zur ebenen Ausrichtung des Geräts dienen. Von unten einsehbar kann die Mechanik der Arretierung bei Bedarf manipuliert werden. Um an das Innere der Waage zu gelangen, sind zwei jeweils mit Gegengewichten ausbalancierte Vorderschieber angebracht, wobei etwa ein Fünftel der Frontscheibe in der Mitte unbeweglich montiert ist. Beide können gleichzeitig mit einem Schloss an der Oberseite versperrt werden. Gegenüber liegen zwei Rückwandschieber, welche über einen hölzernen fixen Mittelsteg getrennt sind und jeweils mit einem Schnapper in verschiedenen Positionen arretiert bzw. gelöst werden können. Die unteren Dreiviertel der Seitenwände sind als Klapptüren ausgeführt und können mit Vorreibern verschlossen werden.



Abb. 13: Rueprecht – Analytische Waage Nr. 8

(a) Drehknopf für Arretierung, (b) Reiterverschiebung, (c) Laufgewichte am Balken, (d) Laufgewicht an der Zunge

An der rechten Seite der Waage befindet sich der Hebel bzw. Drehknopf für die Reiterverschiebung, welche durch die obere Glasscheibe geführt wird. Der Haken für den Drahtreiter wird dabei auf nur einer Metallstange geführt, die durch ein Lager – vermutlich aus Elfenbein – gleitet und durch Drehen gehoben und gesenkt werden kann. Eine Metallstange, die als Anschlag für den drehbaren Haken dient, ist an zwei messingfarbenen Säulen befestigt, die von innen an die Decke des Gehäuses geschraubt sind. An der Vorderseite der Waage ist ein Drehknopf für die Arretierung angebracht, welcher die Parallelbalken- bzw. Gehänge- und Schalenarretierung

gleichzeitig betätigt. Die hierfür ausgeführte Konstruktion an der Unterseite der Waage zeigt Abb. 14 rechts. Unter den Waagschalen sind auf runden Messingplatten je drei Schrauben eingedreht, die beim Arretieren an den Schalen angreifen und bei Bedarf in der Höhe justiert werden können. Zusätzlich ist ein Pinsel montiert (siehe Abb. 14 links), dessen Borsten etwas länger als die Schrauben sind, und dazu dient, etwaige Schwingungen vor dem Kontakt der blanken Metallteile zu dämpfen. Laut dem Katalog des Herstellers sind die Modelle dieses Typs auch mit einer doppelten Luftbremse und zwei Gummigebläsen ausgestattet (Alb. Rueprecht & Sohn Wien, 1928, S. 14), jedoch wurden diese ebenso wie dafür vorgesehene Aussparungen nicht vorgefunden. Daher wird davon ausgegangen, dass es sich um eine Modifikation bzw. Sonderanfertigung handelt, bei der vermutlich aus Kostengründen auf diese Einrichtung verzichtet wurde. Ohnehin verstehen sich die Angaben in den Produktkatalogen dieses Herstellers meist als Serienausstattungen, da an mehreren Stellen angeführt wird, dass auf jegliche Kundenwünsche nach Absprache eingegangen werden kann.

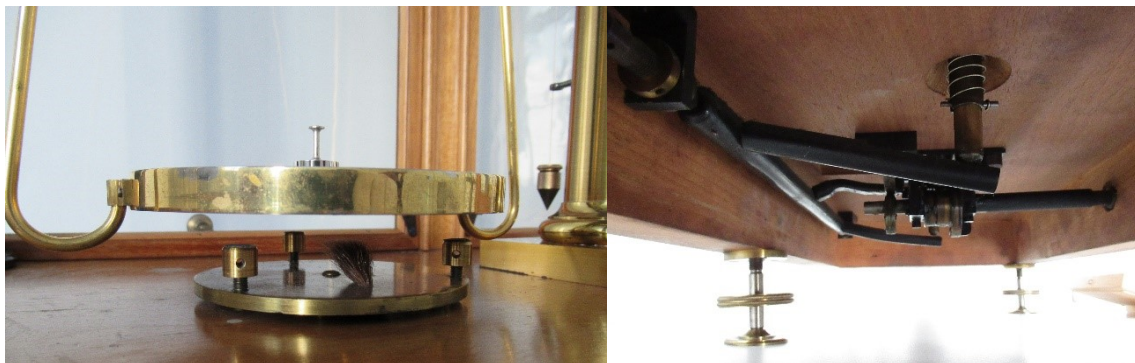


Abb. 14: Rueprecht – Analytische Waage Nr. 8: Arretierung

links: Teller der Arretierung mit Stellschrauben und Pinsel, Senklot rechts hinten; rechts: Mechanik der Arretierung unter Grundplatte

Über alle schwingenden Teile der Waage ist bekannt, dass diese „stark vergoldet“ (Alb. Rueprecht & Sohn Wien, 1928, S. 14) ausgeliefert wurden, jedoch nicht welches Material sich darunter befindet. Es wird davon ausgegangen, dass der Balken analog zu anderen Waagen dieser Zeit aus Messing gefertigt wurde und der Goldüberzug zum Schutz gegen Korrosion dient. An der Oberkante des Balkens ist eine nach links und rechts je 100-teilige Skala eingraviert, auf die der Reiter aufgesetzt werden kann. An den beiden Enden befinden sich auf Gewindespindeln sitzende Laufgewichte zur Justierung der Gleichgewichtslage. Alle Schneiden sowie die

dazugehörigen Pfannen sind aus Stahl ausgeführt. Eine Besonderheit an dieser Waage ist, dass die Zunge nicht wie üblich direkt unter der Mittelachse am Balken montiert ist, sondern an einem axial angebrachten Fortsatz. Diese Konstruktion ist notwendig, da der Balken mittig über der Säule platziert ist und somit die Zunge aus Platzgründen nach vorne versetzt werden muss. Ungefähr in der Mitte dieser ist ein Gewinde eingefräst, auf dem ein Laufgewicht zur Justierung des Schwerpunkts einige Zentimeter nach oben oder unten geschraubt werden kann.

Als Zubehör sind der Waage zwei austarierte Glasscheiben zur Schonung der Schalen beigelegt sowie eine rechteckige Ableselupe (siehe Abb. 15). Bei letzterer handelt es sich um die Artikelnummer 79 aus dem Katalog 70 (Alb. Rueprecht & Sohn Wien, 1928, S. 59), welche eine doppelte Vergrößerung ermöglicht und in der Neigung verstellbar ist. Der Hersteller versieht die Rückseite des Sockels mit einem Metallspiegel, der einfallendes Licht auf die Skala der Waage reflektieren soll. Dieser wurde jedoch beim vorliegenden Modell nicht vorgefunden.



Abb. 15: Rueprecht – Analytische Waage Nr. 8: Zubehör

3.5.2. Versuch und Diskussion

Bei der Aufstellung bzw. Einrichtung der Waage wurde zunächst festgestellt, dass das Senklot, welches als Referenz für die horizontale Ausrichtung verwendet wurde, aufgrund der Position hinter der Waagsäule schwer einsichtig ist. Stellt man das Gerät vor einer Wand auf, so ist es deswegen schwierig die Stellfüße zu bedienen und gleichzeitig die Spitzen des Lots im Auge zu behalten. Hingegen war die

Nullpunktslage des Balkens bereits vorab nahezu korrekt eingestellt und musste mit den Laufgewichten nur minimal justiert werden.

Für diese Waage wurde eine Messreihe im Bereich von rund 5 g bis 170 g angefertigt, um die Linearität des Geräts zu überprüfen. Dabei wurde mit zwei verschiedenen Gewichtssätzen so vorgegangen, dass jeweils auf der linken Schale ein bestimmtes Gewicht bzw. eine Masse mit Teilen des Gewichtssatzes vorgegeben und dann auf der rechten Schale so lange aufgelegt wurde, bis die Waage im Gleichgewicht war. Danach wurden die resultierenden Massen, welche sich additiv aus den Messergebnissen der Wägungen mit der digitalen Feinwaage (siehe Tab. 1 für Analytische Gewichte und Tab. 2 für Messinggewichte) zusammensetzen, notiert und im Programm QtiPlot gegeneinander aufgetragen, wie in Abb. 16 zu sehen ist.

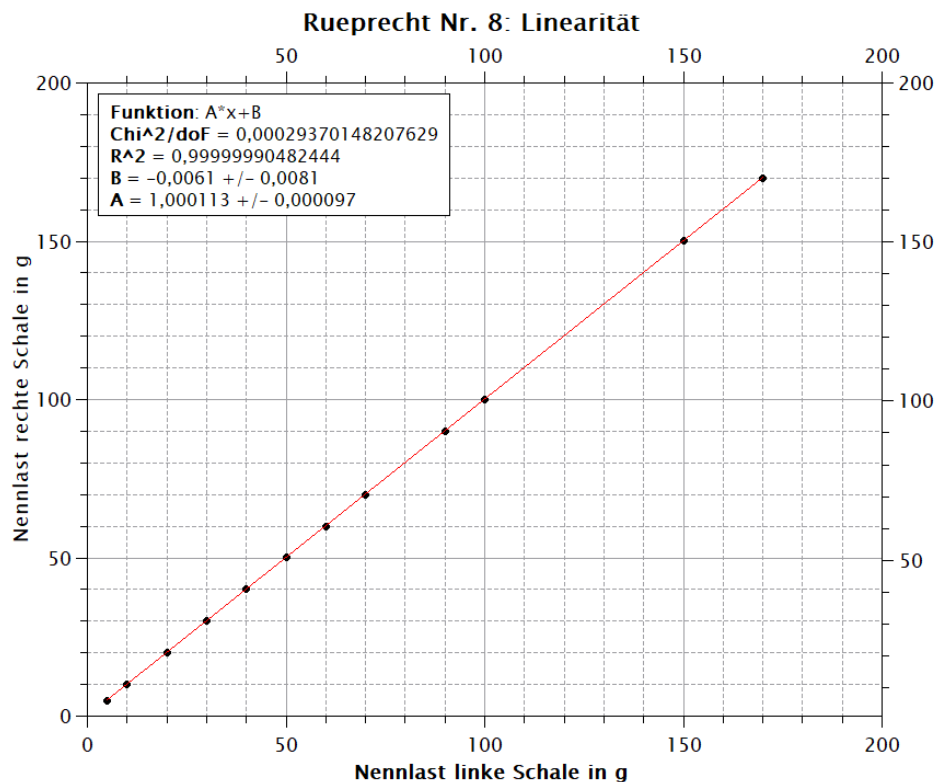


Abb. 16: Rueprecht – Analytische Waage Nr. 8: Diagramm zur Linearität

Eine lineare Regression der Messdaten ergibt eine Steigung von $A = 1,000113 \pm 0,000097$, welche auf eine leichte Abweichung zwischen den beiden Schalen bzw. eine leicht überhöhte globale Empfindlichkeit der Waage hindeutet (definiert als Abweichung der Steigung der Linearitätsgeraden von 1 (Nater et al., 2008, S. 77)). Diese könnte durch Justieren der Stellschrauben am Balken korrigiert werden. Da

das Bestimmtheitsmaß R^2 nahezu 1 beträgt, die Werte also sehr gut zur Regressionsgeraden passen, kann die Linearität der Waage bestätigt werden.

Da die Waage über keinerlei Dämpfungs- bzw. Bremseinrichtung verfügt, ist die Dauer für einen Wägevorgang aufgrund der Periodendauer von rund 15,5 s höher als bei anderen vergleichbaren Modellen. Beim Auflegen durch Probieren mit verschiedenen Gewichtsstücken und dem Abwarten mehrerer Schwingungen, kann sich eine einzelne Wägung daher über mehrere Minuten erstrecken. Somit wird der Gebrauch eines weniger empfindlichen Modells – beispielsweise einer Dezimalwaage oder einer einfachen Handwaage – als Vorwaage empfohlen, um das Wiegen zu beschleunigen.

Die Analysenwaage kann als gut erhalten beurteilt werden, da alle Funktionen voll gegeben sind und auch der äußere Zustand des Geräts einwandfrei ist. Offensichtlich ist die Einfachheit der verbauten Mechanik bzw. des generellen Aufbaus, zusammen mit hochwertigen und sauber verarbeiteten Materialien ein entscheidender Faktor für die Langlebigkeit eines solchen Messinstruments. Dass keine serienmäßig vorgesehenen Luftbremsen verbaut wurden, deutet wiederum darauf hin, dass die Waage für die Verwendung durch Studierende bestimmt war und deshalb aus wirtschaftlichen Gründen Einsparungen vorgenommen wurden, was aber der Qualität der Messergebnisse in diesem Fall nicht einschränkt.

3.6. k. k. Polytechnisches Institut – Analysenwaage

3.6.1. Aufbau und Beschreibung

Bei der Analysenwaage (siehe Abb. 17) handelt es sich um eine Dauerleihgabe aus der „Sammlung Physikalischer Geräte der HTL-Ottakring“ (frühere HTL-Schellinggasse bzw. k. k. Staatsgewerbeschule). Das Modell stammt ursprünglich aus dem k. k. Polytechnischen Institut, also der heutigen Technischen Universität Wien. Da keinerlei Angaben über Hersteller oder Typenbezeichnung zu finden sind, kann aufgrund der äußeren Merkmale und der groben historischen Verortung nur vermutet werden, dass die Waage in einer der Werkstätten der Hofmechaniker, welche für das Institut tätig waren, gefertigt wurde. Hierfür kommen in erster Linie Josef bzw.

sein Sohn Anton Florenz (Jenemann, 1987, S. 15) oder Carl Eduard Kraft (Jenemann, 1987, S. 20) in Frage. Optisch besteht zwar eine große Ähnlichkeit zu den Analysenwaagen von I. M. Ekling bzw. Eckling und J. Kusche, welche ihre Erzeugnisse jedoch im Normalfall mit Signaturen an der Säule versehen haben (Jenemann, 1987, S. 21 ff.). In jedem Fall kann der Herstellungszeitraum der Waage grob zwischen 1830 und 1850 eingegrenzt werden.



Abb. 17: k. k. Polytechnisches Institut – Analysenwaage

(a) Rändelmutter für Arretierung, (b) Öse für Senklot, (c) Schublade mit Zubehör

Das Gehäuse aus Holz ist mit einem Vorderschieber sowie einer Türe auf der rechten Seite ausgestattet. Dieses steht auf einer Grundplatte, welche aus demselben Holz gefertigt ist und unter sich einen Schubkasten mit verschiedenem Zubehör verbirgt, der mit einem zugehörigen Schlüssel versperrt werden kann. An der linken Unterkante sind zwei und an der rechten ein Stellfuß montiert, die zur Ausrichtung der Waage dienen. Hierfür wurden weder eine Libelle noch ein Lot vorgefunden,

jedoch eine Öse am oberen Ende der hölzernen Waagsäule, welche eventuell zur Anbringung eines Senklots vorgesehen ist.

An der Oberseite dieser Waage tritt eine Gewindespindel durch die Deckplatte des Gehäuses, welche durch eine mit drei Schrauben befestigte Muffe aus Messing geführt wird. Darauf ist eine gerändelte Mutter ebenfalls aus Messing aufgeschraubt, die dazu dient, die Spindel durch Drehen zu heben und zu senken. Im Inneren des Gehäuses ist an dieser ein Querbalken angebracht, der parallel zum Waagbalken verläuft und an dessen Enden je eine senkrechte Metallstange angebracht ist, welche eine vermutlich aus Elfenbein gefertigte Rolle trägt. Diese außergewöhnliche Einrichtung ermöglicht die stufenlose Arretierung des Balkens, der von den beiden Rollen angehoben bzw. abgesenkt wird (siehe Abb. 18). Die Schalen bzw. die Gehänge können nicht arretiert werden, weshalb runde Holzscheiben untergelegt wurden.

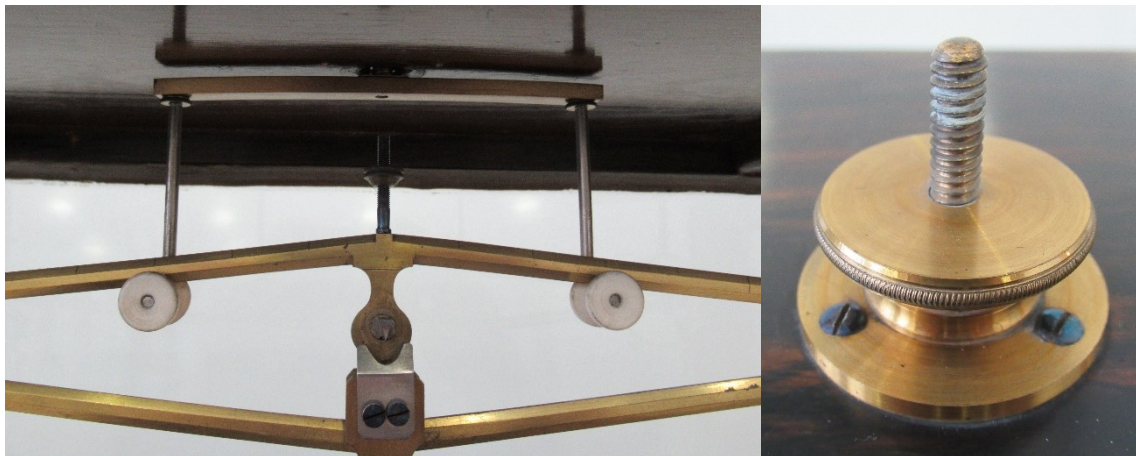


Abb. 18: k. k. Polytechnisches Institut – Analysenwaage: Arretierung

links: Querbalken mit Stangen und Rollen innen (arretiert); rechts: Rändelmutter an der Oberseite

Der aus Messing gefertigte Balken hat die Form eines flachen Deltoids mit einer einzigen Querverbindung, welche die kurze Diagonale bildet. In der Mitte dieser springen die beiden metallischen Schneiden hervor, welche auf zwei halbrunden, ebenfalls aus Metall bestehenden Pfannen lagern. Am höchsten Punkt des Balkens ist eine kleine Gewindestange mit einem Laufgewicht zur Justierung des Schwerpunkts angebracht. Die beiden Endachsen sind ebenfalls mit nach oben konisch zulaufenden Metallschneiden versehen, auf denen keine herkömmlichen Pfannen lagern, sondern kreisrunde Haken. Daran hängen die aus Messingblech

bestehenden Schalen, welche einen erhöhten Rand aufweisen und mit je drei Schnüren am Gehänge befestigt sind.

Am rechten Ende des Balkens ist ein zu diesem paralleler Metaldorn montiert, der die Zunge der Waage bildet. Diese bewegt sich vor einer von der Decke des Gehäuses herabhängenden zehnteiligen Skala, die auf einer silbernen Metallplatte eingraviert ist. Zur verbesserten Ablesung ist rechts von der Skala eine Blende aus weißem Papier bzw. Karton montiert, die vermutlich dazu dient, das einfallende Licht auf die Gravuren zu reflektieren. Weiters ist ebenfalls von der Decke hängend eine runde Ableselupe angebracht (siehe Abb. 19), die in zwei hölzernen Schienen bewegt werden kann, um den Abstand zur Skala einzustellen bzw. die Lupe zu entfernen. Über dem linken Gehänge sind ähnliche Schienen angebracht, die jedoch andere Maße als jene der Lupenhalterung aufweisen.



Abb. 19: k. k. Polytechnisches Institut – Analysenwaage: Skala mit Lupe

Der Boden des Schubkastens ist mit dunkelgrünem Filz ausgekleidet, worüber eine aus Mahagoni gefertigte Einlegeplatte mit Aussparungen zum Einsortieren der verschiedenen Zubehörteile liegt (siehe Abb. 20). Darunter befinden sich ein Glasbehälter mit Bleischrot, eine Holzkassette mit einem achteiligen Gewichtssatz, aus dem jedoch nur mehr ein Stück vorhanden ist und kreisrunde Papier- und

Metallschnipsel in verschiedenen Stärken bzw. Massen. Weiters wurden verschiedene Senkkörper aus Glas vorgefunden, die jeweils mit einer Öse versehen sind, durch die dünne Drähte gefädelt werden können, welche noch restweise vorhanden sind. Ebenfalls aus Glas sind diverse Reagenzien, Trichter und Kapillarröhren gefertigt, zu jenen passende Verschlusskorken vorgefunden wurden, sowie Uhrgläser und Scheiben, welche auf die Schalen gesetzt werden können. Darüber hinaus befinden sich ein langer Drahtaken sowie weitere Objekte aus Holz und Metall, welche nicht näher identifiziert werden konnten, in der Schublade.

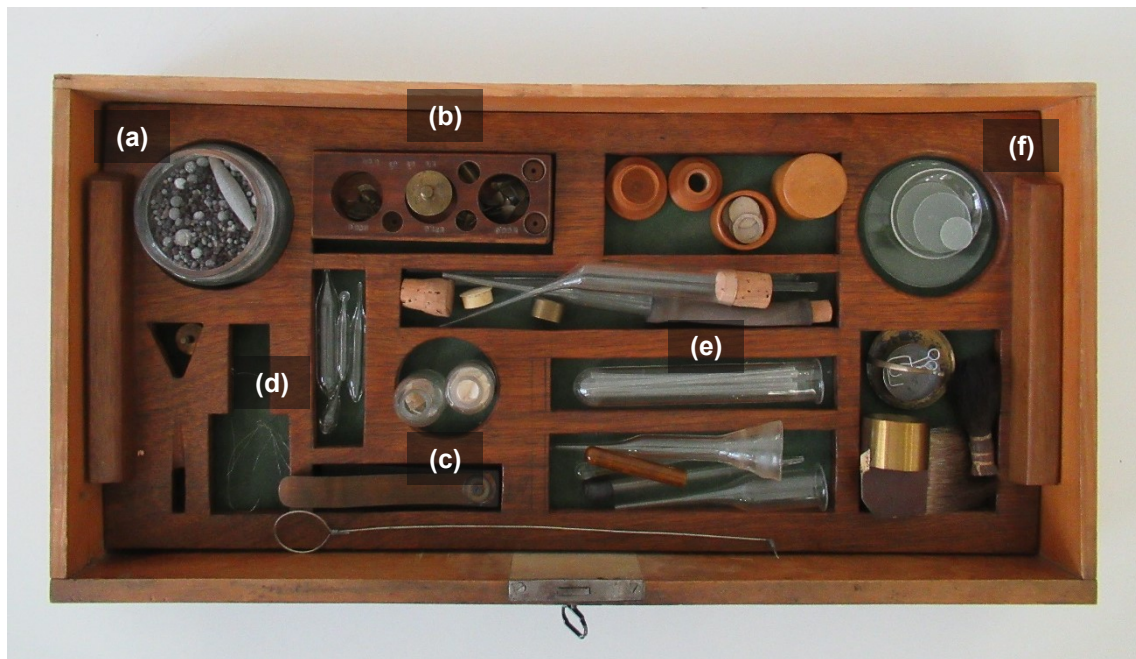


Abb. 20: k. k. Polytechnisches Institut – Analysenwaage: Schubkasten mit Zubehör:

(a) Bleischrot, (b) Gewichtssatz, (c) Papierschnipsel, (d) Senkkörper, (e) Reagenzien, (f) Uhrgläser

Des Weiteren befanden sich in der Schublade drei Zettel mit handschriftlichen Aufzeichnungen bzw. Daten (siehe Abb. 21), welche für die Durchführung verschiedener Versuche mit den übrigen Materialien nötig sind. Die Tabelle mit dem Titel „Werth des Theilstriches“ dient zur Umrechnung zwischen der Anzeige der Skala und der tatsächlichen Masse in verschiedenen Lastbereichen. Das Blatt mit dem Titel „Handels-Gewichte“ beschreibt eine Umrechnung zwischen der Masse in Gramm und zwei Gewichtssätzen weiterer Einheiten, die nicht weiter beschrieben werden. Zuletzt macht das Blatt zum „Auftrieb der Glaskörper“ Angaben zu den Senkkörpern bezüglich des Auftriebs bei bestimmten Temperaturen. Diese werden in Grad Réaumur mit $1^{\circ}\text{R} = 1,25^{\circ}\text{C}$ (Hölting & Coldewey, 2013, S. 192) angegeben,

einer Einheit, die bis zur Umstellung der deutschen amtlichen Temperaturmessung auf Grad Celsius im Jahr 1901 gebräuchlich war (Perlmutter- und Heimatmuseum Adorf, 2021). Weiters werden auch Angaben zum Begriff Pyknometer gemacht, was darauf hindeutet, dass die Kapillarröhren gemeinsam mit weiteren Reagenzien zur Dichtebestimmung von Flüssigkeiten bzw. Festkörpern dienen. Generell sind die Aufzeichnungen zwar gut erhalten, jedoch aufgrund der Handschrift schwer lesbar und können deshalb nur teilweise zugeordnet werden.

Werth des Theilstriches.

Belast.	Temper.	Belast.	Temper.
120	125	55	0.63
115	121	50	0.58
110	117	45	0.54
105	113	40	0.51
100	109	35	0.48
95	105	30	0.46
90	101	25	0.44
85	0.96	20	0.42
80	0.91	15	0.39
75	0.85	10	0.36
70	0.80	5	0.33
65	0.74	3	0.31
60	0.68	0	0.30

Handels-Gewichte

200g Hinte 100g
100g Hinte 50g
50g Hinte 20g
20g Hinte 10g

Auftrieb der Glaskörper

1) 5.1204
2) 4.1723
3) 2.2343
4) 0.6486

Glas 1

26.2078
23.9583
41.5520
12.3907

Flaschen 1

14.3464
14.9301
20.9763
6.0467

Abb. 21: k. k. Polytechnisches Institut – Analysenwaage: Aufzeichnungen,

links: Werth des Theilstriches; Mitte: Handels-Gewichte; rechts: Auftrieb der Glaskörper

3.6.2. Versuch und Diskussion

Beim Hantieren mit der Waage konnte zuerst festgestellt werden, dass die Arretierungsvorrichtung den Balken nicht exakt aufsetzt, sodass die Schneiden in den Pfannen verrutschen. Das liegt daran, dass sich der Querbalken, der mit der Gewindespindel verbunden ist, gering mit dieser mitdrehen kann und die beiden Eifenbeinrollen deshalb beim Arretieren leicht versetzt zum Balken stehen und diesen beim Entarretieren auch verdreht absetzen. Zur Schonung der Schneiden sollte deshalb die Rändelmutter möglichst langsam gedreht werden, damit die Reibung geringgehalten wird.

Da zur Tragkraft der Waage nichts bekannt ist und die Konstruktion darüber hinaus dem Alter entsprechend fragil erscheint, wurden Wägungen in einem Bereich bis rund 10 g durchgeführt. Dabei konnte eine Empfindlichkeit von 5 mg festgestellt werden. Diese erscheint angesichts des Alters dieser Waage als hoch und ergibt zusammen mit dem äußeren Erscheinungsbild des Geräts einen guten Gesamtzustand. Besonders die verschiedenen Zubehöerteile dieser Waage und die unversehrten Versuchsaufzeichnungen machen sie zu einem wertvollen Objekt, das die Sammlung ergänzt und aus dieser heraussticht.

