



universität
wien

MAGISTERARBEIT

Titel der Magisterarbeit

„Anwendungsgebiete und ökonomisches
Potential von Wasserstoff“

Verfasserin

Alice Steiger, Bakk.

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften

(Mag. rer. soc. oec.)

Wien, im August 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 066 915

Studienrichtung lt. Studienblatt: Betriebswirtschaft

Betreuer: O. Univ.- Prof. Dr. Kurt Heidenberger

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, am

Für Susanne.

Du hast immer an mich geglaubt. Danke!

Vorwort

Die Auseinandersetzung mit den verschiedenen Bereichen des Innovations- und Technologiemanagements hat mich während meines Studiums sehr fasziniert. Der Entschluss in diesem Bereich meine Magisterarbeit verfassen zu wollen, war schnell gefasst. Die Suche nach einem Thema für eine so wichtige Arbeit ist eine heikle und manchmal langwierige Angelegenheit. Ich hatte das große Glück nicht selbst suchen zu müssen, sondern ein Thema von den Herren Mag. Martin Zsifkovits und O. Univ. Prof. Dr. Kurt Heidenberger angeboten zu bekommen, welches in mir sofort die Neugierde geweckt hatte. Nach ein wenig Recherche wurde das Thema Wasserstoff zu einer Herausforderung, welcher ich mich dankbar und gerne gestellt habe.

Für die tatkräftige Unterstützung und den immerwährenden Rückhalt möchte ich von ganzem Herzen Susanne danken. Du hast immer an mich geglaubt.

Außerdem möchte ich ein paar ganz besonderen Menschen Danke sagen, die mich während dieser stressigen und ereignisreichen Zeit unterstützt und immer wieder aufgebaut haben. Dieser Dank gilt Elfi, Yvi, Maria und Aysegül. Desweiteren bedanke ich mich bei Barbara, Tatjana, Carina, Lotte und Otto. Euer Zuspruch half mir in schwierigen Zeiten und wird mir auf ewig in Erinnerung bleiben.

Meinem Großvater, meinem Vater und meinen Brüdern Hannes und Florian möchte ich danken, weil sie mich während dieser Zeit, trotz all meiner Launen, ertragen haben. Meiner verstorbenen Großmutter danke ich auch, denn ich bin mir sicher, sie hat während dieser Zeit über mich gewacht.

Zu guter Letzt möchte ich mich für die Unterstützung und Beratung bei meinen Betreuern dem O. Univ. Prof. Dr. Kurt Heidenberger und Herr Mag. Martin Zsifkovits bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	VII
Tabellenverzeichnis	XIII
Abbildungsverzeichnis	XV
Abkürzungsverzeichnis	XVII
1. Einleitung.....	1
2. Hintergrundinformationen.....	3
2.1. Energiearten.....	3
2.2. Aktueller Energiestand.....	4
2.3. Energiequellen	7
2.3.1. Fossile Energieträger	7
2.3.2. Kernenergie	9
2.3.3. Erneuerbare Energie.....	10
2.4. Energiefazit	20
3. Wasserstoff Allgemein	21
3.1. Geschichte.....	22
3.2. Erzeugung	24
3.2.1. Reformierung.....	24
3.2.2. Direkte Spaltung von Kohlenwasserstoffen	26
3.2.3. Vergasung	27
3.2.4. Elektrolyse	27
3.2.5. Thermochemische Verfahren	28
3.2.6. Photochemische Verfahren	29
3.2.7. Photobiologische Verfahren	30
3.2.8. Nachreinigungsverfahren	30

3.3.	Speicherung.....	31
3.3.1.	Speicherung in Druckbehältern	31
3.3.2.	Speicherung in Kryogen-Behältern	32
3.3.3.	Speicherung in Metallhydriden.....	33
3.4.	Transport	34
3.4.1.	Diskreter Transport	34
3.4.2.	Leitungsgebundener Pipeline-Transport	35
3.5.	Sicherheit.....	36
3.6.	Forschung und Entwicklung	39
3.6.1.	Wasserstoffpulver für den Tank	40
3.6.2.	Saubere Wasserstofferzeugung aus Sonnenlicht, Wasser und Zinkoxid.....	41
4.	Anwendungsgebiete von Wasserstoff.....	43
4.1.	Wasserstoffheizungen.....	43
4.2.	Wasserstoffmotoren	45
4.3.	Brennstoffzelle	51
4.3.1.	Mobile Anwendungsbereiche	57
4.3.2.	Stationäre Anwendungsgebiete.....	65
4.3.3.	Portable Anwendungen	68
4.4.	Carbazol.....	69
4.5.	Methanisierung von Wasserstoff	70
5.	Ökonomisches Potential von Wasserstoff.....	73
5.1.	Wasserstoffwirtschaft	73
5.2.	Wasserstoffinfrastruktur	76
5.3.	Anfallende Kosten	79
5.4.	Andere alternative Kraftstoffe zum Vergleich	82
5.4.1.	Biodiesel.....	83

5.4.2. Pflanzenöl	84
5.4.3. Erdgas	85
5.4.4. Flüssiggas	86
5.4.5. Methanol	88
5.5. Ausblick	89
6. Conclusio	93
Literaturverzeichnis	95
Appendix A: Abstract	103
Appendix B: Lebenslauf	105

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Erdöl.....	8
Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Erdgas	8
Tabelle 3: Vor- und Nachteile von Kohle	8
Tabelle 4: Vor- und Nachteile von Kernkraftwerken.....	10
Tabelle 5: Vergleich des Brennvorganges von Wasserstoff und Benzin	38
Tabelle 6: Technische Daten BMW Hydrogen 7	48
Tabelle 7: Technische Daten Mazda RX-8 Hydrogen RE.....	49
Tabelle 8: Arten von Brennstoffzellen	52
Tabelle 9: Vor- und Nachteile von Brennstoffzellen	57
Tabelle 10: Technische Daten des Unterseebootes U32	61
Tabelle 11: Vor- und Nachteile von Biodiesel	84
Tabelle 12: Vor- und Nachteile von Erdgas	86
Tabelle 13: Vor- und Nachteile von Flüssiggas	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhang der Energieformen	4
Abbildung 2: Weltweite Primärenergieversorgung von 1973.....	6
Abbildung 3: Weltweite Primärenergieversorgung von 2009.....	6
Abbildung 4: Vorgangsweise in einem solaren Flachkollektor.....	12
Abbildung 5: Jährliche Biotreibstoffabsatzmenge in Österreich von 2006 bis 2010	18
Abbildung 6: Erneuerbare Energieträger in Österreich - Stand 2005 & Potential 2020	19
Abbildung 7: Alkalische Elektrolyse	28
Abbildung 8: Wärmeerzeuger	44
Abbildung 9: Reaktionsvorgänge im Inneren des katalytischen Zylinders.....	44
Abbildung 10: BMW Hydrogen 7	47
Abbildung 11: Bivalenter Kreiskolbenmotor RENESIS Hydrogen	50
Abbildung 12: Mazda 5 Hydrogen RE Hybrid und Mazda RX-8 Hydrogen RE	51
Abbildung 13: Funktionsweise PEM-Brennstoffzelle	54
Abbildung 14: Aufbau eines Stacks	56
Abbildung 15: Mercedes-Benz B-Klasse F-Cell	59
Abbildung 16: Hyundai ix35 FCEV.....	59
Abbildung 17: Wasserstoffbetriebener Brennstoffzellenbus – „SaubereBus“	60
Abbildung 18: Innenleben Unterseebootserie 212A.....	62
Abbildung 19: Nemo H ₂	63
Abbildung 20: Hybrik-Lokomotive 1205	63
Abbildung 21: Brennstoffzellenkraftwerk in Kalifornien.....	65
Abbildung 22: Vaillant Brennstoffzellen-Heizgerät	67
Abbildung 23: Schematische Darstellung der Nutzung einer Energiepumpe	68
Abbildung 24: Vorgangsbeschreibung der Methanisierung von Wasserstoff	71
Abbildung 25: „Unechte“ Wasserstoffwirtschaft	75
Abbildung 26: „Echte“ Wasserstoffwirtschaft.....	76
Abbildung 27: Infrastrukturvergleich	79
Abbildung 28: Prognostizierte Preisentwicklung von Wasserstoff 2010 - 2050	80
Abbildung 29: Prognostizierte preisliche Änderungen bei Brennstoffzellensystemen	81
Abbildung 30: Prognostizierte Änderungen beim Platinanteil.....	81
Abbildung 31: Prognostizierte durchschnittliche Kostenänderung für einen Stack	82

Abkürzungsverzeichnis

AFC	Alkaline Fuel Cell [Alkalische Brennstoffzelle]
BMW	Bayerische Motoren Werke
Ccm	Kubikzentimeter
C ₂ H ₆	Ethan
CH ₄	Methan
CNG	Compressed Natural Gas [verdichtetes Erdgas]
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell [Direkt-Methanol-Brennstoffzelle]
DWV	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband
f.	folgende Seite
FAME	Fettsäure-Methylester
FCHJU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking [Brennstoffzellen- und Wasserstoff Verband]
ff.	fortfolgende Seiten
GM	General Motors
H	Wasserstoff
H ₂	Wasserstoffmolekül
H ₂ O	Wasser
IEA	International Energy Agency [Internationale Energie Agentur]
lt.	laut
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
Kg	Kilogramm
Km	Kilometer
km/h	kilometers per hour [Kilometer pro Stunde]
kn	Knoten
KOH	Kalilauge
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde

I	Liter
LNG	Liquefied Natural Gas [verflüssigtes Erdgas]
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MCFC	Molten Carbonat Fuel Cell [Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle]
MW	Megawatt
O	Sauerstoff
ÖE	Öleinheit
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell [Phosphorsäure-Brennstoffzelle]
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell [Protonen-Austausch-Membran Brennstoffzelle]
PJ	Petajoule
PS	Pferdestärken
RME	Rapsöl-Methylester
RÖE	Rohöleinheit
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell [Oxidkeramische Brennstoffzelle]
TWh	Terawattstunde
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

1. Einleitung

Die fossilen Energieträger Uran, Kohle, Gas und Öl sind ein wichtiges Fundament der heutigen Wirtschaft und der dazugehörigen modernen Industriegesellschaft. Diese Träger sind derzeit essentiell für die Erzeugung von Treibstoff, Strom und Wärme. Desweiteren dienen sie als Basis für die Herstellung unzähliger Produkte. Aufgrund der starken Umweltschädlichkeit und des begrenzten Bestandes der weltweiten fossilen Energieträgerreserven wird die Weltwirtschaft in absehbarer Zeit größtenteils auf Alternativen umsteigen müssen (BWF-Energie 2010).

Eine Wende im Energiesektor ist deutlich erkennbar. Beispielhaft kann der Ausstieg aus der Kernenergie von Österreich und Deutschland genannt werden. Ab Ende 2015 ist der Bezug von Atomstrom in Österreich weder für die Industrie, noch für private Haushalte möglich (Obermayr 2012). In Deutschland gilt dies ab Ende 2022. Außerdem hat die Förderung der erneuerbaren Energiequellen an enormer Wichtigkeit zugenommen (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2012). Vom Jahr 2010 auf 2011 haben globale Investitionen im Bereich erneuerbarer Energien um 17 Prozent zugenommen und einen Wert von 257 Milliarden amerikanischer Dollar erreicht. Derzeit können 16,7 Prozent des weltweiten Endenergieverbrauchs mit erneuerbaren Energien abgedeckt werden (REN21 2012).

Um die Deckung des weltweiten Energiebedarfs gewährleisten zu können, sind Forscher¹ auf der Suche nach nachhaltigen Energiequellen als Alternative zu Öl, Gas, Kohle und Uran. Da die Herstellung von Wasserstoff auch aus erneuerbaren Energien möglich und somit umweltfreundlich ist, kann Wasserstoff in diesem Zusammenhang als eine der vielversprechendsten Alternativen angesehen werden (Eichlseder und Klell 2010, S. 1). Die folgende Ausarbeitung befasst sich mit den Anwendungsgebieten und dem ökonomischen Potential von Wasserstoff.

¹ Um eine leichtere Lesbarkeit gewährleisten zu können, erfolgt in der kompletten Ausarbeitung keine Geschlechterunterscheidung.

Aufbau der Arbeit

Die Ausarbeitung wurde in sechs Kapitel untergliedert, wobei es vier Themenschwerpunkte gibt, welche sich in den Kapiteln zwei bis fünf wiederfinden. Eine kurze Einleitung begründet die Auseinandersetzung mit dem Thema Wasserstoff.

Anschließend gibt das zweite Kapitel die benötigten Hintergrundinformationen zum Thema Energie. Es befasst sich mit den unterschiedlichen Energiearten, dem aktuellen Stand der Energiewirtschaft und erklärt abschließend die einzelnen Energiequellen im Detail.

Das dritte Kapitel gibt eine Einführung in die Thematik des Wasserstoffs. Angefangen bei der Geschichte, über die verschiedenen Produktions-, Speicher- und Transportmethoden, bis hin zum Thema Sicherheit, wird dieses Kapitel mit dem aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstand bezüglich Wasserstoff abgeschlossen.

Im vierten Kapitel werden zahlreiche Anwendungsgebiete von Wasserstoff näher erläutert. Diese umfassen den großen Themenschwerpunkt der Einsatzgebiete von Brennstoffzellen. Außerdem werden wasserstoffbetriebene Heizungen und Motoren vorgestellt. Die Methanisierung von Wasserstoff und die Verwendung von Carbazol als Wasserstoffträger runden das Kapitel ab.

Das fünfte Kapitel behandelt das ökonomische Potential von Wasserstoff. Anfallende Kosten, eine mögliche Wasserstoffwirtschaft, benötigte Infrastrukturen und ein Vergleich zu anderen alternativen Kraftstoffen bilden die Themenschwerpunkte. Eine abschließende Zusammenfassung im sechsten Kapitel soll die wesentlichsten Punkte der Ausarbeitung nochmals hervorheben.

2. Hintergrundinformationen

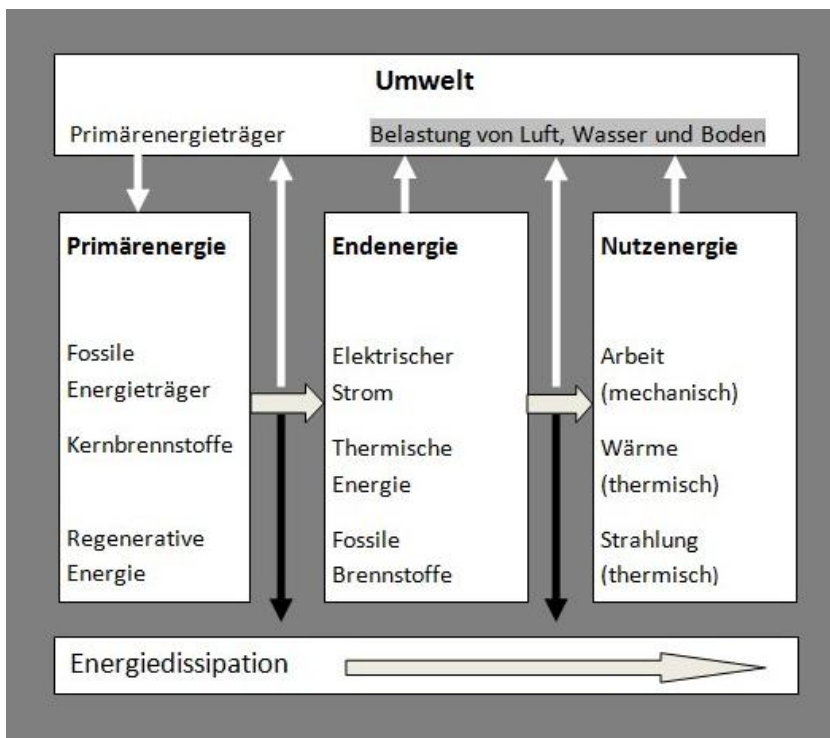
Dieses Kapitel befasst sich mit dem aktuellen Stand der Energiewirtschaft und den verschiedenen Arten von Energie, angefangen bei den erneuerbaren Energieformen, über fossile Energieträger, bis hin zur Kernenergie. Danach erfolgt ein Einblick in den aktuellen Stand und potentielle Entwicklungsmöglichkeiten von erneuerbarer Energie mit Hauptaugenmerk auf dem Bereich der Mobilität. Das Kapitel schließt mit einem Fazit zur Energie ab und leitet den großen Themenbereich Wasserstoff ein.

2.1. Energiearten

Die Einteilung der einzelnen Energiearten erfolgt in die Kategorien Primär-, Sekundär-, End- und Nutzenergie (Adunka 1999, S. 9). Energie in seiner ursprünglichen Form, wie zum Beispiel Kohle, Solarstrahlung oder Holz wird als Primärenergie bezeichnet (Quaschning 2010, 28).

Jene Primärenergie kann durch spezielle Verfahren, beispielsweise bei der Stromerzeugung in einem Dampfkraftwerk mit Kohle als Primärenergieträger, in Sekundärenergie umgewandelt werden. Beispiele für Sekundärenergie sind Benzin, Strom und Heizöl. Bei diesen Verfahren entstehen jedoch enorm hohe Verluste, auch Dissipation genannt, da nur eine bestimmte Teilmenge der Primärenergie in Strom transferiert werden kann (Adunka 1999, S. 9). Unter Endenergie wird jene Form der Energie verstanden, welche den Verbrauchern zugeführt wird. Beispielhaft wäre hier Erdgas, Heizöl, Fernwärme und Benzin zu nennen. Die Nutzenenergie ist Energie in seiner tatsächlich verwendeten Form, wie zum Beispiel das Licht zur Beleuchtung oder die Heizungswärme (Quaschning 2010, S. 28). Abbildung 1 stellt den Zusammenhang der verschiedenen Energieformen und deren Verbindung mit der Umwelt grafisch dar.

Abbildung 1: Zusammenhang der Energieformen



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Rebhan 2002, S. 109)

2.2. Aktueller Energiestand

Der weltweite Energiebedarf unterliegt einem ständigen Wachstum, welches auf mehrere Faktoren zurückzuführen ist. Der wohl bedeutendste Faktor ist der rasante Anstieg der Weltbevölkerung. Aber auch der zunehmende Wohlstand und der damit verstärkte Energiebedarf tragen ihren Teil dazu bei. Diese Erhöhung des Energiebedarfs zieht jedoch auch negative Konsequenzen mit sich. Eine lange Zeit waren Umweltprobleme, hervorgerufen durch den hohen Bedarf an Energie, regional begrenzt. Mittlerweile haben diese Probleme jedoch globale Ausmaße erreicht. Das bedeutet, sie beeinflussen das weltweite Klima und sind für die Klimaerwärmung verantwortlich (Quaschnig 2010, S. 13).

Die globale Versorgung mit Primärenergie verzeichnet einen starken Anstieg aufgrund des wachsenden Handels weltweit und der Steigerung der Güterproduktion. Eine Studie der International Energy Agency (IEA) zeigt die enorme Steigerung der Primärenergieversorgung zwischen 1973 und 2008 auf. Im Jahr 1973 betrug die Primärenergieversorgung **6.115** Millionen Tonnen Öläquivalent und 35 Jahre später war dieser Wert mit **12.267** Millionen Tonnen Öläquivalent mehr als doppelt so hoch (Bundeszentrale für politische Bildung 2011). „Mit

Öläquivalent ist das gleiche gemeint wie Öleinheit (ÖE oder englisch OE) und das gleiche wie Rohöleinheit (RÖE). Ein Kilogramm Öleinheit entspricht der Energiemenge, die bei der Verbrennung eines Kilogramm Rohöls frei gesetzt wird“ (Schünemann 2011). Die Steigerung innerhalb dieser 35 Jahre beträgt 100,6 Prozent. Aufgrund der Finanz- und Wirtschaftskrise zwischen 2008 und 2009 kam es zu einer Verringerung des weltweiten Energieverbrauchs von 12.267 Millionen Tonnen Öläquivalent auf **12.150** Millionen Tonnen Öläquivalent (Bundeszentrale für politische Bildung 2011).

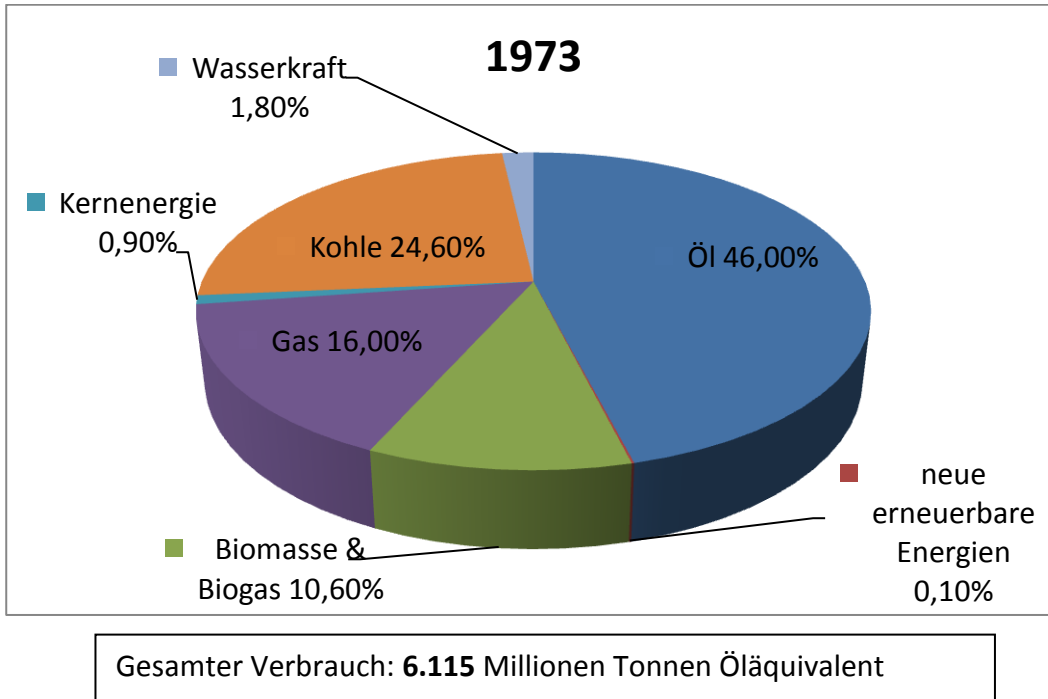
Die weltweite Versorgung mit Primärenergie im Jahr **2009** unterlag folgender Aufteilung: 32,8 Prozent Öl; 20,9 Prozent Gas; 5,8 Prozent Kernenergie; 2,3 Prozent Wasserkraft; 10,2 Prozent Biomasse, Biogas und biologisch abbaubaren Abfällen; 0,8 Prozent neue erneuerbare Energien, wie zum Beispiel Geothermik, Solar-, Wind- und Meeresenergie und 27,2 Prozent Kohle (Bundeszentrale für politische Bildung 2011).

Zum Vergleich der Daten aus dem Jahr 2009 wurden in der erwähnten Studie Daten von **1973** herangezogen. Damals unterlag die weltweite Primärenergieversorgung folgender Gliederung: 46,0 Prozent Öl; 16,0 Prozent Gas; 0,9 Prozent Kernenergie; 1,8 Prozent Wasserkraft; 10,6 Prozent Biomasse, Biogas und biologisch abbaubaren Abfällen; 0,1 Prozent neuer erneuerbare Energien und 24,6 Prozent Kohle (Bundeszentrale für politische Bildung 2011).

Beim Vergleich dieser Daten fällt vor allem der Rückgang von 13 Prozentpunkten beim Anteil von Öl auf. Diese relative Verminderung hat jedoch keine genaue Aussagekraft über die Entwicklung der absolut zur Verfügung gestellten Ölmenge, denn diese hat in besagtem Zeitraum um 41,4 Prozent zugenommen. Die Kohleanteile erhöhten sich in diesem Zeitraum um 2,7 Prozent, wobei die absolut zur Verfügung gestellte Kohlemenge um fast 120 Prozent anstieg. Die Anteile von Gas stiegen sogar um 4,9 Prozent, bei einer um 160 Prozent ansteigender bereitgestellter Gasmenge. Relativ gesehen haben sich zwischen 1973 und 2009 die Anteile der Kernenergie und der erneuerbaren Energie am meisten erhöht. Im Bereich der erneuerbaren Energie fand eine Erhöhung von 725 Prozent statt (von 0,1 Prozent auf 0,8 Prozent), bei einer Erhöhung der bereitgestellten Menge von 1.550 Prozent. Der Anstieg der Kernenergie beträgt 550 Prozent (von 0,9 Prozent auf 5,8 Prozent), unter Berücksichtigung des Anstieges der zur Verfügung gestellten Menge um 1.175 Prozent. Jedoch ist seit 2002 der Kernenergieanteil regressiv und der Anteil der erneuerbaren Energien ansteigend

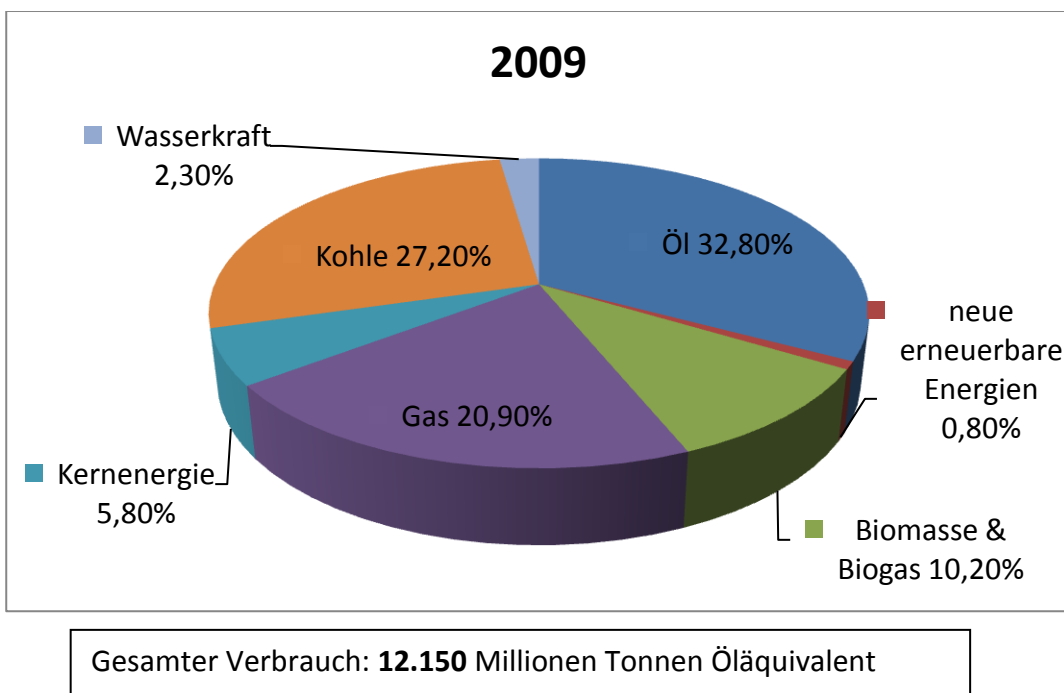
(Bundeszentrale für politische Bildung 2011). Abbildungen 2 und 3 stellen die behandelten Daten zum leichteren Verständnis grafisch dar:

Abbildung 2: Weltweite Primärenergieversorgung von 1973



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (International Energy Agency 2011)

Abbildung 3: Weltweite Primärenergieversorgung von 2009



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (International Energy Agency 2011)

2.3. Energiequellen

Primärenergiequellen sind unterteilbar in erneuerbare Energiequellen, fossile Energieträger und Kernenergie. Dem Bereich der **fossilen Energieträger** sind **Erdöl, Erdgas, Torf, Stein- und Braunkohle** zuzuordnen. Zu den **erneuerbaren Energiequellen** gehören **Sonnenenergie, Wasserkraft, Windenergie, Biomasse** und **Erdwärme** (Quaschnig 2010, S. 16ff.). In dem folgenden Kapitel erfolgt eine detaillierte Beschreibung dieser Energiequellen.

2.3.1. Fossile Energieträger

„Fossile Energieträger sind das Produkt von Ablagerungen organischen Pflanzenmaterials unter Übersichtung mit anorganischen Erdkrustenmaterialien“ (Rebhan 2002, S. 112). Die Bezeichnung der fossilen Energieträger leitet sich vom lateinischen Wort „Fossils“ ab und hat die Bedeutung „ausgegraben“. Es bezieht sich somit auf den Herkunftsort, beziehungsweise auf die jeweilige Gewinnung des Stoffes. Werden fossile Primärenergieträger nach ihrem Aggregatzustand unterschieden, erfolgt die Unterteilung in feste, flüssige oder gasförmige Brennstoffe (Rebhan 2002, S. 112).

Natürliche, fossile Energieträger sind **Erdöl, Torf, Erdgas, Stein- und Braunkohle**. Auf chemischer Ebene basieren sie auf organischen Kohlenstoffverbindungen. Sobald diese Energieträger unter Sauerstoffzufuhr verbrannt werden, entsteht auf der einen Seite Energie, welche sich als Wärme zeigt und auf der anderen Seite das Treibhausgas Kohlenmonoxid (CO) samt diverser weiterer Verbrennungsprodukte (Quaschnig 2010, S. 16). Durch spezielle Verfahren entstehen aus natürlichen, fossilen Energieträgern veredelte, fossile Energieträger. In diese Kategorie fallen zum Beispiel **Kohlebriketts, Benzin, Dieselmotortreibstoff** und **Wasserstoff**. Des Weiteren existieren synthetische, fossile Energieträger, welche auf zwei Arten produziert werden können. Die eine Möglichkeit besteht darin, den Aggregatzustand von natürlichen, fossilen Energieträgern zu ändern und während dieses Umwandlungsprozesses synthetische fossile Energieträger herzustellen. Die andere Möglichkeit ist, synthetische, fossile Energieträger als Nebenprodukt von Stoffwandlungsverfahren zu produzieren. Ein Beispiel für ein solches Verfahren ist das stoffliche Abfallrecycling. Zu synthetischen, fossilen Energieträgern zählen unter anderem Benzin aus der Kohleumwandlung oder Gichtgas aus der Stahlherstellung (Rebhan 2002, S. 112f.). Die nachfolgenden Tabellen 1 bis 3 fassen Vor- und Nachteile von Erdöl, Erdgas und Kohle zusammen:

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Erdöl

Vorteile	Nachteile
• bestehendes Verkehrsnetz hauptsächlich auf Öl ausgerichtet • Motoren zum größten Teil nur mit Benzin und Diesel einsatzfähig	• rasanter Ölpreisanstieg • begrenzte Rohstoffvorräte (geschätzt auf 40 Jahre) • Klimabelastung durch Kohlendioxid (CO₂)

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Spiegel Online 2011a)

Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Erdgas

Vorteile	Nachteile
• klimafreundlicher als Öl oder Kohle → geringere Menge von Kohlenstoffdioxidentstehung bei Verbrennung • hohe geschätzte Reichweite von 60 Jahren • vorteilhafte Flexibilität → schnelles hoch- und runterfahren von Gaskraftwerken möglich	• nur wenige Länder verfügen über Gasvorkommen → große Abhängigkeiten von diesen Ländern • Gaspreis ist an Ölpreis gebunden

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Spiegel Online 2011a)

Tabelle 3: Vor- und Nachteile von Kohle

Vorteile	Nachteile
• weit verbreitetes Kohlevorkommen → kaum Importabhängigkeiten • Kohlevorrat für mindestens 200 Jahre gesichert	• klimaschädlichster Energieträger • schwere Arbeitsbedingungen bei Kohleförderung

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Spiegel Online 2011a)

2.3.2. Kernenergie

Otto Hahn und Fritz Straßmann legten im Dezember 1938 den Grundstein für die Kernenergie als nutzbare Energiequelle. Sie führten im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, in Berlin-Dahlem, die erfolgreiche Spaltung eines Urankerns durch und ermöglichten somit die weiterführende Forschung in diesem Bereich. Während dem Experiment wurden langsame Neutronen auf einen Uran-235-Kern geschossen. Die Reaktion darauf war die Spaltung des Kerns, die Bildung der atomaren Trümmer - Krypton und Barium, sowie die Entstehung weiterer Neutronen. Ist nach diesem Vorgang noch Uran-235 vorhanden, können die entstandenen Neutronen weitere Urankerne zur Spaltung bringen, welche daraufhin erneut Neutronen absondern und somit eine Kettenreaktion verursachen. Bei einer enorm hohen Menge an Uran entsteht durch eine unkontrollierte Kettenreaktion eine Atombombe (Quaschnig 2010, S. 21f.).

Vor der Entdeckung der Kernspaltung wurde Uran in sehr geringen Mengen in der keramischen Industrie als Farbstoff und zur Bestrahlung in der Medizin eingesetzt. Ab dem Jahr 1945 wurde Uran auch für militärische Zwecke verwendet. Daraufhin stieg die Produktion von Uran drastisch an (Rebhan 2002, S. 97).

Die zivile Nutzung von Kernenergie gelang erstmals am 20. Dezember 1951 im amerikanischen Bundesstaat Idaho. Der „Versuchsreaktor EBR 1“ erzeugte elektrischen Strom durch die Nutzung von Kernenergie. Die Kernspaltung in Atomkraftwerken sollte kontrolliert erfolgen und somit wurden Maßnahmen zur Realisierung dieses Verfahrens entwickelt. Sobald die Kettenreaktion begonnen hat, muss die Anzahl der neu entstehenden Neutronen eingegrenzt werden. Bei jeder weiteren Urankernspaltung werden zwei bis drei Neutronen freigesetzt, von denen jedoch nicht alle, sondern nur ein einziges Neutron einen neuen Kern spalten darf. Aus diesem Grund wurden Regelstäbe eingebaut, welche zum Einfangen der Neutronen benötigt werden und somit die Anzahl der freiwerdenden Neutronen verringern (Quaschnig 2010, S. 23).

Nach mehreren Reaktorunfällen, wie zum Beispiel in den Jahren 1979 in Pennsylvania in den Vereinigten Staaten von Amerika und 1986 in Tschernobyl in der Ukraine, legte sich die Euphorie über die Nutzung der Kernenergie. Das angeblich Unmögliche, der Verlust der Kontrolle über die Kettenreaktion führte zur Kernschmelze. Die daraufhin freigesetzte Radioakti-

vität führte zu einer extrem hohen Strahlenbelastung und in weiterer Folge zu vielen Todes- und Krankheitsfällen. Bei der Nutzung von Kernenergie fallen radioaktive Abfallstoffe an, welche für tausende von Jahren eine große Bedrohung darstellen. Die gefahrlose Endlagerung dieser radioaktiven Stoffe ist bis heute nicht zufriedenstellend gelöst. Von der technischen Seite her ist die Kernenergienutzung beeindruckend, denn die Erzeugung der Elektrizität benötigt nur eine sehr kleine Menge an Brennstoffen. Diesem Nutzen stehen jedoch sehr große Risiken gegenüber (Quaschnig 2010, S. 23f.).

Wie realitätsnahe diese Risiken sind zeigte der Vorfall im Jahr 2011 in Fukushima, Japan. Nach dem Erdbeben und dem darauf folgenden Tsunami kam es in drei verschiedenen Reaktoren im Atomkraftwerk in Fukushima zur Kernschmelze. Die Folgen waren verheerend, die Langzeitauswirkungen sind nicht einschätzbar und ein Ende der Aufräumarbeiten ist noch Jahrzehnte lang nicht in Sicht (Spiegel Online 2011b). Tabelle 4 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Vor- und Nachteile von Kernkraftwerken:

Tabelle 4: Vor- und Nachteile von Kernkraftwerken

Vorteile	Nachteile
• günstige Stromproduktion • geringe laufende Betriebskosten → kleine Menge Uran ausreichend • wetterunabhängig • klimafreundlicher als Kohle und Gas → kaum Freisetzung von Kohlendioxid	• Gefahr von Reaktorunfällen → Umweltverwüstung, Todes- und schwere Krankheitsfälle • ungelöstes Problem der Endlagerung → Atom Müll strahlt bis zu 100.000 Jahre lang • Gefahr von Terroranschlägen mit Kernkraftwerken als Anschlagziel

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Spiegel Online 2011a)

2.3.3. Erneuerbare Energie

Starke Klimaveränderungen in den letzten Jahrzehnten, begrenzte Vorräte und immer höhere Preise von Erdgas und Erdöl führen zu einem Umdenken bezüglich verwendeter Energiequellen. Erneuerbare Energiequellen stellen die passenden Alternativen zu fossilen Energie-

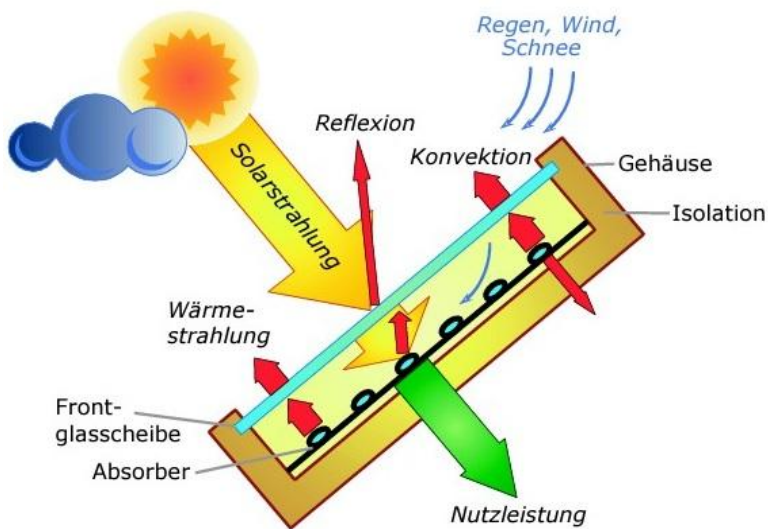
trägern und zur Kernenergie dar (Quaschning 2010, S. 5). Erneuerbare Energie wird definiert als jener Teil der Primärenergie, welcher als unerschöpflich gilt. Als Quellen werden geothermische Energie, Solarenergie und die Energie der Gezeiten herangezogen (Kaltschmitt, Streicher und Wiese 2005, S. 4). Die Ausdrücke „alternative“ oder „regenerative“ Energien können als Synonym für erneuerbare Energien angewandt werden. Zur Kategorie dieser Energieart zählen die Sonnenenergie, die Wasserkraft, die Windenergie, die Biomasse und die Erdwärme (Quaschning 2010, S. 16). Der folgende Abschnitt befasst sich mit den jeweiligen Unterarten der erneuerbaren Energie, um einen bestmöglichen Einblick zu gewähren.

Sonnenenergie

Die derzeit größte und ertragreichste Energiequelle für die Menschheit ist die 150 Millionen Kilometer (km) weit entfernte Sonne. Sie versorgt die Erde täglich mit 15.000 Mal so viel Energie wie benötigt wird, um den weltweiten Primärenergiebedarf zu decken (Geitmann 2009, S. 62). Die Nutzung von Sonnenenergie kann auf verschiedene Arten erfolgen. Die technisch einfachere Variante erfolgt mittels **Solarthermik**. Hier wird aus der Energie des Sonnenlichts Wärme produziert. Eine technische Herausforderung stellt die **Photovoltaik** dar, bei welcher eine direkte Umwandlung von Sonnenlicht in Strom stattfindet (Diekmann, Gierer und Krupp 1991, 2).

Die **Solarthermik** ist in den unterschiedlichsten Bereichen einsetzbar. Beispielhaft kann hier die Warmwasserbereitung und die Wohnungsbeheizung genannt werden. Um die Wärmeübertragung durch Sonnenstrahlung gewährleisten zu können, werden Solarthermie-Module, sogenannte Kollektoren, eingesetzt. Alle Kollektorarten verfügen über einen Absorber (Geitmann 2005, S. 103ff.). Dieser ist für die Umwandlung der Energie in Wärme zuständig. Danach wird diese an ein Wärmeträgermedium, wie zum Beispiel Wasser oder Öl, abgegeben. Im Zuge dieses Umwandlungsprozesses kommt es teilweise zu erheblichen Wärmeverlusten, welche jedoch unvermeidlich sind (Quaschning 2010, S. 136). Abbildung 4 zeigt diese Vorgänge beispielhaft bei einem solaren Flachkollektor.

Abbildung 4: Vorgangsweise in einem solaren Flachkollektor



Quelle: (Quaschnig 2010, 136)

Beim **Photovoltaiksystem**, wobei Licht direkt in Strom umwandelt wird, werden als Grundlage Photovoltaikzellen, welche in Modulen verschaltet sind, benötigt. Solche Zellen setzen sich aus einer negativ dotierten Siliziumschicht, welche einen Elektronenüberschuss aufweisen und einer Schicht, die positiv dotiert ist, jedoch über zu wenige Elektronen verfügt, zusammen. Eine vorhandene Grenzschicht trennt diese beiden Schichten voneinander. Wenn Sonnenlicht auf die jeweiligen Zellen auftrifft, werden Ladungen aus den Siliziumschichten freigesetzt. Durch die Trennung bei der Grenzschicht wird elektrische Spannung gebildet. Mittels einer Verbindung des oberen und unteren Pols schließt sich der Stromkreis und bewirkt das Fließen von Gleichstrom. Dieser Gleichstrom wird durch einen Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt und ermöglicht somit die Einspeisung in ein Stromnetz (Hufnagel 2010, S. 23f.).

Windenergie

Die Generierung elektrischer Energie durch den Gebrauch von Windenergie erfolgt ohne die Notwendigkeit einer anhaltenden Kraftstoffzufuhr (Geitmann 2005, S. 130). Unterschieden wird bei Windkraftwerken zwischen On-Shore und Off-Shore. Einerseits beschreiben die beiden Begriffe, ob sich die jeweiligen Anlagen On-Shore - auf dem Land - oder Off-Shore - vor der Küste - befinden. Andererseits gibt diese Bezeichnung auch Hinweise auf Eigenschaften

welche sich im Fundament, beim Aufbau, bei der Wartung und bei der Netzanbindung bemerkbar machen. Ein Unterschied besteht zum Beispiel in der Bodenverankerung. Bei On-Shore-Anlagen ist diese weitaus einfacher, da das Stahlbetonfundament mittels Kränen im Boden verankert werden kann. Bei Off-Shore-Anlagen ist der Aufbau im Meer weitaus komplizierter und geht risikoreicher von statten (Geitmann 2009, S. 104).

Nach dem Anlagenbau entsteht nur noch durch eventuelle Wartungsarbeiten der Bedarf einer Energiezufuhr. Somit ist das Betreiben der Anlage weitaus weniger energieraubend, als der eigentliche Anlagenbau, bei welchem teilweise eine sehr große Menge an Energie benötigt wird. Anhand der Dauer der energetischen Amortisationszeit lässt sich erkennen, zu welchem Zeitpunkt eine Windkraftanlage jene Menge an Energie erwirtschaftet hat, welche für den Bau der Anlage benötigt wurde. Diese beträgt in der Regel in etwa zwischen vier bis acht Monate. Ab diesem Zeitpunkt erzeugt die Anlage Energie, ohne selbst welche zu verbrauchen. Bei einer Nutzungszeit von 20 Jahren würde das einer Energiegewinnung entsprechen, welche 40 Mal so groß ist, als beim Herstellungsverfahren gebraucht wurde (Geitmann 2005, S. 137).

Wasserkraft

Eine Verknüpfung von Solar- und Windenergie spiegelt sich bei der Energiegewinnung mittels Wasserkraft wider. Das Verdampfen des Wassers durch die Sonneneinstrahlung führt zu Wolkenbildung. Diese Wolken werden durch entstehende Winde landeinwärts geführt. Das Wasser aus den Wolken regnet in den Bergen in Bäche und Flüsse, welche die Wasserkraft gesammelt speichern (Strobl und Zunic 2006, S. 299). Der Wasservorrat der Erde erstreckt sich zirka auf 1,4 Milliarden Kubikkilometer, wobei 97,4 Prozent dieses Vorrats als Salzwasser verteilt in den Weltmeeren zu finden sind und lediglich etwa 2,6 Prozent davon als Süßwasser zur Verfügung stehen. Ein wenig mehr als ein Drittel des Süßwasservorkommens findet sich einerseits im Grundwasser und andererseits in der Bodenfeuchte wieder. Die restlichen drei Viertel dieses Vorkommens treten in gebundener Form auf, wie zum Beispiel in Gletschern oder im Polareis. Das Wasser in Seen und Flüssen macht mit 0,02 Prozent nur einen sehr geringen Anteil aus (Quaschnig 2010, S. 214).

Um dem Wasser Energie entziehen zu können werden sogenannte Wasserturbinen in Wasserkraftanlagen eingesetzt. Abhängig vom Wasserdurchfluss und von der Wasserfallhöhe

werden für den Einsatzort im jeweiligen Wasserkraftwerk speziell angepasste Turbinen verwendet (Quaschnig 2010, S. 216). In der heutigen Zeit zählen insbesondere ältere Wasserkraftwerke, welche ihre Baukosten schon überwiegend abgeschrieben haben, zu den preiswertesten Methoden um Strom aus erneuerbarer Energie zu erzeugen. Sehr hohe Kosten bei der Errichtung und lange Amortisationszeiten würden die Kosten der Stromerzeugung bei einem Neubau beträchtlich erhöhen. Da Wasserkraftanlagen oftmals einen bedeutenden Eingriff in die Natur mit sich bringen zählt diese Form der Energiegewinnung zu den umstrittenen Methoden. Aus diesem Grund ist es von enorm großer Bedeutung Nutzen und Schaden diesbezüglich gegeneinander abzuwägen und sowohl ökologisch, als auch ökonomisch annehmbare Werke zu bauen (Quaschnig 2010, S. 228ff.).

Erdwärme

Unter der Erdoberfläche als Wärme gespeicherte Energie wird Erdwärme oder geothermische Energie genannt. Diese in enormen Mengen vorhandenen Wärmevorkommen sind größtenteils auf die Zerfallsenergie natürlicher radioaktiver Isotope zurückzuführen. Aktuelle Gutachten verweisen auf mehr als 6.000 Grad Celsius im Erdkern und auf mehr als 1.300 Grad Celsius im oberen Erdmantel. Die Nutzung des vorhandenen Wärmeflusses kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Einerseits zur Wärmeversorgung durch die oberflächennahe Geothermie und andererseits für die Wärme- und Stromgewinnung durch Tiefengeothermie (Hennicke und Fishedick 2007, S. 54).

Die oberflächennahe Geothermie verwendet gespeicherte Wärme aus Tiefen von bis zu 200 Metern. Zur direkten Nutzung der Erdwärme ist diese Tiefe nicht ausreichend. Aus diesem Grund wird die Wärme mit der Hilfe von Pumpen auf ein angenehmes Temperaturniveau gebracht, um als Raumwärme genutzt werden zu können. Eine flächendeckende Nutzbarkeit ist weitestmöglich gegeben, jedoch ist die Ergiebigkeit sehr unterschiedlich. Die Tiefengeothermie kann entweder zur Wärmenutzung oder zur Stromerzeugung herangezogen werden. Bei der Wärmenutzung werden Heißwasseraquifere angezapft (Hennicke und Fishedick 2007, S. 54f.). Damit „ist ein Boden oder Gesteinskörper, in dessen Hohlräumen Grundwasser fließen kann“ gemeint (Wasserwirtschaft.Steiermark 2012). Um Strom durch Tiefengeothermie erzeugen zu können, ist eine Temperatur von mindestens 100 Grad Celsius erforderlich. Dieses Temperaturniveau ist in einer Tiefe ab 3.000 Meter vorhanden. Die

derzeitige Grenze bei Tiefenbohrungen liegt bei 7.000 Meter. Ein Wärmetauscher ist für die Aufnahme der Wärme aus dem Erdinneren verantwortlich und ermöglicht die Stromerzeugung (Hennicke und Fishedick 2007, S. 54f.).

Biomasse

Bei Biomasse handelt es sich um alle Stoffe, welche von organischer Herkunft sind und somit aus kohlenstoffhaltiger Materie bestehen. Dies umfasst in der Natur lebende Zoo- und Phytomasse, wie Tiere und Pflanzen, die daraus entstehenden Rückstände, wie Tierexkremente, tote, aber noch nicht fossile Zoo- und Phytomasse, wie zum Beispiel Stroh und jene Stoffe, welche bei technischen Umwandlungen oder durch stoffliche Anwendung entstanden sind, wie Schlachtabfälle oder Pflanzenöle (Hartmann und Kaltschmitt 2001, S. 2). Bioenergieträger haben einen dreiphasigen Lebenszyklus. In der ersten Phase, der Wachstumsphase, sind chemische Eigenschaften und der erwünschte Ertrag beeinflussbar. Danach folgt die Aufbereitungsphase, in welcher die physikalischen Eigenschaften der Energieträger eine wichtige Rolle spielen. In der abschließenden Phase, der Nutzung, ist die Qualität für die Handhabung, die Lagerung und die Zuführung von enormer Bedeutung. Daraus ergeben sich wichtige Einzelschritte, wie das Einpflanzen, das Wachstum, die Ernte, die Aufbereitung, die Verdichtung, die Trocknung, die Lagerung, der Transport und der abschließende Umschlag, die für ein qualitativ hochwertiges Ergebnis Sorge tragen (Schabbach und Viktor 2009, S. 102).

Die konkrete Ausgestaltung der einzelnen Schritte ist von diversen Faktoren, wie zum Beispiel der benötigten Biomasse oder der verwendeten Umwandlungstechnik abhängig. Die Umwandlung jener Energieträger kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Entweder werden diese direkt in Endenergie, wie zum Beispiel in Strom oder in Nutzenergie, wie Wärme gewandelt, oder es erfolgt eine Verwandlung in andere Energieträger, beispielsweise Holzkohle oder Gas (Schabbach und Viktor 2009, S. 102). Exemplarisch kann hierfür auch Biomasse genannt werden. Aus Biomasse hergestellte Biokraftstoffe können die Aggregatzustände flüssig oder gasförmig annehmen und sind für den Antrieb von Fahrzeugverbrennungsmotoren einsetzbar. Die beiden am häufigsten verwendeten Biokraftstoffe sind Biodiesel und Bioethanol (Winter 2011).

Aktueller Stand und Entwicklungsmöglichkeiten erneuerbarer Energien

Nach der genauen Betrachtung der einzelnen erneuerbaren Energiearten, folgt nun ein Überblick bezüglich ihrem aktuellen Stand und ihrem möglichen Entwicklungspotential mit Hauptaugenmerk auf dem mobilen Sektor. Der Rat zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und das Europäische Parlament haben die Richtlinie 2009/28/EG beschlossen, welche am 25. Juni 2009 in Kraft getreten ist. Diese Richtlinie enthält die Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energie am totalen Bruttoendenergieverbrauch in der Europäischen Union als verbindliches Endergebnis. Im Jahr 2005 betrug der Anteil an erneuerbarer Energie in etwa 8,5 Prozent. Bis zum Jahr 2020 hat dieser Wert auf 20 Prozent anzuheben. Dieser angestrebte Wert wurde innerhalb der einzelnen Mitgliedsstaaten anhand nationaler Potenziale aufgeteilt. Somit liegen die Anteile unterschiedlich verteilt zwischen zehn Prozent für Malta bis hin zu 49 Prozent für Schweden (Böhme, Dürrschmidt und Van Mark 2011, S. 57). Der erneuerbare Energieanteil am Endenergieverbrauch in Österreich belief sich im Jahr 2010 auf 31 Prozent. Bis zum Jahr 2020 muss dieser Wert auf 34 Prozent erhöht werden, um die Anforderungen der Richtlinie zu erfüllen (Umweltbundesamt 2012). Ein weiteres Ziel dieser Richtlinie besteht in der Verwendung von mindestens **zehn Prozent erneuerbarer Energie** beim Energieverbrauch des **Transportsektors**. In diese Kategorie fällt neben Biokraftstoff auch Strom, welcher aus erneuerbaren Energien gewonnen wird (Böhme, Dürrschmidt und Van Mark 2011, S. 57).