3.7. Sartorius – Selecta Semi-Mikro

3.7.1. Aufbau und Beschreibung

Die Feinwaage Selecta Semi-Mikro der Sartorius-Werke Göttingen mit der Produktionsnummer 106119 (siehe Abb. 22) wurde um das Jahr 1960 von der Universität Wien angeschafft. Am Typenschild wird eine Höchstlast von 100 g sowie eine Empfindlichkeit von 0,01 mg angegeben, wodurch das Modell zu den höher-auflösenden Analysenwaagen gezählt werden kann. Anders als bei den herkömmlichen Balkenwaagen, welche bisher im Kapitel 3 beschrieben wurden, ist diese Waage mit nur einer Schale ausgestattet, die auch als einziges Teil des Hebelsystems für den Benutzer sichtbar ist, während sich die übrigen Teile hinter verschiedenen Abdeckungen befinden. Das gesamte Gerät ist in einem zylinderförmigen und cremeweiß lackiertem Metallgehäuse verbaut, das mit einer Kuppel abschließt. Dieses außergewöhnliche äußere Erscheinungsbild führte dazu, dass das Modell im Jahr 1954 mit einem iF Design Award ausgezeichnet wurde (iF Design, o. J.). Die Grundplatte aus Aluminium mit einem Durchmesser von 33 cm steht auf drei Füßen, wovon die vorderen zwei verstellbar sind, um die horizontale Lage mithilfe einer vorne mittig angebrachten Dosenlibelle zu justieren. Durch zwei gläserne Schiebetüren, die in konzentrisch liegenden Nuten laufen, kann das Innere bzw. die Waagschale erreicht werden. Weiters kann der Deckel abgenommen werden, um an den Balken und die verschiedenen Justiermöglichkeiten an diesem sowie an die Mechanik und Elektrik der Waage zu gelangen.



Abb. 22: Sartorius – Selecta Semi-Mikro

(a) Arretierungshebel, (b) Drehknöpfe für Gewichtsauflage, (c) Zählwerk, (d) Dosenlibelle, (e) Mattscheibe, (f) Mikrometerschraube, (g) Bildschärfeneinstellung, (h) Nullpunktfeineinstellung

Alle Bedienelemente der Waage sind „mit Berücksichtigung arbeitsphysiologischer Gesichtspunkte“ (Sartorius, 1960b, S. 3) seitlich angeordnet, wodurch sie bequem mit aufgelegten Armen bedient werden kann. An der linken und rechten Seite

befindet sich je ein schwarzer Hebel für die Arretierung, die über eine Achse verbunden sind und in die Stellungen arretiert, halbarretiert und entarretiert gebracht werden können. Dieser schaltet gleichzeitig die Beleuchtung der Projektionsableseung ein und aus. Darüber liegen rechts drei konzentrisch angeordnete Drehknöpfe in nach außen absteigendem Durchmesser, welche die Gramm- und Bruchgrammauflegung bedienen. Diese sind einerseits durch die Größe sowie auch durch einen Farbcode den einzelnen Dekaden zugeordnet, welche an einem hinter der Glasscheibe angebrachten Zählwerk abgelesen werden können (siehe Abb. 24 links). Der größte innenliegende Knopf mit einer roten Markierung ändert die Einstellung im Bereich der Zehnerstelle und der mittlere grüne Knopf die Einerstelle der ganzen Gramme. Die Dezigrammeinstellung ist mit gelber Farbe markiert und wird als einzige zu einem zweiten Drehknopf an der rechten Seite der Waage durchgeführt. Dort befindet sich außerdem eine Mikrometerschraube mit eingravierter Skala von 0-100, die die letzten beiden Dekaden im Mikrogrammbereich bedient. Zuletzt ist weiter oben eine silberne Rändelschraube angebracht, welche die Nullpunktfeineinstellung ermöglicht.

Die mechanische Gramm- und Bruchgrammauflage in einem Bereich von 0,1-99,9 g erfolgt mittels eines 16-teiligen Gewichtssatzes, dessen kleinste Teile mit 10 mg und 20 mg aus Aluminium bestehen, während alle weiteren aus Chromnickelstahl gefertigt sind (Sartorius, 1960b, S. 8). Diese werden bei der Erstmontage der Waage in die entsprechenden Kerben am Gewichtsbügel (siehe Abb. 23) eingehängt, welcher durch Demontage der Rückwand erreicht werden kann. Beim Modell Selecta Semi-Mikro entfallen aufgrund der gegebenen Höchstlast die beiden äußeren 50 g-Gewichte (Sartorius, o. J., S. 6). Die Fehlergrenzen der einzelnen Gewichte sind mit $\leq 0,3 H$ angegeben, was sich auf die Klasse H (hochfein) laut DIN 1924 bezieht. Absolut beträgt der Gesamtfehler des Gewichtssatzes 0,08 mg (Sartorius, 1960b, S. 8). Zur Mechanik der Auflage wird in den verschiedenen Dokumenten des Herstellers – vermutlich zur Wahrung von Firmengeheimnissen – nichts erwähnt, jedoch funktioniert diese wohl ähnlich zu den früheren Vorrichtungen anderer Hersteller mit Exzentern und verschiedenen Hebeln, wie bereits in den Kapiteln 3.3 und 3.4 beschrieben wurde.

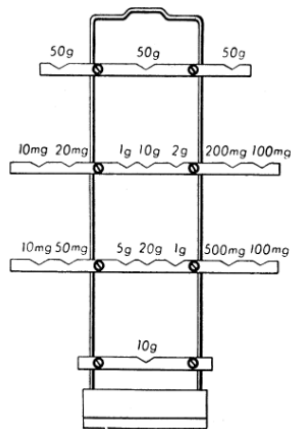


Abb. 23: Sartorius – Selecta Semi-Mikro: Gewichtsbügel.

Quelle: (Sartorius, 1960b, S. 6)

Der Bereich von 0-100 mg wird mittels einer Projektionseinrichtung angezeigt, die aus einem System von Spiegeln im Inneren der Waage aufgebaut ist. Diese projizieren eine Mikroskala, welche auf der Zunge angebracht ist, auf eine Mattscheibe mit aufgedruckter Nullmarke rechts neben der Waagschale (siehe Abb. 24 rechts). Eine Linse vergrößert die Anzeige, die bei Bedarf mit einer Justierschraube oberhalb scharfgestellt werden kann. Das System wird von einer Glühlampe mit 2 W bei 6 V Spannung beleuchtet, die von einem Transformator zum Anschluss an die Netzspannung gespeist wird. Dabei sorgt die geringe elektrische Leistung der Lampe zusammen mit einer Belüftungseinrichtung dafür, dass sie im Inneren des Geräts montiert werden kann, ohne dabei die Wägung durch ihre Erwärmung zu beeinflussen, was bei älteren Modellen nicht möglich war (Sartorius, 1951, S. 7).



Abb. 24: Sartorius – Selecta Semi-Mikro: Anzeigen

links: Zählwerk mit Farbkennzeichnung an Drehknöpfen; rechts: Mattscheibe mit Nullmarke und Mikroskala

Wie für die Waagen der Firma Sartorius aus dieser Zeit üblich, wird der Balken (siehe Abb. 25) mittels Kreisbogenarretierung fixiert bzw. freigegeben, während an der Schale und dem zweiten Gehänge hinter der Abdeckung eine Schalenarretierung von unten gegen die schwingenden Teile drückt und diese so zum Stillstand bringt. Die Stellung halbarretiert dient zum Durchführen einer schonenden Vorwägung, während jener die Schaltgewichte betätigt werden können. Erst zur Feineinstellung der letzten Dezimalstellen wird vollständig entarretiert, sodass sich das Endergebnis der Wägung durch das freie Schwingen einstellen kann. Zum schnelleren Abklingen dieser Schwingung ist wiederum eine Luftdämpfungseinrichtung verbaut, welche unter dem Gehänge der Schale angebracht ist und durch eine zylinderförmige Abdeckung geschützt wird.

Der vergleichsweise kurze Balken dieses Modells ist aus einer Leichtmetall-Legierung gefertigt, die nicht näher beschrieben wird, und mit einer Speziallackierung überzogen, welche äußere Einflüsse durch die Luftfeuchtigkeit ausschließen soll (Sartorius, 1960b, S. 5). Kreisrunde Löcher, reduzieren seine Masse und sorgen für eine außergewöhnliche Balkengeometrie. Am höchsten Punkt in der Mitte ist eine parallel verlaufende Gewindestange mit zwei Laufgewichten angebracht, wovon laut Bedienungsanleitung nur das vordere zur Nullpunkteinstellung bewegt werden soll (Sartorius, o. J., S. 8). An einer weiteren Gewindestange, die orthogonal zur Mittelachse über dieser ausgerichtet ist, befindet sich ein weiteres Laufgewicht für die Justierung der Empfindlichkeit. Gegenüber auf der anderen Seite des Balkens ist ein zweites Laufgewicht mit einem größeren Durchmesser montiert, das ebenfalls die Empfindlichkeit bzw. den Schwerpunkt des Hebels verändert, jedoch in den Dokumenten nicht erwähnt wird und deshalb eventuell nur zur werksinternen Justierung bestimmt ist. Zuletzt sind links und rechts des Balkens je eine rote Rändelschraube und eine Blattfeder angebracht, welche die Balkentransportsicherung bilden und nach der Erstmontage gelöst werden können. Die Schneiden der drei Achsen sind aus Achat hergestellt, während die Lagersteine bzw. Pfannen aus Saphir bestehen (Sartorius, 1960b, S. 8).

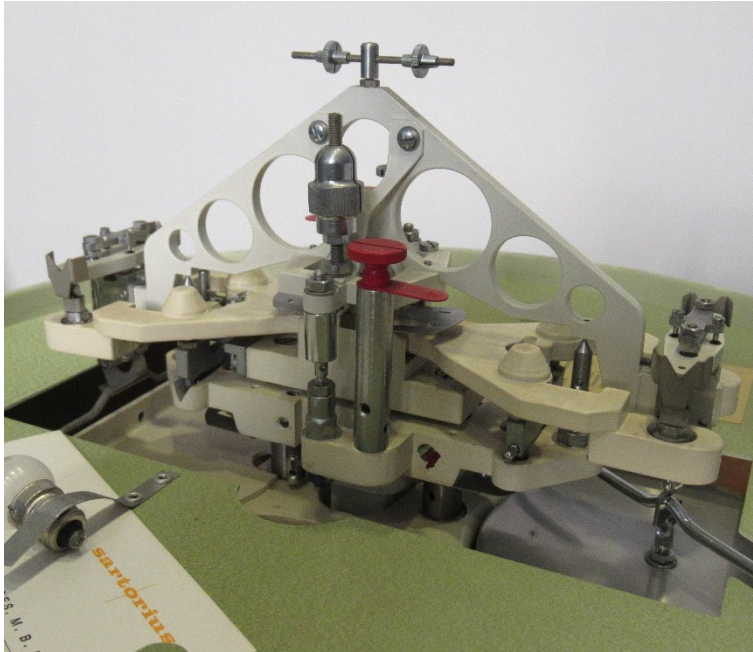


Abb. 25: Sartorius – Selecta Semi-Mikro: Balken

Unter dem kuppelförmigen Deckel der Waage sind mit einem Federbügel eine Ersatz-Glühlampe sowie eine Visitenkarte des Servicetechnikers der Firma in Wien befestigt. Weiters ist dort ein Zettel mit Sicherheitshinweisen zum Wechsel der Glühlampe, welcher durch Abheben einer weiteren Abdeckung vorgenommen werden kann, eingeklebt.

3.7.2. Versuch und Diskussion

Vor der Durchführung erster Wägungen wurde die Waage gemäß der Bedienungsanleitung (Sartorius, o. J., S. 8) für den Gebrauch vorbereitet und justiert. Dabei wurde zuerst die Nullpunkteinstellung durch Verstellen des horizontalen Laufgewichts am Balken und der Nullpunktfeineinstellung durchgeführt. Danach konnte die Empfindlichkeit durch Verstellen des vertikalen Laufgewichts angepasst werden, wonach wiederum eine Kalibrierung des Nullpunkts nötig war. Diese Aufgaben konnten mithilfe der detaillierten Angaben in der Anleitung in wenigen Minuten erledigt werden.

An dieser Waage wurden Messungen in einem Bereich von 0,01 g bis 50 g zur Bestimmung der Linearität durchgeführt. Hierfür wurde der Gewichtssatz von

Rueprecht verwendet und die einzelnen Stücke in aufsteigender Reihenfolge aufgelegt, um insgesamt 22 Datenpunkte zu erhalten. Im Programm QtiPlot wurden jeweils das Messergebnis gegen die Referenzmasse (siehe Tab. 1) aufgetragen und eine Regressionsgerade generiert, wie in Abb. 26 zu sehen ist. Die Steigung dieser linearen Funktion mit $A = 0,9999674 \pm 0,0000033$ weist auf eine geringe Abweichung zwischen den auf die Schale aufgelegten Massen und den verbauten Schaltgewichten bzw. eine zu kleine globale Empfindlichkeit hin. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 \approx 1$ ist jedoch die Linearität der Waage über den gesamten Messbereich gegeben und man kann den Korrekturfaktor $\frac{1}{A}$ heranziehen, um den Fehler einzelner Wägungen in guter Näherung zu kompensieren.

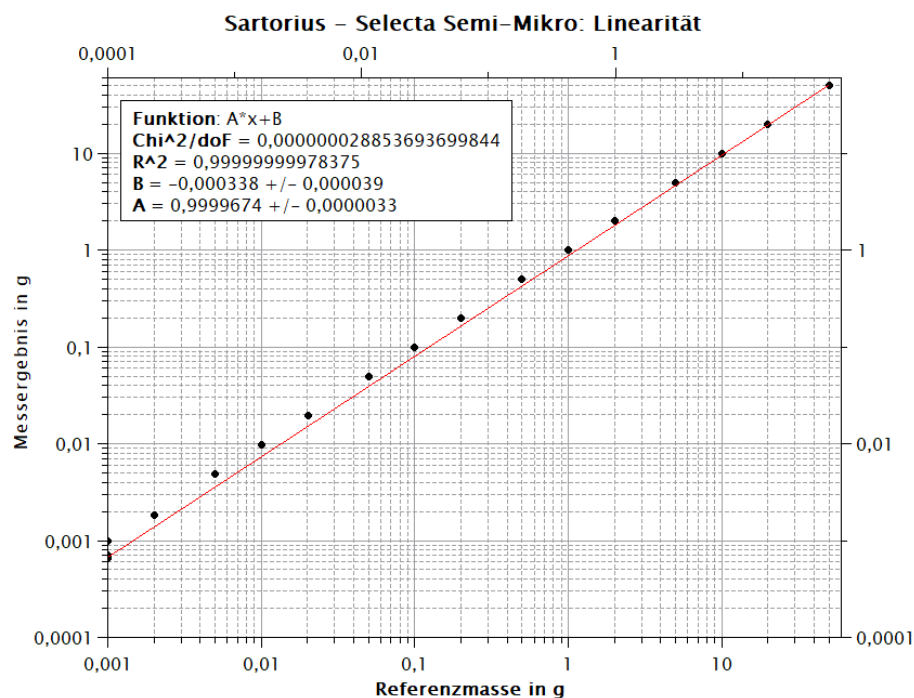


Abb. 26: Sartorius – Selecta Semi-Mikro: Diagramm zur Linearität

Weiters wurden Messreihen zur Bestimmung der Wiederholbarkeit des Geräts durchgeführt. Dabei wurden mit den Massestücken von 0,02 g und 5 g im Christian-Doppler-Hörsaal der Fakultät für Physik bei einer Raumtemperatur von rund 20 °C jeweils zehn aufeinanderfolgende Wägungen und anschließend eine statistische Auswertung angefertigt. Das Wägegut wurde dabei mit einer Pinzette jeweils zentral auf die Waagschale aufgelegt und die Glastüren für die Dauer der gesamten Messreihe verschlossen. Danach wurde die Waage jeweils entarretiert, das Ergebnis abgelesen und notiert und anschließend wieder arretiert. Für das 0,02 g-Stück hat sich

bei einer Messung am 16. Februar 2023 so ein Mittelwert von $m_{0,02} = (0,019239 \pm 0,000040)$ g mit dem Standardfehler des Mittelwerts als Unsicherheit und einer Standardabweichung von $\sigma_{0,02} = 0,000127$ g ergeben, welche die Wiederholbarkeit beschreibt. Analog haben sich für das 5 g-Stück bei einer Messung am 6. Februar 2023 ein Mittelwert von $m_5 = (4,99061 \pm 0,00013)$ g und eine Standardabweichung von $\sigma_5 = 0,000421$ g ergeben. Nimmt man als kleinste Nettomasse wiederum die beiden Massen der Messreihen an, ergibt sich gemäß (23) für die die Messung mit 0,02 g keine zufriedenstellende Wiederholbarkeit, während die Standardabweichung der zweiten Messreihe weit unter dem Grenzwert liegt. Weiters kann die angegebene Empfindlichkeit von 0,01 mg durch die verschiedenen Messungen bestätigt werden.

Die Dauer einer Einzelwägung mit diesem Gerät beträgt rund 40 s, wobei diese ohne aufgelegte Schaltgewichte, also bei der Einstellung 00,0 g am Zählwerk, merkbar abnimmt. Diese trotz der verbauten Luftdämpfung lange Zeitspanne vom Entartieren bis zur Einstellung des Messergebnisses hängt unter anderem auch mit dem Untergrund am Versuchsort zusammen, da bereits das Gehen in Schrittschwindigkeit rund um den Experimentiertisch Schwingungen des Balkens angeregt hat. Dies kann auch die größere Streuung der Messreihe vom 6. Februar 2023 erklären, während jener verschiedene handwerkliche Arbeiten im Umkreis des Hörsaals durchgeführt wurden. Die Aufstellung auf einem geeigneten Wägetisch, der entweder an der Wand oder am Boden fest montiert und somit vibrationsarm ist, kann also das Wiegen verkürzen und damit auch die Qualität der Ergebnisse verbessern.

Abschließend kann der Zustand der Waage als sehr gut beurteilt werden, da die Funktion vollumfänglich erhalten ist und auch das äußere Erscheinungsbild von einer schonenden Handhabung der Vorbenutzerinnen und Vorbenutzer zeugt. Diese Beurteilung zusammen mit der robusten Bauweise des Geräts haben die zahlreichen und lange andauernden Messungen ermöglicht. Auch der damalige Verkaufserfolg der Waage, die zwar den Grundprinzipien einer klassischen Dreischneidenwaage folgt, jedoch der Formsprache der 1950er-Jahre (Ähnlichkeiten zum VW-Käfer) angepasst wurde und auch technische Neuerungen wie die verdeckte mechanische Gewichtsaufgabe mit sich brachte (Berghoff et al., 2021, S. 190), kann nach den durchgeführten Versuchen nachvollzogen werden. Lediglich die Ablesung

des Messergebnisses, welche an drei verschiedenen Stellen, nämlich dem Zählwerk, der Projektionsablesung und der Mikrometerschraube erfolgt, erscheint aus heutiger Sicht kompliziert und schränkt den Komfort ein. Die Waage kann jedoch in Bezug auf die Empfindlichkeit mit modernen Digitalwaagen mithalten, wobei der größte qualitative Unterschied die Wägedauer betrifft. Für Messungen im kleineren Umfang bzw. als Reservegerät könnte das Modell daher auch heute noch problemlos eingesetzt werden.

3.8. Mettler – Analysenwaage B6 Halbmikro

3.8.1. Aufbau und Beschreibung

Die Analysenwaage Typ B6 Halbmikro der Firma E. Mettler aus Zürich mit der Produktionsnummer 15811 (siehe Abb. 27) wurde 1957 vom I. Physikalischen Institut der Universität Wien erworben. Am Typenschild des Geräts wird eine maximale Belastung von 100 g angegeben, im Produktkatalog des Herstellers eine Empfindlichkeit von 0,01 mg (E. Mettler Analysen- und Präzisionswaagen, Zürich, o. J., S. 8). Ähnlich zur im Kapitel 3.7 beschriebenen Waage ist auch bei diesem Modell nur eine Waagschale vorhanden und für die Benutzerin oder den Benutzer sichtbar, während alle weiteren Komponenten hinter Abdeckungen verbaut sind. Das Gehäuse des Geräts ist quaderförmig und besteht aus Leichtmetall, welches nicht näher beschrieben wird und mit grünem Hammerschlaglack überzogen ist. Es steht auf drei Stellfüßen, wovon an der Vorderkante zwei und an der Hinterkante einer angebracht sind. An der Vorderseite der Waage ist eine Glasscheibe angebracht, die einen Blick auf die Schale zulässt, welche über zwei seitliche gläserne Schiebetüren erreicht werden kann. Dort befindet sich auch eine Dosenlibelle, die vor der Schale angebracht ist. Der Deckel des Geräts, unter dem sich der Balken und alle dazugehörigen Einstellmöglichkeiten befinden, ist abnehmbar und wird mit zwei Federschnappern in Position gehalten. An der Rückseite ist ein quaderförmiges Gehäuse angebracht, das oben und unten offen ist und die Glühlampe mitsamt Fassung und Justiermöglichkeiten verdeckt.



Abb. 27: Mettler – B6 Halbmikro

(a) Drehknopf für Differenzwägungen, (b) Drehknopf für Dekagrammdekade, (c) Drehknopf für Grammdekade, (d) Drehknopf für Dezigrammdekade, (e) Mikrometer, (f) Nullpunktfeineinstellung, (g) Arretierungshebel

Alle für eine Wägung nötigen Bedienelemente sind an der Vorderseite der Waage angebracht. Unter der Glasscheibe befindet sich ein Hebel für die Arretierung und die Beleuchtung der Projektionsablesung, welcher das schwingende System in senkrechter Stellung arretiert, nach links gedreht entarretiert und nach rechts gedreht halbarretiert. Über der Glasscheibe am silbernen Armaturen Brett sind drei Drehknöpfe für die mechanische Gewichtsauflage angebracht, die jeweils mit einer Zeigermarkierung versehen sind. Um diese ist je eine zehnteilige Skala passend

zu den einzelnen Dekaden (0,1 g, 1 g und 10 g) aufgedruckt. Die Knöpfe sind mit einem mechanischen Zählwerk verbunden, das in der Mitte der Armaturentafel angebracht ist und die Ablesung von 0,1 g bis 99,9 g ermöglicht (siehe Abb. 28 links). Ein vierter Drehknopf, der nur über zwei Stellungen verfügt, hebt ein 50 mg-Gewicht ab, was zur Durchführung von Differenzwägungen dient. Eine rote Leuchte über dem Knopf zeigt dabei an, dass dieser betätigt wurde. Rechts neben dem Zählwerk befindet sich die Mattscheibe der Projektionsablesung für die Zenti- und Milligrammanzeige, gefolgt von der Mikrometerskala und dem zugehörigen Drehknopf für den Mikrogrammbereich. Zuletzt ist an der rechten Seite der Waage ein Knopf für die Nullpunktfeineinstellung angebracht, der eine Justierung im Bereich von 4 mg zulässt.

Ein besonderes Unterscheidungsmerkmal zu allen bisher beschriebenen Waagen besteht in der Anwendung des Substitutionsprinzips bei diesem Gerät. Die technische Umsetzung besteht in diesem Fall zunächst aus der Konstruktion eines ungleicharmigen Balkens aus einer Aluminiumlegierung und mit weißer Lackierung, an dessen längerem Teil ein Gegengewicht starr montiert ist (siehe Abb. 28 rechts). Dadurch reduzieren sich die Lagerstellen auf zwei, deren Schneiden und Pfannen jeweils aus synthetischem Saphir gefertigt sind (E. Mettler Analysen- und Präzisionswaagen, Zürich, o. J., S. 9). Durch den längeren Hebel des Gegengewichts kann dieses kleiner bzw. mit geringerer Masse dimensioniert werden, was die Gesamtmasse des schwingenden Systems und damit die Abnutzung der Mittelschneide reduziert, ohne dabei die Maximalbelastung zu beeinflussen. Bei unbelasteter Schale sind alle Schaltgewichte, welche sich zwischen dem Gehänge und der Schale befinden, aufgelegt, sodass sich die Drehmomente der beiden Hebel aufheben und der Balken im Gleichgewicht ist. Sobald ein Wägegut aufgelegt wird, werden durch die Bedienerin oder den Bediener die entsprechenden Teile der Gewichtsauflage abgehoben, um das Übergewicht am vorderen Teil des Balkens zu kompensieren. Die Schaltgewichte sind aus Chromnickelstahl mit einer Dichte von $7,77 \text{ g/cm}^3$ gefertigt, wobei angegeben wird, dass diese bei einer Luftdichte von 1200 mg/l auf eine scheinbare Masse von $8,4 \text{ g/cm}^3$ geeicht sind und die Genauigkeit des Gewichtssatzes $\pm 0,1 \text{ mg}$ beträgt (E. Mettler Analysen- und Präzisionswaagen, Zürich, o. J., S. 8 f.).

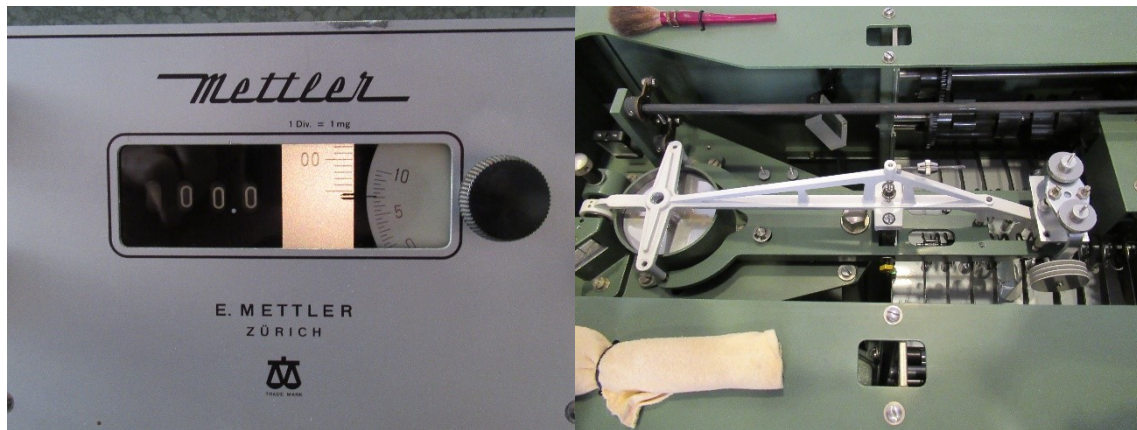


Abb. 28: Mettler – B6 Halbmikro: Detailansichten

links: Anzeige mit Zählwerk, Projektionsablesung und Mikrometer; rechts: Balken und Zubehör

Zur schnelleren Erreichung des Gleichgewichtszustandes bewegt sich das feste Gegengewicht in einem Luftdämpfungszyylinder. Über die Arretierung des Balkens können aufgrund der verdeckten Bauweise keine Aussagen gemacht werden, die Schale mit einem Durchmesser von 100 mm wird hingegen mit einem senkrechten Federbolzen von unten fixiert. Zur Justierung der Empfindlichkeit ist über der Mittelachse eine senkrechte Gewindestange mit einem Laufgewicht angebracht. Die Korrektur der Nullpunktlage bei einer nötigen Verschiebung von über 4 mg auf der Mikroskala kann mit einer parallel zum Balken verlaufenden Schraube vorgenommen werden.

Als Zubehör sind unter dem Deckel der Waage ein Pinsel sowie ein Putztuch zum Reinigen verschiedener Teile mit Gummibändern befestigt. Ebenfalls beigelegt ist eine schwarz-weiß-Kopie der Bedienungsanleitung. Eine im Produktkatalog beschriebene Ersatzlampe sowie eine Schutzhülle wurden nicht vorgefunden.

3.8.2. Versuch und Diskussion

Nachdem die Justierung des Nullpunkts, der Empfindlichkeit und der Bildschärfe gemäß der Bedienungsanleitung (E. Mettler. Zürich, o. J., S. 6 f.) durchgeführt wurden, sind verschiedene Messreihen zur Bestimmung der Wiederholbarkeit angefertigt worden. Am 2. und 6. Februar 2023 wurden je zehn aufeinanderfolgende Messungen mit einem Massestück von rund 25 g durchgeführt. Die

Umgebungsbedingungen in der historischen Sammlung der Fakultät für Physik wiesen dabei eine Raumtemperatur von ca. 19,5 °C und leichte Konvektion durch die Heizkörper auf. Das Wägegut wurde daher mittig auf die Schale aufgelegt und die Glastüren für die Dauer der gesamten Messreihe verschlossen. Durch wiederholtes Entarretieren, Ablesen und Arretieren wurden die Einzelmessungen innerhalb einiger Minuten unter annähernd gleichen Bedingungen durchgeführt. Die statistische Auswertung mit dem Programm QtiPlot hat für die Messreihe am 2. Februar einen Mittelwert von $m_{25_2} = (25,123574 \pm 0,000041)$ g und eine Standardabweichung von $\sigma_{25_2} = 0,000129$ g ergeben, welche die Wiederholbarkeit der Messungen beschreibt. Für die Messreihe am 6. Februar gilt ein Mittelwert von $m_{25_6} = (25,119006 \pm 0,000025)$ g und eine Standardabweichung von $\sigma_{25_6} = 0,0000803$ g. Die Verbesserung der Wiederholbarkeit vier Tage nach der ersten Messung lässt sich vermutlich auf den sichereren Umgang mit dem Gerät zurückführen, der sich durch die Übung und die parallel verlaufende Arbeit mit den Grundlagen ergeben hat. Unter letzteren Bedingungen liegt auch die statistisch errechnete Unsicherheit in der Größenordnung der angegebenen Empfindlichkeit dieser Waage.

Ebenfalls am 6. Februar 2023 wurde eine weitere Messreihe mit dem 5 g-Stück aus dem Gewichtssatz von Rueprecht erstellt. Diese wurde analog zur zuvor beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt, jedoch im Nebenraum, dem Christian-Doppler-Hörsaal. Dort herrschte die gleiche Temperatur, dagegen kein spürbarer Luftzug. Die Auswertung der zehn Datenpunkte hat dabei einen Mittelwert von $m_5 = (4,98379 \pm 0,00015)$ g und eine Standardabweichung von $\sigma_5 = 0,000464$ g ergeben. Hier stehen die größere Unsicherheit und Standardabweichung wiederum in Zusammenhang mit dem Untergrund bzw. dem sehr einfachen Labortisch, auf dem die Waage aufgestellt wurde. Dieser Tisch war vermutlich weniger stabil als das Hörsaalpult. Generell sind jedoch alle ermittelten Werte größer als die in der Produktbroschüre angegebene Reproduzierbarkeit von $\pm 0,01$ mg (E. Mettler Analysen- und Präzisionswaagen, Zürich, o. J., S. 8), welche vermutlich nur unter genormten Laborbedingungen erzielt werden kann.

Die Waage befindet sich insgesamt in einem sehr guten Zustand, welcher sowohl optisch als auch durch die im Versuch erhaltenen Messergebnisse bemerkbar ist. Dabei ist die Bedienung benutzerfreundlich gestaltet und besonders das zentral angebrachte Anzeigenfeld, bei dem alle Dezimalstellen des Messergebnisses auf

einen Blick abgelesen werden können, bietet einen Vorteil gegenüber der im Kapitel 3.7 beschriebenen Waage. Die intuitive Einstellung der mechanischen Gewichtsaufgabe sowie die über den gesamten Lastbereich konstante Empfindlichkeit ermöglicht es auch wenig erfahrenen Bedienerinnen und Bedienern, eine exakte Wägung durchzuführen und würde daher auch noch heute den Einsatz des Geräts in einem naturwissenschaftlichen Praktikum für Studienanfängerinnen und -anfänger rechtfertigen.

Ein qualitativer Vergleich zwischen der Mettler – B6 Halbmikro und der Sartorius – Selecta Semi-Mikro, welche sich nicht zuletzt im Namen, sondern auch in der Konstruktion und ihren Funktionen stark ähneln, macht die schnelle Entwicklung der analytischen Waagen im deutschsprachigen Raum nach dem Zweiten Weltkrieg deutlich sichtbar. Das anfangs futuristisch anmutende Design ging im Laufe der Zeit in ein zweckmäßigeres und nüchterneres Äußeres über, gleichzeitig ähnelte die Ablesung des Messergebnisses immer mehr der heute üblichen Anzeige auf einem einzigen Display. Der Hersteller Sartorius rechtfertigte zunächst noch den Einsatz klassischer gleicharmiger Waagen mit drei Schneiden durch die symmetrische Auswirkung von äußeren Störeinflüssen und der daraus resultierenden Minimierung des Fehlers (Sartorius-Werke AG. Göttingen, o. J., S. 4). Schließlich gewann jedoch in technischer Hinsicht die Firma Mettler das Rennen um die Spitzenposition im Wettbewerb der Verkaufszahlen gegen Sartorius durch die konsequente Umsetzung der ungleicharmigen Zweischneiden-Substitutionswaage (Berghoff et al., 2021, S. 190).

3.9. Sartorius – 2255

3.9.1. Aufbau und Beschreibung

Die Präzisionswaage 2255 des Herstellers Sartorius mit der Fabr. Nr. 802197 (siehe Abb. 29) wurde im Jahr 1975 vom II. Physikalischen Institut der Universität Wien angeschafft. Im Gegensatz zu sämtlichen anderen in dieser Arbeit beschriebenen Waagen handelt es sich bei diesem Modell um eine Oberschalige Präzisionswaage, welche in ihren Grundprinzipien bereits den heute üblichen Geräten entspricht, bei denen das Wägegut nicht in eine hängende, sondern auf die oben am Gerät

befindliche Schale aufgesetzt wird. Aus diesem Grund weicht die Beschreibung des Aufbaus auch vom bisher angewandten Schema ab, da die Waage anders gestaltet ist und die Details im Waageninneren nicht einsichtig sind.



Abb. 29: Sartorius – 2255

(a) Drehknopf 10 g bis 150 g, (b) Drehknopf 0,01 g bis 0,1 g, (c) Kippschalter für Beleuchtung, (d) Tarierung, (e) Nullpunktfeineinstellung

Zunächst steht das graue Kunststoffgehäuse in Form eines rechtwinkligen Parallelepipedes mit fünfeckigen Seitenflächen auf zwei Stellfüßen vorne und einem starren Fuß an der Rückseite. Zur Ausrichtung ist oben links eine Libelle angebracht. An der Oberseite befindet sich ein zylinderförmiger Windschutz aus lackiertem Blech, welcher die silber-glänzende Schale umgibt. Vorne unten ist ein roter Kippschalter angebracht, der die Beleuchtung für die Projektionsablesung aktiviert bzw. deaktiviert. Darüber ist eine abnehmbare Abdeckung mit Lüftungsschlitzen

angebracht, welche den Zugang zur Glühlampe, der Bildschärfeneinstellung und der Wahl der Netzspannung ermöglicht (siehe Abb. 30 rechts). Die Lampe wird von einem Blechgehäuse umgeben, das mit einer Isolierung aus Schaumstoff versehen ist. An der linken Seite der Waage ist oben ein Drehknopf zur Gewichtsschaltung im Bereich von 10 g bis 150 g angebracht, der mit der entsprechenden 16-teiligen Rolle des Zählwerks an der Anzeige (siehe Abb. 30 links) verbunden ist. Dieser Knopf kann abgezogen und auf eine darunter befindliche Achse für die Transportsicherung bzw. Arretierung aufgesetzt werden, die nach der ersten Aufstellung gelöst und mit einem schwarzen Stopfen verschlossen werden kann. Rechts oben ist ebenfalls ein großer Drehknopf zur Einstellung der Zenti- und Milligrammdekaden angebracht, die an zwei Rollen des Zählwerks abgelesen werden kann. Der Tariernknopf für die darunter befindliche Achse, auf welche aufgrund der D-Form (halbkreisförmiger Querschnitt) nur der linke Knopf der Gewichtsschaltung passt, fehlt. Weiter hinten ist rechts ein kleinerer fest montierter Knopf für die Nullpunktfeineinstellung angebracht.

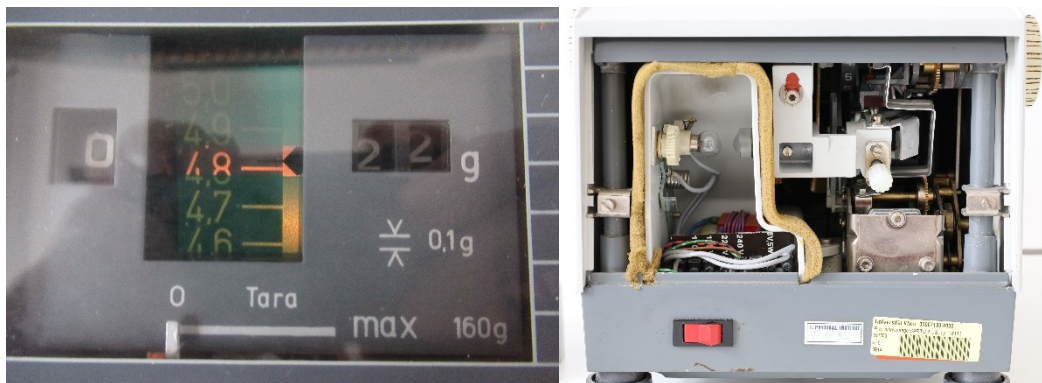


Abb. 30: Sartorius – 2255: Detailansichten

links: Anzeigenfeld mit Zählwerken und Projektionsablesung; rechts: Lampengehäuse unter Abdeckplatte

An der Unterseite des Waagengehäuses befindet sich eine drehbare Abdeckung, unter welcher ein Haken für Unterflurwägungen angebracht ist. Dieser ist mit der Schale verbunden, sodass dort Wägegut hängend aufgelegt werden kann. Da in Bezug auf den Balken bzw. den inneren Aufbau der Waage keine Beobachtungen gemacht werden können, wird lediglich vermutet, dass die Grundprinzipien einer Neigungswaage, welche eine Oberschalige Ausführung zulässt, mit denen einer Balkenwaage kombiniert wurden und das Gerät daher als Hybridtyp gesehen werden kann.

Als Zubehör der Waage wurde eine Schutzhaube aus transparentem Kunststoff vorgefunden, welche sich aufgrund von Verfärbungen und Flecken in einem schlechten Zustand befand und daher anschließend entsorgt wurde. Weiters war die Bedienungsanleitung als gedrucktes Original beigelegt. Das Netzkabel, welches mit einem Kaltgerätestecker versehen ist, kann abgezogen werden und ist daher ebenfalls als separates Teil des Geräts zu verstehen.

3.9.2. Versuch und Diskussion

Zunächst wurde der Nullpunkt gemäß der Bedienungsanleitung justiert und der Windschutz mit dem Falz nach oben gerichtet aufgesetzt, wie es für Wägungen kleiner Objekte vorgesehen ist. Anschließend konnten Messungen bzw. Messreihen mit verschiedenen Teilen des Gewichtssatzes von Rueprecht durchgeführt werden.

An dieser Waage wurde eine Messreihe zur Bestimmung der Linearität in einem Bereich von 0,001 g bis 100 g angefertigt. Durch Auftragen der insgesamt 20 Messergebnisse gegen die Referenzmasse und anschließende Regressionsanalyse im Programm QtiPlot wurde der Graph, welcher in Abb. 31 zu sehen ist erhalten.

Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 \approx 1$ kann die Linearität im gegebenen Messbereich bestätigt werden. Die Abweichung der Steigung A vom Idealwert 1 liegt innerhalb der angegebenen Empfindlichkeit dieses Modells und stellt somit keine signifikante Beeinträchtigung dar.

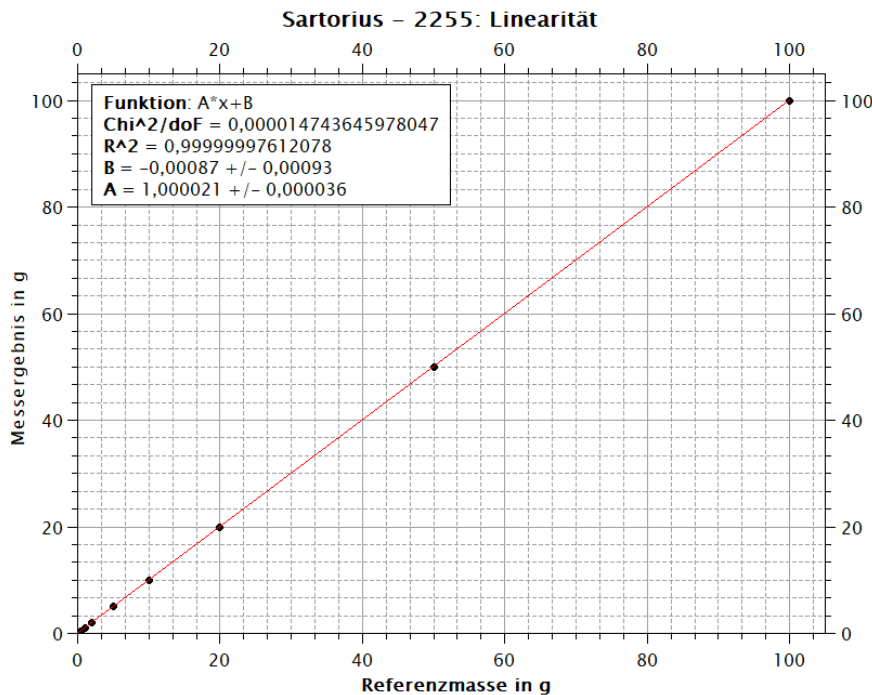


Abb. 31: Sartorius – 2255: Diagramm zur Linearität

Weiters wurde mit den Massestücken 1 g, 10 g und 100 g je eine Messreihe angefertigt, deren statistische Auswertungen Aussagen über die Wiederholbarkeit der Messungen mit dieser Waage zulassen. Dabei wurde das jeweilige Wägegut zehn Mal mit der Pinzette auf die Schale aufgelegt, abgelesen und wieder abgehoben. Alle Messungen wurden am 28. Februar 2023 im Raum der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien durchgeführt. Dabei herrschte eine Raumtemperatur von rund 20 °C. Aufgrund des störenden Einflusses durch den Luftzug der Heizkörper wurde die Waage mit ausreichender Entfernung zu diesen aufgestellt. Für die kleinste Masse ergab sich ein Mittelwert von $m_1 = (0,99890 \pm 0,00018)$ g und eine dazugehörige Standardabweichung von $\sigma_1 = 0,000568$ g. Fünf aufeinanderfolgende Messungen mit dem 10 g-Stück ergaben exakt 10 g, weshalb die Messreihe sodann abgebrochen wurde. Dementsprechend ergibt sich der Mittelwert aufgrund der Gerätegenauigkeit zu $m_{10} = (10,0000 \pm 0,0001)$ g. Die Messreihe mit dem 100 g-Stück haben einen Mittelwert von $m_{100} = (100,00420 \pm 0,00053)$ g und eine Standardabweichung von $\sigma_{100} = 0,00169$ g ergeben. Die durch die Standardfehler der Mittelwerte gegebenen Unsicherheiten sind wiederum kleiner als die angegebene Empfindlichkeit der Waage, was für deren Präzision und einen guten Zustand

spricht. Nimmt man als kleinste Nettomassen die jeweiligen Massen der Messreihen an, ergeben sich gemäß (23) zufriedenstellende Wiederholbarkeiten.

Bei den durchgeführten Wägungen ist aufgefallen, dass das Gerät im unteren Lastbereich nicht immer durch das alleinige Auflegen einer Masse reagiert, sondern zusätzlich mit der Pinzette angestoßen werden muss, um die nötige Schwingung anzuregen. Dabei wurde der subjektive Eindruck erweckt, dass durch dieses manuelle Einschwingen die Zuverlässigkeit der Messergebnisse erhöht werden kann. Offensichtlich bewegen sich also gewisse Teile der Mechanik nicht leichtgängig und bedürfen einer Wartung. Ansonsten kann die Empfindlichkeit von 1 mg jedoch experimentell bestätigt werden.

Die Dämpfung der Waage sorgt für nahezu aperiodische Schwingungen und einen dementsprechend schnellen Wägevorgang. Gleichzeitig muss jedoch der Nullpunkt vergleichsweise oft mit der dafür vorgesehenen Feineinstellung justiert werden, da sonst die Einzelergebnisse einer Messreihe zu stark voneinander abweichen. In der Bedienungsanleitung wird dieser Schritt auch im Prozedere des Wiegens vorgeschrieben.

Zusammenfassend ist die Funktion dieser Waage vollumfänglich gegeben, wobei der fehlende Drehknopf und das Problem der Leichtgängigkeit die Qualität der Wägungen zunächst nicht einschränken. Durch das Wissen über diese Eigenheiten kann dementsprechend entgegengewirkt werden, was zu den bereits beschriebenen präzisen Ergebnissen führt. Mit einem Alter von rund 50 Jahren wurde das Modell zwar bereits aus dem Studien- bzw. Forschungsbetrieb ausgemustert und ist deshalb der physikhistorischen Sammlung und in weiterer Folge dieser Arbeit zugeordnet, entspricht dennoch den Anforderungen an eine moderne Waage. Durch einen Vergleich mit den im Kapitel 3.2 und 3.7 beschriebenen Geräten lassen sich die firmeninterne Entwicklung bei Sartorius bzw. auch der generelle Fortschritt im Waagenbau bis knapp vor die Einführung der vollelektrischen Modelle überblicken. Trotz der umfangreichen Funktionen dieser Waage, lässt sie sich einfach bedienen und ermöglicht schnelle Messungen, was vor allem durch den Wegfall des Arretierungsvorganges begünstigt wird.

4. Waagen mit größerer Tragkraft

Das vorangehende Kapitel widmete sich den Präzisions- und Analysenwaagen, welche nach ihrer Empfindlichkeit eingeteilt wurden. Hier werden nun verschiedene Modelle beschrieben, die ebenfalls auf dem Grundprinzip der Balkenwaage beruhen, jedoch solche die größere (ab 200 g) und große Wägegüter (ab 5 kg) tragen können. Diese Abgrenzung mag zwar zunächst unscharf erscheinen, da auch einige der Analysen- und Präzisionswaagen größere Lasten tragen und vergleichen können, ist jedoch nicht willkürlich gewählt, sondern beruht auf der Notwendigkeit anderer Konstruktionsprinzipien solcher Waagen im Vergleich mit den zuvor beschriebenen (Felgentraeger, 1907, S. 39). Dabei spielt die Empfindlichkeit mit steigender Tragkraft eine geringere Rolle, während Eigenschaften wie der Stabilität, einem einfachen und schnellen Wägevorgang oder der simplen Ablesung größere Relevanz zugeschrieben wird.

4.1. Alb. Rueprecht & Sohn – Präzisionswaage No. 159

4.1.1. Aufbau und Beschreibung

Die Präzisionswaage des Herstellers Albert Rueprecht & Sohn aus Wien wurde um das Jahr 1910 vom I. Physikalischen Institut der Universität Wien erworben. Durch einen Vergleich der äußeren Merkmale der Waage mit den Abbildungen in der Liste 50 (Alb. Rueprecht & Sohn Wien, 1911, S. 59) kann darauf geschlossen werden, dass es sich um die Präzisionswaage No. 159 handelt (siehe Abb. 32). Diese wird mit einer Empfindlichkeit von 2 mg bei einer Tragkraft von 10 kg angegeben, weshalb sie hier als Waage mit größerer Tragkraft im Vergleich zu jenen im Kapitel 3 angeführt wird.

Eine aus Eichenholz gefertigte Grundplatte, welche mit drei Stellfüßen versehen ist, trägt das Gehäuse mit Rahmenteilen aus dem gleichen Material. Zur horizontalen Ausrichtung sind weder Lot noch Libelle verbaut. Die beiden Seitenscheiben, sowie eine zweigeteilte Scheibe an der Rückwand sind fest montiert, während vorne zwei Türen den Zugang zur Waage ermöglichen. Diese werden durch einen schmalen

und fest montierten Steg aus Glas getrennt. Beide Türen werden durch eine horizontale Leiste halbiert, wobei die untere Scheibe zusätzlich jeweils als Vorderschieber aus Acrylglas ausgeführt ist.

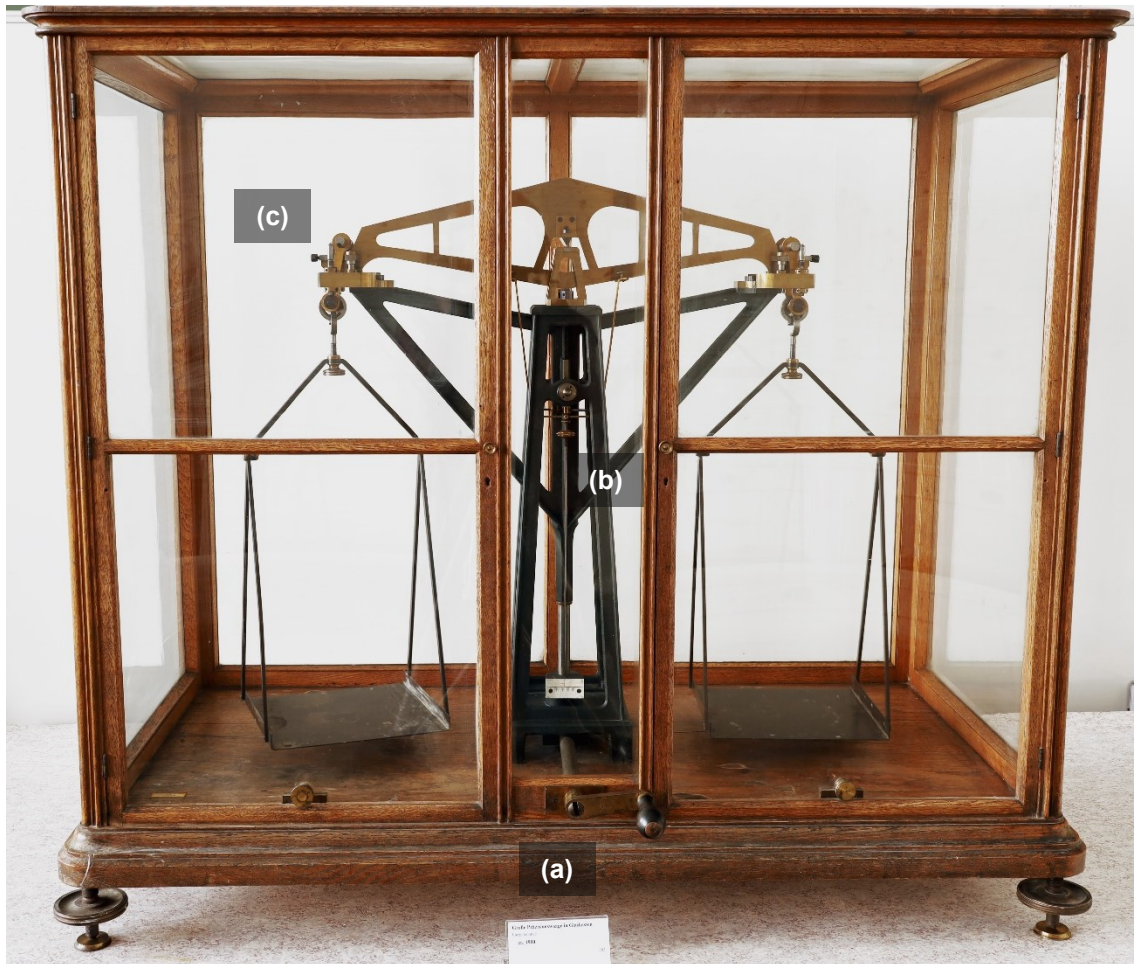


Abb. 32: Rueprecht – Präcisionswaage No. 159

(a) Hebel für Arretierung, (b) Laufgewicht für Empfindlichkeit, (c) Justierschrauben für Nullpunktslage

An der Vorderseite der Waage ragt eine Metallachse durch eine Holzleiste unter der mittleren Glasscheibe, an welcher eine Kurbel zur Arretierung angebracht ist. Dabei handelt es sich um eine Parallelträgerarretierung, die den Balken aus den Lagern hebt und mittels Zentrierstiften und gegenüberliegenden Einkerbungen ausrichtet. Die Lager bestehen an der Mittelachse und den beiden Endachsen aus einem grauen Kristall, was auf den Einsatz von Achat hindeutet, wobei alle Pfannen plan sind. Der Balken besteht aus Messing und hat die Form eines Fachwerks mit dem Umriss eines Deltoids. An dessen beiden Enden sind kleine Schrauben zum Justieren der Nullpunktslage angebracht. Darunter befinden sich die Gehänge, die als Ring-Haken-Gelenke mit jeweils konisch zulaufenden Querschnitten ausgeführt

sind (siehe Abb. 33) und die weit ausladenden Schalen tragen, auf welche vergleichsweise große Objekte aufgelegt werden können.

Zum Justieren der Empfindlichkeit dieser Waage ist am oberen Drittel der Zunge ein Laufgewicht angebracht, welches auf einem Gewinde auf- und abbewegt werden kann. Das spitze Ende der Zunge schwingt vor einer zehnteiligen Elfenbeinskala mit schwarzen Teilstrichen. Da die Schalen über keine Arretierungseinrichtung verfügen, wurden sie mit Karton und Schaumstoff unterlegt vorgefunden, um die Lager zu schonen und ungewollte Bewegungen beim Transport zu verhindern.