Der Verbrauch von Biokraftstoff in der **Europäischen Union** belief sich im Jahr 2010 insgesamt auf 13,9 Millionen Öleinheiten. Dieser Wert zeigt eine Erhöhung des Verbrauchs um 13,6 Prozent im Vergleich zum Vorjahr. Da die Erhöhung des Biokraftstoffverbrauchs vom Jahr 2008 auf 2009 jedoch 28,9 Prozent betrug, zeigt der aktuelle Wert einen Rückgang der Wachstumsrate (EurObserv'ER 2011, S. 1). Innerhalb der Europäischen Union ist Biodiesel der bedeutendste Biokraftstoff, da er fast 80 Prozent vom totalen Biokraftstoffverbrauch ausmacht. Biodiesel wird größtenteils aus Rapsöl hergestellt und kann fossilem Diesel beigemischt werden. Der Biokraftstoff Ethanol wird in der Europäischen Union überwiegend durch die Fermentation von Getreide und Zuckerrüben hergestellt. Dieser wird entweder direkt dem Benzin beigemischt oder zu Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether umgewandelt (Böhme, Dürrschmidt und Van Mark 2011, S. 77). Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether führt zu einer verbesserten Klopfestigkeit bei Kraftstoffen, welche die Gefahr einer unkontrollierten Kraftstoffselbstent-

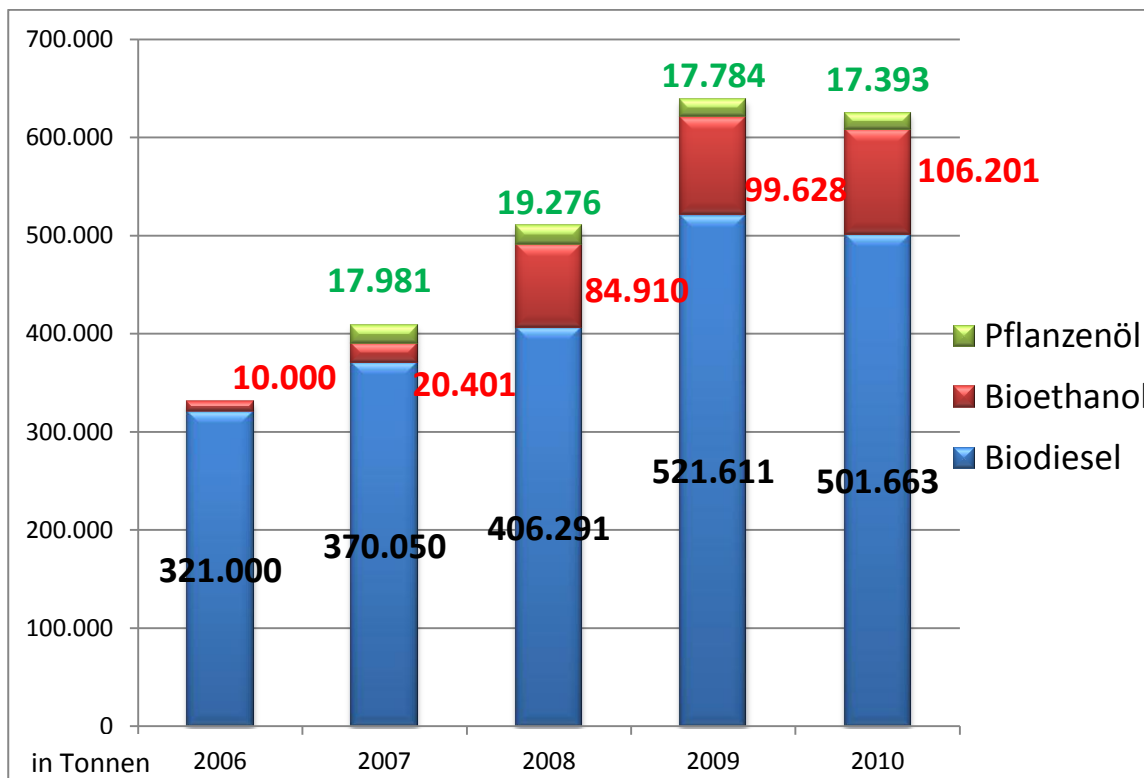
zündung verringert (Paschotta o.J.). Weitere Kraftstoffe in diesem Bereich, wie zum Beispiel Biogas und Pflanzenöl, haben einen lediglich einprozentigen Anteil am Gesamtverbrauch. Im Bereich der Kraftstoffherstellung ist **weltweit** gesehen Ethanol beziehungsweise daraus produzierter Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether die bevorzugte Wahl. Der Anteil von Biodiesel beträgt auf globaler Ebene nur knapp ein Viertel der Biokraftstoffbereitstellung (Böhme, Dürrschmidt und Van Mark 2011, S. 77).

In **Österreich** gliederte sich der gesamte Energieverbrauch aus dem Jahr 2010 prozentual gesehen in folgende Bereiche: (Biermayr 2011, S. 10)

- 25,7 Prozent private Haushalte
- 2,1 Prozent Landwirtschaft
- 10,9 Prozent Dienstleistungsbereich
- 28,4 Prozent Sachgüterproduktion und
- **32,9 Prozent Verkehr**

Die Anteile **erneuerbarer Energie** am gesamten Endverbrauch beliefen sich im Jahr 2010 auf 30,8 Prozent. Im Bereich der Stromerzeugung wurden 65,3 Prozent aus erneuerbaren Energien produziert. Bei der Fernwärme belief sich der Anteil auf 38,3 Prozent, bei anderen erneuerbaren Energien auf 27,5 Prozent und im **Verkehrsbereich auf 6,3 Prozent** (Biermayr 2011, S. 10). Im Jahr 2010 wurden 336.654 Tonnen Biodiesel, 156.860 Tonnen Bioethanol und etwa 1.758 Tonnen Pflanzenöl in **Österreich** produziert. Biodiesel kann entweder fossilen Treibstoffen beigemischt werden oder als reiner Biotreibstoff vertrieben werden. Bioethanol wird seit dem Jahr 2007 Benzin beigemischt und das Pflanzenöl findet seine Verwendung in landwirtschaftlichen Bereichen und im Straßengüterverkehr. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die jährlichen Absatzmengen der Biotreibstoffe von den Jahren 2006 bis 2010 in Österreich (Biermayr 2011, S. 27).

Abbildung 5: Jährliche Biotreibstoffabsatzmenge in Österreich von 2006 bis 2010



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Biermayr 2011, S. 27)

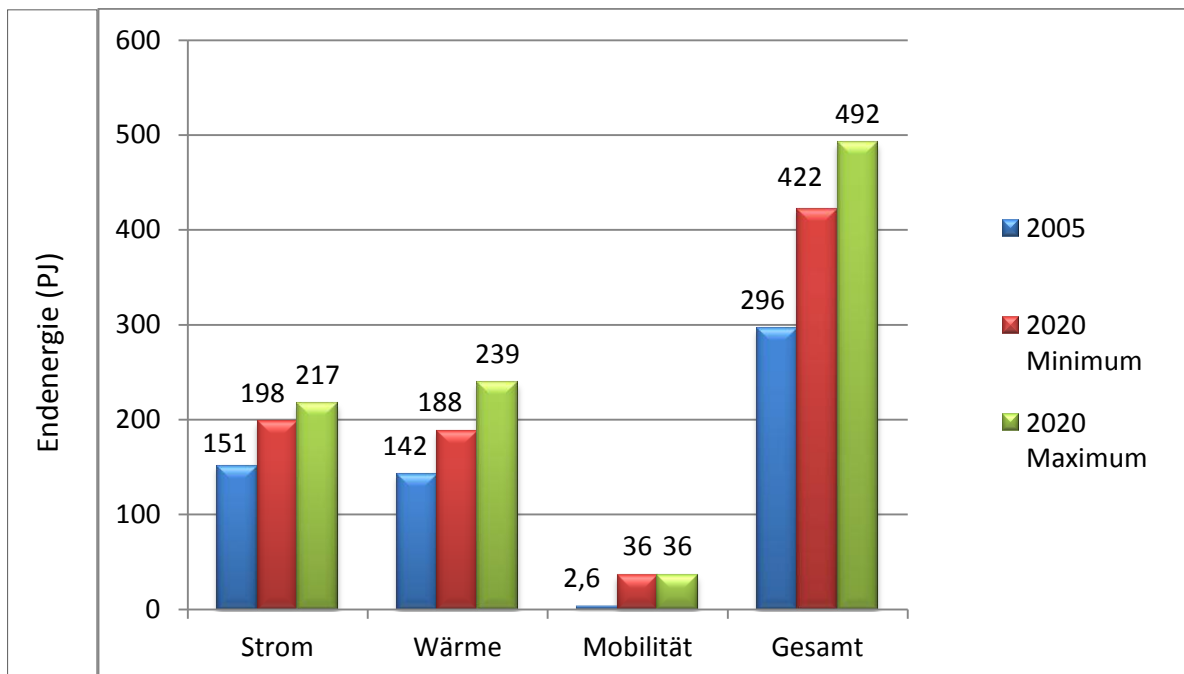
Im Jahr 2011 wurden in Österreich 309.598 Tonnen Biodiesel und 170.994 Tonnen Bioethanol hergestellt. Der Biodiesel-Absatz innerhalb Österreichs belief sich auf 264.885 Tonnen. Davon wurden 190.984 Tonnen an die Mineralölindustrie abgesetzt und 73.901 Tonnen als Biodiesel direkt dem Verkehr zugeführt. Im Bereich von Bioethanol gab es einen inländischen Umsatz von 45 Prozent der Gesamtproduktion. Das in Österreich produzierte Bioethanol besteht zu 45 Prozent aus Weizen und zu 55 Prozent aus Mais. Bei der heimischen Biodieselproduktion wurden 69,3 Prozent pflanzliche Frischöle; 10,3 Prozent Tierfette; 0,99 Prozent sonstige Rohstoffe wie zum Beispiel Fettsäuren und 19,5 Prozent Altspeiseöle verwendet. Der Herkunftsort der verwendeten Rohstoffe für die Biokraftstoffe spielt aufgrund der Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle für österreichische Produzenten. Aus diesem Grund stammten alle für Bioethanol verwendeten Rohstoffe zu 100 Prozent und zu 84 Prozent bei Biodiesel aus der Europäischen Union. Österreich verwendet nicht nur im Inland produzierte Biokraftstoffe, sondern bezieht diese auch aus angrenzenden Importquellen (Thayer 2012).

Um die Vorgabe der oben genannten Richtlinie bezüglich der Erhöhung der erneuerbaren Energieanteile auf zehn Prozent im Verkehrssektor zu erfüllen, soll die Biokraftstoff-

Beimischungsquote zu Diesel und Benzin erhöht werden. Aktuell liegen diese Werte bei Diesel auf sieben Prozent und bei Benzin auf fünf Prozent. Zukünftig sollen beide Werte auf zehn Prozent angehoben werden (OEM-AG 2012). Weiters sollen die Förderungsmittel für alternative Fahrzeuge und Umrüstungen auf erneuerbare Kraftstoffe aufgestockt werden (Lebensmittelministerium 2009, S. 42).

Das österreichische Lebensmittelministerium hat für das Jahr 2020 für erneuerbare Energien in Österreich ein Potential von 422 bis 492 Petajoule (PJ) Endenergie errechnet (Lebensmittelministerium 2009, S. 5). Peta steht für eine Billiarde und Joule für eine international verbindliche Energiemaßeinheit. 3,6 PJ ergeben umgerechnet eine Terawattstunde (TWh), welche sich aus eine Milliarde Kilowattsunden (kWh) zusammensetzt (Agenda 21 2005). Dieses Potential teilt sich mit 188-239 PJ im Wärmesektor, 198-217 PJ im Bereich Strom und 36 PJ im Mobilitätsbereich auf. Abbildung 6 zeigt das errechnete Potential im besten und im schlechtesten Fall anhand eines Vergleiches zu Zahlen aus dem Jahr 2005 (Lebensmittelministerium 2009, S. 37).

Abbildung 6: Erneuerbare Energieträger in Österreich - Stand 2005 & Potential 2020



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Lebensmittelministerium 2009, S. 37)

2.4. Energiefazit

Der Energiesektor macht aktuell eine Wandlungsphase durch, in welcher die bisherige Vorgehensweise bei der Energiegewinnung in Frage gestellt wird. Der Weggang von fossilen Energieträgern und die Suche nach nachhaltigen Alternativen haben enorm an Bedeutung gewonnen. Mittlerweile haben erneuerbare Energien einen festen Platz in der Energiewirtschaft von heute. Gefordert wird ein verantwortungsbewusster Umgang mit der Umwelt und der Energie. Dies wird durch einen effizienten Einsatz von erneuerbaren Energien ermöglicht. Zu den erneuerbaren Energiequellen zählen die Windenergie, die Erdwärme, die Bioenergie, die Sonnenenergie und die Wasserkraft. Die Umstellung von der heute gängigen Nutzung fossiler Energieträger und Kernenergie auf eine nachhaltige Energiewirtschaft ist nicht unproblematisch. Obwohl das Potential erneuerbarer Energie beeindruckend ist, steht es derzeit aber noch nicht in vollem Ausmaß zur Verfügung. Zur Deckung von Lastspitzen und bei der Notwendigkeit von Regelenergie kann derzeit noch die erneuerbaren Energien im gesamten Energiekreislauf immer weiter erhöht und angewendete Techniken weiter verbessert werden (Geitmann 2009, S. 12ff.).

Da erneuerbare Energien nicht immer an den benötigten Orten und zu den gewünschten Zeiten zur Verfügung stehen, wie es zum Beispiel bei der Sonnenenergie auf Grund der begrenzten Anzahl an Sonnenstunden der Fall ist, wird eine Transport- und Speichermöglichkeit benötigt. Diese beiden Kriterien erfüllt Wasserstoff und somit wird er als potentieller Energieträger von immer größerer Bedeutung. Sowohl erneuerbare, als auch klassische Energieformen können in Wasserstoff überführt werden und sind somit austauschbar. Diese Tatsache macht Wasserstoff zu einem gemeinsamen Nenner der Energietechnik (Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband o.J.). Die drei nachfolgenden Kapitel geben eine Einführung zum Thema Wasserstoff, den dazugehörigen Anwendungsgebieten und dem ökonomischen Potential.

3. Wasserstoff Allgemein

Im Periodensystem der Elemente befindet sich Wasserstoff in der ersten Periode mit der Ordnungszahl Eins und wird unter dem Symbol H geführt (Rühle 2005, S. 22). Wasserstoff ist das kleinste existierende Atom und hat als Kern ein Proton, welches von einem Elektron umkreist wird. Mit einer Häufigkeit von mehr als 92,7 Prozent ist es, das am öftesten vorkommende Element im Universum. Aufgrund der geringen Temperatur- und Druckwerte kommt Wasserstoff im Weltall in atomarer Form vor. Dies ist auf der Erde nicht möglich, da Wasserstoff wegen seiner starken Reaktivität unverzüglich Verbindungen mit anderen Atomen eingeht. Meistens verbindet sich Wasserstoff mit sich selbst zu einem Wasserstoffmolekül (H_2). Dieses Wasserstoffmolekül kommt auf der Erde, außer in geothermalen Quellen und Vulkangasen, nicht in seiner reinen Form vor, sondern verbindet sich am häufigsten mit Sauerstoff (O) zu Wasser (H_2O). Weitere Verbindungen, in welchen Wasserstoff vorkommt, sind unter anderem Alkohole, Säuren, Fette, Proteine, Eiweiße und organische Verbindungen wie Kohlenwasserstoffe, zum Beispiel in Methan (CH_4) oder Ethan (C_2H_6) (Eichseder und Klell 2010, S. 31).

Da Wasserstoff der Brennstoff der Sonne ist, besteht diesbezüglich eine deutliche Abhängigkeit. Im Sonnenkern werden durch Kernfusionen laufend große Wasserstoffmengen in Helium umgewandelt. Bei diesem Vorgang wird Energie frei, welche an die Oberfläche der Sonne gelangt und in Form von sichtbarem Sonnenlicht in den Weltraum - unter anderem zur Erde - abgestrahlt wird. Dieses Licht ist die Grundvoraussetzung für die Entstehung von Leben (Rühle 2005, S. 23). Wasserstoff spielt bei sehr vielen Stoffwechselprozessen von Menschen, Tieren und Pflanzen eine bedeutende Rolle und ist somit lebensnotwendig für alle Lebewesen. Er ist mit über 60 Prozent das häufigste im menschlichen Körper vorkommende Element und macht in etwa zehn Prozent der jeweiligen Körpermasse aus (Eichseder und Klell 2010, S. 31).

Der Aggregatzustand von Wasserstoff ist unter normalen Umgebungsbedingungen gasförmig. Wasserstoff ist nicht reizend, ungiftig, geruchslos, umweltneutral, unsichtbar, nicht radioaktiv, geschmackslos, leicht flüchtig und nicht krebserregend. Der Schmelzpunkt von Wasserstoffmolekülen liegt bei -259,15 Grad Celsius und der Siedepunkt von flüssigem Wasserstoff bei -252,76 Grad Celsius. Wasserstoff ist mit knapp 0,15 Prozent das dritthäufigste

Atom, welches in der Erdkruste zu finden ist (Geitmann 2004, S. 53ff.). Bei vorherrschender Raumtemperatur ist Wasserstoff sehr beständig und ohne Eingriff von Außen reagiert er nicht mit der Luft in der Umgebung. Stattdessen vermischt sich Wasserstoff sehr rasch mit allen Bestandteilen aus der Luft. Dies führt zur schnellen Unterschreitung der unteren Zündgrenze und verhindert somit die Möglichkeit der Entzündung. Falls jedoch Wasserstoff gemischt mit Sauerstoff durch eine Flamme entzündet wird, kommt es zur sogenannten Knallgasreaktion, bei welcher ein Verbrennungsvorgang mit einem Knall einsetzt. Dies kann nur geschehen, wenn der volumetrische Anteil des Wasserstoffs zwischen vier und 77 Prozent beträgt, genügend Zündenergie zugeführt wird und ausreichend Sauerstoff vorhanden ist. Wasserstoff hat die Möglichkeit, trotz seines geringen Eigengewichts, sehr viel Energie zu speichern (Rühle 2005, S. 22f.). Ein Kilogramm (kg) Wasserstoff entspricht 2,75 kg Benzin und ein Liter (l) flüssiger Wasserstoff ist mit 0,27 l Benzin gleichzusetzen (Rühle 2005, S. 67).

Um einen genaueren Einblick in das Thema Wasserstoff zu erhalten, befasst sich dieses Kapitel mit den Grundlagen, der Geschichte, den verschiedenen Produktionsmethoden, dem Stand der Forschung und Entwicklung, den einzelnen Speicherungs- und Transportmöglichkeiten und der Sicherheit von Wasserstoff.

3.1. Geschichte

Theophrastus Bombastus von Hohenheim, auch bekannt unter dem Namen Paracelsus, gilt als Entdecker des Wasserstoffs. Der Alchemist und Physiker aus dem Zeitalter der Renaissance beobachtete die Entwicklung eines brennbaren Gases, wenn Metalle von Säuren angegriffen wurden. Im Jahr 1766 entdeckte der englische Adelige Henry Cavendish, dass Wasserstoff eine individuelle Substanz mit ganz typischen Eigenschaften ist. Er betitelte seine Entdeckung als „brennbare Luft“ (Romm 2006, S. 50).

1780 legte Luigi Galvani den Grundstein zur Wasserstofftechnologie, indem er die Umwandlungstheorie von chemischer in elektrische Energie aufstellte. Alessandro Volta entdeckte 1783 die „Voltaische Zelle“, welche die Stromerzeugung zwischen einem nassen und zwei trockenen Leitern ermöglicht. Der Pariser Physikprofessor Jacques Alexandre Cesar Charles ließ 1783 den ersten Wasserstoffballon aufsteigen. Der französische Chemiker Antoine Laurent Lavoisier gab dem Element im Jahr 1787 den Namen „Hydrogène“, was „Wasserbildner“ bedeutet. Der Name leitet sich aus den griechischen Wörtern „hydor“, welches

für Wasser steht und „genes“, welches erzeugend bedeutet, ab. Aus dieser Bezeichnung wurde „H“ als Elementsymbol hergeleitet. Gegen 1800 gelang dem deutschen Chemiker Johann Wilhelm Ritter die Durchführung der Elektrolyse von Wasser in einem U-förmig gebogenen Glasrohr. Francois Isaac de Rivaz baute 1807 das allererste mit Wasserstoff betriebene Fahrzeug. Der aus England stammende Jurist und Physiker Sir William Grove entdeckte 1839 die Möglichkeit der direkten Umwandlung von chemischer Wasserstoffenergie in elektrische Spannung, ohne einen Umweg über mechanische Energien tätigen zu müssen. Durch die Verwendung einer „Knallgaszelle“ konnte er die Freisetzung elektrischer Energie bei der Umkehrung der Elektrolyse von Wasser beweisen. Durch dieses Experiment gilt er als Brennstoffzellenerfinder. 1898 gelang James Dewar die Produktion von flüssigem Wasserstoff. Die erstmalige Wasserstoffgasspeicherung in Stahlflaschen gelang 1901 Ernst Wiss in Griesheim. Ein weniger erfreuliches Ereignis in der Geschichte des Wasserstoffs geschah 1937 in Lakehurst, in den Vereinigten Staaten von Amerika. Die Umhüllung des Wasserstoff-Zeppelin Hindenburg fing bei seiner Landung Feuer und verbrannte innerhalb von nur wenigen Minuten vollständig. Das Unglück forderte 36 Menschenleben. Varta und Siemens starteten in den fünfziger Jahren die Forschung über alkalische Brennstoffzellen. 1956 wurde der erste Prototyp eines mit flüssigem Wasserstoff betriebenen Flugzeuges, der Bomber B57, fertiggestellt. Der amerikanische Physiker Francis T. Bacon stellte im Jahr 1959 die erste praxistaugliche Brennstoffzelle vor, mit deren Hilfe Energie kontrolliert gewonnen werden konnte. Seit 1963 wurde Wasserstoff bei der Raumfahrt in alkalischen Brennstoffzellen zur Bordenergieversorgung eingesetzt und das dabei entstandene Wasser zur Trinkwasserversorgung herangezogen. Ab dem Jahr 1968 wurde Wasserstoff bei Raumflügen zum Mond und bei Space-Shuttle-Flügen verwendet (Geitmann 2004, S. 274ff.) (Rühle 2005, S. 16ff.).

Der erste Wagen mit bivalentem Wasserstoffverbrennungsmotor, welcher entweder mit Flüssigwasserstoff oder mit Benzin betrieben werden konnte, wurde 1979 von der deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt in Zusammenarbeit mit den Bayerischen Motoren Werken (BMW) gebaut. 1994 wurde das erste Daimler-Brennstoffzellen-Versuchsfahrzeug „NeCar1“ entwickelt. Einem Team von amerikanischen Forschern gelang 1996 die Produktion von festem Wasserstoff, welcher elektrischen Strom ebenso gut leitet wie die Metalle Cäsium und Rubidium. Die allererste Tankstelle für Wasserstoff wurde in München 1999 eröffnet. Für die „Expo 2000“ brachte BMW die erste Kleinserie von 15 was-

serstoffbetriebenen Fahrzeugen heraus. Im Jahr 2002 verleasten Honda und Toyota die ersten Brennstoffzellenfahrzeuge an öffentliche Institutionen (Geitmann 2004, S. 274ff.) (Rühle 2005, S. 16ff.). Seither wurde immer weiter an den Möglichkeiten zur Herstellung beziehungsweise zur Verwendung von Wasserstoff geforscht. Beispiele hierfür finden sich im Kapitel 3.3. Forschung und Entwicklung. Der folgende Abschnitt behandelt die verschiedenen Wasserstoffproduktionsmöglichkeiten.

3.2. Erzeugung

Wasserstoff kommt in der Natur nur als Sekundärenergieträger vor und ist somit an andere Elemente gebunden. Aus diesem Grund müssen Verfahren zur Gewinnung angewandt werden (Rühle 2005, S. 25). Die wasserstoffhaltigen Rohstoffe, die bei diesen Verfahren verwendet werden, sind Wasser und Kohlenwasserstoffverbindungen. Die überwiegende Mehrheit des produzierten Wasserstoffs wird derzeit aus den fossilen Energieträgern Erdgas, Methan und Kohle produziert (Quaschnig 2010, S. 295).

Die verschiedenen Herstellungsmethoden lassen sich in Reformierung, direkte Spaltung von Kohlenwasserstoffen, Vergasung, Elektrolyse, thermo- und photochemische Verfahren, sowie in photobiologische Verfahren unterteilen (Jordan 2008, S. 19). Danach erfolgt zusätzlich ein Nachreinigungsverfahren. Im Folgenden werden die einzelnen Verfahren näher erläutert.