Abb. 33: Rueprecht – Präcisionswaage No. 159: Ring-Haken-Gelenk

4.1.2. Versuch und Diskussion

Die Waage wurde zunächst aufgestellt und mithilfe einer Wasserwaage horizontal ausgerichtet, wobei die Grundplatte und die Säule als Referenz dienten. Anschließend konnten die behelfsmäßigen Transportsicherungen entfernt und einige einfache Versuche zur Ermittlung der Funktion durchgeführt werden. Da zu diesem Zeitpunkt die Tragkraft des Modells unbekannt war und diese erst bei der späteren

Recherche eruiert werden konnte, wurden Wägungen im Bereich bis 100 g durchgeführt. Dabei konnte eine Empfindlichkeit von 50 mg festgestellt werden, welche stark von der Herstellerangabe abweicht. Dieses Ergebnis lässt in erster Linie darauf schließen, dass die Waage in der Vergangenheit stark genutzt wurde und die Lager dementsprechend verschlissen sind. Auch die Acrylglasscheiben, welche vermutlich als Ersatz für die Originalscheiben aus Glas dienen, sind ein Indiz für die Beanspruchung des Messgeräts in der täglichen wissenschaftlichen Arbeit.

Interessant zu bemerken ist auch, dass bei dieser Waage verschiedene Sonderwünsche bzw. Einschränkungen des Funktionsumfangs umgesetzt wurden, welche vom Hersteller auch ausdrücklich angeboten wurden. So werden im Katalog beispielsweise ausbalancierte Vorderschieber, eine Konus-Schalenarretierung oder eine Vernickelung des Balkens angeführt, welche beim vorliegenden Modell nicht vorhanden sind (Alb. Rueprecht & Sohn Wien, 1911, S. 58 ff.). Aufgrund der Anordnung der Bauteile, der Form des Balkens und weiterer konstruktiver Merkmale kann dennoch mit hoher Sicherheit auf die beschriebene Modellbezeichnung geschlossen werden.

Schließlich ist die Waage in einem dem Alter und Verschleiß entsprechenden Zustand, jedoch äußerlich gut erhalten. Der Ersatz der Glasscheiben zeigt, dass das Messgerät für die Benutzerinnen und Benutzer in der Forschung unentbehrlich war und deshalb gewartet und instand gehalten wurde. Für Vorwägungen großer Objekte könnte das Modell aufgrund der robusten Bauweise auch heute noch verwendet werden. Es eignet sich ob der Größe und der simplen Aufmachung aber besonders zu Anschauungszwecken in naturwissenschaftlichen Vorlesungen oder auch im Schulunterricht.

4.2. Alb. Rueprecht & Sohn – Demonstrationswaage No. 98

4.2.1. Aufbau und Beschreibung

Die Demonstrationswaage von Albert Rueprecht & Sohn (siehe Abb. 34) wurde um das Jahr 1910 vom II. Physikalischen Institut der Universität Wien angeschafft. Den Abbildungen im Katalog des Herstellers (1911, S. 39) nach zu urteilen, handelt es

sich dabei um die Demonstrationswaage für physikalische Vorlesungs-Versuche an Hochschulen No. 98, welche mit einer großen Zubehörkiste geliefert wird. Sie wird mit einer Empfindlichkeit von 20 mg bei einer Tragkraft von 2 kg in jeder Schale angegeben. Das Modell steht auf einem hölzernen quaderförmigen Sockel, der mit drei ausladenden Füßen versehen ist. Darauf ist die Säule der Waage als Stahlgerippe montiert, welches über vier Stellfüße mit dem Sockel verbunden ist. Diese dienen zusammen mit dem Senklot, das hinter der Zunge angebracht ist, zur Ausrichtung vor einer Messung. Eine Besonderheit dieses Geräts ist, dass es aufgrund seines Einsatzzweckes ohne Gehäuse ausgeliefert wird und somit frei im Raum steht.

Der Drehknopf für die Arretierung befindet sich an der Rückseite der Waage, sodass der Bediener oder die Bedienerin diese von hinten manipulieren kann, ohne dabei die Sicht für die Zuseherinnen und Zuseher zu versperren. Es handelt sich um eine Parallelbalkenarretierung, welche ausschließlich den Balken anhebt und senkt. Dieser ist zweischildig, also aus zwei parallelen und mit Zwischenstücken verbundenen Lamellen, gefertigt und besteht aus Messing. Er hat den Umriss eines Deltoids und ist als Fachwerk mit vertikalen Ständern ausgeführt. Am höchsten Punkt des Balkens ist ein horizontal verlaufendes Justiergewicht für die Nullpunkteinstellung montiert, das um die vertikale Achse gedreht werden kann. Das einzige Lager, das aus Schneide und Pfanne gebildet wird, befindet sich an der Mittelachse des Balkens und besteht aus einem grauen Material, bei dem es sich vermutlich um Achat oder einen ähnlichen Kristall handelt. An den beiden Balkenenden, sowie jeweils am Mittelpunkt zwischen Balkenende und Mittelachse, sind verschiedene Ösen und Schrauben zum Befestigen der Schalen und anderer Vorrichtungen angebracht.

Ein vergleichsweise dickes Messingrohr bildet die konisch zulaufende Zunge, welche in einem Dorn aus silbernem Metall endet, der über einer kleinen zehnteiligen Skala spielt. Am Rohr befindet sich ein Laufgewicht, das zur Einstellung der Empfindlichkeit vertikal verschoben werden kann. Die eigentliche zweiteilige und stark vergrößerte Skala zu Demonstrationszwecken befindet sich darunter am Holzsockel und bildet mit dicken schwarzen Strichen vor einer weiß lackierten Tafel einen deutlichen Kontrast. Die Zunge wird hierfür mit einer Metallstange verlängert und endet in einer aufgeschraubten breiten und schwarz lackierten Metallplatte als Zeiger. Als Gegengewicht für diese Verlängerung bzw. um den Schwerpunkt wiederum

anzuheben, wird über der Mittelachse ein breiter Messingknopf auf den Balken geschraubt (Rueprecht, 1882, S. 101).



Abb. 34: Rueprecht – Demonstrationswaage No. 98

(a) Drehknopf für Arretierung, (b) kleine Skala, (c) große Skala, (d) Aufhängemöglichkeiten

In einer Holzkiste befindet sich der Zubehörsatz zu dieser Waage (siehe Abb. 35), dessen Teile verschiedene Demonstrationsversuche wie die Untersuchung der „Folgen bei Verlegung der Ebene der Aufhänge-Achsen über oder unter die Mittelschneide [...], Wägen mit ungleicharmiger Waage, Bestimmung des Hebelfehlers, Bestimmung des spezifischen Gewichtes fester und flüssiger Körper“ (Alb. Rueprecht & Sohn Wien, 1911, S. 39), den Versuch zum Maxwell'schen Rad und weitere ermöglichen. Hierfür wurden kurze Waagschalen, längere Schalen zum Einhängen von Tellern oder Glaszylindern, Zylinder mit einem Volumen von ca. 2 l, Metallhaken als Gehänge, Hufeisen- und Stabmagnete der Firma M. Millers Sohn, das Maxwell'sche Rad, eine trichterförmige Schale, Schnüre, ein Reiter aus Messing und eine Labor-Hebebühne aus Holz vorgefunden.

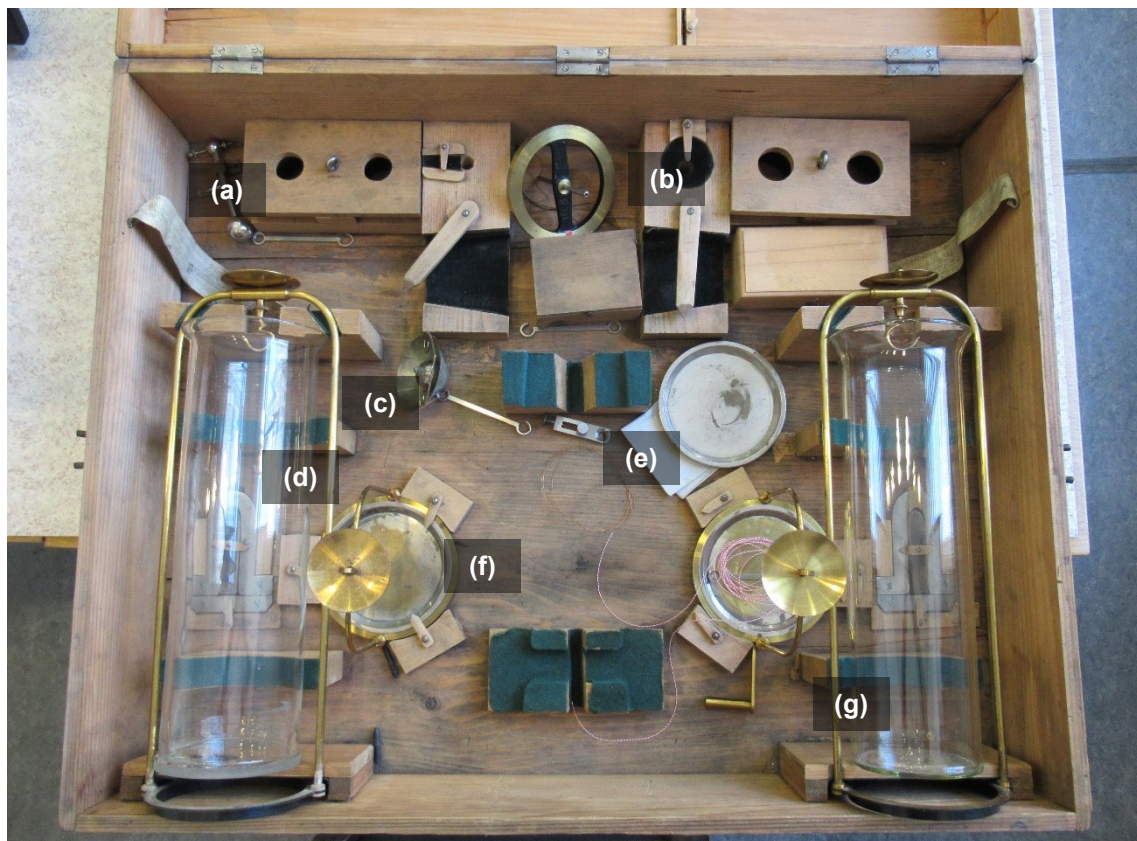


Abb. 35: Rueprecht – Demonstrationswaage No. 98: Zubehörkiste

(a) Metallhaken, (b) Maxwell'sches Rad, (c) längere Schale, (d) Magnete, (e) Teller, (f) kurze Schale, (g) Glaszylinder

Ebenfalls dieser Waage beigelegt wurde ein achteiliger Gewichtssatz in einer Kassette aus Buchenholz vorgefunden (siehe Abb. 36). Da dieser nicht als Zubehör in den Katalogen des Herstellers angeführt wird, ist davon auszugehen, dass der Satz

vermutlich von einer anderen Firma separat angekauft wurde. Die offensichtlich aus Messing gefertigten Teile reichen von 5 g bis 200 g und tragen jeweils verschiedene österreichische Eichstempel der Eichstellen 11, 18 und 34 aus den Jahren 1957 bis 1975, was dafür spricht, dass die Anschaffung nicht vor 1957 stattfand.

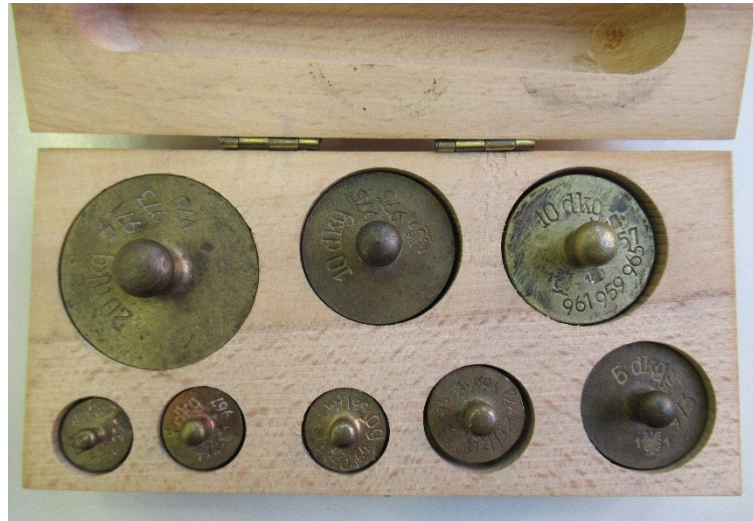


Abb. 36: Rueprecht – Demonstrationswaage No. 98: Gewichtssatz

4.2.2. Versuch und Diskussion

Bei der Aufstellung der Waage ist zunächst aufgefallen, dass die horizontale Ausrichtung mit vier statt drei Stellfüßen deutlich schwieriger ist und mehr Zeit in Anspruch nimmt. Bei mehreren Wägungen im Bereich bis 100 g konnte eine Empfindlichkeit von höchstens 100 mg festgestellt werden, was wiederum für eine starke Abnutzung der Lagerelemente spricht. Anschließend wurde auch ein Demonstrationsversuch zur Empfindlichkeit dieser Waage durchgeführt, der in einem handschriftlichen Vorlesungsskriptum vorgefunden wurde. Dabei konnte deutlich gezeigt werden, dass die Empfindlichkeit durch das Abschrauben des Justiergewichts und das Verschieben des Laufgewichts an der Zunge nach unten die Empfindlichkeit der Waage jeweils um den Faktor zehn reduziert werden kann.

Da der zuvor beschriebene Gewichtssatz gemeinsam mit den Analytischen Gewichten No. 196 von Rueprecht für Versuche an verschiedenen Waagen in dieser Arbeit herangezogen wurde, wurde dieser analog zu der in Kapitel 3.1 beschriebenen

Vorgehensweise gewogen, um Referenzwerte zu erhalten, welche in Tab. 2 angeführt sind.

Tab. 2: Gewichtssatz Demonstrationswaage: Messergebnisse

Nennwert in g	Messergebnis in g ($\pm 0,0002$ g)
200	199,9844
100	99,9872
100	99,9923
50	50,0062
20	19,9920
10	9,9918
10	9,9620
5	5,0031

Zuletzt wurde auch ein Demonstrationsversuch zum Maxwell'schen Rad (siehe Abb. 37) nach einer Anleitung aus dem Vorlesungsskriptum durchgeführt, welcher hier nur kurz beschrieben wird. Am rechten Balkenarm wurde das Rad aus der Zubehörkiste befestigt, indem die beigelegte Schnur um die Achse auf beiden Seiten des Rads gewickelt und an der Öse festgebunden und das Rad mit einem dünnen Faden gesichert wurde. Am linken Arm wurde die trichterförmige Schale mit einer darin befindlichen Metallkugel befestigt und in den mit Wasser gefüllten Glaszylinder eingetaucht, der auf der Hebebühne steht, um eine Dämpfungsvorrichtung zu bilden. Anschließend wurde der Balken durch Auflegen von Gewichten in das stabile Gleichgewicht gebracht. Durchtrennt man den Haltefaden mit einem brennenden Zündholz, beginnt das Rad sich zu drehen und beschleunigt stetig bis an den Umkehrpunkt, also bis die Schnur abgewickelt ist. Es behält die Drehbewegung bei, was dazu führt, dass die Schnur wiederum aufgewickelt wird und sich das Rad nach oben bewegt. Damit kann das Prinzip der Energieerhaltung gezeigt werden. Die Waage dient vor allem dazu, zu zeigen, dass die Gewichtskraft auf das Rad während der Rotation geringer ist als in der Ruhestellung. Die in der Ruhe wirkende Beschleunigung von g wird aufgrund der erzwungenen Rotationsbewegung auf g/k

mit $k = 1 + \frac{J}{mr^2}$ verringert, wobei J das Trägheitsmoment um den Schwerpunkt, m die Masse des Rades und r den Abrollradius bezeichnet (Ucke & Schlichting, 2015, S. 42). Aus diesem Grund schlägt die Waage sowohl beim Abrollen als auch dem trägheitsbedingten Aufrollen nach links aus. Im Umkehrpunkt, an dem das Rad bzw. die Schnur ganz abgerollt ist, gibt es einen Kraftstoß, wodurch kurzzeitig der rechte Waagbalken stärker belastet wird.



Abb. 37: Rueprecht – Demonstrationswaage No. 98: Maxwell'sches Rad

Zusammenfassend kann die Waage als gut erhalten beschrieben werden, da alle zu Demonstrationszwecken erforderlichen Funktionen gegeben sind. Zwar ist die

Empfindlichkeit gegenüber der Herstellerangabe aufgrund von Verschleiß deutlich reduziert, jedoch ist der primäre Zweck einer solchen Waage nicht das Durchführen von Präzisionswägungen, auch wenn dies grundsätzlich möglich wäre. Die Mechanik der Arretierung funktioniert einwandfrei und alle Zubehörteile im Original sind in der Kiste sicher verwahrt. Lediglich einer der beiden Glaszylinder wurde offensichtlich in der Vergangenheit ersetzt, da sich die Abmessungen und Massen gering unterscheiden, was jedoch durch Tarieren kompensiert werden kann. Verschiedene Demonstrationsversuche, die mit diesem Modell möglich sind und auch teilweise durchgeführt wurden, sind keineswegs veraltet und können daher auch in heutigen Mechanikvorlesungen oder im schulischen Physikunterricht sinnvoll eingesetzt werden. Einige davon wie die Demonstration der Teilbarkeit des Hebels, der Auswirkungen der Verlegung des Schwerpunktes, der Ausrichtung der Lagerpunkte, der Prüfung und Justierung der Waage, oder der Bestimmung der Massendichte sind in einem Artikel des Herstellers, welcher in der Zeitschrift für Instrumentenkunde erschienen ist, ausführlich erklärt (Rueprecht, 1882, S. 101 ff.). Besonders nützlich für Demonstrationsversuche ist dabei die stark vergrößerte Anzeige der Waage, die eine gute Ablesbarkeit aus verschiedenen Entfernungen, aber auch in Hinblick auf mögliche Sehschwächen im Publikum, bietet.

4.3. H. D. Schmid – Dezimalwaage No. 6403

4.3.1. Aufbau und Beschreibung

Die Dezimalwaage des Herstellers H. D. Schmid mit der Modellnummer No. 6403 (siehe Abb. 38) wurde um das Jahr 1910 vom II. Physikalischen Institut der Universität Wien angeschafft. Der Waagenbauer Heinrich Daniel Schmid, der eine Ausbildung bei Rollé & Schwilgué in Straßburg durchlief, gründete auf Wunsch des Fürsten Metternich 1831 einen Zweigbetrieb in Wien. Die 1869 daraus entstandene Aktiengesellschaft wurde später als Simmering-Graz-Pauker AG bekannt und ist heute Teil von Siemens Österreich (Schobert, 1994, S. 270 f.). Laut dem Typenschild beträgt die höchstmögliche Belastung der Waage 2 Zentner (2 q), was nicht eindeutig konvertierbar ist, da bis zur gesetzlichen Festlegung des SI-Systems in Österreich

unterschiedliche Definitionen von $1\text{ q} = 56\text{ kg}$ und $1\text{ q} = 100\text{ kg}$ geläufig waren (Steinhäuser, 1977, S. 415).

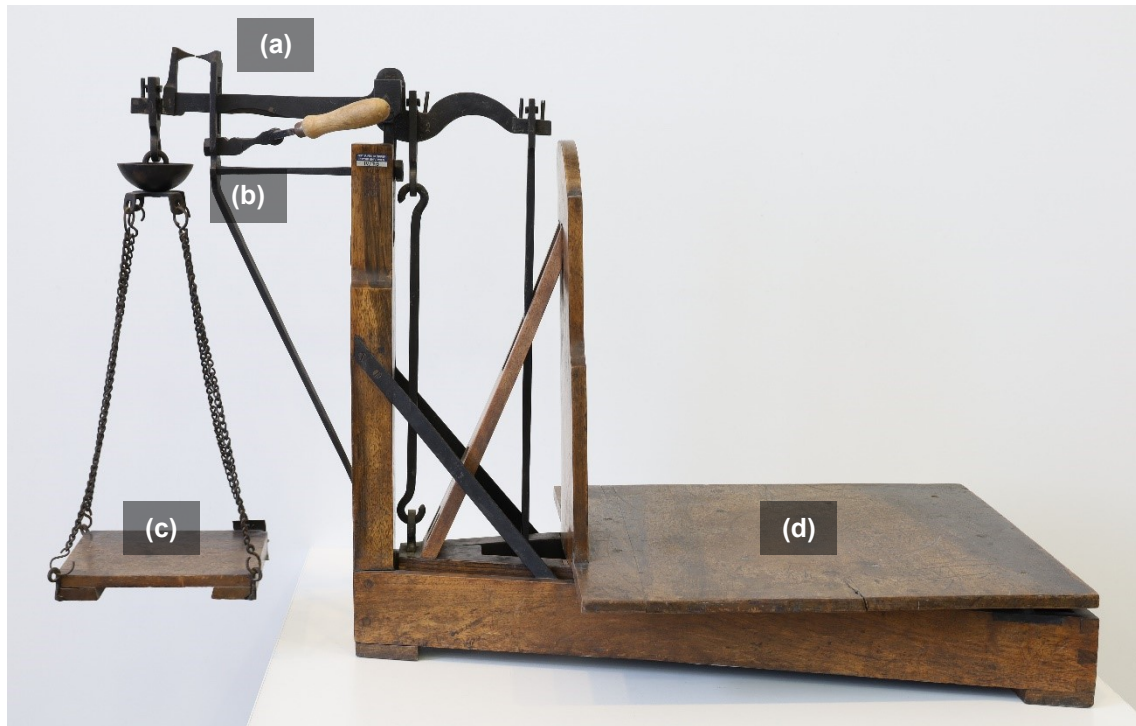


Abb. 38: H. D. Schmid – Dezimalwaage No. 6403

(a) Keile zur Ablesung, (b) Arretierungshebel, (c) Schale, (d) Brücke

Eine trapezförmige Unterkonstruktion aus dunklem Holz, welche auf drei abgesetzten Fußplatten steht, bildet den Sockel der Waage. Die Säule und die Schalen bzw. die Brücke bestehen aus dem gleichen Holz, während alle beweglichen Teile, welche die Mechanik bilden, aus schwarzgefärbtem Schmiedeeisen bestehen. Das zu wägende Gut wird auf die Brücke mit den Abmessungen $45 \times 45\text{ cm}$ aufgelegt, während die Massestücke zum Austarieren auf einer Schale mit den Abmessungen $18 \times 18\text{ cm}$ Platz finden, welche über vier Metallketten am Gehänge befestigt ist.

Unter dem längeren Balkenarm ist ein Hebel zur Arretierung des Balkens angebracht. Diese Vorrichtung dient ausschließlich als Transportsicherung der beweglichen Teile, während die Lager nicht entlastet werden. Am Typenschild der Waage ist der Schriftzug „ $1 = 10$ “ zu lesen, was sich auf das Verhältnis der Armlängen und in weiterer Folge auf das Verhältnis der aufgelegten Massen im stabilen Gleichgewicht bezieht (folgerichtige Bezeichnung als Dezimalwaage). Gemäß (21) bzw. Abb. 2 betragen die Längen $\overline{AB} = (222 \pm 1)\text{ mm}$ und $\overline{BC} = (22 \pm 1)\text{ mm}$. Der längere Balkenarm ist als gerader Stab mit rechteckigem Querschnitt ausgeführt, während

der kürzere Arm zwischen den Punkten *C* und *D* einen Bogen aufweist. Alle Lager, welche am Balken angebracht sind, sowie jene am Zusatzbalken, bestehen aus dem gleichen Metall wie der Balken selbst und sind mit halbrunden Pfannen versehen, welche ein Abrutschen verhindern. An den Punkten *E* und *F* sind einfache Ring-Haken-Gelenke ausgeführt.

Die Ablesung des Messergebnisses erfolgt über zwei horizontal gegenüberliegende Metallkeile, von welchen einer am Balken und einer über Gestänge an der Säule montiert ist. Somit kann quantitativ nur festgestellt werden, ob sich das stabile Gleichgewicht eingestellt hat oder nicht, da aufgrund der fehlenden Skala keine absoluten Abweichungen beschrieben werden können.

4.3.2. Versuch und Diskussion

Für die Durchführung verschiedener Wägungen wurde die Waage auf einem stabilen Arbeitstisch aufgestellt, wobei das horizontale Ausrichten aufgrund fehlender Verstellmöglichkeiten entfiel. Bevor mit Teilen aus mehreren Gewichtssätzen mit einem maximalen Nennwert von 30 kg Versuche durchgeführt wurden, sind die größten Massestücke auf einer digitalen Personenwaage zum Vergleich gewogen worden. Die Messergebnisse sind in Tab. 3 aufgeführt.

Tab. 3: Großer Gewichtssatz: Messergebnisse

Nennwert	Messergebnis in kg ($\pm 0,01$ kg)
30 kg	28,10
20 kg	19,85
10 lb	5,45

Bei den anschließenden Wägungen in einem Bereich bis rund 56 kg (siehe Abb. 39), also der halben Maximalbelastung, wenn man vom geringeren Umrechnungsfaktor ausgeht, konnte eine Empfindlichkeit von rund 10 g festgestellt werden. Das Verhältnis 1:10 zwischen den aufgelegten Massen konnte im Rahmen der Unsicherheit über den gesamten Messbereich bestätigt werden.



Abb. 39: H. D. Schmid – Dezimalwaage No. 6403: Wägung

Die Funktion der Waage ist nach wie vor gegeben und konnte im Experiment überprüft werden. Dabei ist die im Vergleich zur Maximalbelastung und der simplen Bauweise hohe Empfindlichkeit bemerkenswert und zeugt von einer gut durchdachten Konstruktion. Alle Lagerstellen wurden von den Vorbenutzern mit Beschriftungen versehen, was den Auf- und Abbau des Geräts erleichtert und damit eine Lagerung auch bei eingeschränkten Platzverhältnissen ermöglicht. Für Demonstrationsversuche könnten aufgrund des weiten Messbereichs auch Personen gewogen werden, wobei die Stabilität der Waage durch langsames Herantasten an die Maximallast überprüft werden sollte.

4.4. C. W. Brecknell – Römische Schnellwaage

4.4.1. Aufbau und Beschreibung

Die römische Schnellwaage des Herstellers Charles William Brecknell aus Birmingham im Vereinigten Königreich (siehe Abb. 40) wurde um das Jahr 1915 vom I. Physikalischen Institut der Universität Wien erworben. Da das Unternehmen 1913

gegründet wurde, kann dieses Jahr als frühestmögliches Erwerbsdatum angegeben werden (Brecknell Ltd., o. J.). Das Modell kann in zwei verschiedenen Modi verwendet werden, indem es jeweils um 180 ° um die Längsachse gedreht wird. Dabei kommen zwei verschiedene Skalen mit dazugehörigen Maximallasten zum Einsatz, wobei alle Angaben in der Einheit Pfund des angloamerikanischen Maßsystems eingraviert sind:

1. Maximallast: 56 lb $\approx$ 25,40 kg
Skalierung: von 15 lb bis 56 lb in Schritten von 0,5 lb $\approx$ 0,23 kg
2. Maximallast: 15 lb $\approx$ 6,80 kg
Skalierung: von 1 lb bis 15 lb in Schritten von 0,25 lb $\approx$ 0,11 kg

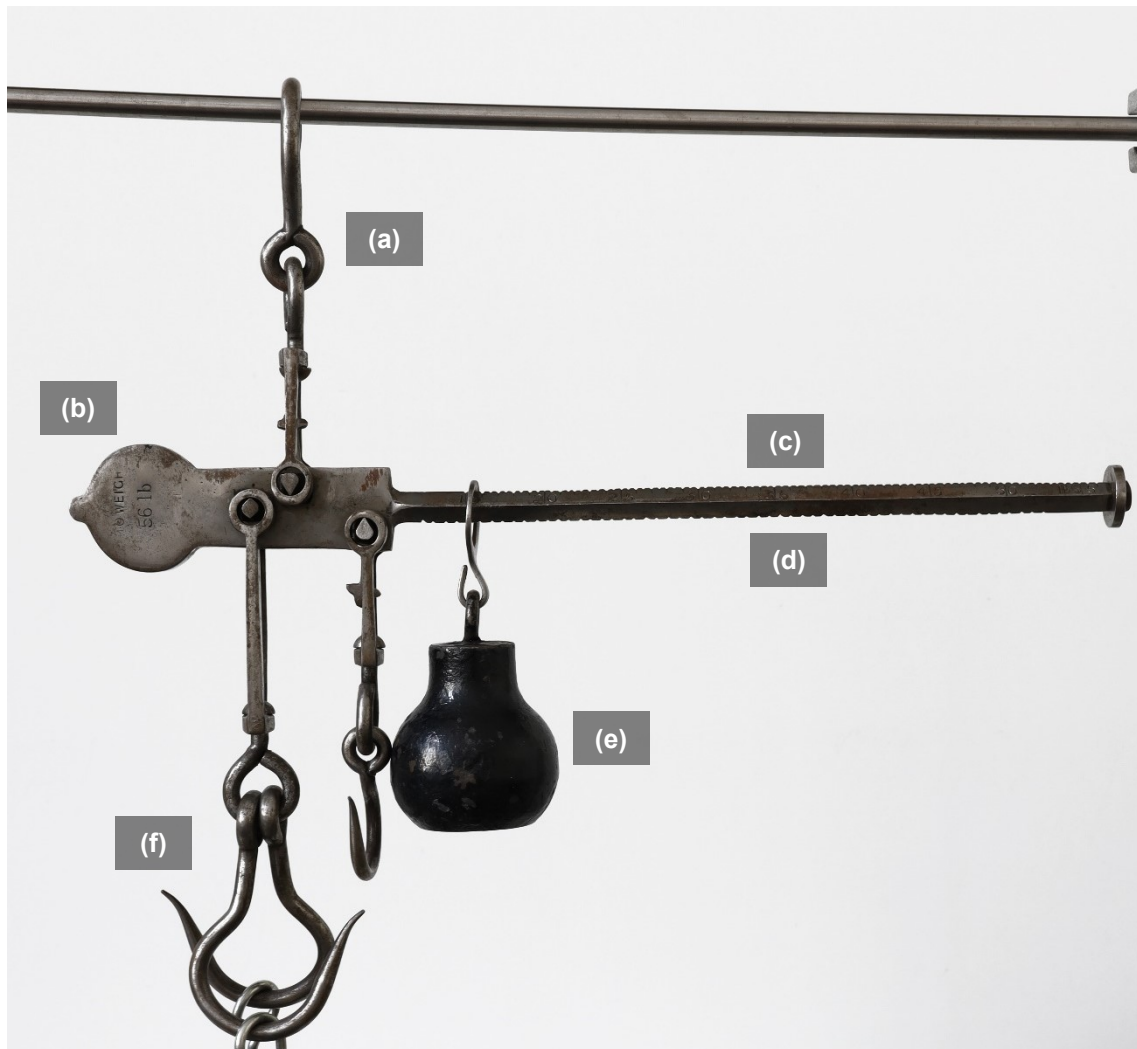


Abb. 40: C. W. Brecknell – Römische Schnellwaage

(a) Haken als Mittelachse, (b) festes Gegengewicht, (c) Skala 15 lb – 55 lb, (d) Skala 1 lb – 15 lb, (e) Laufgewicht, (f) Haken für Last

Damit diese Modi trotz des fest angebrachten Gegengewichts wirksam werden, sind insgesamt drei Haken an verschiedenen Lagerpunkten angebracht, von denen jeweils einer die Mittelachse bildet und einer als Endachse für die Anbringung der zu wägenden Last dient, während der dritte frei bleibt. So kommen je nach Ausrichtung der Waage verschiedene Balkenlängen und gemäß (20) verschiedene Verhältnisse zwischen Last und Laufgewicht zum Einsatz. Rechnerisch ergibt sich damit für das Laufgewicht eine Masse von rund $2,77 \text{ lb} \approx 1,25 \text{ kg}$.

Die Waage besteht aus geschmiedetem Eisen, wobei der gesamte Balken aus einem Stück gefertigt ist. Die einzelnen Lager sind jeweils mit zwei keilförmigen Schneiden auf beiden Seiten des Balkens ausgestattet, welche die jeweils korrekte Ausrichtung der Gelenke in den beiden Modi anzeigen. Ringe um diese bilden die Pfannen und sichern gleichzeitig gegen ein Auseinanderfallen der Teile. Das schwarzgefärbte Laufgewicht ist an einem Ring-Haken-Gelenk befestigt, welches mittels einer Öse am langen Balkenarm hängt und in die Kerben der Skalierung greift. Am Ende der Skala ist eine Sicherungsscheibe mit einem größeren Durchmesser als jenem der Öse angebracht, welche ein Abrutschen des Laufgewichts verhindert.

Die Ablesung der Waage funktioniert mittels zweier lotrechter Zeiger, welche an beiden Seiten des Balkens für die beiden Messmodi angebracht sind. Dabei dient der Schäkel der Aufhängung, welcher immer eine lotrechte Stellung einnimmt, als Referenz für den Vergleich mit dem Zeiger. Sind beide Teile deckungsgleich bzw. parallel zueinander ausgerichtet, ist der Balken im stabilen Gleichgewicht, und das Messergebnis kann an der Stellung des Laufgewichts abgelesen werden.

4.4.2. Versuch und Diskussion

Für die Durchführung von Wägungen wurde eine geeignete Aufhängung aus Stativmaterial aufgebaut und am Arbeitstisch befestigt. Anschließend wurden in beiden Modi je zwei Messungen durchgeführt, um exemplarische Aussagen über die Qualität der Waage treffen zu können. Alle dabei festgestellten Abweichungen lagen im Bereich der Messunsicherheit bzw. Empfindlichkeit, welche gemäß den beiden

Skalen $0,5 \text{ lb} \approx 0,23 \text{ kg}$ und $0,25 \text{ lb} \approx 0,11 \text{ kg}$ beträgt. Die Dauer einer Wägung ist aufgrund der großen Massen und eher grob gearbeiteten bzw. abgenützten Schneiden kurz, da sich nach einem nahezu aperiodischen Pendeln das stabile Gleichgewicht einstellt.

An den großen Haken dieser Waage lassen sich verschiedene Lasten problemlos befestigen, der vornehmliche Einsatzzweck eines solchen Modells war jedoch vermutlich das Wiegen verschiedener Fleischstücke oder ganzer Tiere im fleischverarbeitenden Betrieb oder auf Märkten, weshalb das Messinstrument im Inventarverzeichnis auch als „Fleischerwaage“ aufgeführt wird. Neben schnellen Wägungen bzw. Vorwägungen lassen sich mit diesem Modell aber auch die Prinzipien des Hebelgesetzes veranschaulichen. Die robuste Bauweise ist ein Grund für den guten Zustand des Objekts, dessen Handhabung trotz der Umrechnung in die angloamerikanische Masseneinheit einfach vonstattengeht und leicht verständlich ist.

4.5. Kraft – Tafelwaage

4.5.1. Aufbau und Beschreibung

Die vom Wiener Mechaniker Carl Eduard Kraft gebaute Tafelwaage (siehe Abb. 41) kann aufgrund fehlender Inventarverzeichnisse bzw. sonstiger Angaben nur grob (um 1900) zugeordnet werden. Sie wurde in der Lehrmittelsammlung des Christian-Doppler-Hörsaals an der Fakultät für Physik der Universität Wien vorgefunden und ist zuletzt der Lehrtätigkeit von Univ.-Prof. Dr. Ferdinand Stangler zuzuschreiben. Die Werkstatt für Messinstrumente des Herstellers C. E. Kraft etablierte sich 1823 in Wien (Jenemann, 1987, S. 20), was somit als frühestmögliches Baujahr dieser Waage anzuführen ist. Am Gehäuse ist der Schriftzug 10 lb eingeprägt, welcher vermutlich die maximale Belastung in der Einheit Wiener Pfund mit umgerechnet rund 5,6 kg angibt (Reichsgesetzblatt für die im Reichsrathe vertretenen Königreiche und Länder, Jahrgang 1892, 1892).

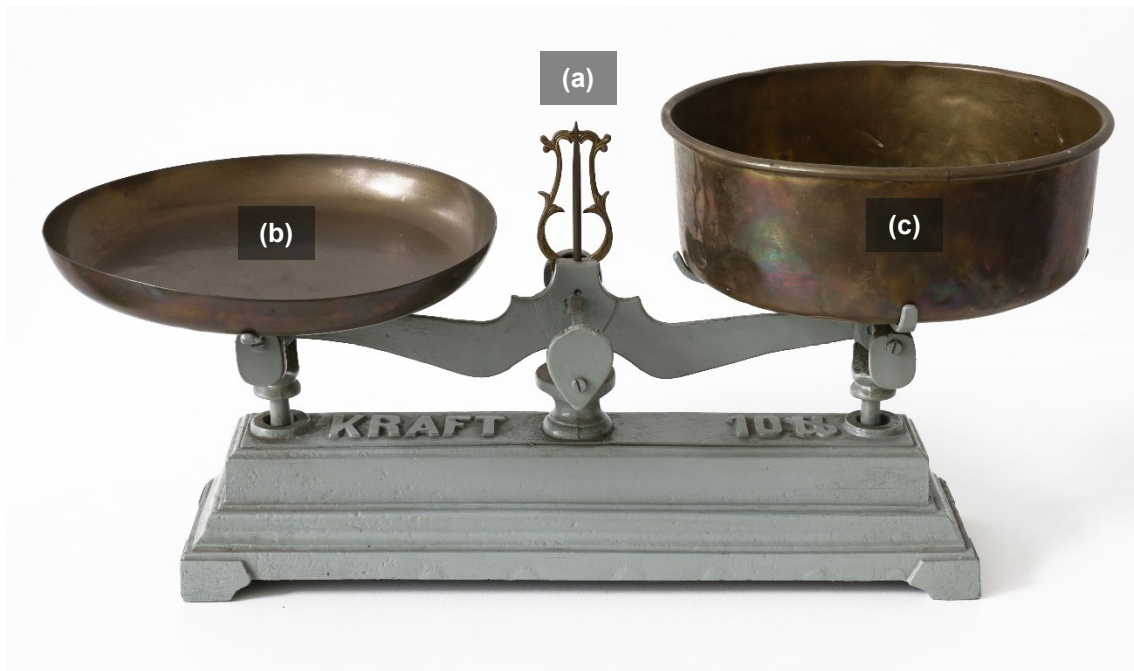


Abb. 41: Kraft – Tafelwaage

(a) Zunge mit Skalierung, (b) tiefe Schale, (c) hohe Schale

Der gusseiserne Sockel bzw. das Gehäuse der Mechanik, welches mit grauem Lack überzogen ist, steht auf vier festen Füßen. Aufgrund der geschlossenen Bauweise können keine weiteren Aussagen über das Innere gemacht werden, wo sich vermutlich eine Dämpfungseinrichtung befindet. Der (Haupt-)Balken, der nicht arretiert werden kann, liegt jedoch frei und ist geschwungen ausgeführt. Auf diesem lagern vierarmige Halterungen, welche die aus Messing gefertigten Schalen – bei dieser Bauart auch Tafeln genannt – tragen, weshalb man von einer overschaligen Waage spricht. Die beiden Schalen sind unterschiedlich hoch, haben jedoch die gleiche Masse, wodurch der Hebel mit leeren Tafeln das stabile Gleichgewicht einnimmt. In der Mitte des Balkens ist eine senkrecht nach oben gerichtete Zunge angebracht, die vor einer kunstvoll verzierten Skala mit zwei Teilstrichen schwingt. Somit kann bei Kenntnis der Empfindlichkeit trotz der einfachen Ausführung eine etwaige Abweichung vom Gleichgewicht quantitativ bestimmt werden. Unter der Zunge befindet sich das Lager der Mittelachse, das jedoch wiederum nicht einsehbar ist.

4.5.2. Versuch und Diskussion

An diesem Modell wurden verschiedene Wägungen in einem Messbereich bis 100 g durchgeführt. Dabei konnte eine Empfindlichkeit von rund 100 mg festgestellt werden, wobei man davon ausgehen kann, dass die Waage für praktische Messungen im Haushalt mit bis zu 1 g Empfindlichkeit gebaut wurde. Für die Verwendung als Küchenwaage spricht auch die hohe rechte Schale, in die beispielsweise Mehl oder andere Koch- und Backzutaten bequem eingefüllt und mit passenden Massestücken auf der zweiten Schale aufgewogen werden können.

Die Funktion der Waage ist nach wie vor gegeben, weshalb sie mit einem passenden Gewichtssatz noch Verwendung finden könnte. Daneben ist die geringe Schwingungsdauer für einfache Wägungen, wie sie beispielsweise in einer Bäckerei durchgeführt werden, nützlich. Als Schauobjekt und Zeitzeugnis der Wiener Hofmechaniker aus Zeiten der Monarchie ist das Modell eine sinnvolle Ergänzung der historischen Waagensammlung.

4.6. C. Schember & Söhne – Tafelwaage

4.6.1. Aufbau und Beschreibung

Die Tafelwaage des Herstellers C. Schember & Söhne aus Wien/Budapest (siehe Abb. 42) wurde um 1900 angeschafft und dem (späteren) II. Physikalischen Institut der Universität Wien zugeordnet. Da die Söhne von Conrad Schember im Jahr 1873 in das Unternehmen eintraten und ein Jahr später in die ungarische Hälfte der Monarchie expandiert wurde (*100 Jahre Schemberwaagen*, 1952, S. 14 ff.), kann das Modell mit dem Schriftzug „Wien Budapest“ am Emblem mit frühestens 1874 datiert werden. Der Firmengründer ging durch die Schule des Werks von H. D. Schmid, was sich auch in den Erzeugnissen widerspiegelt (Schobert, 1994, S. 271). Unter den beiden Schalen sind getrennt voneinander „5“ und „K“ eingeprägt, was entweder die Modellbezeichnung der Waage ist oder ihre Maximalbelastung mit 5 kg angibt.



Abb. 42: C. Schember & Söhne – Tafelwaage

(a) Zunge, (b) Nebenhebel, (c) Haupthebel, (d) Lastträger

Das Modell steht auf zwei bogenförmigen Fachwerkträgern, die das Untergestell bilden und die Waage in Skelettbauweise erscheinen lassen. Aufgrund der guten Sicht auf die Mechanik, ist die Zuordnung als Pfanzer-Tafelwaage möglich, bei welcher neben dem Haupthebel je ein Nebenhebel unter den Schalen angebracht ist. Die Lastträger stützen sich jeweils am Haupthebel bzw. Balken und am gegenüberliegenden Nebenhebel, welche über Koppeln miteinander verbunden sind. So können exzentrische Belastungen besser kompensiert werden, was in weiterer Folge die Schwingungsdauer verkürzt (Nater et al., 2008, S. 168 f.). Die Rahmentteile und Lastträger sind mit einer roten Beschichtung versehen, während die übrigen Teile der Mechanik aus blankem oder eventuell vernickeltem Gusseisen bestehen. Die beiden baugleichen Schalen bestehen aus Messing.

Über die Lager der verschiedenen Achsen kann keine genaue Aussage getroffen werden. Hingegen ist die Zunge, welche senkrecht nach oben gerichtet über der Mittelachse angebracht ist, deutlich sichtbar und vergleichsweise lange. Sie spielt vor einer in der Mitte geschwungenen Zeigermarkierung der gleichen Länge. Wiederum ist aufgrund einer fehlenden Skala nur der Vergleich zwischen Zunge und Referenz zur Feststellung des stabilen Gleichgewichts möglich. Wie bei den

meisten Tafelwaagen üblich, ist auch dieses Modell nicht mit einer Arretierungsvorrichtung versehen.

4.6.2. Versuch und Diskussion

Zur experimentellen Erprobung der Waage wurden einige Wägungen im Bereich bis 100 g durchgeführt, bei welchen eine Empfindlichkeit von rund 500 mg festgestellt wurde. Generell ist das Modell äußerlich abgenutzt und in einem dem Alter entsprechenden Zustand, jedoch ist die Funktion gegeben und für ihren letzten Einsatz im Anfängerpraktikum der Fakultät geeignet gewesen. Durch die offene Bauweise lassen sich die Prinzipien der Hebelwaage bzw. im speziellen der Ausführung nach Pfanzeder gut veranschaulichen. Deshalb zeichnet sich die Waage als Lehrmittel aus und kann darüber hinaus für Vorwägungen mit einer Empfindlichkeit bis zu 1 g ohne Einschränkungen genutzt werden.

5. Spezielle Waagen

Neben Waagen, die zwei verschiedene Massen bzw. deren Gewichtskräfte miteinander vergleichen, existieren auch Messgeräte, die zur Bestimmung einer unbekannten Masse elektrostatische oder elektrodynamische Kräfte einsetzen. Diese beruhen ebenfalls auf dem Grundprinzip der Balkenwaage, jedoch kommen dabei andere Messmethoden und verschiedene Zusatzeinrichtungen zum Einsatz, welche auf den im Kapitel 2.3 beschriebenen Grundlagen basieren. Neben diesen wird auch ein Modell beschrieben, das zur direkten Bestimmung der Massendichte konzipiert ist. Unter dem Überbegriff der speziellen Waagen sind daher all jene Messgeräte in der Bauart einer Waage zusammengefasst, die in der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien ausgestellt sind und nicht den Kapiteln 3 und 4 zugeordnet werden können.

5.1. G. Westphal – Mohr'sche Waage

5.1.1. Aufbau und Beschreibung

Die Mohr'sche Waage des Herstellers Georg Westphal Präzisionstechnik aus Celle (siehe Abb. 43) wurde im Jahr 1913 vom II. Physikalischen Institut der Universität Wien erworben. Es handelt sich dabei um ein Modell, das von einem der beiden Erfinder dieser hydrostatischen Waage konstruiert und von seinem Unternehmen produziert wurde.

Die Säule der Waage, welche teleskopisch ungefähr auf die doppelte Länge ausgezogen und mit einer Rändelschraube fixiert werden kann, steht auf einem zylindrischen Sockel, der in einer ebenfalls zylinderförmigen und breiteren Fußplatte endet. Der oben mittig angebrachte Querträger schließt mit einem Halbkreisbogen auf der einen Seite ab und hält die Pfanne der Mittelachse auf der anderen Seite. Diese Teile sind wie der Rest der Waage inklusive den Lagerelementen aus Messing gefertigt, jedoch im Gegensatz dazu mit Zaponlack überzogen. Der Balken ist als gerader Metallstab ausgeführt, dessen Querschnitt sich an der Mittelachse ändert. Am kürzeren und dickeren Balkenarm ist ein festes Gegengewicht sowie ein

Laufgewicht mit Rändelschraube zur Justierung der Gleichgewichtslage montiert. Am Ende des Gegengewichts ist ein waagrechter Metaldorn angebracht, welcher mit einem gegenüberliegenden Dorn am Halbkreisbogen die Ablesevorrichtung der Waage bildet und die Horizontalstellung des Balkens anzeigt. Der längere Arm ist mit einer neunteiligen Skalierung mit eingepprägten Zahlen sowie Kerben versehen und trägt einen Haken an seinem Ende.



Abb. 43: G. Westphal – Mohr'sche Waage

(a) Dorne zur Ablesung, (b) Laufgewicht, (c) kleinster und größter Reiter, (d) Rändelschraube für Teleskopauszug, (e) Reimann'scher Senkkörper, (f) mittlerer und größter Reiter

Der Reimann'sche Senkkörper aus Glas ist 5 g-verdrängend und beinhaltet ein Quecksilberthermometer mit einer Skala von $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Schritten von $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Er ist mittels eines Drahts mit einem Durchmesser von $(105 \pm 1)\text{ }\mu\text{m}$ an einem Metallhaken befestigt, welcher am Balken eingehängt werden kann. Insgesamt vier Reiter sind der Waage beigelegt, wobei der größte bzw. jener mit der größten Masse zwei Mal vorkommt. Drei Stück davon bestehen aus Messing, während der kleinste

aus einem silbernen Metall gefertigt ist. Die Masse der beiden Reiter, welche die erste Dezimale des Messergebnisses anzeigen, beträgt je $(4,9997 \pm 0,0003)$ g, jene der zweiten Dezimale $(0,5006 \pm 0,0003)$ g und jene der dritten Dezimale $(0,0508 \pm 0,0003)$ g.

5.1.2. Versuch und Diskussion

Bei der Vorbereitung der Versuchsmessungen und dem Reinigen der Waage ist der Draht, an dem der Senkkörper befestigt ist, gerissen. Es wird vermutet, dass es sich dabei um einen Silberdraht handelte, jedenfalls wurde dieser durch einen Platindraht ähnlichen Durchmessers ersetzt. Für die anschließenden Messungen wurden ein Erlenmeyerkolben mit einem Volumen von 100 ml, welcher zur Erhöhung auf einen Aluminiumquader gestellt wurde, sowie ein Messzylinder mit einem Volumen von 25 ml verwendet.

Alle Messungen wurden nach der Anleitung des Physikalischen Praktikums von Steinke (1943, S. 14) durchgeführt. Dabei wurde zuerst mit angehängtem Senkkörper durch Justieren des Laufgewichts die Nullpunktslage eingestellt. Anschließend wurde der Erlenmeyerkolben mit destilliertem Wasser befüllt und der Senkkörper vollständig eingetaucht. Durch Aufsetzen der Reiter wurde der Balken wieder in die Gleichgewichtslage gebracht und über die Skalierung eine Dichte von $\rho_w = 0,997 \text{ kg/dm}^3$ bei einer Temperatur von 19°C abgelesen. Somit ergibt sich durch einen Vergleich mit dem in der Literatur angeführten Wert von $\rho_w = 0,998 \text{ kg/dm}^3$ bei der gleichen Temperatur (Schenk et al., 2014, S. 380) ein Korrekturfaktor von rund 1,001, welcher auf alle nachfolgenden Messungen angewandt wurde.

Die mit dem Korrekturfaktor multiplizierten Messergebnisse verschiedener Flüssigkeiten sind in Tab. 4 angeführt. Die Proben wurden in eines der beiden Glasgefäße eingefüllt, welche vor den Messungen jeweils mitsamt dem Senkkörper gespült und anschließend getrocknet wurden.

Tab. 4: Mohr'sche Waage: Messergebnisse

Stoffbeschreibung	Dichte in kg/dm³ ($\pm 0,001$ kg/dm³)	Temperatur in °C ($\pm 0,5$ °C)
Isopropanol (75, 15 Vol.-%)	0,872	19
Brennspiritus	0,807	20
Weingeist	0,874	21
Paraffin dickflüssig	0,886	19

Bei den verschiedenen Messungen ist aufgefallen, dass die Flüssigkeiten eine gute Dämpfung der Schwingung hervorrufen, welche dementsprechend abhängig von ihrer Dichte, jedoch auch vom verwendeten Gefäß ist. So konnte bei Verwendung des Messzylinders, der einen kleineren Durchmesser aufweist, eine kürzere Abklingzeit beobachtet werden als beim Erlenmeyerkolben.

Die Waage ist ohne sichtbare Abnützungerscheinungen erhalten und die Funktion ohne Einschränkungen gegeben. Durch die zuvor beschriebene Eichung und die Anwendung des daraus erhaltenen Korrekturfaktors kann das Messgerät zur Dichtebestimmung verschiedener Flüssigkeiten oder auch fester Stoffe in zerkleinerter Form, unter Zuhilfenahme geeigneter Flüssigkeiten, eingesetzt werden. Dabei muss zwar mit dem fragilen Senkkörper und seiner Aufhängung sorgsam umgegangen werden, jedoch ist der restliche Aufbau einfach gehalten und ermöglicht deshalb eine simple Bedienung. Da die Säule verlängert werden kann, sind auch Messungen von Flüssigkeiten in größeren Behältnissen möglich.

5.2. J. Eiss – Spannungswaage

5.2.1. Aufbau und Beschreibung

Die Spannungswaage des Herstellers Josef Eiss (siehe Abb. 44), einem Mechaniker mit der Anschrift Stumpergasse 10 in Wien VI, wurde im Jahr 1882 vom Physikalischen Institut der Universität Wien erworben. Über den Fabrikanten wurde lediglich ein einziger Verweis in einem Werk aus 1905 gefunden, welcher auf einen

Eintrag in der Central-Zeitung für Optik und Mechanik 4, 145 bis 146 verweist (Lehmann, 1905, S. 1325). Letztere ist leider nicht mehr auffindbar, weswegen keine Herstellerdaten zur Waage verfügbar sind. Die Grundplatte aus Holz steht auf einem fest montierten Fuß an der Rückseite und zwei Stellfüßen an der Vorderseite, welche zur Ausrichtung der Waage dienen. Hierfür sind jedoch weder Lot noch Libelle angebracht. Auf dieser Platte ist das Glasgehäuse aufgesetzt und mit vier Holzdübeln fixiert. Es wird von hölzernen Rahmenteilen eingefasst und ist mit einem Vorderschieber versehen, der an der Oberseite versperrt werden kann und stufenweise mittels eines Schnappers arretierbar ist.