3.2.1. Reformierung

Die Umwandlung von Kohlenwasserstoffen und Alkoholen in Wasserstoff wird als Reformierung bezeichnet. Bei diesem Prozess fallen die Nebenprodukte Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Wasserdampf an. Bei zusätzlichem Einsatz von Luft als Oxidationsmittel wird außerdem noch Stickstoff produziert. Die einzelnen Reformierungsverfahren lassen sich unterteilen in Dampfreformierung, partielle Oxidation und autotherme Reformierung (Jordan 2008, S. 19).

Dampfreformierung

Dampfreformation wird aktuell als häufigste Methode bei der Wasserstoffproduktion eingesetzt. Die geeignetsten Ausgangsstoffe für diesen Prozess sind fossile Kraftstoffe, wie zum Beispiel Erdgas, Biogas und Methanol, welche über einen hohen Anteil an Wasserstoffmolekülen verfügen. Der erste Schritt besteht in der Erzeugung eines wasserstoffreichen Gasge-

misches. Dies geschieht bei der Umsetzung des verwendeten Energieträgers mit Wasserdampf, während Wärme zugeführt wird. Um diese Reaktion einzuleiten werden Nickel-Katalysatoren verwendet. Das daraus, stark Kohlenstoffmonoxid belastete, entstandene Gasgemisch, wird mit Wasserdampf in zwei katalytischen Konverter in Kohlenstoffdioxid überführt. Der erste Schritt der Umwandlung, die Hochtemperatur-Konvertierung, findet zwischen 320 bis 400 Grad Celsius statt. Anschließend folgt der zweite Umwandlungsschritt, die Niedertemperatur-Konvertierung, welcher in etwa bei 180 bis 240 Grad Celsius von staten geht. Durch dieses Verfahren wird der Kohlenmonoxid-Anteil, welcher anfänglich zwischen zehn und 15 Volumen-Prozent lag, auf einen Anteil von nur noch 0,3 bis 0,6 Volumen-Prozent reduziert. Die daraufhin folgende Stufe der Gasreinigung entfernt, bis auf einen geringen Restbestand, das noch vorhanden Kohlenstoffmonoxid und stellt somit die gewünschte Reinheit sicher. Danach besteht die Möglichkeit den Wasserstoff von anderen störenden Bestandteilen, wie zum Beispiel Schwefel, durch eine Druckwechsel-Adsorption zu befreien. Die benötigten Temperaturen bei dem Prozess der Reformierung hängen von den herangezogenen Kraftstoffen und deren chemischer Zusammensetzung ab. Der Wirkungsgrad beläuft sich auf 80 Prozent (Geitmann 2004, S. 64f.).

Partielle Oxidation

Bei der partiellen Oxidation wird der Reformeinheit Sauerstoff und Erdgas oder ein anderer Kohlenwasserstoff beigemischt. Wasserdampf kommt bei diesem Verfahren nicht zum Einsatz. Durch Freisetzung von Wärme reagiert das Erdgas, bei Temperaturen zwischen 1.300 und 1.400 Grad Celsius, mit dem Sauerstoff zu Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid. Bei diesem Verfahren liegt der Wirkungsgrad in etwa bei 70 Prozent. Die partielle Oxidation wird häufig in Raffinerien angewandt. Dort können billige Reste aus der Mineralölaufbereitung als Ausgangsmaterial herangezogen werden (Geitmann 2004, S. 67).

Autotherme Reformierung

Die autotherme Reformierung vereint die Dampfreformation mit der partiellen Oxidation, um eine Optimierung des Wirkungsgrades zu erreichen (Jordan 2008, S. 24). Der Name „autotherm“ lässt sich auf die Tatsache zurückführen, dass der verwendete Reformer seine benötigte Wärme selbständig erzeugt (Geitmann 2004, S. 68). Als Ausgangsstoffe können hierbei alle Kohlenwasserstoffe, beziehungsweise jedes Kohlenwasserstoffgemisch verwen-

det werden. Die Kombination der beiden Verfahren zielt darauf ab, den Vorteil der Oxidation (Wärmeenergiebereitstellung) und den Vorteil der Dampfreformation (hohe Wasserstoffausbeute), zu vereinen. Ermöglicht wird dies, durch eine exakte Dosierung der Wasserdampf- und Luftzufuhr (Jordan 2008, S. 24). Da nach dem Prozess eine aufwändige Nachreinigung erfolgen muss, hat sich dieses Verfahren bis lang noch nicht durchgesetzt (Geitmann 2004, S. 68).

3.2.2. Direkte Spaltung von Kohlenwasserstoffen

Eine weitere Produktionsmöglichkeit besteht in der direkten Spaltung von Kohlenwasserstoffen. Die beiden Verfahren, welche in den kommenden Absätzen näher erläutert werden, sind „Cracken“ und das „Kvaerner Verfahren“ (Eichlseder und Klell 2010, S. 67f.).

Cracken

Cracken bezeichnet eine thermische oder katalytische Spaltung von Kohlenwasserstoffen, welche unter Luftabschluss bei einer hohen Temperatur von mehr als 800 Grad Celsius stattfindet. Durch diesen endothermen Prozess kann aus allen Kohlenwasserstoffen Wasserstoff, ohne Kohlendioxid als Nebenprodukt, hergestellt werden. Jedoch ist die Ausbeute an Wasserstoff sehr gering und der dafür benötigte Einsatz an Energie sehr hoch (Eichlseder und Klell 2010, S. 67f.).

Kvaerner Verfahren

Das Verfahren wurde Anfang 1980 in Norwegen entwickelt. Beim Kvaerner Verfahren wird Wasserstoff und Aktivkohle aus Erdgas oder Schweröl und Elektrizität hergestellt, ohne dabei Kohlendioxid zu produzieren. In dem ersten Schritt, beim sogenannten Plasmabogen-Prozess, werden bei etwa 1.600 Grad Celsius Kohlenwasserstoffverbindungen in Reinstkohle und Wasserstoff getrennt. Neben dem jeweiligen Primärenergieträger, wie beispielsweise Erdgas oder Mineralöl, werden zusätzlich noch Kühlwasser und Strom, jedoch kein Sauerstoff benötigt. Eine solche Anlage hat einen Wirkungsgrad von nahezu 100 Prozent, wovon 48 Prozent im produzierten Wasserstoff, 40 Prozent in der entstandenen Aktivkohle und in etwa zehn Prozent im Heißdampf enthalten sind. Der hergestellte Wasserstoff hat einen hohen Grad an Reinheit und die Kosten halten sich demgegenüber gestellt im niedrigen Bereich. Ein weiterer Vorteil eines solchen Verfahrens besteht in der Flexibilität, welche eine

schnelle Regelbarkeit ermöglicht. Am sinnvollsten ist diese Methode, wenn ausreichend Erdgas, aber zu wenig Kohle vorhanden ist und außerdem die Möglichkeit der sofortigen Verwendung oder Wasserstoffspeicherung gegeben ist (Geitmann 2004, S. 69).

3.2.3. Vergasung

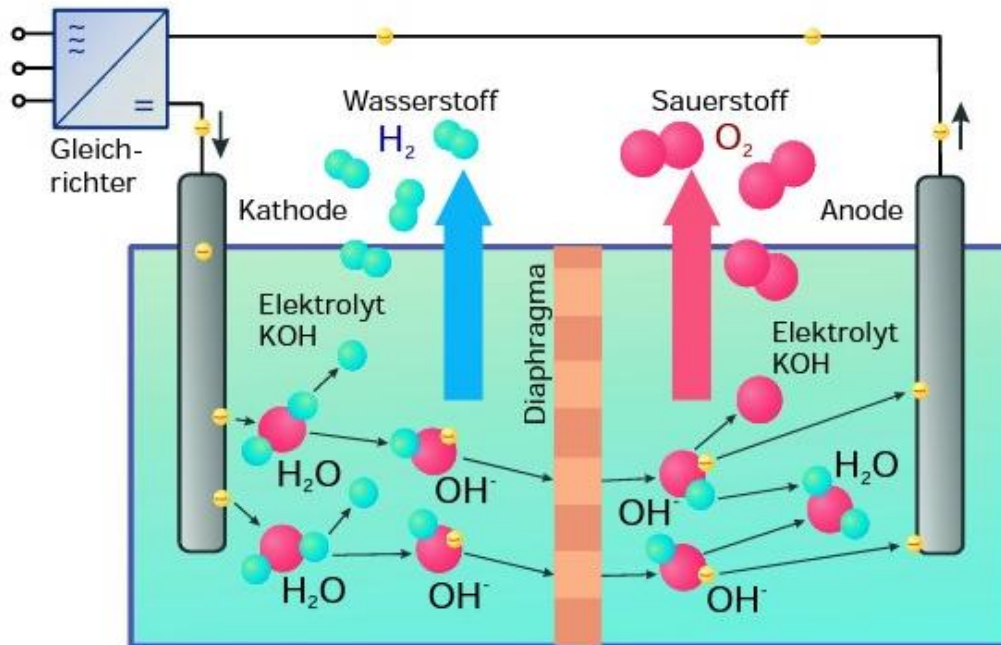
Um feste Kraftstoffe zu vergasen werden Temperaturen zwischen 800 und 2.000 Grad Celsius und ein Druck von bis zu 40 bar benötigt. Die am häufigsten verwendeten Methoden bei der Vergasung sind die Kohlevergasung, die drucklose Kohlestaub-Vergasung, die Vergasung von Biomasse, die Braunkohle-Hochtemperatur-Vergasung und die Druck-Vergasung im Festbett. Die verschiedenen Wirkungsgrade der Verfahren liegen, abhängig vom verwendeten Ausgangsprodukt, in etwa bei 55 Prozent (Geitmann 2004, S. 69f.). Der Prozess der Vergasung teilt sich in vier Teile auf. Er startet mit der Trocknung, wo das Wasser entzogen wird, nachfolgend kommt die Thermo- beziehungsweise Pyrolyse, wo die Aufheizgeschwindigkeit und die Größe der Brennstoffpartikel bestimmt werden. Der dritte Schritt besteht aus der Oxidation, bei welcher der zerlegte Rohstoff teilweise verbrennt und dadurch eine hohe Menge an benötigter Energie deckt. Abschließend bei der Reduktion reagieren die bei der Oxidation gebildeten Produkte, wie Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff mit Kohlenstoff bei Temperaturen von 500 bis 1.000 Grad Celsius (Eichlseder und Klell 2010, S. 68ff.).

3.2.4. Elektrolyse

Elektrolyse ist eine elektrochemische Zerlegung einer bestimmten Substanz mit Hilfe von zugeführtem Strom. Bei diesem Verfahren erfolgt eine Umwandlung von elektrischer in chemische Energie (Jordan 2008, S. 26). Beispielhaft hierfür kann die alkalische Elektrolyse angeführt werden. Zwei Elektroden werden in einen wässrigen leitfähigen Elektrolyten, wie zum Beispiel einer Mischung aus Wasser und Kalilauge (KOH), eingetaucht. Die Kathode und die Anode leiten in den Elektrolyten Gleichstrom, wo Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff getrennt wird (Quaschnig 2010, S. 296). An der negativ geladenen Elektrode, auch Kathode genannt, wird an das Wasserstoff-Ion ein Elektron abgegeben. Dadurch entsteht ein Wasserstoffatom, welches sich mit einem anderen Wasserstoffatom zu einem Wasserstoffmolekül verbindet. Diese Wasserstoffatome steigen als Gasblasen an der Elektrode auf. An der positiv geladenen Elektrode, auch Anode genannt, werden zwei Hydroxid-Ionen zwei Elektronen

abgenommen. Diese werden daraufhin zu einem Wassermolekül und einem Sauerstoffatom umgewandelt. Durch die Verbindung von zwei Sauerstoffatomen entsteht ein Sauerstoffmolekül. Die so gebildeten Moleküle steigen als Gasblasen an der Anode auf (Bockhorst o.J.). Abbildung 7 stellt diesen Prozess grafisch dar.

Abbildung 7: Alkalische Elektrolyse



Quelle: (Quaschning 2010, S. 296)

Der Wirkungsgrad bei einer Elektrolyse von Wasser beträgt zwischen 70 und 80 Prozent. Bei der Erzeugung von Wasserstoff mit einem Energieäquivalent von einer Kilowattstunde werden an die 300 Milliliter Wasser benötigt. Da dieser Produktionsprozess sehr viel Energie benötigt, ist der Anteil des Wasserstoffs, welcher auf diese Weise hergestellt wird, derzeit noch sehr gering (Geitmann 2004, S. 64).

3.2.5. Thermochemische Verfahren

Der Zerfall von Molekülen in seine einzelnen Atome, durch die Einwirkung von Wärme, wird als thermische Dissoziation bezeichnet. Die direkte Spaltung von Wasserdampf in Sauerstoff und Wasserstoff findet erst bei einer Temperatur von mehr als 1.700 Grad Celsius statt. Exemplarisch für Anlagen zur Anwendung des thermochemischen Verfahrens können Solaröfen angeführt werden. Dabei entstehende Gase können mit Hilfe von keramischen Memb-

ranen voneinander getrennt werden. Jene Membranen dürfen aber nicht für Sauerstoff, sondern für Wasserstoff durchlässig sein. Dieses Verfahren ist aufgrund der hohen Temperaturen und der teuren hitzebeständigen Materialien, welche benötigt werden, derzeit nicht konkurrenzfähig. Durch gekoppelte chemische Reaktionen kann eine Verringerung der Temperatur für die thermische Wasserspaltung auf weniger als 900 Grad Celsius erreicht werden. Der Schwefelsäure-Jod-Prozess und der Hybrid-Schwefel-(Westinghouse)-Prozess weisen in dieser Hinsicht das größte Potential auf (Jordan 2008, S. 30).

Schwefelsäure-Jod-Prozess

Schwefeldioxid und Jod reagieren bei einer Temperatur von 120 Grad Celsius mit Wasser zu Schwefelsäure und Jodwasserstoff. Die Reaktionsprodukte werden anschließend voneinander getrennt. Die Schwefelsäure wird bei einer Temperatur von 900 Grad Celsius in Schwefeldioxid und Sauerstoff aufgespalten. Der entstandene Jodwasserstoff wird bei 400 Grad Celsius in Wasserstoff und Jod getrennt. Dieser Prozess verfügt einerseits über hohe thermische Wirkungsgrade, andererseits gibt es jedoch noch ungelöste material- und verfahrenstechnische Probleme (Jordan 2008, S. 31).

Hybrid-Schwefel (Westinghouse)-Prozess

Der Hybrid-Schwefel (Westinghouse)-Prozess besteht aus zwei Stufen. Durch einen elektrochemischen Vorgang wird Schwefeldioxid in Wasser zu Schwefelsäure und Wasserstoff umgewandelt. Die entstandene Schwefelsäure wird in einer Gasphase in Sauerstoff und Schwefeldioxid getrennt. Vorteilhaft sind die Verwendung von günstigen Chemikalien und die hohe Effizienz. Der Nachteil liegt in dem enorm hohen Verbrauch von Strom (Jordan 2008, S. 31f.).

3.2.6. Photochemische Verfahren

Bei diesen Verfahren werden Solarstrahlung direkt genutzt. Die Absorption von energiereichen Photonen durch Reaktanten gewährleistet dies. Für diesen Vorgang werden Halbleitermaterialien benötigt, die eine so große Energielücke haben, dass dem Wasser durch die Aufnahme von Lichtquanten Elektronen entzogen werden können. Dieser Prozess führt dann zur Wasserspaltung. Dieser Vorgang soll mit der Verwendung von Photokatalysatoren ermöglicht und vereinfacht werden. Die Problematik liegt derzeit bei den Anforderungen an die photoaktiven Materialien. Diese müssen einerseits katalytisch hochaktiv und anderer-

seits mit Wasser auf lange Sicht stabil sein. Die Kombination von thermo- und photochemischen Verfahren weist großes Potential auf (Jordan 2008, S. 33).

3.2.7. Photobiologische Verfahren

Photobiologische Verfahren nutzen Prozesse, welche Organismen oder Pflanzen bei der Sonnenlichtnutzung verwenden. Unterschieden werden die photobiologische Spaltung von Wasser auf der einen Seite und die Trennung von Wasserstoff aus diversen organischen Materialien auf der anderen Seite. Die Wirkungsgrade liegen hierbei nur bei maximal zehn Prozent (Jordan 2008, S. 33f.).

3.2.8. Nachreinigungsverfahren

Nachreinigungsverfahren gewährleisten die hohen Reinheitsansprüche, welche an Wasserstoff gestellt werden. Dabei wird zwischen den folgenden Reinigungsverfahren unterschieden (Geitmann 2004, S. 74):

- *„Entschwefelung*
- *Druckwechsel-Adsorption*
- *Hochtemperatur-Diffusion durch Metallmembranen*
- *Verflüssigung*
- *Niedertemperatur-Diffusion durch Polymermembranen*
- *Kohlenstoffdioxid-Wäsche mit nachfolgender Methanisierung*
- *Selektive, katalytische Oxidation von Kohlenstoff-Monoxid an Platin oder Ruthenium-katalysatoren“* (Geitmann 2004, S. 74)

Um eine optimale Reinigung zu garantieren, werden oftmals mehrere der erwähnten Nachreinigungsverfahren angewendet. Dies ist abhängig vom verwendeten Ausgangsprodukt und welcher Grad an Reinheit gewünscht wird (Geitmann 2004, S. 74). Die meisten Herstellungsverfahren benötigen eine große Menge an Energie. Um die Umwelt zu entlasten und die Schadstoffproduktion zu reduzieren, werden nachhaltige Produktionsmethoden benötigt (Rühle 2005, S. 25). Einige dieser Verfahren werden im Kapitel Forschung und Entwicklung (siehe Kapitel 3.6.) vorgestellt. Nach der Produktion muss der Wasserstoff gespeichert und

transportiert werden können. Die beiden folgenden Unterkapitel beschäftigen sich mit den einzelnen Methoden.

3.3. Speicherung

Um den hergestellten Wasserstoff speichern zu können, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die drei am häufigsten verwendeten Verfahren sind die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff in Hochdruckspeichern, von flüssigem Wasserstoff in Kryogen-Behältern und die Einlagerung in Metallhydriden (Geitmann 2004, S. 83f.). Im Folgenden werden die einzelnen Verfahren näher erläutert.

3.3.1. Speicherung in Druckbehältern

Die gasförmige Speicherung von Wasserstoff ist derzeit die am häufigsten verwendete, einfachste und effizienteste Möglichkeit der Speicherung (Jordan 2008, S. 41). Durch die Erhöhung des Drucks wird das Volumen des Wasserstoffgases verringert. Aufgrund der guten Lastverteilung kommen als Behälterform nur Kugeln oder Zylinder in Frage. Unterschieden werden kann zwischen Niederdruck-Tanks und Hochdruck-Tanks (Geitmann 2004, S. 83f.).

Niederdruck-Tanks

Der Druck in Niederdruck-Tanks liegt zwischen zehn und 15 bar. In diesen Bereichen werden hauptsächlich zylindrische Behälter verwendet. In solchen Tanks werden zum Beispiel Propan und Butan, besser bekannt als Autogas, beziehungsweise Flüssiggas (siehe Kapitel 5.4.4.) gespeichert. Bei Fahrzeugen, welche mit Flüssiggas betrieben werden, können solche Tanks im Kofferraum installiert werden. Eine Füllbegrenzung von 85 Prozent dient zur Gewährleistung der Ausdehnungsmöglichkeit des Gases im Falle einer Erwärmung. Weiters muss ein Absperrventil eingebaut sein, welches den Tank bei Bedarf vollkommen verschließen kann. Ein Durchfluss-Mengenbegrenzer verhindert eine plötzliche Gastankentleerung. Durch eine Schmelzlot-Sicherung ist eine Druckentlastung bei sehr hohen Temperaturen, wie zum Beispiel in einem Brandfall, sicher gestellt. Das Lot schmilzt bei extremen Temperaturen und dadurch wird der Druck nach einem bestimmten Zeitraum entlastet. Sicherheitsventile ermöglichen den Druckausgleich bei zu hohen Werten (Geitmann 2004, S. 84f.).

Hochdruck-Tanks

Die Druckwerte, der in Hochdruck-Tanks gespeicherten Gase, bewegen sich zwischen 200 und 350 bar. Um eine gleichmäßige Kräfteverteilung zu erreichen, sind die Tanks entweder kugelförmig oder zylindrisch aufgebaut. Diese Form verhindert außerdem die Entstehung von Spannungsspitzen. Der Druck in handelsüblichen Stahlflaschen kann zwischen 100 und 300 bar erreichen und sie haben ein größenabhängiges Fassungsvermögen zwischen zwei und 50 Litern. Diese Flaschen werden größtenteils aus Chrom-Molybdän-Stahl hergestellt und haben schon im leeren Zustand ein hohes Gewicht. Vergleichsweise dazu wiegt das eingefüllte Gas so gut wie nichts (Geitmann 2004, S. 85ff.).

Um im mobilen Bereich eine Gewichtserleichterung zu erreichen, werden stattdessen Composite-Tanks verwendet. Diese Tanks sind kostenintensiver, wiegen aber weniger. In ihrem Inneren befindet sich ein sogenannter „Liner“, ein Behälter aus Stahl, Kunststoff oder Aluminium, welcher für die Dichtheit sorgt. Um die benötigte Festigkeit zu erreichen, ist der Behälter von einem Netz aus Kohlenstofffasern umgeben. Ein solcher Behälter kann bis zu 320 Liter Wasserstoff, bei einem Druck von 250 bar speichern. Die Länge des Tanks kann über drei Meter und der Durchmesser an die 40 Zentimeter betragen. Das Eigengewicht eines solchen Tanks macht 108 Kilogramm aus. Um für den mobilen Bereich geringe Gasmengen speichern zu können, gibt es spezielle kleine Druckflaschen. Beispielsweise kann ein 0,5 Liter fassender Aluminiumhochdruckbehälter, bei einem Druck von 200 bar, 100 Liter Gas fassen. Ein solcher Behälter wiegt 960 Gramm, hat eine Höhe von 23 Zentimeter und einen Durchmesser von sieben Zentimeter. Im Vergleich zu einem solchen mobilen Behälter, verfügt ein stationärer Gasbehälter über einen wesentlich geringeren Betriebsdruck von maximal 50 bar (Geitmann 2004, S. 86ff.).

3.3.2. Speicherung in Kryogen-Behältern

Die Speicherung von flüssigem Wasserstoff bietet, im Gegensatz zur gasförmigen Speicherung, einige Vorteile. Beispielhaft hierfür können die höhere Energiedichte, die leichtere Handhabung und der einfachere Transport genannt werden. Dieses Verfahren bringt jedoch auch einige Nachteile mit sich. Der Vorgang des Verflüssigens erfolgt in mehreren Verdichtungs- und Abkühlungsstufen, welche sowohl sehr kosten-, als auch energieintensiv sind. Fast 40 Prozent der Energie vom verwendeten Wasserstoff werden für die Verflüssigung

verbraucht. Je kleiner die verwendeten Verflüssigungsanlagen sind, desto mehr Energie wird benötigt. Ein weiteres Problem bei flüssigem Wasserstoff stellt der Energieverlust durch Verdampfungsvorgänge dar. Die Verflüssigung von Wasserstoff findet erst ab einer Temperatur von -253 Grad Celsius, welche gerade noch über dem absoluten Nullpunkt liegt, statt. Aus diesem Grund ist die Speicherung von flüssigem Wasserstoff nur in superisolierten Gefäßen, sogenannten Kryogen-Tanks, möglich (Romm 2006, S. 70f.).

Die verwendeten Tanks bestehen sowohl aus einem Innen-, als auch aus einem Außentank. Das am häufigsten verwendete Material ist Edelstahl und zeichnet sich durch zwei Besonderheiten aus. Bei geringen Temperaturen behält es sein ausgezeichnetes Verformungsvermögen und im Gegensatz zu den meisten anderen Werkstoffen wird es nicht spröde. Durch diesen geschachtelten Aufbau der Tanks ist die Isolation mit einer Thermosflasche vergleichbar. Für die Wärmestromreduzierung ist der Raum zwischen den beiden ineinander gefügten Behältnissen verantwortlich. Um ein noch besseres Isolationsergebnis zu erreichen, wird eine Isolationsschicht aus 70 Lagen Aluminiumfolie abwechselnd mit Glasfiber Matten eingelegt. Dadurch wird die Einströmrates von Wärme auf weniger als ein Watt pro Tag beschränkt. Durch die stets vorhandene Wärmeeinstrahlung von außen, treten geringfügige Verdampfungsverluste trotz der optimierten Wärmeisolation, auf. Dies führt zu einem allmählichen Anstieg des Drucks, welcher durch das ablassen von Gas mit einem Sicherheitsventil bewältigt werden kann. Der normale Betriebsdruck beträgt zwischen 1,2 und 3,5 bar und der maximale Betriebsdruck beträgt 4,5 bar. Die Isolation der Kryogen-Behälter soll einerseits vor dem Wärmeeintrag von außen schützen und andererseits den Kontakt der Umgebung mit den tiefkalten Komponenten verhindern (Geitmann 2004, S. 88ff.).

3.3.3. Speicherung in Metallhydriden

Bei der Speicherung in Metallhydriden ist der Wasserstoff chemisch an ein oder mehrere Metalle gebunden. Durch Erhitzen oder mittels einer katalysierten Reaktion kann der Wasserstoff freigesetzt werden. Die Speicherung der Hydride kann in fester Form oder als wässrige Lösung von statten gehen. Nach der Abgabe des Wasserstoffs kann das Hybrid wieder aufgeladen oder entsorgt werden (Romm 2006, S. 73). Metallhydride sind Metalle, wie zum Beispiel Magnesium, mehrphasige Legierungen, intermetallische Verbindungen und Leichtmetall-Hydride. Am häufigsten werden Metallhydride verwendet, welche nur eine geringe

Zufuhr von Wärme benötigen, um den Wasserstoff wieder freizusetzen. Vorteilhaft bei dieser Speichermethode sind die niedrigen Druckwerte, die Möglichkeit des ständigen Wiederbefüllen, die hohe Wasserstoffreinheit, keine Dampfverluste und die kompakte Bauweise. Nachteilig sind jedoch das hohe Gesamtgewicht, die lange Betankungsdauer, die niedrige gewichtsbezogene Speicherdichte und die sehr geringe Reichweite (Geitmann 2004, S. 94 ff.).

Die oben angeführten Methoden der Wasserstoffspeicherung sind die derzeit am weitesten verbreitete Verfahren. Verschiedene Forschungsprojekte weltweit arbeiten an der Entwicklung und Verbesserung weiterer Möglichkeiten Wasserstoff zu speichern. Beispielhaft hierfür können die **Methanisierung von Wasserstoff** und die Verwendung von **Carbazol** als Wasserstoffträgerflüssigkeit genannt werden. Diese Verfahren werden im Kapitel Anwendungsgebiete von Wasserstoff näher erläutert (siehe Kapiteln 4.4. und 4.5.)

3.4. Transport

Beim Transport von Wasserstoff wird unterschieden zwischen diskretem Transport in geeigneten Behältnissen (siehe Kapitel 3.3.) und kontinuierlichem, leitungsgebundenen Pipeline-Transport. Beide Möglichkeiten werden im Folgenden näher beschrieben.

3.4.1. Diskreter Transport

Der diskrete Transport von Wasserstoff erfolgt mit Druck-Tanks oder Kryogen-Behälter. **Gasförmiger Wasserstoff** wird vom Hersteller größtenteils per Lastkraftwagen oder Eisenbahn zum Verbraucher geliefert. Für den Transport einer großen Wasserstoffmenge werden Flaschenbündel zusammengestellt. Diese Bündel und die einzelnen Flaschen werden mit Hochdruckleitungen verbunden. Zum Beispiel fasst ein verbundenes Bündel aus 28 Flaschen rund 250 Kubikmeter Gas bei einem Druck von 200 bar. Druckgasflaschenwagen bieten die Möglichkeit noch größere Mengen transportieren zu können. Über 4.000 Kubikmeter Gas können beispielsweise von neun mehreren Meter langen Druckgasflaschen transportiert werden. Diese werden Trailer genannt und haben ein Gesamtgewicht von bis zu 40 Tonnen. Der enthaltene gasförmige Wasserstoff wiegt jedoch nur 530 Kilogramm. Als Tankstellenspeicher

wären solche Trailer gut geeignet. Für den Betankungsvorgang wäre ein Verdichter samt Zwischenspeicher und einer Zapfsäule von Nöten (Geitmann 2004, S. 102f.).

Der Transport von **flüssigem Wasserstoff** stellt sehr hohe Materialanforderungen. Die Leitungen und Tankbehälter werden aufgrund der extremen Temperaturunterschiede zwischen dem tiefkalten Wasserstoff im Tank und der Umgebungstemperatur stark beansprucht. Der flüssige Wasserstoff wird mit Tank-Lastwagen, welche ein Fassungsvermögen von bis zu 50.000 Litern haben, transportiert. Das Gesamtgewicht eines solchen Trailers liegt bei 40 Tonnen und der transportierte flüssige Wasserstoff wiegt 3.300 Kilogramm. Der Vorteil von flüssigem Transport gegenüber gasförmigem Transport liegt bei dem neunmal größeren Kapazitätswolumen (Geitmann 2004, S. 103).

3.4.2. Leitungsgebundener Pipeline-Transport

Unter einer Pipeline wird eine weit verzweigte Rohrleitung verstanden, welche aus einem unterirdisch verlegtem Rohrstrang, mehreren Anfangs- und Endzwischenlagerungsbehältern für die zu befördernden Rohstoffe und einem Pumpwerk besteht (Maline und von Stackelber o.J.). In Betrieb genommen wurde die erste Wasserstoffpipeline 1938 von dem deutschen Unternehmen Hülsmann im Ruhrgebiet. Damit besitzt das französische Unternehmen Air Liquide das mittlerweile 240 Kilometer lange Pipelinennetz. Weitere Wasserstoffpipelines finden sich auch in anderen Teilen Deutschlands, wie zum Beispiel Leuna/Bitterfeld, sowie in den Niederlanden, den Vereinigten Staaten von Amerika, Kanada, England, Schweden, Frankreich, Belgien, Brasilien und Südafrika (Feck 2009, S. 45).

Die derzeit verwendeten Wasserstofffernleitungssysteme werden **mit trockenem Gas** und bei **Umgebungstemperatur** betrieben. Untersuchungen des europäischen Forschungsprojektes „NATURALHY“ haben die bedingte Eignung des vorhandenen Erdgaspipeline-Netzes für den Transport von Wasserstoff ergeben. Da der Transport von Wasserstoff gewisse Metalle versprödet, ist in gewissen Leitungsabschnitten die Verwendung von reinem Wasserstoff nicht möglich. Mischungen aus Wasserstoff und Erdgas können aber trotzdem transportiert werden. Dies ist häufig bei älteren Leitungen, welche nicht den hohen Ansprüchen genügen, der Fall. Da Wasserstoff über eine geringe Dichte verfügt ist ein sehr hoher Volumenstrom erforderlich. Die Transportverluste betragen auf einer Leitungslänge von etwa 1.000 Kilometer zehn Prozent (Jordan 2008, S. 53).

3.5. Sicherheit

Da sich Energie nicht einfach ohne weiteres kontrollieren lässt, besitzt jeder Energieträger ein gewisses Risikopotential. Der Umgang mit Energiespeichern unterliegt, je nach Kraftstoffart, gewissen Regeln. Der sorgsame Umgang mit der Materie und die Beachtung dieser Sicherheitsvorkehrungen kann das vorhandene Risiko minimieren. Bei Wasserstoff sollten zwei wichtige Regeln beachtet werden. Erstens sollte die **Freisetzung von Wasserstoff** in die Umgebung **verhindert werden**. Somit kann kein zündfähiges Gemisch in der Umgebungsluft gebildet werden. Alle Kraftstoffsysteme sollten über einen geschlossenen Kreislauf verfügen, aus welchen kein Wasserstoff austreten kann. Eine regelmäßige Wartung und ein ausreichender Schutz gegen Gewalteinwirkung sind Grundvoraussetzung bei der Verwendung von Wasserstoff. Falls trotz aller Sicherheitsvorkehrungen trotzdem Gas entweicht, sollte eine schnelle Verdünnung herbeigeführt werden. Dies kann durch eine intensive Belüftung oder durch die Absaugung der verunreinigten Luft geschehen. Zweitens muss das **Eindringen von Sauerstoff** in ein wasserstoffbetriebenes System **verhindert werden**. Innerhalb eines Kraftstoffbehältnisses sollte kein Sauerstoff vorgefunden werden, damit keine Detonation stattfinden kann (Geitmann 2004, S. 121f.).

Wenn bereits ein zündfähiges Gemisch in der Luft ist, muss zusätzlich Energie zugeführt werden um eine wirkliche Entzündung zu bewirken. Hierfür würde eine minimale Energiemenge reichen. Funken, welche beim Gang über einen Teppich entstehen, während ein gerader Gegenstand berührt wird, wären ausreichend. Jegliche Zündquellen, Elektrogeräte, Schuhe ohne Gummisohlen und Mobiltelefone sind an Orten, an denen Wasserstoff austreten könnte, zu vermeiden (Geitmann 2004, S. 121ff.).

Bei der Verbrennung von Wasserstoff entsteht durch die Reaktion mit der Luft nur Stickstoffoxid und Wasserdampf. Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe würden Schwefeloxide, Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffmonoxide oder Kohlenstoffdioxide entstehen. Im Falle einer Entzündung eines Luft/Wasserstoffgemisches sollten unbedingt folgende Eigenschaften von Wasserstoff berücksichtigt werden: (Geitmann 2004, S. 121ff.)

- Entstandene Flammen sind schwer erkennbar, da sie sich nur im ultravioletten Bereich bewegen.
- Die Ausbreitung der Flammen findet relativ schnell statt, da die Geschwindigkeit der Verbrennung sehr hoch ist. Dies führt jedoch auch zu einem raschen Ende des Brandes.
- Das Gas steigt schnell auf, da die Stoffdichte des Wasserstoffgases sehr gering ist.
- Die Zündenergie, welche vorhanden sein muss, ist gering.
- Da keine glühenden Kohlenstoffpartikel vorhanden sind, ist die Hitzeabstrahlung gering. Daher besteht die Gefahr, in die schwer erkennbare und kaum fühlbare Flamme zu greifen.
- Eine Entflammung ist schwer zu erkennen, da es ohne die Zufuhr weiterer Substanzen zu keiner Rauch- oder Qualmbildung kommt.
- Das Feuer sollte nicht gelöscht, sondern die Kraftstoffzufuhr unterbrochen werden (Geitmann 2004, S. 121ff.).

Die Chemikalienrichtlinie 2006/121/EG vom Europäischen Parlament und des Rates wurde an die Verordnung Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe im Dezember 2006 angepasst. Chemische Stoffe müssen unter anderem mittels Gefahrensymbolen, Sicherheits- und Risikohinweisen gekennzeichnet werden (Eichlseder und Klell 2010, S. 274).

Dr. Michael Swain, beschäftigt an der Universität von Miami, Florida, führte einen Versuch durch, bei welchem das Brandverhalten von einem wasserstoffbetriebenen und einem benzinbetriebenen Fahrzeug verglichen wurde. Bei dem benzinbetriebenen Fahrzeug wurde ein Loch von 1,6 Millimeter in der Benzinleitung verursacht. Eine undichte Verbindungsstelle in der Wasserstoffleitung wurde bei dem anderen Fahrzeug simuliert. Daraufhin wurde ganz in der Nähe ferngezündet. Tabelle 5 zeigt anhand von Videoausschnitten den Verlauf des Experiments (Swain 2001, S. 679ff.) (Kern 2008a).

Tabelle 5: Vergleich des Brennvorganges von Wasserstoff und Benzin

Wasserstofftank	 0 Minuten, 0 Sekunden	Benzintank
Entstehung einer hohen Stichflamme	 0 Minuten, 3 Sekunden	Benzinlache unterhalb des Fahrzeuges fängt Feuer
Wasserstoffdruck wird geringer und Flamme kleiner	 1 Minute, 0 Sekunden	Ausbreitung des Feuers
Wasserstoffgas nahezu ausgebrannt, Flamme verschwindet, Höchstwert der Innentemperatur betrug 19,4 Grad Celsius und sinkt wieder ab, die Spitzentemperatur am Heck betrug 47 Grad Celsius	 1 Minute, 30 Sekunden	Entzündung der Reifen und Kunststoffteile der Karosserie
Erloschenes Feuer, Beschädigungsbereich des Fahrzeuges beschränkt sich auf die Umgebung des Lecks	 2 Minuten, 20 Sekunden	Flammenübergriff auf Innenraum, vollständiger Fahrzeugbrand

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Kern 2008a)

Bei dem benzinbetriebenen Fahrzeug reichte ein kleines Loch aus, um den Personenkraftwagen vollständig zu zerstören. Um denselben Fehler beim wasserstoffbetriebenen Fahrzeug auszulösen hätten vier verschiedene Sicherheitssysteme gleichzeitig ihren Dienst versagen

müssen (Kern 2008a). Das Thema Sicherheit gehört zu einem der wichtigsten Gebiete im Bereich der Forschung und Entwicklung. Das folgende Kapitel gibt einen Einblick in den aktuellen Entwicklungsstand.

3.6. Forschung und Entwicklung

Die Technologie um das Thema Wasserstoff ist sowohl ein alter, als auch ein neuer Bereich der Forschung. Die Brennstoffzelle wurde vor über 170 Jahren entwickelt und seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts praktisch angewendet (siehe Kapitel 3.1.). In den letzten beiden Jahrzehnten erlebte der Forschungsbereich bezüglich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik einen beträchtlichen Aufschwung (Geitmann 2004, S. 263).

Aufgrund des großen Interesses an erneuerbaren Energien sind innovative Möglichkeiten, wie zum Beispiel die Wasserstofftechnologie, in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt. Verbesserungen und Weiterentwicklungen führten zu einer steigenden Akzeptanz der Technologie zur Wasserstoff- und Brennstoffzellennutzung. Weiters haben zahlreiche Unternehmen massiv in den Ausbau dieser Technologie investiert und setzen somit große Hoffnungen in diesen Bereich. Ein anderes Indiz für die stetige Weiterentwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie ist der mittlerweile angelaufene kommerzielle Verkauf von Brennstoffzellensystemen am freien Markt. Eingesetzt werden diese primär beim Camping und bei Notstromaggregaten. Zukünftig sollen Systeme folgen, welche einerseits für die Haus-Energieversorgung und andererseits für die Energiezufuhr zu Mobiltelefonen, Laptops und ähnlichem zuständig sind. Ein weiteres Einsatzgebiet wird die Kraftfahrzeugbranche bieten (siehe Kapitel 4.3.)(Geitmann 2004, S. 252ff.).

In den nachfolgenden Bereichen besteht ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie: (Geitmann 2004, S. 255)

- *„Entwicklung von europaweit einheitlichen Betankungsverfahren und Tank-Kupplungen*
- *weitere Gewichts- und Volumen-Reduzierung der Tanks und Nebenaggregate*
- *Europaweite Harmonisierung der Regelwerke und Gesetze*
- *gesteigerte Unterstützung von öffentlicher Seite*
- *weitere Kostensenkung aller Komponenten*

- *Erforschung der tatsächlichen Auswirkung von zunehmender Wasserdampf- und Wasserstoff-Emissionen auf die Umwelt“ (Geitmann 2004, S. 255)*

Viele Nationen haben, um verstärkt Forschung und Entwicklung betreiben zu können, Verbände für die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik eingerichtet. Zu ihrem Ziel gehört die Aufklärung über Wasserstoff, um eventuelle Besorgnisse und Missverständnisse auszuräumen. Außerdem dienen sie als Ansprechpartner für Institutionen und Unternehmen aus den verschiedensten Bereichen der Forschung, Politik und Wirtschaft. Beispielhaft können hierfür der „Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV)“ und der „europäische Wasserstoff Verband“ genannt werden (Geitmann 2004, S. 255). Nachfolgend wird eine kleine Auswahl von verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsprojekten aus dem Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik präsentiert.

3.6.1. Wasserstoffpulver für den Tank

„Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking“ (FCHJU), eine Europäische Technologieinitiative unterstützt mit 2,3 Millionen Euro die Wasserstofffeststoffspeicherentwicklung auf der Basis von Borhydriden. Wissenschaftler aus Deutschland, Dänemark, Norwegen, Italien, Schweiz, Griechenland, sowie ein deutsches, ein spanisches und ein tschechisches Unternehmen arbeiten in Schleswig-Holstein, Deutschland, am Helmholtz-Zentrum Geesthacht an diesem Forschungsprojekt. Betitelt wurde dieses Vorhaben als „Bor4Store“ und der Auftaktworkshop fand vom 23. bis 25. April 2012 statt. Erforscht wird die Speicherung von Wasserstoff in festen Materialien, in sogenannten Metallhydriden. Die Verbindung aus Bor und Wasserstoff soll als Pulver in den jeweiligen Antriebsterank gefüllt werden können. Borhydride werden verwendet, da ihre Kapazitäten bei der Wasserstoffspeicherung unter allen bekannten Metallhydrid-Speichermaterialien am höchsten sind. In einem 50 Liter Tank eines heutzutage gängigen Mittelklassewagens könnten in etwa fünf Kilogramm Wasserstoff gespeichert werden. Die Reichweite würde zwischen 400 und 500 Kilometer betragen. Dieses Projekt ist für den Bau eines Tankprototyps verantwortlich, welcher für die Energiezufuhr zu einer Brennstoffzelle verantwortlich sein soll (Helmholtz-Zentrum Geesthacht 2012).

3.6.2. Saubere Wasserstofferzeugung aus Sonnenlicht, Wasser und Zinkoxid

An der Universität von Delaware, Amerika, hat Erik Köpf einen neuen Solar-Reaktor gebaut, welcher ohne fossile Brennstoffe Wasserstoff mit Hilfe von Sonnenlicht, Wasser und Zinkoxid produzieren kann. Bei diesem Verfahren entstehen keine Kohlendioxid-Emissionen. Die Maße des Reaktors belaufen sich auf zwei mal drei Meter und sein Gewicht beträgt 794 Kilogramm. Aufgrund des konzentrierten Sonnenlichts kann die Innentemperatur im Reaktor auf nahezu 1.650 Grad Celsius gebracht werden. Danach wird das Zinkoxid Pulver in das keramische Reaktorinnere befördert und zu Zinkdampf verarbeitet. Daraufhin folgt eine Reaktion des Dampfes mit Wasser und die Wasserstofffreisetzung beginnt. Da das verwendete Zinkoxid wiederverwendet werden kann, benötigt die Prozedur lediglich erneuerbare Energien um den gewünschten Wasserstoff produzieren zu können. Derzeit befindet sich der Prototyp an der „Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich“, wo er strengen Tests unterzogen wird. Geplant sind größere Versionen des Reaktors, die zum Beispiel in Wüsten, wo eine sehr starke Sonneneinstrahlung herrscht, zur Wasserstoffproduktion eingesetzt werden können (Trendsderzukunft 2012).

Nach einem kurzen Einblick in den Stand der Forschung und Entwicklung, folgt nun ein detaillierter Überblick über die verschiedenen Gebiete in denen Wasserstoff verwendet werden kann.

4. Anwendungsgebiete von Wasserstoff

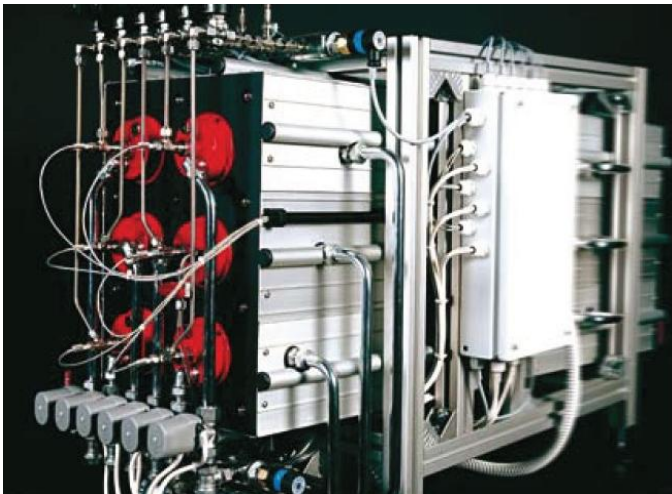
Dieses Kapitel befasst sich mit der großen Vielzahl der möglichen Anwendungsgebiete von Wasserstoff. Angefangen bei Heizungen und Motoren, welche mit Wasserstoff betrieben werden, über Einsatzmöglichkeiten der Brennstoffzellentechnologie, bis hin zur Methanisierung von Wasserstoff und der Verwendung von Carbazol als Wasserstoffträgerflüssigkeit.

4.1. Wasserstoffheizungen

Bei der Verbrennung von Wasserstoff entstehen destilliertes Wasser und Wärme, jedoch keinerlei Kohlendioxidemissionen. Wenn die Temperaturen beim Brennvorgang 600 Grad Celsius überschreiten, entsteht als weiteres Nebenprodukt der Schadstoff Stickstoffoxid. Dies kann jedoch verhindert werden, wenn die Temperaturen entsprechend reguliert werden. Die Bedingungen des Verbrennungsvorganges sind bei Wasserstoff im Gegensatz zu Erdgas und Öl leichter regelbar. Somit besteht die Möglichkeit eine niedrigere Flammentemperatur einzustellen und die Bildung von Stickstoffoxid zu verhindern. Die Wärmeabstrahlung einer Wasserstoffflamme ist niedrig, da sie um etwa 90 Prozent geringer ist als bei einer Öl- oder Gasflamme. Dies ermöglicht die Nutzung von Kunststoff als Fertigungsverfahren, welcher bei den geringeren Temperaturen nicht schmilzt. Kondensate und korrosive Gase treten nicht auf. Durch die Verwendung katalytischer Brenner besteht die Möglichkeit die Temperatur noch weiter abzusenken (Tetzlaff 2011b, S. 153f.).

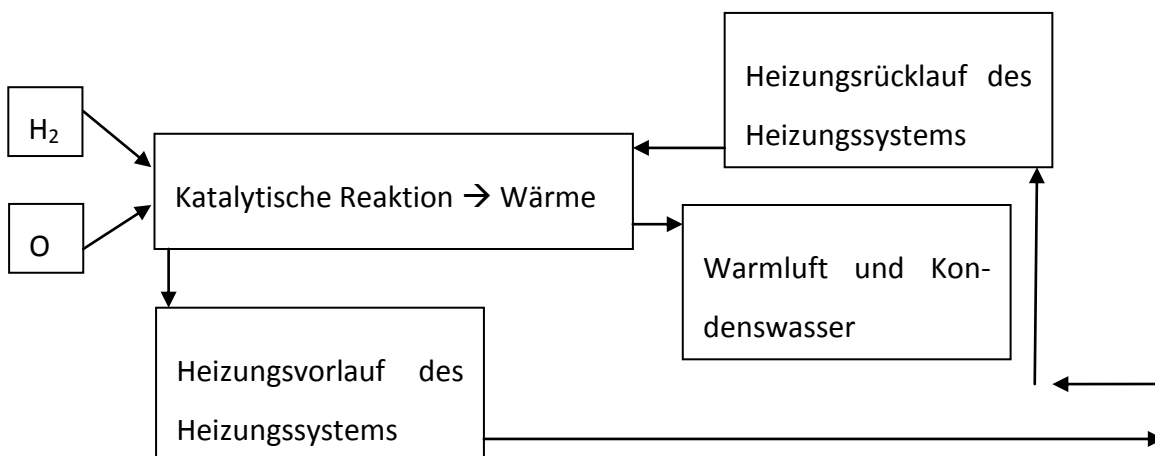
Mehrere Unternehmen arbeiten an der Entwicklung einer serienreifen Wasserstoffheizung. Beispielhaft kann hier die Firma „Giacomini“ aus Waldbröl, Deutschland, genannt werden. Als Ergebnis ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit hat sie einen wasserstoffbetriebenen Wärmeerzeuger entwickelt. Wärme und Wasser entstehen hierbei durch eine Reaktion von Sauerstoff mit Wasserstoff in dem eingebauten katalytischen Zylinder. Abbildung 8 zeigt ein Foto von der Anlage und in Abbildung 9 sind die Reaktionsvorgänge im Inneren des katalytischen Zylinders des Wärmeerzeugers ersichtlich (GIACOMINI 2008, S. 1f.).

Abbildung 8: Wärmeerzeuger



Quelle: (GIACOMINI 2008, S. 2)

Abbildung 9: Reaktionsvorgänge im Inneren des katalytischen Zylinders



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (GIACOMINI 2008, S. 2)

Die sechs eingebauten Zylinder verfügen zusammen über ein Leistungspotential von 35 Kilowatt, dies entspricht 5,8 Kilowatt pro Zylinder. Der benötigte Wasserstoff wird mittels Elektrolyse hergestellt (siehe Kapitel 3.2.4.) (GIACOMINI 2008, S. 3).

4.2. Wasserstoffmotoren

Grundlegend beruhen die Vorgänge in einem Wasserstoffverbrennungsmotor auf denselben Prinzipien wie bei einem konventionellen Verbrennungsmotor. Um einen ausschließlichen oder teilweise bivalenten Wasserstoffbetrieb ermöglichen zu können, sind jedoch Änderungen beim Brennverfahren und beim Gemischbildungssystem notwendig. Außerdem muss die Verwendung von wasserstoffgeeigneten Materialien und Komponenten sichergestellt sein (Eichseder und Klell 2010, S. 151). Ein Wasserstoffmotor verfügt, genau wie ein herkömmlicher Verbrennungsmotor, über eine Fremdzündungseinrichtung. Diese ist für die Entstehung des benötigten Zündfunken mit Hilfe von Zündkerzen verantwortlich. Im Gegensatz dazu wird bei einem dieselbetriebenen Motor das Gemisch aus Luft und Kraftstoff solange verdichtet, bis es wegen der Erwärmung auf 250 Grad Celsius und des Druckanstieges zu einer Selbstentzündung kommt. Dieses Verfahren ist für Wasserstoff, aufgrund der hohen Wasserstoffzündtemperaturen von 560 Grad Celsius, ungeeignet (Geitmann 2004, S. 220). Um den Wasserstoff für die Verwendung aufzubereiten, gibt es zwei verschiedene Verfahren. Entweder wird die Möglichkeit der **äußeren** oder die der **inneren Gemischbildung** angewandt (Geitmann 2004, S. 221ff.).

Wenn gasförmiger Wasserstoff mit geringem Überdruck in ein Ansaugrohr eingeblasen wird, handelt es sich um die Variante der **äußeren Gemischbildung**. Der im Tank gespeicherte, tiefkalte, flüssige Wasserstoff wird während der Gasphase entnommen. Bevor das Gas den Verbrennungsraum erreicht, wird es mit Luft vermischt. Nach dem Verschließen der Einlassventile wird das Gemisch, durch einen von einer Zündkerze entfachten Funken, entzündet. Die Verbrennungstemperatur wird, durch einen hohen Überschuss an Luft, niedrig gehalten. Aus diesem Grund ist das Rückzündungsrisiko gering, jedoch führt dieses Verfahren zu einer verminderten Motorleistung. Um diesen Verlust auszugleichen, besteht die Möglichkeit den Druck auf der Einlass-Seite zu erhöhen und somit die Leistung zu stärken. Vorteilhaft sind beim Verfahren der äußeren Gemischbildung die Möglichkeit mit geringem Druck arbeiten zu können und der unkomplizierte Aufbau. Nachteilig sind der ungleichmäßige Verbrennungsablauf und die geringere Leistungsfähigkeit im Vergleich zu Benzin- beziehungsweise Dieselmotoren (Geitmann 2004, S. 221ff.).