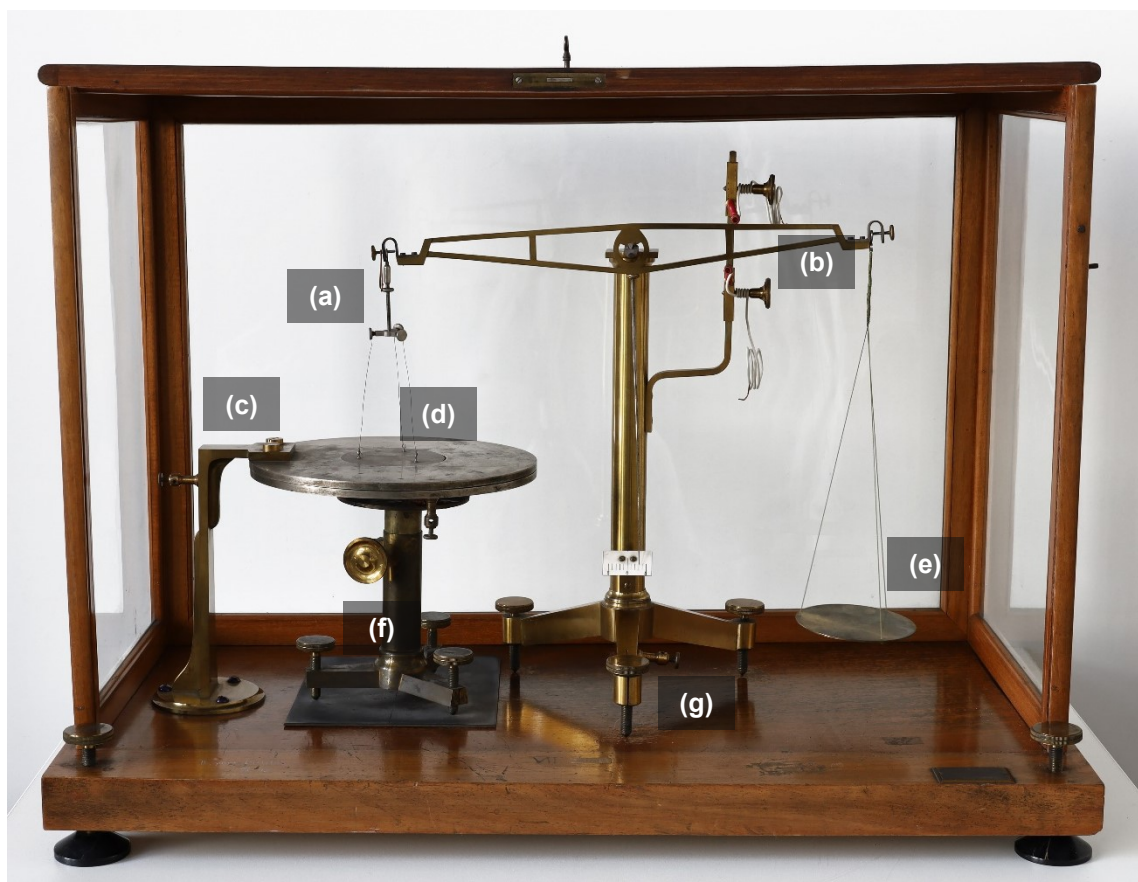


Abb. 44: J. Eiss – Spannungswaage

(a) Kranz mit Befestigungsdrähten, (b) Schaltermechanismus, (c) Halterung des Schutzrings, (d) kleine Kondensatorplatte, (e) Schale, (f) Hubtisch, (g) Schraubklemme

Im Inneren des Gehäuses ist nur die Halterung des Schutzrings fest mit der Grundplatte verschraubt, während der Hubtisch der unteren Kondensatorplatte und die Waagsäule mit jeweils drei spitzen Stellfüßen versehen sind und frei bewegt werden können. Zur Isolierung sind die Füße des Hubtisches mit einer Gummimatte unterlegt. Die metallischen Teile bestehen größtenteils aus Messing und sind teilweise mit

Zaponlack überzogen, während die Kondensatorplatten und der Schutzring aus einem silberfarbenen Metall gefertigt sind. Der Balken, welcher nicht arretiert werden kann, ist trapezförmig ausgeführt und weist zwei vertikale Verstrebungen auf. Sein Mittellager besteht aus silbernem Metall, wobei die an der Säule befestigte halbrunde Pfanne einen kleinen Radius aufweist, wodurch ein Auseinandergleiten ausgeschlossen wird. Die beiden Endlager bestehen aus horizontal verlaufenden Rändelschrauben, auf welche die Gehänge mit einem Haken eingehängt und so längs des Balkens justiert werden können. Unter der Mittelachse ist die Zunge montiert, welche mit einem schraubbaren Laufgewicht zur Einstellung der Empfindlichkeit versehen ist und vor einer weißen Skala mit fünf Teilstrichen spielt.

Am rechten Balkenarm ist die Schale über drei Schnüre befestigt. Sie besteht aus einer runden Messingscheibe und weist keine Erhebung am Rand auf. Am Haken des linken Gehänges ist eine lotrecht verlaufende Gewindestange montiert, auf die ein Kranz mit drei Enden aufgeschraubt ist (siehe Abb. 45 links). Diese sind mit horizontalen Bohrungen versehen, in die konische Metallstifte mit Rändelgriffen gesteckt werden. Die drei Haltedrähte der oberen Kondensatorplatte, welche einen Durchmesser von $(74,0 \pm 0,5)$ mm aufweist, sind um diese Stifte gewickelt und können somit fein justiert werden, um die Platte parallel zur zweiten auszurichten. Alle Platten sowie der Schutzring haben eine Stärke von $(5,5 \pm 0,5)$ mm.

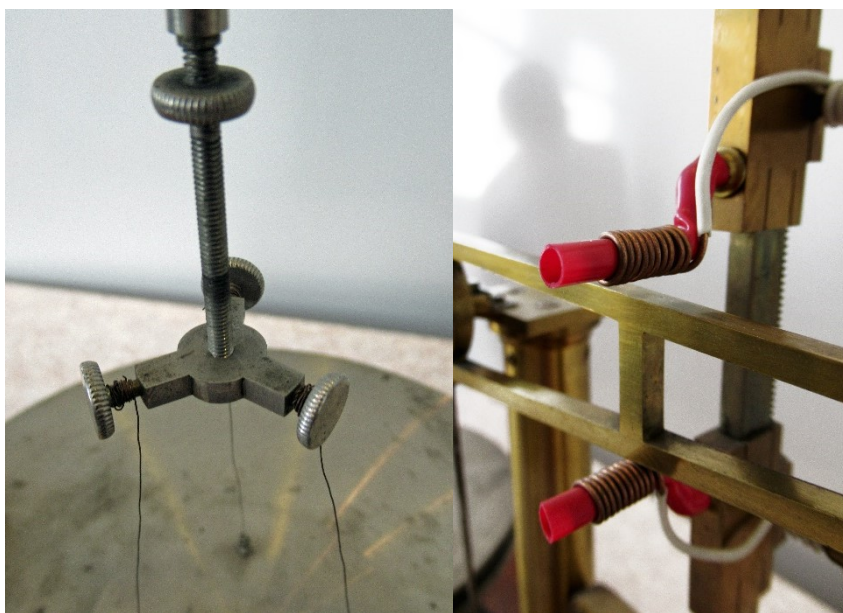


Abb. 45: J. Eiss – Spannungswaage: Detailansichten

links: Kranz mit Haltedrähten; rechts: Schaltermechanismus

Die untere Kondensatorplatte mit einem Durchmesser von $(206,0 \pm 0,5)$ mm, der jenem des Schutzrings gleicht, ist auf einem Hubtisch montiert. Dieser kann über einen Zahnstangenantrieb, der mit einem Rändelgriff versehen ist, vertikal verstellt werden, um den Abstand zwischen den Platten zu justieren. Unten an der großen Platte ist eine Schraubklemme zum Anschluss einer Leitung angebracht. Weiters sind Klemmen an der Halterung des Schutzrings und an einem Fuß der Waagsäule montiert. Parallel zur Säule der Waage ist in der Mitte des rechten Balkenarms eine Vierkantstange montiert, auf welcher je eine Querstange ober- und unterhalb des Balkens befestigt ist (siehe Abb. 45 rechts). Diese können wiederum mit Hilfe von Zahnstangenantrieben auf- und abbewegt werden. Auf die Stangen sind Isolierungen aus rotem Kunststoff aufgesteckt, die jeweils mit der Kupferseele eines Drahts umwickelt sind. Die Enden der Drähte liegen ebenfalls frei und dienen somit als Kontakte für einen Schaltermechanismus, der anstatt der Klemme am Fuß des Dreibeins für den Anschluss der oberen Kondensatorplatte verwendet werden können.

5.2.2. Versuch und Diskussion

Bei der Aufstellung der Waage stellte zunächst die horizontale Ausrichtung eine Herausforderung dar, da sich die Grundplatte und auch das Gehäuse durch den Schwund des Holzes verformt haben und deshalb die Wasserwaage nicht aufgelegt werden konnte. Stattdessen wurde die Oberkante der Waagsäule als Referenz verwendet und mit den drei Stellfüßen ausgerichtet. Analog dazu wurde beim Hubtisch vorgegangen, während an der Halterung des Schutzrings keine Anpassungen vorgenommen werden konnten. Zum Schutz der hölzernen Grundplatte wurden die spitzen Füße der Säule zuvor mit Cent-Münzen und die Füße des Tisches zur besseren Isolation zusätzlich mit Hartpapier- (Pertinax) und Glimmerplatten unterlegt. Anschließend wurden aus Kupferdraht kleine Stücke zurechtgebogen und an den Schraubklemmen befestigt, um daran die Messleitungen mit Krokodilklemmen anschließen zu können.

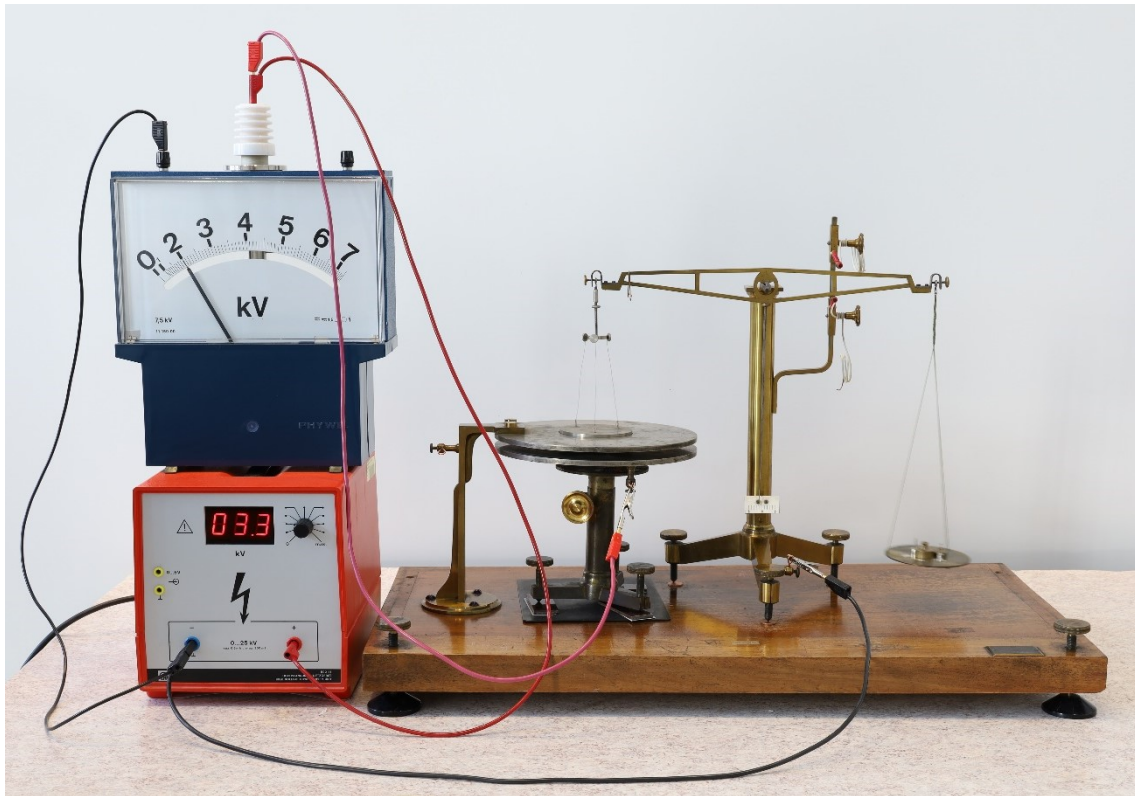


Abb. 46: J. Eiss – Spannungswaage: Versuchsaufbau

Für die danach folgenden Messungen wurde das Gehäuse der Waage abgenommen. Der Aufbau (siehe Abb. 46), bestehend aus den zuvor beschriebenen Elementen der Waage, einem Hochspannungsnetzgerät mit der Bezeichnung LD 522 41, einem Demonstrationsvoltmeter des Herstellers Phywe und verschiedenen Messleitungen, wurde gemäß den Schaltskizzen in Abb. 47 aufgebaut. Der linke Stromkreis stellt dabei die Variante mit dem Anschluss der kleinen Kondensatorplatte über die Klemme am Fuß dar, der rechte Stromkreis die Variante mit dem Schaltermechanismus.

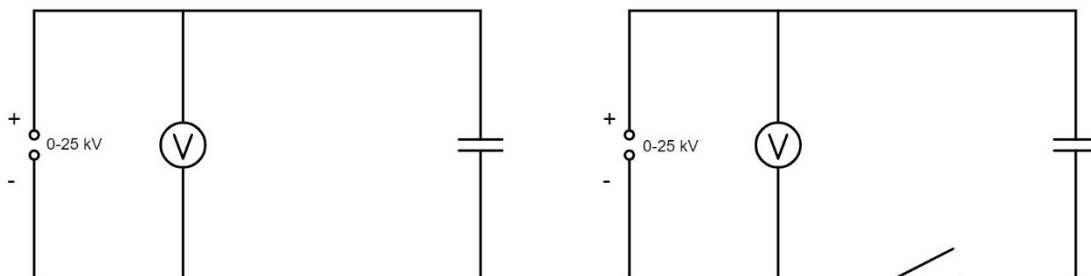


Abb. 47: J. Eiss – Spannungswaage: Schaltskizzen

Zunächst wurde am Kondensator ein Plattenabstand von $(8,0 \pm 0,5)$ mm eingestellt und dieser mit verschiedenen Spannungen aufgeladen. Im Durchschnitt hat er sich bei den vorherrschenden Umgebungsbedingungen (trockene Heizungsluft bei rund 20 °C am 10.02.2023) nach einer Zeit von rund 10 s entladen, ohne die zusätzliche Isolierung unter den Standfüßen hingegen bedeutend schneller. Danach wurde der Balken durch Auflegen von Massestücken auf die Schale in das Gleichgewicht gebracht, welches bei 37,1 g erreicht wurde und somit der Masse der kleinen Kondensatorplatte entspricht. Für eine Messreihe wurden dann verschiedene Zusatzmassen in einem Bereich bis 800 mg aufgelegt und jeweils die Spannung am Netzgerät langsam erhöht, bis sich das Gleichgewicht einstellte. So wurden insgesamt neun Messpunkte erhalten und in QtiPlot die aufgelegte Zusatzmasse gegen die abgelesene Spannung aufgetragen (siehe Abb. 48).

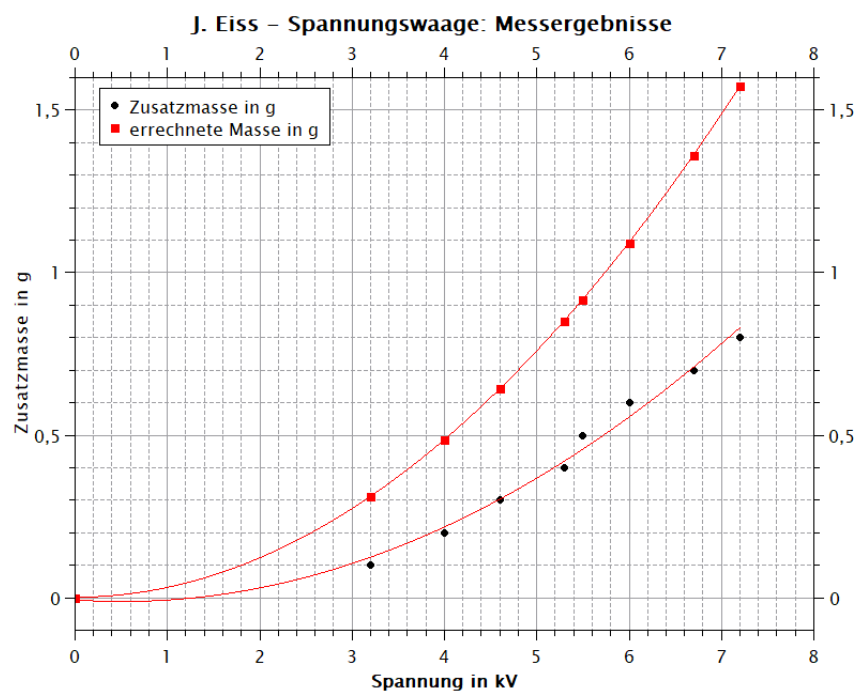


Abb. 48: J. Eiss – Spannungswaage: Diagramm zu den Messergebnissen

Anhand der Regressionskurven zweiter Ordnung lässt sich ein quadratischer Zusammenhang zwischen Spannung und Masse erkennen. Die Messergebnisse (schwarze Punkte) passen in guter Näherung zum quadratischen Modell, weichen jedoch von den gemäß (26) errechneten Werten (rote Punkte) ab. Diese Differenz könnte äußeren Einflüssen wie der Luftfeuchtigkeit, aber auch der nicht wirklich perfekten elektrischen Isolation der Kondensatorplatten geschuldet sein, welche in eine

genaue Rechnung durch Korrekturfaktoren einbezogen werden müssten. Weiters hat sich die merkbare Reibung der Mittelachse als störend erwiesen, da durch das allmähliche Erhöhen der Spannung eine gewisse Schwelle überwunden werden muss, um den Balken in Bewegung zu versetzen und dieser dann leicht über die Gleichgewichtslage hinaus kippt.

Am Ende der Versuchsreihe wurde die zweite Variante der Schaltung (siehe Abb. 47 rechts) aufgebaut und getestet. Dabei wurde die Messleitung am Draht der unteren Querstange angebracht und diese so justiert, dass ein Kontakt mit dem Balken besteht. Lädt man dann den Kondensator durch Anlegen der Spannung auf, kippt der Balken durch die Anziehung zwischen den Platten nach links und der Stromkreis wird unterbrochen. Nach der Entladung fällt der Hebel wieder nach rechts und die Aufladung beginnt neulich. Bei richtiger Justierung der Querstangen können auf diese Weise die Spannung genauer eingestellt und so eventuell präzisere Ergebnisse erhalten werden, was jedoch auch mit einer längeren Messdauer verbunden ist.

Zusammenfassend kann die Waage als funktionstüchtig und dem Alter entsprechend gut erhalten bewertet werden. Sämtliche mechanische Komponenten lassen sich problemlos bewegen und abgesehen von der Schneide konnten keine relevanten Abnützungen festgestellt werden. In den Versuchen konnte der theoretische Zusammenhang zwischen Masse und angelegter Spannung qualitativ demonstriert werden. Die präzise Handhabung des Geräts erfordert jedoch Übung und eventuell weitere Maßnahmen zur elektrischen Isolation, sowie eine Möglichkeit zur feineren Justierung der Spannung. Dennoch ist das Modell als Demonstrationsobjekt gut geeignet und zeigt die Grundprinzipien moderner Spannungswaagen auf. Diese können als abgewandelte Formen der Kibble-Waage zum Einsatz kommen, um damit Kräfte auf die Planck'sche Konstante zurückzuführen, wobei statt einer elektromagnetischen eine elektrostatische Kraft zur Kompensation verwendet wird (Rothleitner, 2021, S. 242). Die Fähigkeit, kleine Massen bzw. Kräfte zu bestimmen, kann auch dafür genutzt werden, den Photonendruck von Laserlicht zu messen (Shaw et al., 2019, S. 1), wodurch das historische Gerät in einen aktuellen Zusammenhang gerückt wird.

5.3. Hartmann & Braun – Galvanometer No. 365

5.3.1. Aufbau und Beschreibung

Das vertikale astatische Galvanometer mit der Modellnummer 365 des Herstellers Hartmann & Braun aus Frankfurt am Main (siehe Abb. 49) wurde um das Jahr 1894 vom Chemisch-Physikalischen Institut bzw. dem II. Physikalischen Institut der Universität Wien angeschafft. Es trägt die Trivialbezeichnung „Stromwaage“ und kann daher auch zum Vergleich gravitativer und elektromagnetischer Kräfte herangezogen werden, weshalb das Gerät im Rahmen dieser Arbeit untersucht und in die Beschreibungen aufgenommen wurde. Im Produktkatalog wird angegeben, dass ein Ausschlag des Zeigers von 1° einer Abweichung von rund $5\ \mu\text{A}$ entspricht (Hartmann & Braun, 1894, S. 124), was der Empfindlichkeit der Waage analog zu (12) in elektrischen Einheiten entspricht.

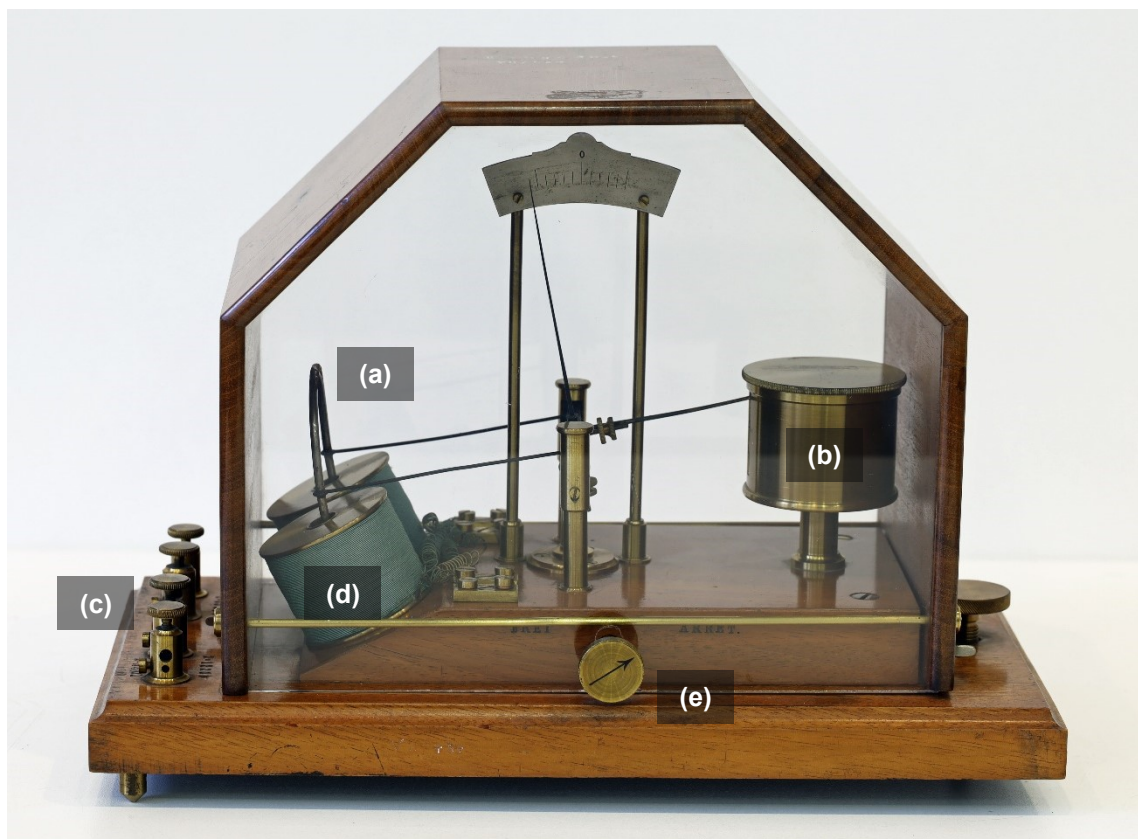


Abb. 49: Hartmann & Braun – Galvanometer No. 365

(a) Hufeisenmagnet, (b) Dämpfungszylinder, (c) Schraubklemmen, (d) Spulen, (e) Knopf für Arretierung

Die hölzerne Grundplatte der Waage steht auf zwei festen Füßen auf der linken und einem Stellfuß auf der rechten Seite, welcher zusammen mit einer separaten Wasserwaage zur Ausrichtung verwendet werden kann. Darauf ist ein Gehäuse mit Seitenteilen aus Holz und einer sechseckigen Vorder- und Rückwand aus Glas aufgesetzt und mit Kassettenhaken arretiert, welche in Ringschrauben auf der Grundplatte greifen. Diese Haube muss abgenommen werden, um an das Innere der Waage zu gelangen, während die Anschlussklemmen und der Drehknopf für die Arretierung auch von außen bedient werden können. Letztere hebt den Balken aus den Lagern, ist jedoch nicht mehr benutzbar.

Der Balken selbst ist anders als bei den meisten bisher beschriebenen Waagen nicht aus einem Stück Metall bzw. zusammengesetzt als Fachwerk ausgeführt, sondern besteht aus mehreren verlöteten Teilen, die in der Horizontalebene angeordnet sind. Zwischen zwei gegenüberliegenden Lagerstellen, welche von Messingteilen verdeckt werden, liegt ein Querbalken aus Metall, der die Mittelachse bildet. An diesem sind auf der linken Seite mit je rund 5 mm Abstand zu den Lagern zwei Metallbügel montiert, welche einen Hufeisenmagneten halten. Rechts in der Mitte ist ein weiterer Bügel angebracht, der eine kreisrunde Metallplatte trägt. Daneben verläuft eine kurze Gewindestange, auf der ein Laufgewicht für die Nullpunktfeineinstellung bewegt werden kann. In der Mitte des Querbalkens ist die feine, konisch gearbeitete Zunge montiert, die im Gleichgewicht senkrecht nach oben zeigt und vor einer fünfteiligen weißen Skala spielt. Alle Teile, die den Balken bilden, sind mit einem schwarzen Überzug versehen, während die übrigen Metallteile der Waage aus Messing bestehen.

Die am rechten Balkenarm montierte Metallscheibe bewegt sich in einem Hohlzylinder aus Messing, welcher unten verschlossen und auf der Grundplatte montiert ist. Dieser kann mit einem Deckel auch von oben verschlossen werden und bildet so eine Dämpfungseinrichtung. Die beiden Enden des Hufeisenmagnets auf der linken Seite münden in zwei Spulen, die tangential zur Bahn des Balkenendes ausgerichtet sind. Diese sind jeweils mit zwei separaten Wicklungen versehen, welche paarweise miteinander verbunden sind, sodass die Enden des Magneten parallel angezogen werden. Der Gesamtwiderstand der Spulen ist mit rund $100\ \Omega$ angegeben (Hartmann & Braun, 1894, S. 124). Die einzelnen Drähte der Spulen verlaufen unter einer Abdeckung bzw. im Inneren der Grundplatte und enden an vier

Schraubklemmen auf der rechten Seite der Waage, wo die beiden Wicklungspaare separat angeschlossen werden können. Dort sind jeweils zwischen zwei Klemmen die Schriftzüge „2 x 1320 W“ und „2 x ca. 40 Ω “ eingeprägt, welche sich auf die Spulen beziehen.

5.3.2. Versuch und Diskussion

Für die Durchführung von Versuchen wurde das Gehäuse der Waage abgenommen. Dabei wurde die Metallscheibe im Messingzylinder lose vorgefunden und dankenswerterweise von der Technikerin Marion Malleck wieder am Balkenarm angelötet. Anschließend konnten aus Kupferdraht wiederum kleine Stücke zurechtgebogen und an den Schraubklemmen befestigt werden, um Messungen zu ermöglichen. Da erste Widerstandsmessungen Werte im Kiloohmbereich ergaben, wurden auch die Verdrahtung und alle Kontaktstellen von der Technikerin überprüft und gegebenenfalls repariert. Die folgenden Messungen haben für das erste Paar an Wicklungen L_{l1} und L_{r1} an den Klemmen A und B einen Widerstand von $(81,9 \pm 0,2) \Omega$ und für das zweite Paar L_{l2} und L_{r2} an den Klemmen C und D einen Widerstand von $(83,9 \pm 0,2) \Omega$ ergeben, was den Angaben auf der Grundplatte entspricht.