Bei der **inneren Gemischbildung** wird bei einem Druck zwischen 80 und 120 bar gasförmiger Wasserstoff direkt in den Brennraum geleitet. Die Vermischung mit Luft erfolgt im Brennraum und anschließend findet die Entzündung mittels einer Zündkerze statt. Gegenüber der Verwendung von Diesel als Kraftstoff gibt es bei diesem Verfahren erhebliche Unterschiede bei der Kraftstoffausbreitung und bei dem anschließenden Mischungsprozesses. Die Gründe liegen im gasförmigen Aggregatzustand des Wasserstoffs, dem enormen Dichteunterschied von Luft und Kraftstoff und der viel größeren Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wasserstoff-
flammen. Der hohe Druck wird benötigt, um die Einspritzzeit des Wasserstoffs so gering wie möglich zu halten und somit das Fehlzündungsrisiko zu minimieren. Positiv zu vermerken ist die Leistungsgleichsetzung mit einem Dieselmotor. Negativ muss ein sehr hoher technischer Aufwand erwähnt werden (Geitmann 2004, S. 221ff.).

Außer den unterschiedlichen Gemischbildungsverfahren, gibt es noch vier andere Unterscheidungsmerkmale bei Wasserstoffmotoren. Diese sind das **Niveau der Temperaturen**, die **Einleitungsart der Zündung**, die **Teillastregelung** und der **Ladungszustand**. Das **Temperaturniveau** des verwendeten Wasserstoffs ist entweder tiefkalt oder an die Umgebung angepasst. Bei Verwendung der äußeren Gemischbildung in Verbindung mit der Flüssigspeicherung kann die Einblasung von tiefkaltem Wasserstoff zu deutlichen Leistungsverbesserungen, gegenüber der Einblasung von umgebungswarmem Wasserstoff, führen. Dies ist auf die Abkühlung der kompletten Ladungsmasse durch den tiefkalten Wasserstoff zurückzuführen, was zu einem Anstieg der Gemischdichte und somit einem höheren Gemischheizwert führt (Eichseder und Klell 2010, S. 158).

Die **Zündungseinleitung** kann durch eine Fremd- oder aber auch in seltenen Fällen durch eine Selbstzündung erfolgen. Bei der **Teillastregelung** wird zwischen gedrosselt (quantitäts-geregelt) und ungedrosselt (qualitäts-geregelt) unterschieden. Um hohe Wirkungsgrade zu erreichen, ist eine ungedrosselte Teillastregelung vorzuziehen. Eine Drosselung wird hauptsächlich zur Laufruheoptimierung eingesetzt. Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit bei Wasserstoffmotoren liegt im **Ladungszustand**. Prinzipiell ist der Betrieb sowohl mit Saug- als auch mit einem Aufladebetrieb möglich (Eichseder und Klell 2010, S. 158f.).

Wasserstoffbetriebene Verbrennungsmotoren haben im Vergleich zu Benzin-Motoren einen höheren Wirkungsgrad. Ermöglicht wird dies durch die hohe Brenngeschwindigkeit vom

Wasserstoff/Luft-Gemisch beim Verbrennungsprozess. Der Wirkungsgrad eines Wasserstoffmotors kann über 40 Prozent erreichen. Im Vergleich hierzu kann der Wirkungsgrad eines Benzinmotors mit nur 23 Prozent genannt werden. Ein hoher Wirkungsgrad sollte aber nicht mit einer starken Motorleistungsfähigkeit verwechselt werden (Geitmann 2004, S. 224f.). Der Motorenwirkungsgrad gibt an, wie groß der Anteil der mechanisch genutzten Leistung an der aufgebrachten elektrischen Leistung ist. Wasserstoffbetriebene Motoren haben einen höheren Wirkungsgrad als Benzinmotoren, aber die Leistungsfähigkeit ist mit 75 Prozent wesentlich geringer. Aus diesem Grund und weil noch keine Wasserstoffinfrastruktur vorhanden ist, werden die meisten Verbrennungsmotoren bivalent gebaut. Diese Motoren sind für den Gebrauch von Benzin optimiert, können aber auch mit Wasserstoff betrieben werden. Dies ermöglicht eine größere Reichweite der Fahrzeuge und führt aber zu einer geringeren Leistungsfähigkeit (Geitmann 2004, S. 224ff.). Im Folgenden werden einige Beispiele der erfolgreichen Umsetzung der Wasserstoffmotorentechnologie vorgestellt.

BMW forscht seit mehreren Jahrzehnten im Bereich der Wasserstoffmotoren. Bereits 1979 wurde der erste Versuchswagen gebaut. Mittlerweile gibt es schon die sechste Generation dieses wasserstoffbetriebenen Fahrzeuges. Im Jahr 2000 stellte BMW eine Serie vor, welche aus 15 wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen der 7er-Reihe bestand (Geitmann 2004, S. 231f.). BMW präsentierte 2007 den „Hydrogen 7“, einen bivalenten Personenkraftwagen, bei dem die Umschaltung von Wasserstoffantrieb auf Benzinantrieb während der Fahrt durchgeführt werden konnte. Abbildung 10 zeigt ein Foto des BMW Hydrogen 7 und die technischen Daten sind in Tabelle 6 angeführt.

Abbildung 10: BMW Hydrogen 7



Quelle: (BMW o.J.)

Tabelle 6: Technische Daten BMW Hydrogen 7

Herstellerfirma	BMW
Modellname	760h
Hubraum	5972 Kubikzentimeter (ccm)
Betriebsart	bivalent (Wasserstoff und Benzin)
Leistung mit Benzin und Wasserstoff	191 Kilowatt (kW) - 260 Pferdestärken (PS)
Sprint von Null auf 100 Kilometer pro Stunde (km/h) mit Benzin und Wasserstoff	9,5 Sekunden
Maximale Geschwindigkeit mit Benzin und Wasserstoff	230 km/h
Wasserstoffverbrauch	vier kg / 100 km
Reichweite mit Wasserstoff	200 km
Wasserstofftankvolumen	acht kg flüssiger Wasserstoff
Benzinverbrauch	14,8 l / 100 km
Reichweite mit Benzin	500 km
Tankgröße Benzin	74 l

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Eichseder und Klell 2010, S. 181)

Hinter den Rücksitzen im Kofferraum befindet sich das benötigte Wasserstofftanksystem. Die Fertigung dieser Systeme fand in Graz bei der Firma MAGNA STEYR statt. Um ein problemloses Umschalten zwischen den beiden Antriebsmöglichkeiten gewährleisten zu können, verfügt das Fahrzeug über eine elektronische Motorregelung (Eichseder und Klell 2010, S. 182). Im Jahr 2009 stellte BMW die Feldversuche mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen vorübergehend ein. Als Gründe werden unter anderem die Lagerungs- und Verteilungsprobleme von Wasserstoff genannt (Anker 2009). Ende 2011 gab es Berichte über eine mögliche Zusammenarbeit von General Motors (GM) und BMW im Bereich der Wasserstoff-Grundlagenforschung (Doll 2011). Mittlerweile wurden diese Gespräche für diesen Bereich wieder beendet und stattdessen ist eine Zusammenarbeit mit Toyota geplant (Spiegel Online 2012). Die ersten wasserstoffbetriebenen Busse wurden im Jahr 1996 von der Firma MAN im

Verkehr in Erlangen und München eingesetzt. Ein bivalenter Antrieb ermöglichte die Umschaltung von Wasserstoff auf Benzin und umgekehrt. Ab dem Jahr 1999 wurden monovalent betriebene Wasserstoffmotoren verwendet. Ihr Einsatzgebiet erstreckte sich auf den öffentlichen Nahverkehr in der Umgebung des Flughafen Münchens (Regionalverkehr 2006). In Berlin wurden ab 2006 auch wasserstoffbetriebene Busse eingesetzt (MAN 2006). Im Jahr 2009 gab die Firma MAN jedoch die Einstellung des Projektes aufgrund vermehrter Defekte bekannt (Kurpjuweit 2009). Das Unternehmen Mazda verleihte 2006 seine ersten beiden bivalenten Benzin-Wasserstoff-Fahrzeuge. Das Modell „RX-8 Hydrogen RE“ besitzt einen Wankel-Verbrennungsmotor und einen 350 bar Drucktank, welcher über ein Fassungsvermögen von 110 l verfügt. Der Kofferraum wird von dem Drucktank vollständig ausgefüllt. Die hohe Verbrennungsgeschwindigkeit des Wasserstoffs ist für den Wankelmotor sehr gut geeignet. Die Reichweite ist vergleichsweise gering und es kommt zu deutlichen Leistungseinbußen. Die technischen Leistungsmerkmale sind Tabelle 7 zu entnehmen (Eichlseder und Klell 2010, S. 183).

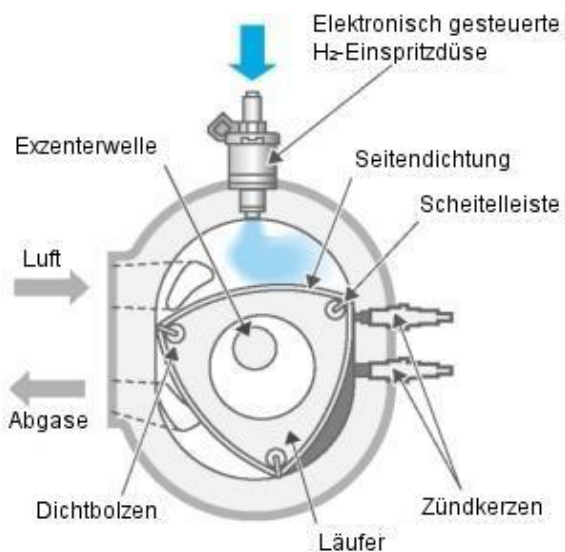
Tabelle 7: Technische Daten Mazda RX-8 Hydrogen RE

Herstellerfirma	Mazda
Modellname	RX-8 Hydrogen RE
Hubraum	zwei Rotationskolben von je 654 ccm
Betriebsart	Bivalent (Benzin und Wasserstoff)
Leistung bei Wasserstoffbetrieb	81 kW – 110 PS
Leistung bei Benzinbetrieb	154 kW – 209 PS
Wasserstoffverbrauch	2,5 kg / 100 km
Reichweite bei Wasserstoffbetrieb	100 km
Wasserstofftankvolumen	110 l, 350 bar
Benzinverbrauch	11 l / 100 km
Reichweite bei Benzinbetrieb	550 km
Benzintankgröße	61 l

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Eichlseder und Klell 2010, S. 183)

Im Gegensatz zu einem konventionellen Vier-Takt-Motor hat ein Wankelmotor statt Hubkolben Kreiskolben. Während einer kompletten Umdrehung des Läufers werden in verschiedenen Bereichen des Kreiskolbens alle vier Takte (Ansaugen, Verdichten, Verbrennen und Auslassen) durchlaufen. In Abbildung 11 ist der Aufbau des von Mazda entwickelten bivalenten Kreiskolbenmotors zu sehen. Verwendung findet er im oben genannten Modell RX-8 Hydrogen RE.

Abbildung 11: Bivalenter Kreiskolbenmotor RENESIS Hydrogen



Quelle: (Kern 2008b)

In die obere Kammer wird durch eine Kreisbewegung im Uhrzeigersinn Luft angesaugt und Wasserstoff eingespritzt. Aufgrund der Läuferrotation wird das Gemisch aus Wasserstoff und Luft zusammengedrückt. Eine Explosion erfolgt durch die Zündkerzenzündung. Die dadurch verursachte Druckwelle bewirkt den Antrieb des Läufers. Abschließend werden Abgase in den Abgaskanal gepresst und der Kreislauf beginnt von neuem. Die Exzenterwelle wird vom Läufer angetrieben. Pro Läuferumdrehung dreht sich die Exzenterwelle drei Mal. Diese Welle treibt mit einem Getriebe die Antriebsräder des jeweiligen Fahrzeuges an. Ein Wankelmotor hat eine leichtere Bauart, ist weniger anfällig für Störungen und leiser (Kern, Wankelmotor 2008b). Die ersten Fahrzeuge der Type Premacy Hydrogen RE Hybrid von Mazda wurden im März 2009 verleast. Hierbei handelt es sich um Hybridfahrzeuge, welche einen Elektromotor mit einem Wasserstoff-Wankelmotor und einem Generator auf Basis eines Mazdas 5 kombiniert haben. Durch diese Verbindung konnte eine Leistungssteigerung um 40 Prozent und eine Verdoppelung der Reichweite gegenüber dem RX-8 festgestellt werden (Eichlseder und

Klell 2010, S. 185). Abbildung 12 zeigt ein Foto beider Modelle. Auf der linken Seite ist der Mazda 5 Hydrogen RE Hybrid und auf der rechten Seite der Mazda RX-8 Hydrogen RE zu sehen.

Abbildung 12: Mazda 5 Hydrogen RE Hybrid und Mazda RX-8 Hydrogen RE



Quelle: (Mazda 2010)

Die Weiterverfolgung und Verwendung dieser Technologie ist aufgrund des großen Forschungs- und Entwicklungsaufwandes im Konkurrenzbereich der Brennstoffzellentechnologie in den Hintergrund geraten (Tetzlaff 2011b, S. 155). Das folgende Kapitel befasst sich mit dieser Technologie im Detail.

4.3. Brennstoffzelle

Vor mehr als 170 Jahren wurde die Brennstoffzellentechnologie entwickelt. Professor Christian Friedrich Schönbein entdeckte bei einem Experiment 1838, die Möglichkeit der Elektrizitätsfreisetzung, wenn eine Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff oder Chlor stattfindet. Sir William Robert Grove, ein Freund von Schönbein, erfuhr von diesem Polarisierungseffekt und vertiefte daraufhin seine Forschungen in diesem Themenbereich. Er deutet die Entdeckung seines Freundes als Vorgangsumkehrung der Elektrolyse und war somit in der Lage elektrische Energie zu erzeugen. Er stellte 1839 die sogenannte „Gasbatterie“ her, jedoch wurde damals von seiner Entwicklung kaum Notiz genommen. Heute gilt er als der Brennstoffzellenerfinder (Geitmann 2004, S. 130f.). Bei dem Ablauf der Elektrolyse (siehe Kapitel 3.2.4.) wird Wasser mit elektrischem Strom in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten. Bei der Brennstoffzellentechnik wird dieser Vorgang umgekehrt. Die bei einer chemischen Reaktion entstandene Energie, wie zum Beispiel mit Wasserstoff und Sauerstoff, wird in Wasser, Wärme und elektrische Energie umgewandelt. Da Wasserstoff die Zusammenführung mit

Sauerstoff von sich aus bestrebt, um zu Wasser reagieren zu können, ist keine externe Energiezufuhr nötig, stattdessen kommt es sogar zu einer Energieabgabe, der exothermen Reaktion. Dieser Vorgang ist auch unter der Knallgas-Reaktion bekannt (Geitmann 2004, S. 133). Grundlegend bestehen alle Brennstoffzellen aus zwei Elektroden, der Kathode und der Anode und einem Elektrolyten, welcher für die Trennung der beiden Elektroden voneinander verantwortlich ist. Die Klassifizierung der Brennstoffzellen erfolgt nach der Elektrolytart. Weitere Unterscheidungsmerkmale liegen in der Arbeitstemperatur, beim elektrischen Wirkungsgrad und beim verwendeten Brenngas. In Tabelle 8 werden die einzelnen Typen anhand vorhin genannter Merkmale unterschieden. Anschließend folgen eine detailliertere Beschreibung der unterschiedlichen Brennstoffzellenarten und die Zuordnung zu den verschiedenen Anwendungsgebieten (H-TEC 2011, S. 15f.).

Tabelle 8: Arten von Brennstoffzellen

Brennstoffzelle	Elektrolyt	Arbeitstemperatur	Elektrischer Wirkungsgrad	Brenngas
Alkalische Brennstoffzelle (AFC)	Kalilauge	Zimmertemperatur bis 90 Grad Celsius	60 – 70 Prozent	Wasserstoff
Membranbrennstoffzelle (PEMFC)	Protonleitende Membran	Zimmertemperatur bis 80 Grad Celsius	40 – 60 Prozent	Wasserstoff
Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC)	Protonleitende Membran	Zimmertemperatur bis 130 Grad Celsius	20 – 30 Prozent	Methanol
Phosphorsäure Brennstoffzelle (PAFC)	Phosphorsäure	160 – 220 Grad Celsius	55 Prozent	Erdgas, Biogas, Wasserstoff
Karbonatschmelzen Brennstoffzelle (MCFC)	Alkalicarbonatschmelzen	620 – 660 Grad Celsius	65 Prozent	Erdgas, Biogas, Kohlegas, Wasserstoff
Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)	Yttriumstabilisiertes Zirkonoxid	800 – 1.000 Grad Celsius	60 – 65 Prozent	Erdgas, Biogas, Kohlegas, Wasserstoff

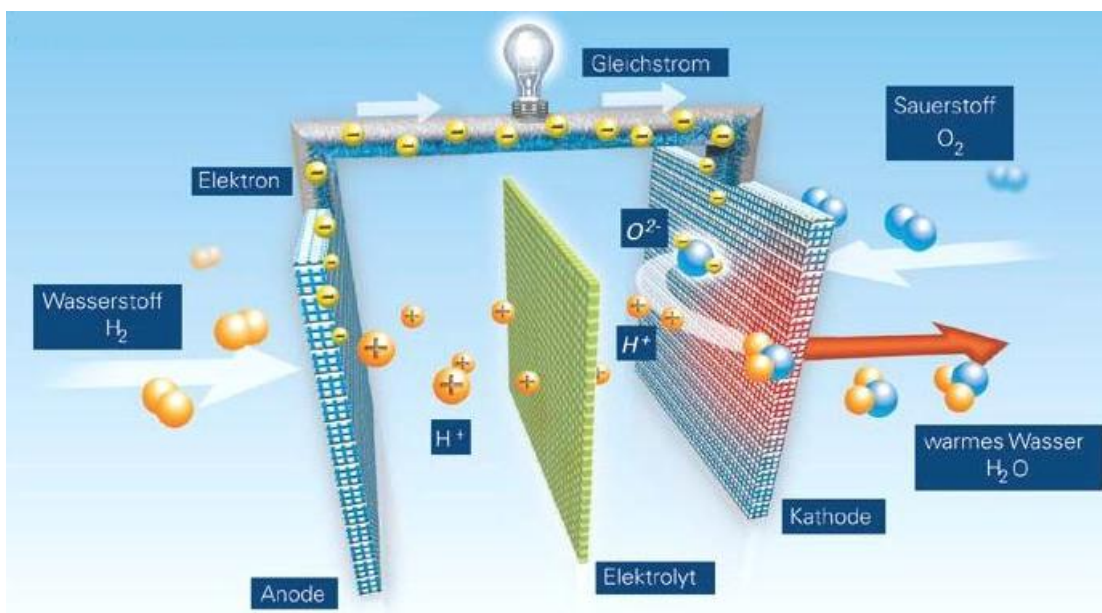
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (H-TEC 2011, S. 15)

Alkalische Brennstoffzellen sind Niedertemperaturbrennstoffzellen, welche bei Temperaturen zwischen 20 und 90 Grad Celsius arbeiten. Kalilauge wird als Elektrolyt verwendet. Vorteilhaft sind die Verwendung günstiger Katalysatoren und sehr hohe Wirkungsgrade. Nachteilig ist die Unverträglichkeit mit Kohlendioxid, welches zur Zersetzung führen würde. Somit kann dieser Brennstoffzellentyp nur mit hochreinen Brennstoffen arbeiten, wie reinem Sauerstoff und Wasserstoff. Angewendet werden alkalische Brennstoffzellen beim Militär und in der Raumfahrt. Auch die **PEM-Brennstoffzelle** ist eine Niedertemperaturbrennstoffzelle. Eine protonenleitende Folie dient als Elektrolyt. Ein hoher Wirkungsgrad, ein gutes Kaltstartverhalten und die Möglichkeit zur Zellstapelung sind bei diesem Typ von Vorteil. Nachteilig ist die Verwendung von teurem Platin als Katalysatormaterial anzumerken. Kohlenmonoxid darf unter keinen Umständen in die Zelle gelangen, da es ein starkes Katalysatortgift für diese Brennstoffzelle ist. Angewendet wird dieser Typ zum Beispiel bei Autos, in der Raumfahrt, zur tragbaren Stromversorgung und als Batterieersatz. Eine sehr spezielle Unterart der PEM-Brennstoffzelle ist die **Direkt-Methanol-Brennstoffzelle**. Der Aufbau beider Typen ist sehr ähnlich, jedoch wird hier Methanol als Brennstoff verwendet. Der große Vorteil liegt in der einfacheren Handhabung des flüssigen Brennstoffes. Jedoch ist Methanol sehr korrosiv und giftig. Außerdem ist der elektrische Wirkungsgrad nur sehr gering. Verwendet wird die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle bei Elektroantrieben, als tragbare Stromversorgung und als Batterieersatz (H-TEC 2011, S. 16f.).

Die **Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle** zählt zu den Hochtemperaturbrennstoffzellen. Als Elektrolyt wird eine Alkalikarbonatschmelze benützt. Dadurch kann Strom mit hohen Wirkungsgraden erzeugt werden. Außer Wasserstoff können auch Erdgas, Kohlegas oder Biogas als Brenngas verwendet werden. Als Anwendungsbeispiele können Kraftwerke zur Stromerzeugung und Blockheizkraftwerke genannt werden. Bei der **Phosphorsäure-Brennstoffzelle** wird Phosphor als Elektrolyt genutzt. Sie zählt zu den Mitteltemperaturbrennstoffzellen. Eingesetzt wird sie in Blockheizkraftwerken und zur stationären Stromversorgung. Als Brenngas können Wasserstoff, Biogas und Erdgas herangezogen werden. Die **Oxidkeramische Brennstoffzelle** ist eine Hochtemperaturbrennstoffzelle. Als fester Elektrolyt wird eine Zirkonoxidkeramik benützt. Neben Wasserstoff besteht die Möglichkeit Erdgas, Biogas oder Kohlegas als Brenngas zu verwenden. Angewendet wird diese Zelle in Blockheizkraftwerken, in Kraftwerken zur Stromerzeugung oder als Hausenergieversorgung (H-TEC 2011, S. 16f.).

Die am weitesten verbreitete Brennstoffzelle ist, die in obiger Tabelle 8 grau unterlegte, Proton Exchange Membrane-Brennstoffzelle, welche auch unter dem Namen „Polymer Elektrolyt Membran Brennstoffzelle“ bekannt ist (Geitmann 2004, S. 133). Diese Brennstoffzelle wandelt chemische Energie effizient, emissionsfrei und leise in elektrische Energie um (H-TEC 2011, S. 19). Abbildung 13 stellt die Funktionsweise der PEM-Brennstoffzelle grafisch dar.

Abbildung 13: Funktionsweise PEM-Brennstoffzelle



Quelle: (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2012)

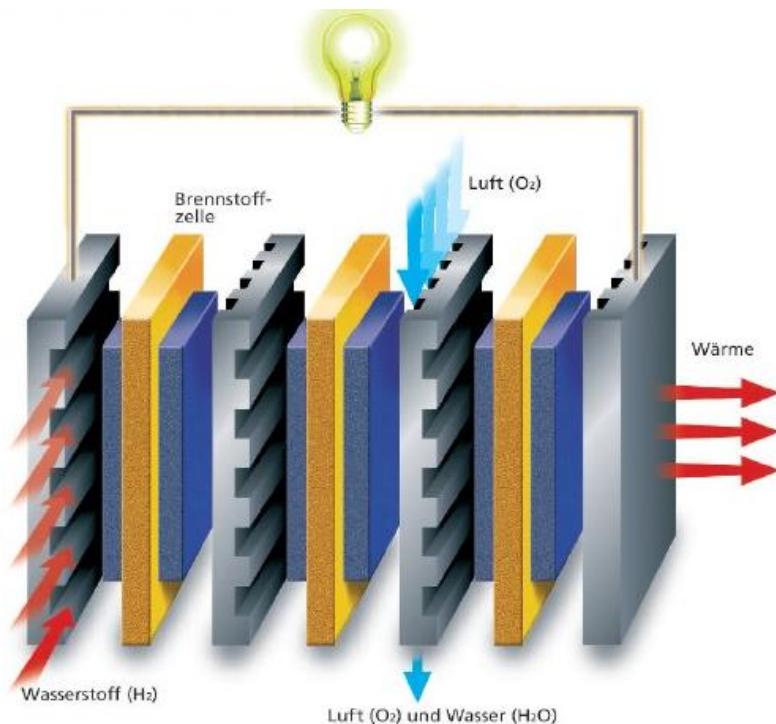
Bei einer direkten Umwandlung von chemischer in elektrische Energie dürfen, um eine normale Verbrennung zu verhindern, die beiden Reaktionspartner, Wasserstoff und Sauerstoff, nicht direkt aufeinandertreffen. Bei der Brennstoffzelle sorgt ein Elektrolyt für die notwendige Trennung von Anode und Kathode, den beiden Elektroden (Jordan 2008, S. 57). Ionen werden vom Elektrolyt geleitet, welcher sich Elektronen gegenüber jedoch als Isolator verhält. Aufgrund der katalytischen Wirkung der Elektrode (zum Beispiel Platin), zerfällt das an die Anode geführte Wasserstoffgas bei Raumtemperatur in Elektronen (negative Ladungsträger) und Protonen (positive Wasserstoff-Ionen). Dadurch entsteht eine Spannungsdifferenz zwischen Anode und Kathode. Ein geschlossener äußerer Stromkreis bringt die freien Elektronen zur Kathode und auf dem Weg dorthin verrichten sie elektrische Arbeit. Wird ein Verbraucher, wie zum Beispiel ein Elektromotor, zwischen Anode und Kathode geschaltet,

kann dieser durch den erzeugten Strom angetrieben werden. Die protonenleitende Membran ermöglicht den H^+ -Ionen (Protonen) den Durchgang auf die Kathodenseite. Das positive Wasserstoff-Ion (Kation) wird durch die negativ geladenen Elektrolyt-Ionen (Anionen) weitergeleitet. Bei diesem Vorgang bleiben die Ionen selbst ortsfest, aber die Anionen stoßen die negativ geladenen Elektronen ab, welche den Weg rundherum nehmen müssen. An der Kathode, auf der anderen Seite, wird Wasser erzeugt, indem die Sauerstoff-Ionen aus der Luft die Elektronen von Stromkreislauf und die Wasserstoff-Protonen unter Wärmeentwicklung erneut kombinieren (H-TEC 2011)(Geitmann 2004, S. 135).

Gleichstrom und Wasser, beziehungsweise Wasserdampf, sind die Endprodukte einer Brennstoffzelle. Je nach Bauart erzeugt eine einzelne Brennstoffzelle in etwa 0,7 Volt und der maximale Spannungswert liegt bei 1,2 Volt, welcher mit einer Leistung von 100 Watt gleichzusetzen ist. Da Brennstoffzellen Gleichstrom mit einer geringen Spannung erzeugen, muss dieser für die Netzeinspeisung in Wechselstrom mit höherer Spannung umgewandelt werden. Diesen Vorgang übernehmen sogenannte Wechselrichter, welche zusätzlich unerwünschte Einflüsse auf die Netzfrequenz und mögliche Rückkoppelungen verhindern sollen. Da Brennstoffzellen aus keinen beweglichen Bauteilen bestehen, ist der Geräuschpegel sehr gering. Nur Nebenaggregate, wie zum Beispiel Gebläse oder Pumpen sind eventuell für entstandene Geräusche verantwortlich. Außerdem besteht ein geringer Wartungsbedarf, aufgrund der fehlenden beweglichen Teile (Geitmann 2004, S. 138f.).

Um eine ausreichende Leistung für den Betrieb zu erhalten, müssen viele Zellen in Reihe geschaltet werden. Diese Zellen werden als „Stacks“ bezeichnet. Bis zu 200 zusammengeschnittene Brennstoffzellen können in einem Stack untergebracht werden. Die Spannung innerhalb eines Stacks wird von der Anzahl der Zellen bestimmt. Die Stromstärke hängt von der Größe der Membranfläche ab. Die Leistungsfähigkeit ist an die Größe des Brennstoffzellen-Stacks gebunden und die Betriebsdauer wird von der Größe des Brennstoff-Reservoirs bestimmt (Geitmann 2004, S. 138f.). In Abbildung 14 wird der Aufbau eines Stacks dargestellt.

Abbildung 14: Aufbau eines Stacks



Quelle: (H-TEC 2011, S. 20)

Um die einzelnen Zellen abzutrennen werden Bipolarplatten verwendet, welche für die elektrische Kontaktierung der Elektroden und somit für die Weiterleitung des Stroms zur Nachbarzelle verantwortlich sind. Außerdem sorgen diese Bipolarplatten für die Wärmeabfuhrung, die Gaszuführung und die Abdichtung der jeweiligen Kammern. Eine Endplatte bildet den Abschluss des Stacks, an welcher Strom-, Gas und eventuell Kühlwasseranschlüsse angebracht sind. Die Kühlung erfolgt, abhängig von der Leistung, mit Luft oder Wasser (H-TEC 2011, S. 21).

Ein allgemeiner Vergleich von Brennstoffzellen mit konventionellen Energiewandlern ist aufgrund der unterschiedlichen Techniken und Parameter sehr schwer. Die jeweiligen Vor- und Nachteile lassen sich nicht verallgemeinern, da es verschiedene Brennstoffzellenarten mit unterschiedlichen Ausprägungen gibt. Jedoch gibt es einige Punkte, welche sich auf alle Brennstoffzellentypen beziehen (Geitmann 2004, S. 164f.). Tabelle 9 fasst diese Punkte zusammen.

Tabelle 9: Vor- und Nachteile von Brennstoffzellen

Vorteile	Nachteile
• umweltschonend, weil sehr schadstoffarm • keine beweglichen Teile • frei von Vibrationen • geringer Wartungsaufwand • sehr geräuscharm • beträchtliche Wirkungsgrade • hohe Stromkennzahl • kein eingebautes Getriebe • modularer Aufbau • enormes Entwicklungspotential • Leistungsabgabe kontinuierlich	• benötigte Infrastruktur zum Einsatz von Brennstoffzellen noch nicht oder nur unzureichend vorhanden • Kaltstartverhalten eher mangelhaft • Wasserstoffproduktionskosten sehr hoch • unausgereifte Technik • bei Verwendung von vorgeschalteten Reformern → hohe Wirkungsgradverluste • hoher Regelungsaufwand • hohe Anforderungen an Brennstoffreinheit, Problematik bei Verunreinigungen • Material- und Fertigungskosten sehr hoch

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Geitmann 2004, S. 164f.)

Zur Energieversorgung in der Raumfahrt haben sich Brennstoffzellen bereits bewähren können. Da es jedoch noch viele andere Einsatzmöglichkeiten gibt, wird im Weiteren anhand verschiedener Beispiele auf portable, mobile und stationäre Anwendungsgebiete von Brennstoffzellen näher eingegangen (Eichlseder und Klell 2010, S. 239).

4.3.1. Mobile Anwendungsbereiche

Der mobile Anwendungsbereich ist für die Brennstoffzellenentwicklung von großer Bedeutung. Aufgrund der hohen Anforderungen in diesem Bereich hat dieser Sektor eine gewisse Vorreiterrolle übernommen (Geitmann 2004, S. 194f.). In diesem Unterkapitel werden einige Beispiele von brennstoffzellenbetriebenen Antrieben gebracht, welche sich in Personenkraft-

wagen, Bussen, Lastkraftwagen, in der Schifffahrt, bei Schienenfahrzeugen und in der Luft- und Raumfahrt wiederfinden.

Personenkraftwagen

Grundsätzlich müssen bei der Brennstoffzellenverwendung in Kraftfahrzeugen zwei verschiedene Möglichkeiten unterschieden werden. Entweder wird das Fahrzeug durch einen **direkten elektrischen Antrieb des Elektromotors** oder durch einen **Hybridantrieb** fortbewegt. Bei der ersten Variante wird Strom genutzt, welcher von der Brennstoffzelle produziert wird. Als Verbraucher fungiert hierbei der Elektromotor. Die Grundlastabdeckung der zweiten Variante geschieht genauso wie bei der ersten Variante, aber das Hybridfahrzeug besitzt zusätzlich Batterien, welche als Energiespeicher genutzt werden können. Diese Speicher werden bei Niedriglast-Phasen aufgeladen und können die Energie, wenn benötigt, wieder abgeben (Geitmann 2004, S. 197).

Viele der großen Fahrzeughersteller betreiben Forschungen in diesem Gebiet und entwickeln Versuchsfahrzeuge mit wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen. Einige sind mittlerweile schon soweit Serienfahrzeuge anbieten zu können (Eichlseder und Klell 2010, S. 243). Da ein kompletter Überblick über alle vorhandenen Fahrzeuge zu umfangreich wäre, folgen nun einige Beispiele von wasserstoffbetriebenen Personenkraftwagen.

➤ Mercedes-Benz B-Klasse F-Cell

Im Jahr 2009 startete Mercedes-Benz die Produktion einer Kleinserie der B-Klasse „F-CELL“ Fahrzeuge. Dieses Fahrzeug ist der erste unter Serienbedingungen hergestellte Brennstoffzellen-Personenkraftwagen von Mercedes-Benz. Mit dem integrierten Wasserstofftank hat es eine Reichweite von fast 400 km. Die Leistung des Elektromotors beläuft sich auf 100 kW, was 136 PS entspricht. Das Drehmoment des Fahrzeuges beträgt 290 Newtonmeter und somit ist es leistungsmäßig mit dem Niveau eines Zwei-Liter-Benzinmotors gleichzusetzen. Umgerechnet auf Dieseläquivalent verbraucht dieses Fahrzeug 3,3 l Kraftstoff je 100 km. Die erreichbare Höchstgeschwindigkeit liegt bei 170 km/h. Ende 2010 wurden die ersten Fahrzeuge in den Vereinigten Staaten von Amerika und Deutschland ausgeliefert. Abbildung 15 zeigt das Fahrzeug (Daimler AG 2012).

Abbildung 15: Mercedes-Benz B-Klasse F-Cell



Quelle: (Daimler AG 2012)

Die Möglichkeit die B-Klasse für 950 Euro pro Monat zu leasen besteht, wenn Daimler zustimmt. Für drei Jahre lang würde der Leasingvertrag laufen. Versicherung, Inspektionen und Reifen sind im Preis inbegriffen. Die Fahrzeuge der neuen B-Klasse mit Brennstoffzellenantrieb werden ab 2014 in Serienfertigung gehen (Endriß 2011).

➤ **Hyundai ix35 FCEV**

Der Prototyp dieses Fahrzeuges verfügt über einen 100 kW/136 Ps starken Brennstoffzellenantrieb. Sein Wasserstoffspeicher fasst 5,6 kg und die Reichweite beträgt in etwa 560 km. Die Höchstgeschwindigkeit liegt bei einem Verbrauch von 3,6 l Kraftstoff bei 160 km/h. Bis Ende des Jahres sollen von dem Hyundai ix35 FCEV 1.000 Stück produziert und weltweit getestet werden. Hyundai plant für das Jahr 2015 den Start der Großserienproduktion (Heyne 2011). Ein Foto des Hyundai ix35 FCEV zeigt Abbildung 16.

Abbildung 16: Hyundai ix35 FCEV



Quelle: (Hyundai 2012)

Busse

Der Brennstoffzelleneinsatz in Bussen führt zu einer Reduzierung der Schadstoffbelastung in Innenstädten. Außerdem verursachen diese Busse so gut wie keine Geräusche im Gegensatz

zu den derzeit eingesetzten Bussen. Eine zentrale, auf dem Betriebsgelände angebrachte, Tankstelle würde für Linienbusse ausreichen, da diese in regelmäßigen Abständen zu ihrem Ausgangspunkt zurückkommen (Geitmann 2004, S. 210f.).

Seit dem Sommer 2011 sind neue wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenbusse, genannt „SauberBus“, mit Hybridtechnologie in Hamburg im Linienverkehr unterwegs. In jedem Bus gibt es sieben Wasserstofftanks, welche ein Fassungsvermögen von je 205 l Wasserstoff bei 350 bar haben. Auf 100 km liegt der Verbrauch bei durchschnittlich zehn bis 14 kg Wasserstoff. Die Reichweite des Busses beträgt in etwa 250 km. Für den Betrieb des Busses ist die eingebaute Lithium-Ionen-Batterie von großer Bedeutung. Sie wirkt als Energiepuffer, der für den gleichmäßigen Betrieb der Brennstoffzelle verantwortlich ist und außerdem ermöglicht sie die Energierückgewinnung beim Bremsen. Die beim Bremsvorgang in den Radnabenmotoren erzeugte elektrische Energie wird zum Aufladen der Lithium-Ionen-Batterie verwendet (SauberBus 2012a). Ein Foto des Busses zeigt Abbildung 17.

Abbildung 17: Wasserstoffbetriebener Brennstoffzellenbus – „SauberBus“



Quelle: (SauberBus 2012b)

Lastkraftwagen

Brennstoffzellenbetriebene Antriebe, welche in Bussen eingesetzt werden, würden sich ebenso für den Einsatz in Lastkraftwagen eignen. Derzeit gibt es jedoch nur wenige kleine Projekte, welche sich mit diesem Bereich auseinandersetzen. Es bestünde aber auch die Möglichkeit zukünftig Brennstoffzellen-Systeme zu entwickeln, welche für die Energieversorgung des Führerhauses verantwortlich wären. Gemeint sind hierbei beispielsweise die Stromversorgung der Klimaanlage, des Radios und eventuell sogar die Kühlung von Lebensmitteltransporten (Geitmann 2004, S. 214f.).

Schifffahrt

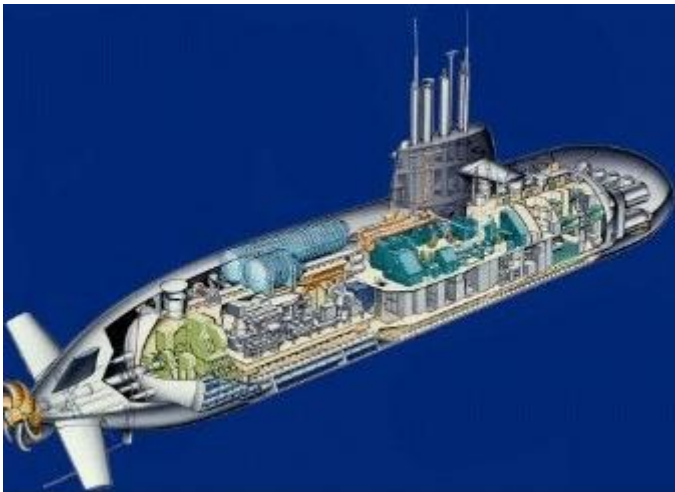
Das weltweit erste brennstoffzellenbetriebene Unterseeboot U 31 absolvierte im April 2003 seine Jungfernfahrt von Kiel aus. Aktuell ist die deutsche Marine im Besitz von vier Unterseebooten mit Brennstoffzellen. Die Unterseebootklasse „212A“ setzt sich aus den Modellen „U31“, „U32“, „U33“ und „U34“ zusammen. Diese vier Modelle verfügen neben einem Dieselmotor zusätzlich über eine PEM-Brennstoffzelle. Die Kosten pro Unterseeboot belaufen sich auf etwa 700 Millionen Euro. Die Versorgung mit Wasserstoff erfolgt über einen Metallhydridspeicher. Die U32 stellte im April 2006 einen Rekord auf, indem sie eine zweiwöchige Tauchfahrt, betrieben mit der Brennstoffzelle absolvierte. Dieser Tauchgang war bis dato der längste, den ein nicht nuklearbetriebenes Unterseeboot jemals absolviert hat. Das eingebaute Diesellager wird für die Fahrt über Wasser eingesetzt. Bei der Fahrt unter Wasser mit niedriger Geschwindigkeit wird die PEM-Brennstoffzelle eingesetzt. Falls jedoch die Höchstgeschwindigkeit unter Wasser benötigt wird, wird der benötigte Strom aus Akkumulatoren bezogen. Das Unterseeboot ist nicht zu orten, da die Brennstoffzelle keine warmen Abgase und keine Geräusche erzeugt (Eichlseder und Klell 2010, S. 250) (Geitmann 2004, S. 218). Tabelle 10 zeigt die technischen Daten des Unterseebootes U32. Abbildung 18 zeigt das Innenleben der Unterseebootserie 212A.

Tabelle 10: Technische Daten des Unterseebootes U32

Brennstoffzelle	zwei Siemens PEM-Module mit je 120 kW Leistung
Dieselantrieb	vier 6,2 Megawatt (MW) Diesel Generator Sets einen drei MW Diesel Generator Set
Reichweite	8.000 Seemeilen
Abmessungen	Länge 56 Meter, maximaler Rumpfdurchmesser 7 Meter Tiefgang 6 Meter, maximale Höhe 11,5 Meter
Geschwindigkeit	12 Knoten (kn) Überwasser 20 kn getaucht
Verdrängung	1.450 Tonnen über Wasser, 1.830 Tonnen unter Wasser

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Eichlseder und Klell 2010, S. 250)

Abbildung 18: Innenleben Unterseebootserie 212A



Quelle: (Diefenbach 2007)

Die Brennstoffzellentechnik stellt auch für konventionelle Schiffe eine interessante Möglichkeit dar. Die Firma Zebotec GmbH rüstete 2005 ein Elektromietboot und 2006 das Forschungsschiff „Solgenia“ mit einer 800 Watt (W) PEM-Brennstoffzelle aus. Das Forschungsschiff besitzt eine Photovoltaikanlage zur Stromerzeugung, einen 70 l Wasserstofftank bei 350 bar, einen acht kW Elektromotor und drei Brennstoffzellen mit je 1,2 kW. Im Jahr 2007 präsentierte die Zebotec GmbH das Sportboot „COBALT 233 ZET“. Dieses verfügt über ein 50 kW Brennstoffzellensystem, welches eine Batterie zur Leistungsspitzenabdeckung hat. Außerdem hat es drei Wasserstoffdrucktanks zu 350 bar. Bei Gleitfahrt kann eine Höchstgeschwindigkeit von 40km/h erreicht werden. Das brennstoffbetriebene Fahrgastschiff „Alsterwasser“ fährt seit August 2008 auf der Alster in Hamburg. Es kann 100 Fahrgäste transportieren. Die „Alsterwasser“ wird mit zwei Brennstoffzellen mit je 50 kW Höchstleistung angetrieben. Der eingesetzte Wasserstofftreibstoff wird bei einem Druck von 350 bar an Bord gespeichert. Die Länge des Schiffes beträgt 25,5 Meter, der Tiefgang 1,2 Meter und die maximale Höhe 2,63 Meter. Die österreichischen Unternehmen Bitter, Frauscher und Fronius stellten im April 2009 am Traunsee ein serienreifes Elektroboot vor, welches einen Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb hat. In Amsterdam fährt das Kanalschiff „Nemo H₂“ mit einer 65 kW PEM-Brennstoffzelle und einer Batterie. An Bord werden 24 kg Wasserstoff bei 350 bar gespeichert. Aufnehmen kann die „Nemo H₂“ 87 Passagiere. Abbildung 19 zeigt ein Foto der „Nemo H₂“ (Eichlseder und Klell 2010, S. 251ff.).

Abbildung 19: Nemo H₂



Quelle: (Schuitemaker 2012)

Schienenfahrzeuge

Im Schienenfahrzeugbereich gibt es einige Versuchsmodelle mit wasserstoffbetrieben Brennstoffzellen. Unter der Leitung von „Vehicle Project LLC“ wurde von einem internationalen Konsortium das weltweit größte Brennstoffzellen-Fahrzeug, eine Brennstoffzellen-Lokomotive entwickelt. Das Gewicht dieses Schienenfahrzeuges kam auf 109 Tonnen (Geitmann 2004, S. 218). Ein weiteres Beispiel ist die Hybrid Lok 1205 von der BNSF-Eisenbahngesellschaft in Kalifornien, Amerika, welche ihren Strom auch aus Wasserstoff-Brennstoffzellen bezieht. Sie verfügt über Akkus, welche den nicht verbrauchten Strom speichern und bei Bedarf wieder abgeben können. Die meiste Zeit jedoch benötigt die Lokomotive kaum mehr als 100 kW von der 300 kW Dauerleistung. Im Vergleich zu einer Diesellok soll die Effizienz doppelt so hoch sein (BNSF und Weidelich 2009). In Abbildung 20 ist ein Foto der beschriebenen Lokomotive zu sehen.

Abbildung 20: Hybrik-Lokomotive 1205



Quelle: (BNSF und Weidelich 2009)

Luftfahrt

Flüssiger Wasserstoff kann auch als Treibstoff für Flugzeuge verwendet werden. Herkömmlicher Flugzeug-Treibstoff produziert bei seiner Verbrennung eine große Menge an Emissionen. Beispielsweise werden bei dem Verbrennungsvorgang von einer Tonne Kerosin 3,2 Tonnen CO₂ produziert. Der Kerosin-Verbrauch eines Groß-Flugzeuges beträgt zwischen 4 und 20 Tonnen innerhalb einer Flugstunde. Der Nachweis der grundsätzlichen Realisierbarkeit wurde schon im Jahr 1988 gebracht, als ein Laborflugzeug testweise mit flüssigem Wasserstoff beziehungsweise flüssigem Erdgas betrieben wurde. Wenn flüssiger Wasserstoff in der Luftfahrt eingesetzt werden soll, müssen folgende Punkte beachtet werden. Der gewichtsspezifische Wasserstoff-Energieinhalt ist 2,8-mal höher als der von Kerosin. Somit würde sich die Nutzlast der Flugzeuge vergrößern. Jedoch ist das benötigte Volumen für exakt dieselbe Menge an Energie um das Vierfache größer. Aus diesem Grund kommt es zu Platzproblemen und Veränderungen in der Flugzeugkonfiguration wären nötig. Eine Möglichkeit zur Lösung dieses Problems wäre die Wasserstofftankplatzierung auf dem Flugzeugrücken. Sicherheitstechnisch ist das Treibstoffsystem gut geschützt und bietet im Vergleich zu Kerosin sogar einige Sicherheitsvorteile (Geitmann 2004, S. 215ff.). Der Airbus-Produzent EADS plant seine Flugzeuge zukünftig mit Wasserstoffantrieben fliegen zu lassen. Zusammen mit Chemikern von der Universität in Glasgow arbeiten sie an einer neuen Möglichkeit Wasserstoff als Treibstoff in Flugzeugen zu speichern. Geplant ist ein Testflug im Jahr 2014 (Focus 2011).

Raumfahrt

Raketen werden mit flüssigem Sauerstoff und flüssigem Wasserstoff angetrieben. Der Wasserstoff tritt als Brennstoff und der Sauerstoff als Oxidator auf. Sowohl der flüssige Wasserstoff, als auch der flüssige Sauerstoff werden getrennt voneinander in Behältern tiefkalt gelagert. Mit Hochleistungs-Turbopumpen werden die Kraftstoffe für die Verbrennung mit 20 bis 30 bar Druck in die Brennkammer gepresst. Drücke von 200 bis 300 bar entstehen beim Verbrennungsvorgang. Der Antrieb der Rakete erfolgt über eine Lavalldüse, durch die der Wasserdampf mit Überschallgeschwindigkeit austritt. Die Lagerung der tiefkalten Flüssigkeiten ist sehr aufwendig und die Technik sehr komplex, trotzdem wird dieses Verfahren seit 1950 zum Raketenantrieb verwendet (Eichseder und Klell 2010, S. 267f.).

4.3.2. Stationäre Anwendungsgebiete

Zur Stromerzeugung in Kombination mit der Nutzung der Abwärme werden stationäre Brennstoffzellen verwendet. Der Ablauf findet unter konstanten Betriebsbedingungen statt. Am häufigsten verwendet werden hierfür Hochtemperaturzellen, wie zum Beispiel die oxid-keramische Brennstoffzelle oder die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle. Außerdem werden Gasturbinen eingesetzt, um die Abwärme der Hochtemperatur-Brennstoffzellen nutzen zu können. Entsprechende Speicher- und Regelstrategien können für einen guten Ausgleich zwischen dem thermischen und elektrischen Energiebedarf im Winter beziehungsweise im Sommer sorgen (Eichlseder und Klell 2010, S. 240f.). Nachfolgend werden Beispiele von drei stationären Anwendungsgebieten genauer beschrieben.

Brennstoffzellenkraftwerke

Im Jahr 2005 wurde beispielsweise in Chico, Kalifornien, ein Brennstoffzellenkraftwerk in Betrieb genommen. Seine Leistungsfähigkeit beträgt ein MW. Die Energie wird in vier Karbonatschmelzen-Brennstoffzellen, welche von dem Unternehmen FuelCellEnergy hergestellt wurden, umgewandelt. Jede Brennstoffzelle für sich stellt 250 kW bereit. Der Brauprozess wird mit Methan und Abgasen betrieben. Die Abwärme der Anlage wird beim Bierbrauen weiter verwendet und erhöht somit den Gesamtwirkungsgrad. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt in etwa 50 Prozent und bei der zusätzlichen Verwendung einer Kraft-Wärme-Kopplung kann dieser Wert auf 75 Prozent erhöht werden (Eichlseder und Klell 2010, S. 241). Abbildung 21 zeigt ein Foto des besagten Kraftwerks.

Abbildung 21: Brennstoffzellenkraftwerk in Kalifornien



Quelle: (SCS Engineers 2008)

Hausenergiezentrale

Um ein Haus mit Energie zu versorgen werden Brennstoffzellensysteme benötigt, welche im elektrischen Leistungsbereich zwischen einem und zehn Kilowatt liegen. Solche Anlagen können Ein- und Mehrfamilienhäuser, Häuser-Komplexe und kleine Gewerbebetriebe mit elektrischer und thermischer Energie versorgen. In diesem Leistungsbereich konkurriert die Brennstoffzellenanlage mit dem öffentlichen Stromversorgungsnetz und der Wärmeversorgung durch das Fernwärmesystem oder mit Öl- und Gaskesseln (Geitmann 2004, S. 180).