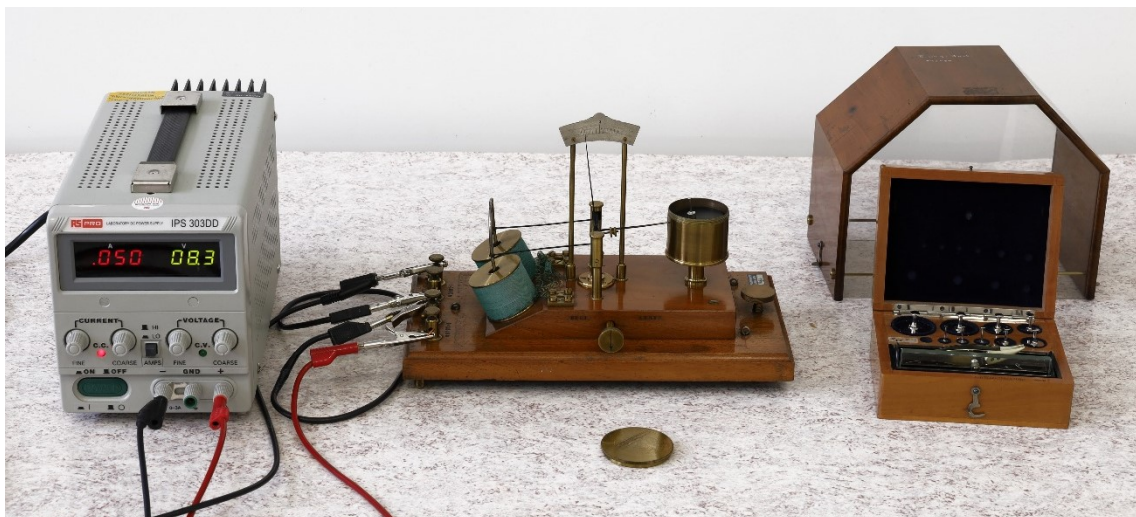


Abb. 50: Hartmann & Braun – Galvanometer No. 365: Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau (siehe Abb. 50), bestehend aus dem Galvanometer, dem Netzgerät IPS 303DD des Herstellers RS-Pro und verschiedenen Messleitungen, wurde gemäß der Schaltskizze in Abb. 51 mit allen Spulenwicklungen in Serie aufgebaut.

Spannung und Stromstärke wurden dabei von den im Netzgerät integrierten Anzeigen abgelesen. Die Metallscheibe im Messingzylinder wurde im Versuch nicht nur als Teil einer Dämpfungseinrichtung, sondern zugleich als Waagschale verwendet. Somit wurde das Gerät zum Vergleich der elektromagnetischen Kraft, welche von den Spulen und dem Permanentmagneten hervorgerufen wird, und der gravitativen Kraft durch die aufgelegte Masse eingesetzt.

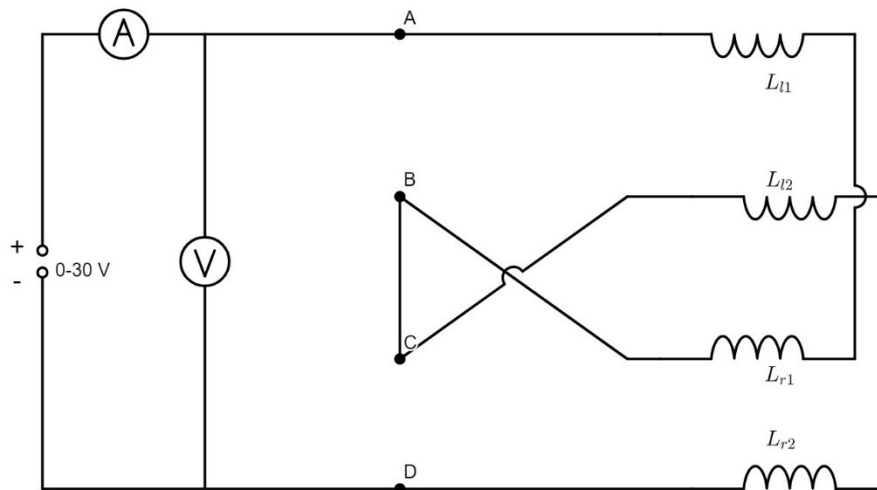


Abb. 51: Hartmann & Braun – Galvanometer No. 365: Schaltskizze

Zunächst wurde dafür der Balken durch Auflegen eines Massestücks von 0,2 g und Justieren des Laufgewichts in das stabile Gleichgewicht gebracht. Anschließend wurden zusätzliche Massestücke aufgelegt und jeweils die Stromstärke mit dem Feintrieb des Netzgeräts so lange erhöht, bis sich wiederum die Gleichgewichtslage einstellte. So wurden insgesamt zehn Messpunkte von Stromstärke und Masse erhalten, welche in QtiPlot gegeneinander aufgetragen wurden und in Abb. 52 zu sehen sind.

Die einzelnen Messpunkte verteilen sich in guter Näherung entlang einer Regressionskurve zweiter Ordnung, wodurch ein quadratischer Zusammenhang zwischen Stromstärke und Masse gezeigt wird. Dieser entspricht auch den theoretischen Zusammenhängen gemäß (31). In diesem Fall ist jedoch kein Vergleich der Messergebnisse mit errechneten Daten möglich, da die Windungszahl der Spulen, die mit feinem Draht umwickelt waren, nicht ermittelt werden konnte, ohne diese eventuell zu beschädigen. Qualitativ gilt der quadratische Zusammenhang zwischen Stromstärke und Masse dennoch als bestätigt. Die Strom-Spannungs-Kennlinie der

einzelnen Messungen ist linear, was bestätigt, dass die Stromstärke im gewählten Bereich für das Gerät angemessen war und dadurch keine etwaigen thermischen Auswirkungen erzeugt wurden.

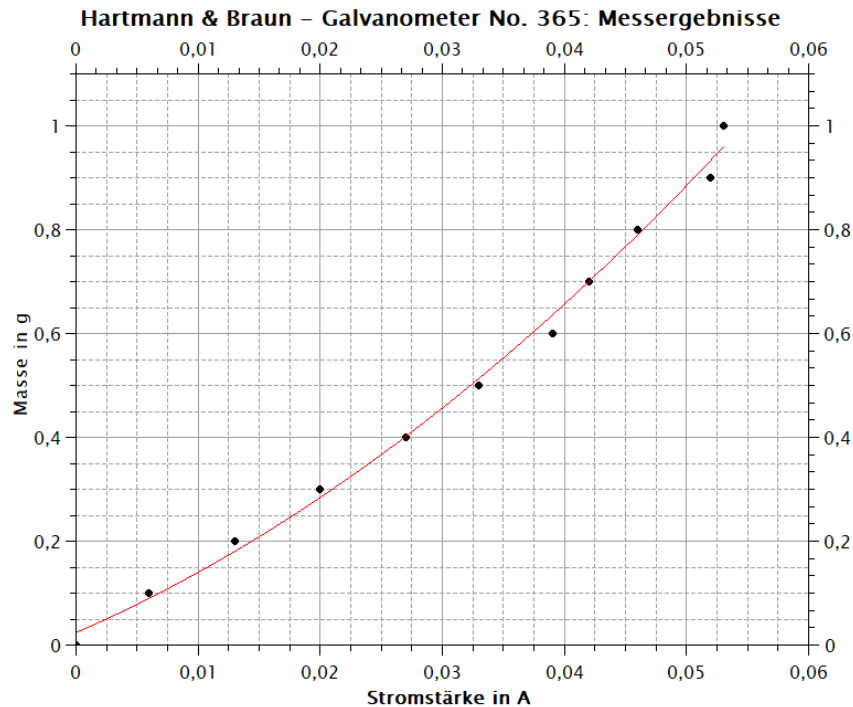


Abb. 52: Hartmann & Braun – Galvanometer No. 365: Diagramm zu den Messergebnissen

Das Messgerät zunächst wurde in einem unbenutzbaren Zustand vorgefunden, ist jedoch nach der Überholung durch die Technikerin (Marion Malleck) abgesehen von der Arretierung, die nicht gänzlich repariert werden konnte, voll funktionsfähig. Äußerlich konnten keine Mängel festgestellt werden, was bei einem Alter von rund 130 Jahren für einen sorgsamen Umgang in der Vergangenheit spricht. Durch die Messungen konnte der theoretisch formulierte Zusammenhang zwischen Stromstärke und Masse experimentell demonstriert werden, wodurch das Gerät nicht nur für Messungen kleiner Ströme, gemäß seines ursprünglich erdachten Einsatzzwecks, sondern auch zur Bestimmung kleiner Massen geeignet ist. Sowohl Galvanometer als auch verschiedene elektromechanische Waagen beruhen auf der Kraftwirkung, welche von stromdurchflossenen Leitern ausgeht, und können in diesem Sinne einer Kategorie von Messgeräten zugeordnet werden.

5.4. Steflitschek – Waltenhofen's Versuch Nr. 1386

5.4.1. Aufbau und Beschreibung

Die Waage mit der Bezeichnung „Waltenhofen's Versuch“ und der Modellnummer 1386 (siehe Abb. 53) aus der Präzisionswerkstätte für physikalische Lehrmittel des Mechanikers Franz Steflitschek mit der Anschrift Millergasse 8 in Wien VI wurde im Jahr 1888 vom Physikalischen Institut der Universität Wien angeschafft. Der Aufbau dient laut der Beschreibung im Produktkatalog dazu „nachzuweisen, dass eine von einem Solenoid umgebene weite Eisenröhre bis zu einer gewissen Stromstärke viel stärker magnetisch wird, als ein massiver Eisenkern von gleicher Länge“ (Steflitschek, 1885, S. 106). Wiederum kann das als Balkenwaage aufgebaute Instrument auch dazu verwendet werden, Gewichtskräfte mit elektromagnetischen Kräften zu vergleichen und wird aus diesem Grund hier beschrieben.

Eine Grundplatte aus dunklem Holz steht auf einem festen Fuß an der Rückseite und zwei Stellfüßen an der Vorderseite der Waage. Das Modell kommt ohne Gehäuse und auch ohne Arretierung aus. In der Mitte der Grundplatte ist die Säule aus schwarz lackiertem Metall angebracht, welche einen vergleichsweise großen Durchmesser aufweist und sich nach oben hin verjüngt. Auf dieser befindet sich ein quaderförmiger Messingblock, der die beiden Lager der Mittelachse trägt. Die Lagerelemente sind aus einem silbernen Metall gefertigt, jedoch größtenteils verdeckt angeordnet.

Der Balken ist aus einem Messingstück gefertigt und weist eine sich zu den Enden verjüngende Form mit Querstreben und geringer Schulterhöhe auf. Seine Oberkante ist horizontal ausgerichtet. Über der Mittelachse ist eine Gewindestange angebracht, auf der ein Justiergewicht montiert ist, das zur Einstellung der Nullpunktlage um die lotrechte Achse gedreht werden kann. Darunter ist die konische Zunge der Waage befestigt. Diese ist mit einem Laufgewicht aus Messing zur Justierung der Empfindlichkeit versehen und spielt vor einer fünfzehnteiligen Messingskala. An beiden Balkenenden sind Ösen aus Stahl angebracht, welche mit je zwei Schrauben an der Oberseite des Balkens befestigt sind. Daran können die Gehänge, die aus Stahlstangen mit Haken an beiden Enden bestehen, und mit Tellern bzw. Schalen versehen sind, angehängt werden.



Abb. 53: Franz Steflitschek – Waltenhofen's Versuch Nr. 1386

(a) Schale, (b) Spule, (c) Schraubklemme, (d) Zahnstangenantrieb, (e) Eisenzylinder

Jeweils lotrecht unter den beiden Endachsen sind Spulen mit einem Innendurchmesser von $(47,7 \pm 0,1)$ mm und einer Länge von $(86,7 \pm 0,1)$ mm angebracht. Sie bestehen aus einem Kupferdraht mit einem Durchmesser von $(1,8 \pm 0,1)$ mm und je 36 Windungen. Beide Spulen sind unten auf Halterringen aus Messing befestigt. Diese verlaufen auf vertikalen Säulen mit Zahnstangenantrieben, sodass die Spulen auf- und abbewegt werden können, wobei links der gerändelte Griff zur Bedienung fehlt. An den Ringen sind je zwei Schraubklemmen montiert, die mit den Enden des Drahts verbunden sind. Unter den Spulen sind Messingbleche auf die Grundplatte aufgeschraubt, die das Holz vor möglicherweise herabfallenden Gegenständen, welche am Gehänge befestigt oder auf die Teller bzw. Schalen aufgelegt werden, schützen.

Zu dieser Waage gehören drei Zylinder aus Eisen mit einer Höhe von je (101 ± 1) mm, die jeweils mit einer Öse versehen sind, um sie an den Haken der Gehänge zu befestigen. Der erste Zylinder hat einen Durchmesser von $(15,5 \pm 0,1)$ mm und eine Masse von (81 ± 1) g. Die beiden übrigen weisen einen Durchmesser von je $(20,5 \pm 0,1)$ mm und eine Masse von (148 ± 1) g bzw. (258 ± 1) g auf, wobei der leichtere Zylinder hohl gefertigt ist. Alle sind mit je zehn eingravierten Teilungen gleicher Länge entlang der Längsachse versehen.

5.4.2. Versuch und Diskussion

Bei der Aufstellung dieser Waage war wiederum die horizontale Ausrichtung schwierig, da weder Lot noch Libelle angebracht sind und eine separate Wasserwaage auf der unebenen Grundplatte nicht aufgelegt werden konnte. Stattdessen wurde die Oberkante der Säule als Referenz verwendet, welche jedoch nur eine kleine Auflagefläche bietet. Anschließend musste die Ausrichtung der Zunge, die nicht normal zum Balken stand, durch Lockern der Befestigungsschraube korrigiert werden. Für die elektrischen Messungen wurden Stücke aus Kupferdraht zurechtgebogen und in den Schraubklemmen befestigt. Eine Messung der Widerstände hat für die linke Spule $(0,1 \pm 0,03) \Omega$ und für die rechte Spule $(0,2 \pm 0,03) \Omega$ ergeben. Danach wurde die erste Versuchsanordnung, bestehend aus der Waage, dem Hohlzylinder am linken Arm, dem dünnen Vollzylinder am rechten Arm, dem Netzgerät PCY 60-120 des Herstellers Heinzinger, dem Digitalmultimeter VC820 von Voltcraft und verschiedenen Messleitungen, gemäß der Schaltskizze in Abb. 55 (nur rechter Kreis) aufgebaut.

Für den Vergleich von Gewichtskraft und elektromagnetischer Kraft wurde nur die Spule unter dem rechten Balkenarm verwendet, während auf die Schale am linken Arm Massestücke aufgelegt wurden. Bei einer Masse von 80 g und der entsprechenden Einstellung des Justiergewichts befand sich der Balken im stabilen Gleichgewicht. Danach wurde die Spule mit dem Zahnstangenantrieb so eingestellt, dass sich sieben Teile des Eisenzylinders im Inneren der Spule befanden und drei Teile oberhalb. Anschließend wurden Zusatzmassen in einem Bereich bis 3 g aufgelegt und dabei jeweils die Stromstärke am Netzgerät so weit erhöht, bis der magnetische

Eisenzyylinder durch das induzierte Magnetfeld wieder in die Ausgangsposition gezogen wurde. Die insgesamt sieben erhaltenen Messpunkte wurden wiederum in QtiPlot in einem Diagramm aufgetragen, welches in Abb. 56 zu sehen ist.

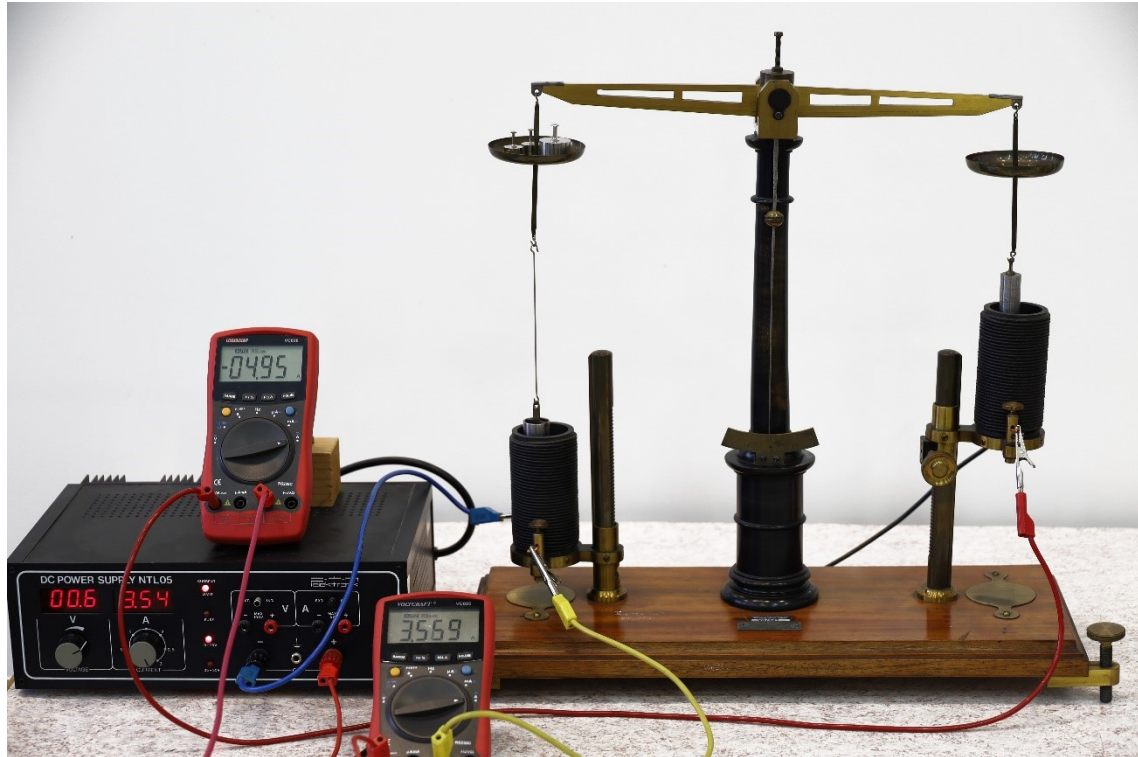


Abb. 54: Franz Steflitschek – Waltenhofen's Versuch: Versuchsaufbau

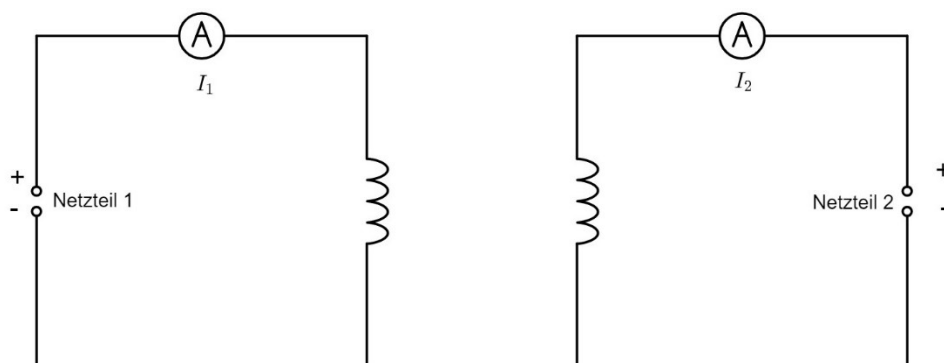


Abb. 55: Franz Steflitschek – Waltenhofen's Versuch: Schaltskizze

Die einzelnen Messpunkte (schwarze Punkte) verteilen sich wieder entlang einer Regressionskurve zweiter Ordnung, was den bereits beschriebenen quadratischen Zusammenhang zwischen Stromstärke und Masse zeigt. Da alle nötigen Abmessungen und Kennzahlen über die Spule zur Verfügung stehen, konnten auch Vergleichswerte der Masse gemäß (31) errechnet und im Diagramm aufgetragen

werden (rote Punkte). Diese zeichnen, unter der Annahme einer relativen Permeabilität von $\mu_r = 500$ (Demtröder, 2017, S. 103) und einem Korrekturfaktor von $k = 0,024$ für die Berechnung eines äquivalenten Solenoids, eine Kurve, entlang welcher sich die Messpunkte in guter Näherung verteilen.

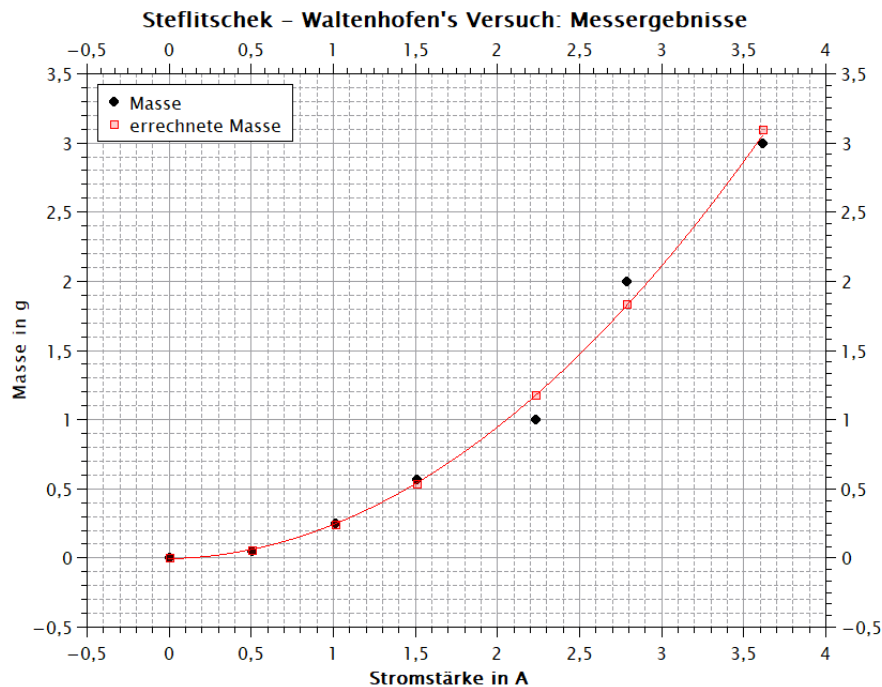


Abb. 56: Franz Steflitschek – Waltenhofen's Versuch: Diagramm zu den Messergebnissen

Für eine weitere Versuchsanordnung (siehe Abb. 54) wurde zusätzlich die linke Spule mit einem Netzgerät des Typs NTL05 des Herstellers ptm und einem zweiten baugleichen Multimeter zur Messung der Stromstärke gemäß der Schaltskizze in Abb. 55 verbunden. Auf diese Weise war es möglich, die zuvor beschriebenen Wägungen zu wiederholen, wobei die aktivierte linke Spule eine Dämpfungseinrichtung darstellte. Diese verkürzte die Wägedauer deutlich und erforderte eine entsprechend geringere elektrische Leistung im Vergleich zur rechten Spule. Weitere Einsatzmöglichkeiten dieses Aufbaus wären auch der Vergleich von Strömen oder der reine Massenvergleich, während beide Spulen als Dämpfung fungieren.

Dieses Demonstrationsinstrument bietet daher eine breite Palette an möglichen Versuchen und ermöglicht den Einsatz in verschiedenen Teilgebieten der physikalischen Lehre. Die von Franz Steflitschek ursprünglich erdachte Demonstration des von Adalbert von Waltenhofen gefundenen Zusammenhangs zwischen der Magnetisierung von Eisenstäben und deren Härte (von Waltenhofen, 1870, S. 407 ff.) kann

dabei im Rahmen von Vorlesungen der Materialphysik zum Einsatz kommen. Das Gerät ist in einem guten Zustand, lediglich der Antrieb der linken Spule müsste ersetzt bzw. repariert werden.

6. Fazit

Anhand der durchgeführten Versuche konnte in Kombination mit weitreichenden Recherchen in historischen Quellen eine Vielzahl an Daten zu den insgesamt 18 Waagen dieser Arbeit zusammengetragen werden. Diese reichen von einer geschichtlichen Kontextualisierung der einzelnen Modelle über die technischen Kenngrößen und deren Funktionsweise bis zu didaktischen Anregungen zum Einsatz der Geräte in der physikalischen Lehre. Die wichtigsten Ergebnisse zu den Exponaten, welche in drei Kategorien eingeteilt wurden, sollen abschließend gruppiert zusammengefasst werden.

Den Anfang der Präzisions- und Analysenwaagen bildete die Sartorius USA-Luft, die sich durch die gut funktionierende Lufterdämpfungseinrichtung auszeichnet. Abnützungserscheinungen, welche die Lagerelemente betreffen, führten bei dieser und auch weiteren Waagen zu einer Reduktion der ursprünglich angegebenen Empfindlichkeit. Alleinstellungsmerkmal der Waage von Welharticky & Pachner ist die von außen bedienbare Gewichtsaufgabe mit dazugehöriger Anzeige sowie die in drei Stufen einstellbare Empfindlichkeit von bis zu 2 mg. Der größte Verschleiß der Schneiden musste bei der knapp 130 Jahre alten Analysenwaage von Nemetz festgestellt werden. Hingegen wurde bei der Analytischen Waage Nr. 8 von Rueprecht eine vergleichsweise hohe Empfindlichkeit bei einer Tragkraft von bis zu 600 g festgestellt, die auch durch eine Messung der Linearität bestätigt wurde. Bei der Waage aus dem k. k. Polytechnischen Institut wurden aufgrund des hohen Alters von mindestens 170 Jahren nur wenige Versuche durchgeführt. Jedoch ist dieses Modell mit den verschiedenen Zubehöerteilen und Originalaufzeichnungen ein wichtiges Zeitzeugnis der Physikgeschichte.

Die moderneren Waagen der Hersteller Sartorius und Mettler weisen hohe Empfindlichkeiten von bis zu 100 µg auf und zählen zusammen mit einer einwandfreien Wiederholbarkeit der Messergebnisse zu den am besten erhaltenen Instrumenten. Darüber hinaus lässt sich an ihnen die historische Entwicklung von den einfachen Balkenwaagen bis zu den Vorläufern heutiger Digitalwaagen verfolgen und der Wettbewerb zwischen den genannten Unternehmen nachvollziehen.

Neben gleicharmigen Waagen zählen auch spezielle Konstruktionen zu den Modellen mit größerer Tragkraft. Die Präzisionswaage No. 159 von Rueprecht kann Massen bis zu 10 kg bestimmen, jedoch wurde bei dieser Beanspruchung die Empfindlichkeit im Laufe der Zeit durch Abnutzung um den Faktor 25 reduziert. Gleichzeitig ist das Gerät für weniger präzise Wägungen aufgrund der einwandfreien Linearität geeignet. Die Demonstrationswaage des gleichen Herstellers sticht durch eine Vielzahl möglicher Versuche hervor und rechtfertigt damit den Einsatz auch in der heutigen Lehre. Dabei steht die Auflösung der Waage im Hintergrund, während der Zubehöratz und die gute Ablesbarkeit auch aus größerer Entfernung wichtige Merkmale darstellen. Zu einer anderen Bauart gehören die Dezimalwaage von H. D. Schmid und die englische Schnellwaage, die das Wiegen großer Lasten mit kleineren Gegengewichten bei einer Empfindlichkeit von rund 10 g bzw. 0,1 g ermöglichen. Zuletzt stellen die beiden Tafelwaagen nützliche Haushaltsgegenstände dar, die ebenfalls den Grundprinzipien der Balkenwaagen folgen.

Zu den speziellen Waagen zählt die hydrostatische Waage nach Mohr und Westphal, mit der die Dichten von Flüssigkeiten bestimmt werden können. Das Messinstrument ist voll funktionstüchtig und lieferte Ergebnisse, die durchwegs mit Vergleichswerten aus der Literatur übereinstimmen. Die Spannungswaage von J. Eiss ermöglichte es, den zuvor formulierten quadratischen Zusammenhang zwischen der Spannung am Kondensator und der aufgelegten Masse zu demonstrieren. Mit dem verbauten Schaltermechanismus sind dabei halbautomatische Messungen kleiner Massen bzw. – im umgekehrten Fall – hoher Spannungen möglich. Beim Versuch mit den Instrumenten von Hartmann & Braun sowie Franz Steflitschek konnte ebenfalls eine quadratische Proportionalität zwischen der Masse und der Stromstärke gezeigt werden, welche im Grundlagenkapitel formuliert wurde. Beim Waltenhofen'schen Aufbau wurde darüber hinaus festgestellt, dass sich auch die magnetische Remanenz der Eisenkerne signifikant auf die Ergebnisse auswirkt.

Für eine weiterführende Beforschung der Waagensammlung liegt es nahe, den Fokus auf ausgewählte Modelle zu legen, die einerseits aufgrund ihres Zustandes weitere Versuche zulassen und andererseits noch offene Fragen – auch in Bezug auf ihre Historie – aufwerfen. Beispielsweise können bei den Modellen Sartorius Selecta und Mettler B6 weitere Kennzahlen wie die Reproduzierbarkeit oder die kleinste bestimmbare Masse ermittelt werden. Unter den speziellen Waagen bietet

es sich besonders an, die zum Aufbau von Franz Steflitschek gehörenden Versuche zur Magnetisierung von Metallzylindern durchzuführen und diese eventuell für den Einsatz im Physikunterricht aufzubereiten.

7. Quellenverzeichnis

- 100 Jahre Schemberwaagen: 1852 - 1952. (1952). Erwin Metten Nachf. <https://resolver.obvsg.at/urn:nbn:at:AT-WBR-626674>
- Alb. Rueprecht & Sohn Wien. (1911). *Liste 50. Katalog über Präzisionswaagen & Gewichte für wissenschaftliche und technische Zwecke* [Katalog]. Kunst- und Buchdruckerei Jg. Unger.
- Alb. Rueprecht & Sohn Wien. (1928). *Katalog 70. Präzisionswaagen und Gewichte für wissenschaftliche und technische Zwecke* [Katalog]. Chwala's Druck.
- Allgeier, T. (2016). The Nemetz Balance of the Science Museum of Porto. *Equilibrium. Quarterly Magazine of the International Society of Antique Scale Collectors*, 2016 (1), 4219–4225.
- Apolin, M. (2017). *Big Bang: [Physik]. 5, RG* (1. Auflage, neue Ausgabe). öbv.
- Bartelmann, M. (2018). *Theoretische Physik 1. Mechanik* (11. Aufl.). Springer.
- Becker, P., & Nicolaus, A. (2008). Hat das Urkilogramm bald ausgedient? *Physik in unserer Zeit*, 39(4), 164–165. <https://doi.org/10.1002/piuz.200890039>
- Becker, R. (1973). *Theorie der Elektrizität. 1, Einführung in die Maxwellsche Theorie, Elektronentheorie, Relativitätstheorie* (F. Sauter, Hrsg.; 21., völlig neubearb. Aufl.). Teubner.
- Berghoff, H., Kleinschmidt, C., Lindner, S. H., & Marshall, L. (2021). *Sartorius 1870–2020*. Piper.
- Bergmann, L., & Schaefer, C. (1961). *Lehrbuch der Experimentalphysik: Zum Gebrauch bei akademischen Vorlesungen und zum Selbststudium* (6., durchges. und verb. Aufl., Bd. 1, Mechanik, Akustik, Wärmelehre). De Gruyter.

Biétry, L. (1963). Das Substitutionsprinzip im Waagenbau. *Technische Rundschau*, 19, 3–8.

Brecknell Ltd. (o. J.). *Brecknell—About Us*. Brecknell Scales. Abgerufen 6. Juni 2023, von <https://www.brecknellscales.com/en-gb/about-us/>

Chang-Woo, S. (2015). Design of a Solenoid Actuator with a Magnetic Plunger for Miniaturized Segment Robots. *Applied Sciences*, 5(3), 595. <https://doi.org/10.3390/app5030595>

Demtröder, W. (2017). *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik* (7. Auflage). Springer Imprint: Springer Spektrum. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-55790-7>

Deutsche Bundesbank. (2023). *Kaufkraftäquivalente historischer Beträge in deutschen Währungen*. <https://www.bundesbank.de/resource/blob/615162/5a2ab631c106f9a6438899323321ec31/mL/kaufkraft-aequivalente-historischer-betraege-in-deutschen-waehrungen-data.pdf>

Deutsches Wörterbuch. (2016). In H. Paul, H. Kämper, & G. Objartel (Hrsg.), *Deutsches Wörterbuch* (9. vollst. neu bearb. Aufl.). Max Niemeyer Verlag. <https://doi.org/10.1515/9783111546629>

Dudenredaktion. (o. J.). „*Waage*“ auf *Duden online*. Duden online. Abgerufen 19. April 2023, von <https://www.duden.de/node/200925/revision/1240049>

E. Mettler Analysen- und Präzisionswaagen, Zürich. (o. J.). *Mettler Analysenwaagen Typ-B* [Broschüre].

E. Mettler. Zürich. (o. J.). *Betriebsvorschriften Mettler Analysenwaage Type B6* [Broschüre].

- Ebrahimi, N. (2021). *Biocompatible Electromagnetic Soft Actuator Network: Design Optimization, Development, Fabrication and Test* [Ph.D., The University of Texas at San Antonio]. <https://www.proquest.com/docview/2572571680/abstract/75617591F12E4686PQ/1>
- Europäisches Direktorat für die Qualität von Arzneimitteln. (o. J.). *Europäisches Arzneibuch 10. Ausgabe, 6. Nachtrag*. Deutscher Apotheker Verlag.
- Fechner, A. (1998). Warum ist schwere Masse gleich träge Masse? *Physik in unserer Zeit*, 29(5), 218–220. <https://doi.org/10.1002/piuz.19980290507>
- Felgentraeger, W. (1907). *Theorie, Konstruktion und Gebrauch der feineren Hebelwage*. Teubner.
- Foth, H.-J. (2006). Extensive Größen. In F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Fauspel, B. Fugmann, T. Gamse, R. Matissek, G. Pohnert, A. Rühling, S. Schmidt, & G. Sprenger (Hrsg.), *RÖMPP [Online]*. Thieme Gruppe; RÖMPP. <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-05-02397>
- Girwidz, R. (2020). Experimente im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz, & H. E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik. Grundlagen* (S. 263–291). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_7
- Gross, R., & Marx, A. (2014). H. SI-EINHEITEN. In *Festkörperphysik* (2. aktualisierte Auflage, S. 975–982). De Gruyter Oldenbourg. <https://doi.org/10.1524/9783110358704.975>
- Guttmann, W., & Vahle, W. (1932). *Guttmanns Grundriß der Physik*. Urban & Schwarzenberg.
- Häckel, H. (2021). *Meteorologie* (9. vollst. überarb. u. erw. Aufl.). utb. <https://doi.org/10.36198/9783838555041>

- Haddad, D., Seifert, F., Chao, L. S., Li, S., Newell, D. B., Pratt, J. R., Williams, C., & Schlamming, S. (2016). Bridging classical and quantum mechanics. *Metrologia*, 53(5), A83. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A83>
- Hanisch, R., Chalk, S., Coulon, R., Cox, S., Emmerson, S., Flamenco Sandoval, F. J., Forbes, A., Frey, J., Hall, B., Hartshorn, R., Heus, P., Hodson, S., Hosaka, K., Hutzschenreuter, D., Kang, C.-S., Picard, S., & White, R. (2022). Stop squandering data: Make units of measurement machine-readable. *Nature*, 605(7909), 222–224. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-01233-w>
- Hartmann & Braun. (1894). *Electrical Measuring Instruments. Edition 1894* [Katalog]. August Osterrieth's; The Library of the University of California Los Angeles.
- Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2013). *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie* (8. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59667-8>
- Hopf, M., Lembens, A., & Kapelari, S. (2017). Naturwissenschaftliche Grundbildung – Welchen Beitrag kann kompetenzorientierter Unterricht dazu leisten? *plus-Lucis*, 1/2017, 4–10.
- iF Design. (o. J.). *Selecta Analytical Balance*. iF Design. Abgerufen 7. April 2023, von <https://ifdesign.com/en/winner-ranking/project/selecta-analytical-balance/2912>
- Jenemann, Hans. R. (1982). Zur Geschichte der mechanischen Laboratoriumswaage. *Physikalische Blätter*, 38(10), 316–322. <https://doi.org/10.1002/phbl.19820381008>

- Jenemann, Hans. R. (1987). Zur Geschichte der Herstellung von Präzisionswaagen hoher Leistung in Wien. *Blätter Für Technikgeschichte*, 49, 7–85.
- Kane, G. (2006). Das Geheimnis der Masse. *Spektrum der Wissenschaft*, 2, 36–43.
- Kochsiek, M., & Gläser, M. (Hrsg.). (1997). *Massebestimmung*. VCH.
- Kohlrausch, F., & Krüger, F. (1932). *Kleiner Leitfaden der praktischen Physik*. Teubner.
- Kurtenacker, H. (1956). Eine Studie über die Reproduzierbarkeit der analytischen Waagen. *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie*, 149(3), 199–200.
<https://doi.org/10.1007/BF00585777>
- Lecher, E., & Smekal, A. (1928). *Lehrbuch der Physik. Zu eigenem Studium und zum Gebrauche bei Vorlesungen. Zweiter Band. Magnetismus und Elektrizität—Atomphysik* (7. verb. und um eine Darstellung der Atomphysik verm. Aufl., Bd. 2). Walter de Gruyter & Co.
- Lehmann, O. (1905). *Physikalische Technik. Anleitung zu Experimentalvorträgen - Erster Band, zweite Abteilung*. Salzwasser Verlag.
- Lehrplan der Allgemeinbildenden Höheren Schule, Pub. L. No. BGBl. 88/1985
idF BGBl. II 1/2023 Anlage A zu Art. 4, 108 (2023).
- Lüders, K., & Oppen, G. (Hrsg.). (2015). *Bergmann / Schaefer kompakt – Lehrbuch der Experimentalphysik Band 2* (Bd. 2). Walter de Gruyter.
- Meschede, D. (2015). *Gerthsen Physik* (25. Aufl. 2015). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-45977-5>

- Nater, R., Reichmuth, A., Schwartz, R., Borys, M., & Zervos, P. (2008). *Wägelexikon. Leitfaden wägetechnischer Begriffe*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-75908-9>
- Nemetz, J. (1886). *Preis-Courant über Präcisionswaagen und Gewichte für wissenschaftliche Zwecke* [Katalog].
- Nemetz, J. (1893). *Neu-Constructions aus dem Institute für Präcisions-Mechanik* [Katalog].
- Ortanderl, S. (2005). Waagen. In F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, R. Matissek, G. Pohnert, A. Rühling, S. Schmidt, & G. Sprenger (Hrsg.), *RÖMPP [Online]*. Thieme Gruppe; RÖMPP. <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-23-00005>
- Österreichische Nationalbank. (o. J.). *Historischer Währungsrechner*. Abgerufen 20. Juni 2023, von <https://www.eurologisch.at/docroot/waehrungsrechner/#/>
- Palm, A. (1934a). Das elektrostatische Meßprinzip. *tm - Technisches Messen*, 37–48(JG), 465–468. <https://doi.org/10.1524/teme.1934.3748.jg.465>
- Palm, A. (1934b). Die absolute Messung hoher Spannungen. *tm - Technisches Messen*, 37–48(JG), 493–496.
<https://doi.org/10.1524/teme.1934.3748.jg.493>
- Perlmutter- und Heimatmuseum Adorf. (2021, November 26). *PM 0065: Thermometer in Form einer Postmeilensäule*. museum-digital. <https://nat.museum-digital.de/object/129052>
- Raith, W., Bergmann, L., & Schaefer, C. (2006). *Lehrbuch der Experimentalphysik. Band 2 Elektromagnetismus* (9., überarb. Aufl., Bd. 2). de Gruyter. <https://ub-data.univie.ac.at/AC05635172>

- Reichsgesetzblatt für die im Reichsrathe vertretenen Königreiche und Länder, Jahrgang 1892, Pub. L. No. RGBL. 126/1892, 644 (1892).
<https://alex.onb.ac.at/cgi-content/alex?aid=rgb&datum=1892&size=38&page=682>
- Robinson, I. A., & Schlamminger, S. (2016). The watt or Kibble balance: A technique for implementing the new SI definition of the unit of mass. *Metrologia*, 53(5), A46. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A46>
- Rothleitner, C. (2021). Wieviel Planck-Konstante steckt im Kilogramm? *Physik in unserer Zeit*, 52(5), 236–242. <https://doi.org/10.1002/piuz.202101613>
- Rueprecht, A. (1882). Eine Demonstrationswaage für physikalische Vorlesungen. *Zeitschrift Für Instrumentenkunde*, 2, 99–104.
- Sartorius. (o. J.). *Sartorius-Archiv, Mar 1/2 Ko 95, Aufstellungs- und Bedienungsanleitung Selecta* [Broschüre].
- Sartorius. (1938). *Sartorius-Archiv, Mar 1/1 A 3, Produktkatalog 1938* [Katalog].
- Sartorius. (1960a). *Sartorius-Archiv, Mar 1/2 B 8, Broschüre Feinwaagen 1960* [Broschüre].
- Sartorius. (1960b). *Sartorius-Archiv (SArch), Mar 1/2 B 8, Broschüre Selecta 1960*. [Broschüre].
- Sartorius AG. (2005). *Betriebsanleitung Sartorius Extend Series, Sartorius Gem and Gold Extend. Elektronische Analysen-, Präzisions- und Edelmetallwaagen* [Broschüre].
- Sartorius-Werke AG. Göttingen. (o. J.). *Original Sartorius Selecta* [Katalog].

- Schenk, W., Kremer, F., Beddies, G., Franke, T., Galvosas, P., & Rieger, P. (2014). *Physikalisches Praktikum* (14., überarb. u. erw. Aufl.). Springer Fachmedien.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-00666-2>
- Schobert, E. (1994). *Österreichisches Biographisches Lexikon 1815-1950* (Österreichische Akademie der Wissenschaften, Hrsg.; Bd. 10). Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.
- Sexl, R. (2013). *Sexl Physik 5*. öbv.
- Shaw, G. A., Stirling, J., Kramar, J., Williams, P., Spidell, M., & Mirin, R. (2019). Comparison of electrostatic and photon pressure force references at the nonewton level. *Metrologia*, 56(2), 025002 (9 ff.).
<https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaf9c2>
- Starke & Kammerer A.-G. (1924). *Analysenwaagen* [Katalog].
- Steflitschek, F. (1885). *Preis-Verzeichnis über physikalische Instrumente und Apparate für den Unterricht an Lehranstalten* [Katalog]. Franz Steflitschek.
https://www2.isep.ipp.pt/museu/uploads/Franz_steflitschek.pdf
- Steinhäuser, H. (1977). Internationale normierte Maßeinheiten des Systeme International (SI). *Carinthia II*, 167/87, 415–418.
- Steinke, E. G. (1943). *Anleitung und Protokollbuch für ein kleines Physikalisches Praktikum*. Steinkopff.
- Technisches Museum Wien mit Österreichischer Mediathek [TMW]. (2023, März 21). *Analysenwaage Starke & Kammerer*. <https://www.technischesmuseum.at/museum/online-sammlung>

- Ucke, C., & Schlichting, H. J. (2015). Das unermüdliche Maxwell-Rad. *Physik in unserer Zeit*, 46(1), 40–43. <https://doi.org/10.1002/piuz.201401385>
- von Waltenhofen, A. (1870). Ueber die Anziehung welche eine Magnetisirungsspirale auf einen beweglichen Eisenkern ausübt. *Annalen der Physik*, 217(11), 407–425. <https://doi.org/10.1002/andp.18702171106>
- Waage. (2023). In *Wikipedia*. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Waage&olddid=230639810>
- Waage (Metrologie). (2023). In *Brockhaus Enzyklopädie Online*. NE GmbH | Brockhaus. <https://brockhaus-at.uaccess.univie.ac.at/ecs/permalink/5595ED5CC27033A1E942B7B8279F5EB6.pdf>
- Wägen. (o. J.). In *DWDS – Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache*, hrsg. V. D. Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Abgerufen 26. April 2023, von <https://www.dwds.de/wb/w%C3%A4gen>
- Walcher, W. (2006). *Praktikum der Physik: Mit 88 Versuchen, 14 Tabellen im Text, einem Tabellenanhang und einem ausklappbaren Periodensystem der Elemente* (9., überarb. Aufl.). Vieweg+Teubner.

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Prinzipskizzen zum Hebel	11
Abb. 2: Skizze zur Dezimalwaage	19
Abb. 3: Rueprecht – Analytische Gewichte No. 196	35
Abb. 4: Sartorius – USA-Luft (ohne Frontscheibe)	37
Abb. 5: Sartorius – USA-Luft: Kreisbogenarretierung	38
Abb. 6: Starke & Kammerer – Analysenwaage Nr. 104	42
Abb. 7: Starke & Kammerer – Analysenwaage Nr. 104: Balken und Gewichtsplatten	43
Abb. 8: Starke & Kammerer: Bruchgrammauflegung,	44
Abb. 9: Jos. Nemetz – Universal-Präcisionswaage Nr. 707	48
Abb. 10: Nemetz: Bruchgrammauflegung	49
Abb. 11: Nemetz: Ringgewichte	50
Abb. 12: Nemetz: Reiterverschiebung	51
Abb. 13: Rueprecht – Analytische Waage Nr. 8	55
Abb. 14: Rueprecht – Analytische Waage Nr. 8: Arretierung	56
Abb. 15: Rueprecht – Analytische Waage Nr. 8: Zubehör	57
Abb. 16: Rueprecht – Analytische Waage Nr. 8: Diagramm zur Linearität	58
Abb. 17: k. k. Polytechnisches Institut – Analysenwaage	60
Abb. 18: k. k. Polytechnisches Institut – Analysenwaage: Arretierung	61
Abb. 19: k. k. Polytechnisches Institut – Analysenwaage: Skala mit Lupe	62
Abb. 20: k. k. Polytechnisches Institut – Analysenwaage: Schubkasten mit Zubehör:	63
Abb. 21: k. k. Polytechnisches Institut – Analysenwaage: Aufzeichnungen,	64
Abb. 22: Sartorius – Selecta Semi-Mikro	66
Abb. 23: Sartorius – Selecta Semi-Mikro: Gewichtsbügel.	68

Abb. 24: Sartorius – Selecta Semi-Mikro: Anzeigen	68
Abb. 25: Sartorius – Selecta Semi-Mikro: Balken	70
Abb. 26: Sartorius – Selecta Semi-Mikro: Diagramm zur Linearität	71
Abb. 27: Mettler – B6 Halbmikro	74
Abb. 28: Mettler – B6 Halbmikro: Detailansichten	76
Abb. 29: Sartorius – 2255	79
Abb. 30: Sartorius – 2255: Detailansichten	80
Abb. 31: Sartorius – 2255: Diagramm zur Linearität	82
Abb. 32: Rueprecht – Präcisionswaage No. 159	85
Abb. 33: Rueprecht – Präcisionswaage No. 159: Ring-Haken-Gelenk	86
Abb. 34: Rueprecht – Demonstrationswaage No. 98	89
Abb. 35: Rueprecht – Demonstrationswaage No. 98: Zubehörkiste	90
Abb. 36: Rueprecht – Demonstrationswaage No. 98: Gewichtssatz	91
Abb. 37: Rueprecht – Demonstrationswaage No. 98: Maxwell'sches Rad	93
Abb. 38: H. D. Schmid – Dezimalwaage No. 6403	95
Abb. 39: H. D. Schmid – Dezimalwaage No. 6403: Wägung	97
Abb. 40: C. W. Brecknell – Römische Schnellwaage	98
Abb. 41: Kraft – Tafelwaage	101
Abb. 42: C. Schember & Söhne – Tafelwaage	103
Abb. 43: G. Westphal – Mohr'sche Waage	106
Abb. 44: J. Eiss – Spannungswaage	109
Abb. 45: J. Eiss – Spannungswaage: Detailansichten	110
Abb. 46: J. Eiss – Spannungswaage: Versuchsaufbau	112
Abb. 47: J. Eiss – Spannungswaage: Schaltskizzen	112
Abb. 48: J. Eiss – Spannungswaage: Diagramm zu den Messergebnissen	113
Abb. 49: Hartmann & Braun – Galvanometer No. 365	115

Abb. 50: Hartmann & Braun – Galvanometer No. 365: Versuchsaufbau	117
Abb. 51: Hartmann & Braun – Galvanometer No. 365: Schaltskizze	118
Abb. 52: Hartmann & Braun – Galvanometer No. 365: Diagramm zu den Messergebnissen	119
Abb. 53: Franz Steflitschek – Waltenhofen's Versuch Nr. 1386	121
Abb. 54: Franz Steflitschek – Waltenhofen's Versuch: Versuchsaufbau	123
Abb. 55: Franz Steflitschek – Waltenhofen's Versuch: Schaltskizze	123
Abb. 56: Franz Steflitschek – Waltenhofen's Versuch: Diagramm zu den Messergebnissen	124

Folgende Bilder wurden von Ass.-Prof. Mag. Dr. Franz Sachslehner aufgenommen:
Abb. 2-6, 8, 11, 12, 14, 16-18, 20, 21, 26, 28, 29, 31-45, 48, 49, 52, 53

9. Anhang

9.1. Tabellarische Übersicht der Waagen

* Die Eurobeträge der Preise in ehemaligen österreichischen Währungen (Gulden – FI, Kronen – K, Schilling – öS) wurden mit dem historischen Währungsrechner der Österreichischen Nationalbank ermittelt. Dabei basiert die Umrechnung auf einem Verbraucherpreisindex und ermöglicht so den Vergleich von historischen Werten (Österreichische Nationalbank, o. J.). Dabei werden das Anschaffungsjahr, die damalige Währung und die Veränderung der Kaufkraft berücksichtigt, woraus ein Vergleichswert in Euro im Jahr 2023 folgt. Analog gibt es für deutsche Währungen Umrechnungstabellen auf Basis der Preisindizes des Statistischen Bundesamtes (Deutsche Bundesbank, 2023), welche für die Deutsche Mark ($\mathcal{M}$) herangezogen wurden.

Hersteller	Modell	Anschaffungs- jahr	Preis (in Euro *)	Inventar- nummer	Außenmaße LxBxH	Empfindlichkeit (gemessen)	Arretierung
Sartorius	USA-Luft	1988	k.A.	P _{IV} /102	31x40x50 cm	0,1 mg (1 mg)	Kreisbogen, Schalen
Starke & Kammerer (Welharticky & Pachner)	Nr. 104	um 1935	1370 öS (6.146,01 €)	IV/173	51x31x57 cm	0,1 mg (2 mg)	Parallelträger, Konus
Jos. Nemetz	Universal- Präzisionswaage Nr. 707	1894	460 FI (7.964,75 €)	IV/146	57x40x67 cm	0,1 mg (100 mg)	Parallelträger, Konus (li)
Alb. Rue- precht & Sohn	Feinste analytische Waage Nr. 8	um 1910	800 K (5.706,22 €)	IV/174	63x33x67 cm	0,1 mg	Parallelträger, Schalen
k. A.	Analysenwaage	1830-1850	k.A.	19/114	52x24x46,5 cm	(5 mg)	Parallelträger
Sartorius	Selecta Semi- Mikro	um 1960	k.A.	k.A.	43x33x53 cm	0,01 mg (0,01 mg)	Kreisbogen, Schalen
Mettler	B6 Halbmikro	1957	11.500 öS (4.133,52 €)	2359	27x50x46 cm	0,01 mg	Parallelträger, Schale
Sartorius	2255	1975	14.395 öS (6.975,44 €)	P _{IV} 82	33x25x30 cm	1 mg (1 mg)	Transport- sicherung

Hersteller	Modell	Anschaffungs- jahr	Preis (in Euro *)	Inventar- nummer	Außenmaße LxBxH	Empfindlichkeit (gemessen)	Arretierung
Alb. Rueprecht & Sohn	<i>Feinste Präzisionswaage No. 159</i>	um 1910	1500 K (10.699,16 €)	1320	106x63x92 cm	2 mg (50 mg)	Parallelträger
Alb. Rueprecht & Sohn	<i>Demonstrations- waage für physika- lische Vorlesungs- Versuche an Hochschulen No. 98</i>	um 1910	500 K (3.566,38 €)	IV 37, IV 37/1	72x25x102 cm	20 mg (100 mg)	Parallelträger
H. D. Schmid	<i>Dezimalwaage No. 6403</i>	um 1910	k.A.	IV 143	46x98x66 cm	(10 g)	Balken- sicherung
C. W. Breck- nell	<i>Römische Schnellwaage</i>	um 1915	k.A.	1234	43x7x38 cm	(100 g)	keine
C. E. Kraft	<i>Tafelwaage</i>	um 1900	k.A.	k.A.	51x21,5x24 cm	(100 mg)	keine
C. Schember & Söhne	<i>Tafelwaage</i>	um 1900	k.A.	P _{IV} 10	51x20x30 cm	(500 mg)	keine

Hersteller	Modell	Anschaffungs- jahr	Preis (in Euro *)	Inventar- nummer	Außenmaße LxBxH	Empfindlichkeit (gemessen)	Arretierung
G. Westphal	Mohr' sche Waage	1913	k.A.	IV 4	20x6,5x20 cm	k.A.	keine
J. Eiss	Spannungs- waage	1882	k.A:	VII 93	35x69x54 cm	(100 mg)	keine
Hartmann & Braun	Vertikales astatisches Galvano- meter No. 365	um 1894	65 M (507 €)	VII 484	27x15x20 cm	5 µA (100 mg)	Balken- sicherung
Franz Stefflit- schek	Walten- hofen' s Versuch Nr. 1386	1888	18 FI (303,18 €)	VII 501	22x51,5x48 cm	(50 mg)	keine