Neue Brennstoffzellen-Heizgeräte sind in Wohngebäuden für die gesamte Wärmeversorgung zuständig. Sie setzen sich aus einer Brennstoffzelle, welche für die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung verantwortlich ist und einem integrierten Heizkessel zusammen. In einem Wärmespeicher sind Heizwärme und warmes Wasser gespeichert. Beim Vergleich mit herkömmlicher getrennter Strom- und Wärmeerzeugung in Kraftwerken und Brennwertkesseln, ermöglichen die neuen Brennstoffzellen-Heizgeräte eine Einsparung von 25 bis 35 Prozent von CO₂. Der erreichbare Gesamtwirkungsgrad beträgt mehr als 96 Prozent und ihre elektrische Effizienz liegt bei über 33 Prozent. Bei den Strom- und Heizkosten für ein durchschnittliches Einfamilienhaus wird mit einer jährlichen Einsparungsmöglichkeit von mehreren hundert Euro gerechnet. Derzeit sind die in nur geringer Stückzahl gefertigten Brennstoffzellen-Heizgeräte im Vergleich mit konventionellen Technologien deutlich teurer. Bevor diese Technik erfolgreich am Markt eingeführt werden kann müssen die Lebensdauer, die Wirkungsgrade und die Kosten optimiert werden. Aktuell werden erdgasbetriebenen Brennstoffzellen im Callux-Projekt bei Privatkunden in deren Eigenheim erprobt. Das Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung aus Baden-Württemberg koordiniert das Projekt mit verschiedenen Geräteherstellern und Energieversorgern. Dieses Projekt ermöglicht den Geräteherstellern die Produktion von Kleinserien und den Aufbau von Lieferantennetzen. Das Ziel ist die Reife der Technologie nachzuweisen und daraufhin die Serienproduktion eines marktfähigen Brennstoffzellen-Heizgerätes einleiten zu können (Hirn 2012, S.1ff.). Ein weiteres Beispiel bietet das Unternehmen Vaillant, welches zu den Pionieren bei der Brennstoffzellen-Heizgeräten-Entwicklung gehört. Seit 2008 hat sich das Unternehmen auf die Entwicklung von Heizgeräten mit oxidkeramischen Brennstoffzellen konzentriert. Das entwickelte Brennstoffzellen-Heizgerät wurde im Rahmen der Hannover Messe 2011 vorgestellt. Das wandhängende Gerät wird mit oxidkeramischen Brennstoffzellen betrieben. Die elektri-

sche Leistung beträgt ein kW und die thermische Leistungsfähigkeit zwei kW. Der elektrische Wirkungsgrad liegt zwischen 30 und 34 Prozent und der Gesamtwirkungsgrad zwischen 80 und 85 Prozent. Die Kaltstartzeit beträgt zwei bis drei Stunden und es besteht die Möglichkeit das Gerät, ohne elektrische Leistung einzubüßen, jederzeit zu starten und zu stoppen (Wichtermann 2012). Ein Foto des beschriebenen Gerätes findet sich in Abbildung 22.

Abbildung 22: Vaillant Brennstoffzellen-Heizgerät



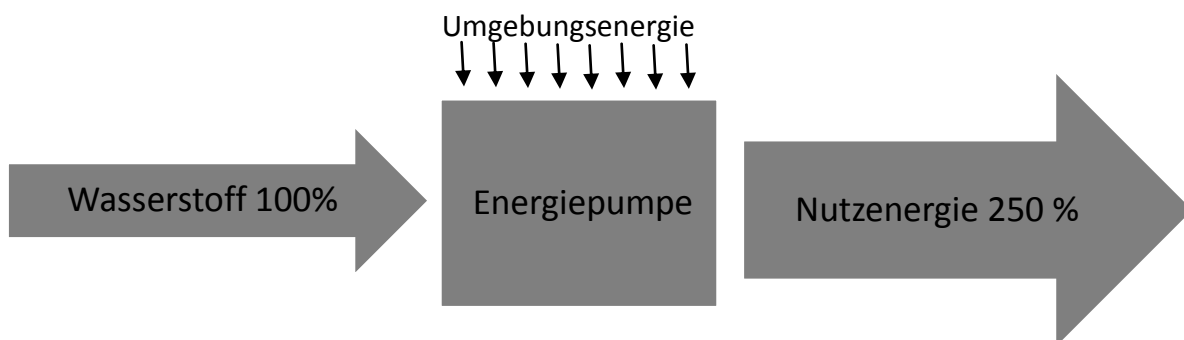
Quelle: (Vaillant Group 2012)

Energiepumpen

Unter einer Energiepumpe wird die Kombination einer Brennstoffzelle mit einer Wärmepumpe verstanden. Trotz der Kostenintensität werden heutzutage jedoch aus Klimaschutzgründen größtenteils Elektrowärmepumpen genutzt. Der größte Teil der Primärenergie geht bei der Nutzung dieser Elektrowärmepumpen in den jeweiligen Kraftwerken verloren. Falls die Stromproduktion jedoch direkt vor Ort, zum Beispiel im eigenen Haus, stattfinden könnte, bestünde die Möglichkeit diese Wärme zu nutzen. Der Strom würde zum Wärmepreis zur Verfügung stehen. Zusätzlich kann die Brennstoffzellenabwärme zum Heizen verwendet werden. Eine Brennstoffzellen-Wärmepumpe steht im Vergleich mit der direkten Wasserstoffverbrennung gut dar, denn aus einer Wasserstoffeinheit werden am Ende mehr als zwei Wärmeeinheiten zum Preis von einer Wärmeeinheit gewonnen. Der Raumwärmebedarf könnte durch dieses Verfahren auf etwa 30 Prozent des heutigen Bedarfs reduziert werden. Der industrielle Einsatz von Wärmepumpen wäre mit geringeren Kosten verbunden, als die

Installation von Erdkollektoren für die Raumheizung. Lediglich ein günstiger Wärmetauscher, welcher in den Prozess integriert werden muss, würde benötigt werden. Um Raum- und Prozesswärme erzeugen zu können, besteht die Möglichkeit Erdwärme, Grundwasser, Außenluft, Solarenergie oder Oberflächenwasser als Quelle zu nutzen. Diese Energiequellen stehen fast überall zur Verfügung. Abbildung 23 zeigt wie eine Energiepumpe genutzt werden kann (Tetzlaff 2011b, S. 190f.).

Abbildung 23: Schematische Darstellung der Nutzung einer Energiepumpe



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Tetzlaff 2011b, S. 190)

4.3.3. Portable Anwendungen

Brennstoffzellen im portablen Bereich sind zum Beispiel für Kleingeräte wie Kameras, Mobiltelefone und Laptops gedacht. Im Vergleich mit Akkus und Batterien sind vor allem höhere Betriebszeiten und gute Wirkungsgrade die Gründe warum, trotz hoher Kosten, ein großes Interesse in diesem Bereich besteht (Eichlseder und Klell 2010, S. 239). Batterien entladen sich während dem Gebrauch, Brennstoffzellen können jedoch die Lieferung von Strom so lange garantieren, wie der verwendete Brennstoff zugeführt wird. Für diese Anwendungsgebiete eignen sich am besten Niedertemperatur-Brennstoffzellen, wie die PEM-Brennstoffzelle und die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle. Diese können schon bei geringen Temperaturen arbeiten, verfügen über ein gutes Kaltstartverhalten und ermöglichen ein kompaktes Design (H-TEC 2011, S. 25). Im Jahr 2002 präsentierte das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE zusammen mit dem koreanischen Konzern LG den ersten Laptop, welcher mit einem vollkommen integrierten Brennstoffzellensystem betrieben wurde. Dieses System bestand aus 27 Zellen und drei Metallhydridspeichern. Die Spannungswerte beliefen sich zwischen zehn und 20 Volt Arbeitsspannung innerhalb der Brennstoffzelle, welche

in 24 Volt für den Laptopbetrieb umgewandelt wurden. Die Höchstleistung betrug 50 W (Mergel 2004, S. 49). Das Unternehmen Panasonic entwickelte 2006 ein Notebook mit einer Brennstoffzelle. Diese wird mit einem Gemisch aus Wasser und Methanol angetrieben und liefert zwischen 13 und 20 W. Die maximale Betriebsdauer betrug 20 Stunden (Eichseder und Klell 2010, S. 240). Die Forschung und Entwicklung im Bereich der portablen Anwendungen wird stetig vorangetrieben, was am folgenden Beispiel gut erkannt werden kann. Das Unternehmen Apple hat im Jahr 2010 in den Vereinigten Staaten von Amerika zwei Patentanträge eingereicht, bei denen es um den Einsatz von Brennstoffzellentechnik in mobiler Hardware geht. Darin beschreibt Apple den Gerätebetrieb mit Wasserstoff-Brennstoffzellen. Apple verweist auf die Wichtigkeit dieses Forschungsbereiches für die Zukunft, erkennt aber auch den hohen Schwierigkeitsgrad in diesem Bereich an (Donath 2011).

4.4. Carbazol

Eine weitere Möglichkeit Wasserstoff anzuwenden besteht in der Verwendung von Carbazol als Trägerflüssigkeit. Carbazol ist eine giftige Chemikalie, welche jedoch große Mengen Wasserstoff speichern und danach wieder abgeben kann. Der Aggregatzustand dieser Chemikalie ist flüssig und der Umgang ist dem mit herkömmlichen Kraftstoffen gleichzusetzen. Die bislang eher unbekannte Chemikalie speichert den aufgenommenen Wasserstoff und gibt ihn, über ein im Fahrzeug eingebautem System, an die Brennstoffzelle oder den verwendeten Verbrennungsmotor ab. Im Gegensatz zu Benzin und Diesel wird Carbazol selbst bei diesem Vorgang nicht verbraucht, es kann immer wieder erneut mit Wasserstoff aufgeladen werden. Das verwendete Carbazol würde bei Tankstellen aus dem Fahrzeug abgepumpt und durch frisches, mit neuem Wasserstoff angereichertem, Carbazol ersetzt werden. Der einzige Unterschied zum derzeitigen Tankvorgang würde in der Form der Zapfsäule, welche an die Bedingungen von Carbazol angepasst werden muss, liegen. Die Wasserstoffspeicherung mittels Carbazol würde in direkter Konkurrenz mit den Hochdruck-Speicherverfahren von reinem Wasserstoff in Fahrzeugtanks stehen (Koller und Sebastian 2011). Vorteilhaft an diesem Verfahren sind einerseits die Eindämmung der Explosionsgefahr, welche bei der Verwendung von reinem Wasserstoff besteht und andererseits die Möglichkeit, die bestehende Tankstelleninfrastruktur weiterhin verwenden zu können. Die bestehenden Nachteile, für welche aktuell noch keine passenden Lösungswege gefunden sind, führen derzeit jedoch zu einer vorherrschenden Skepsis dieser Technik gegenüber. Um den Wasserstoff wieder

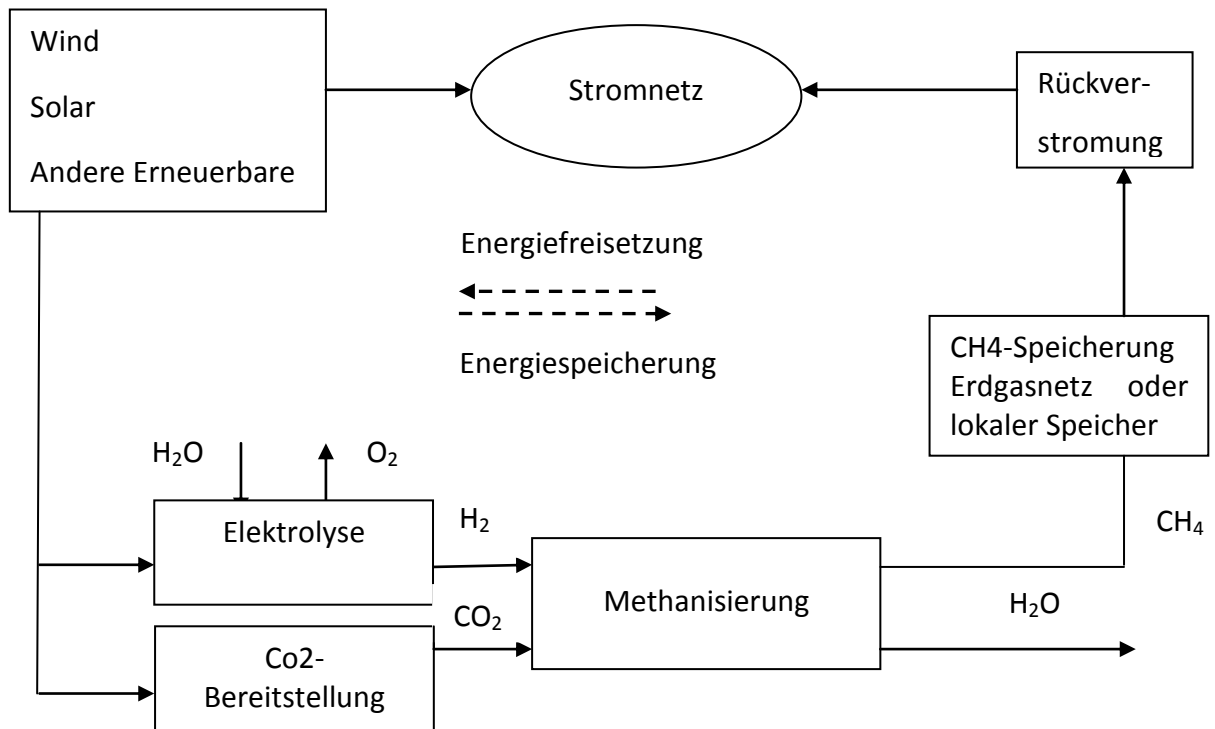
herauslösen zu können, werden höhere Temperaturen, als beispielsweise die 80 Grad Celsius bei der Brennstoffzellentechnik, benötigt. Dies würde zu einem enormen technischem Aufwand führen. Außerdem müsste eine Nachreinigung des gewonnenen Wasserstoffs erfolgen, um die Membranen vor einer Beschädigung zu schützen, da die Reinheit nicht ausreichend wäre. Das Tankvolumen müsste verdoppelt werden, da zweimal so viel Carbazol wie Benzin während der Fahrt benötigt werden würde (Stahl und Maier 2011). Die an dieser Technik arbeitenden Erlanger Forscher wollen durch weitere intensive Forschung und Entwicklung die Methodik verbessern. Ein Förderantrag für 500.000 Euro wurde von der Universität Erlangen-Nürnberg beim Verkehrsministerium eingereicht. Die Entwickler des Treibstoffes, Professor Wolfgang Arlt und Professor Peter Wasserscheid, schätzen die Dauer bis zum serienreifen Einsatz auf mindestens zehn Jahre (Koller und Sebastian 2011).

4.5. Methanisierung von Wasserstoff

Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurde Strom aus Gas erzeugt. Eine österreichisch-deutsche Forschungskooperation hat sich für den entgegengesetzten Weg entschieden. Überschüssiger Strom aus erneuerbaren Energiequellen, wie zum Beispiel aus Windkraft, soll als Methan in bereits vorhandenen Gasleitungen und Gasometern gespeichert und bei Bedarf verwendet werden. Der Einsatz von erneuerbaren Energiequellen nimmt immer mehr zu, bis jetzt fehlt es aber an gut integrierbaren Methoden den gewonnenen Strom zu speichern. Oftmals geht aus diesem Grund erzeugter Strom verloren. Deutsche Forscher haben eine Möglichkeit entwickelt die überschüssige Elektrizität als Erdgas zu speichern. Der produzierte Strom wird durch ein neues Verfahren in synthetisches Erdgas umgewandelt (Fraunhofer-Gesellschaft 2010). Die Entwicklung des Verfahrens ist dem Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) zuzuschreiben. Das österreichische Partnerunternehmen Solar Fuel Technology aus Salzburg bereitet aktuell die industrielle Umsetzung vor. Der bedeutendste Vorteil dieser Technologie liegt im Vorhandensein der nutzbaren Erdgas-Infrastruktur (Fraunhofer-Gesellschaft 2010). Der zu erreichende Wirkungsgrad beträgt derzeit 60 Prozent. Wirtschaftlich betrachtet ist eine Nutzung der 60 Prozent einem vollständigen Verlust vorzuziehen (derStandard.at 2010). Bei dem Verfahren wird die Wasserstoffelektrolyse mit dem Prozess der Methanisierung verbunden. Mit überschüssigem, aus erneuerbarer Energie hergestellter, Strom wird Wasser durch Elektrolyse gespalten. Bei dem

Vorgang entstehen Wasserstoff und Sauerstoff. Methan (synthetisches Erdgas) wird durch eine anschließende chemische Reaktion von Wasserstoff mit zugeführtem Kohlendioxid erzeugt (derStandard.at 2010). Abbildung 24 stellt den beschriebenen Vorgang grafisch dar.

Abbildung 24: Vorgangsbeschreibung der Methanisierung von Wasserstoff



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Müller, et al. 2011, S. 2005)

Das hergestellte Methan kann nach der benötigten Auskondensation des Wassers, welches als Nebenprodukt bei dem Prozess entstanden ist, in das Erdgasnetz eingespeist und dort gespeichert werden. Bei Bedarf besteht die Möglichkeit der Rückverstromung mit konventioneller Energiewandlungstechnologie, wie zum Beispiel Gasmotoren und Gasturbinen (Müller, et al. 2011, S. 2005f.). Durch diese neue Technik soll für das Energiesystem die Aufnahme großer Anteile fluktuierender Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen ermöglicht werden. Die Lieferung von Energie, welche zum Beispiel in Windparks erzeugt wird, wäre mit diesem Verfahren besser plan- und regelbar. Dieses Konzept soll für eine nachhaltige Energiewirtschaft eine Erleichterung bei der Integrierung erneuerbarer Energien darstellen (Fraunhofer-Gesellschaft 2010). Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit dem ökonomischen Potential von Wasserstoff.

5. Ökonomisches Potential von Wasserstoff

Damit der Einsatz von Wasserstoff eine Alternative zur bisherigen Energiewirtschaft werden kann, muss vor allem der Herstellungsprozess beachtet werden. Zur Schonung der Umwelt ist die Produktion von Wasserstoff aus regenerativen Energieträgern für die Zukunft anzustreben (Quaschnig 2010, S. 302). Der Übergang zu einer Ökonomie mit Wasserstoff wäre in vielen Lebensbereichen und in den meisten Aspekten der Ökonomie spürbar. Verschiedene, derzeit nicht vorhersehbare Variablen beeinflussen, ob der Wandel zu einer Ökonomie mit Wasserstoff früher oder später durchgeführt werden kann. Zu diesen Variablen zählen die Änderung des Weltklimas, die Preisentwicklung von Erdöl und Erdgas, die Entwicklungen in der Produktion, der Speicherung und dem Transport von Wasserstoff und der Brennstoffzellentechnologie und abschließend die Erfolge der Konkurrenztechnologien, wie zum Beispiel Elektrofahrzeugen (Romm 2006, S. 95).

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Wasserstoffwirtschaft, der dafür benötigten Infrastruktur, den entstehenden Kosten, gibt einen Einblick in andere alternative Kraftstoffe und schließt mit einem möglichen Ausblick in zukünftige Entwicklungen ab.

5.1. Wasserstoffwirtschaft

In einer Wasserstoffwirtschaft soll die benötigte Energie durch Wasserstoff geliefert werden, welcher vorzugsweise aus regenerativen Energiequellen produziert werden soll (Romm 2006, S. 15). In diesem Zusammenhang kommt der Begriff der „solaren Wasserstoffwirtschaft“ häufig vor. Darunter wird die Produktion von Wasserstoff mit Hilfe der Sonnenenergie verstanden. Der hergestellte Wasserstoff kann transportiert werden und anderorts unter der Freisetzung von Energie erneut verbrannt werden. Bei dem Verbrennungsvorgang würde beinahe nur Wasser entstehen, so dass die Belastung der Umwelt gering gehalten werden kann. Die Sinnhaftigkeit dieses Vorgangs lässt sich durch die mangelhafte Speicherungs- und Transportmöglichkeit von Strom begründen. Wasserstoff würde die Möglichkeit bieten, elektrische Energie effizient zu speichern (Geitmann 2004, S. 43ff.).

Der konkrete Vorgang in einer solaren Wasserstoffwirtschaft würde die Umwandlung von regenerativer Primärenergie, wie zum Beispiel Sonnenenergie, in Sekundärenergie, wie Strom, bewerkstelligen. Durch das Verfahren der Elektrolyse (siehe Kapitel 3.2.4.) könnte durch die

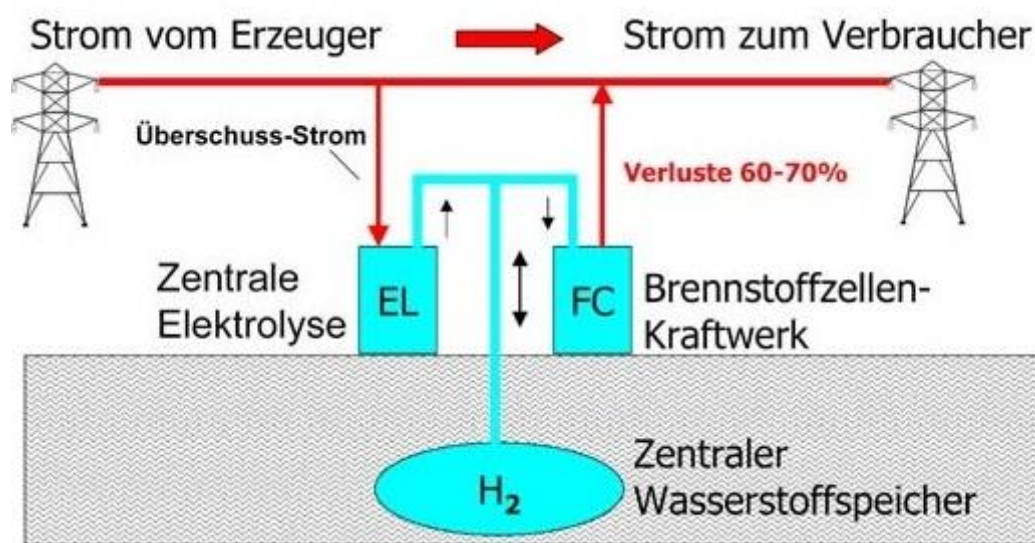
gewonnene Energie Wasserstoff erzeugt werden, welcher als Sekundärenergieträger zur Verfügung stehen würde und entweder direkt verwendet oder über weite Strecken transportiert werden könnte. Da zur Wasserstoffproduktion, aufgrund der hohen chemischen Bindungsenergie, sehr viel Energie benötigt wird, ist es aus ökologischer Sicht unsinnig fossile Energieträger zu verwenden. Stattdessen sollten aus ökologischen Gründen erneuerbare Energiequellen verwendet werden. Neben der Sonnenenergie ist auch die Nutzung aller anderen erneuerbaren Energiequellen, wie Windenergie, Erdwärme, Biomasse und Wasserkraft möglich (Geitmann 2004, S. 43ff.).

Eine Zwischenspeicherung der Energie ist notwendig, da vor Ort nicht immer die Möglichkeit besteht eine ausreichende Menge erneuerbarer Energie zu erzeugen. In Mittel- und Nordeuropa würde die Sonnenstrahlung beispielsweise nicht ausreichen um den gesamten Energiebedarf zu decken. Wenn die benötigte Menge an Energie geringer ist, wie beispielsweise im Sommer, würde die Sonne jedoch am produktivsten sein. Im Winter, wenn der Energiebedarf deutlich höher ist, ist die Sonneneinstrahlung jedoch begrenzt. Desweiteren gibt es starke wetterbedingte und von der Tageszeit abhängige Schwankungen. Für die Energiegewinnung mittels Windanlagen besteht ein ähnliches Problem. Nur weil gerade in jenem Moment eine enorm hohe Menge an Energie benötigt werden würde, gibt es keine Garantie für ausreichend wehenden Wind. Die Zurverfügungstellung einer enorm großen Menge an Energie in relativ kurzer Zeit muss jedoch gewährleistet werden können. Aus diesem Grund werden große Energiespeicher benötigt. Inwieweit Wasserstoff in diesem Punkt künftig zum Einsatz kommen wird, kann nur die Zukunft zeigen (Geitmann 2005, S. 44f.).

Dipl.-Ing. Karl-Heinz Tetzlaff, welcher vor seiner Pensionierung, in der zentralen Konzernforschung und Entwicklung der früheren Höchst AG unter anderem für die Brennstoffzellenentwicklung verantwortlich war, beschreibt in seinem Buch „Wasserstoff für alle“ einen anderen Ansatz zur Wasserstoffwirtschaft (Tetzlaff 2011a). Er unterscheidet zwischen der „**unechten**“ und der „**echten**“ Wasserstoffwirtschaft. Bei der „**unechten**“ **Wasserstoffwirtschaft** handelt es sich seiner Meinung nach um eine Stromwirtschaft mit Wasserstoffspeicher, welche das Problem der fluktuierenden Solarstrom einspeisungen an den benötigten Bedarf anpassen soll. Strom soll, genau wie bei der zuvor beschriebenen solaren Wasserstoffwirtschaft, in Form von Wasserstoff zwischengespeichert werden. Der nicht benötigte Strom würde durch Elektrolyse (siehe Kapitel 3.2.4.) in Wasserstoff umgewandelt und in Unter-

grundspeichern vorübergehend gespeichert werden. Diese Unterspeicher sind neu anzulegende Salzkavernen, weil unterirdisch vorhandene Erdgasspeicher nicht genutzt werden sollen, da die Erdgas-Infrastruktur weiterhin vorhanden bleiben soll. Wenn der gespeicherte Strom benötigt wird, kann der Wasserstoff über Turbinen oder Brennstoffzellen in das Stromnetz rückverstromt werden. Bei diesem Verfahren kommt es zu hohen Verlusten zwischen 60 bis 70 Prozent (Tetzlaff 2011b, S. 225ff.). Abbildung 25 stellt die „unechte“ Wasserstoffwirtschaft grafisch dar.

Abbildung 25: „Unechte“ Wasserstoffwirtschaft

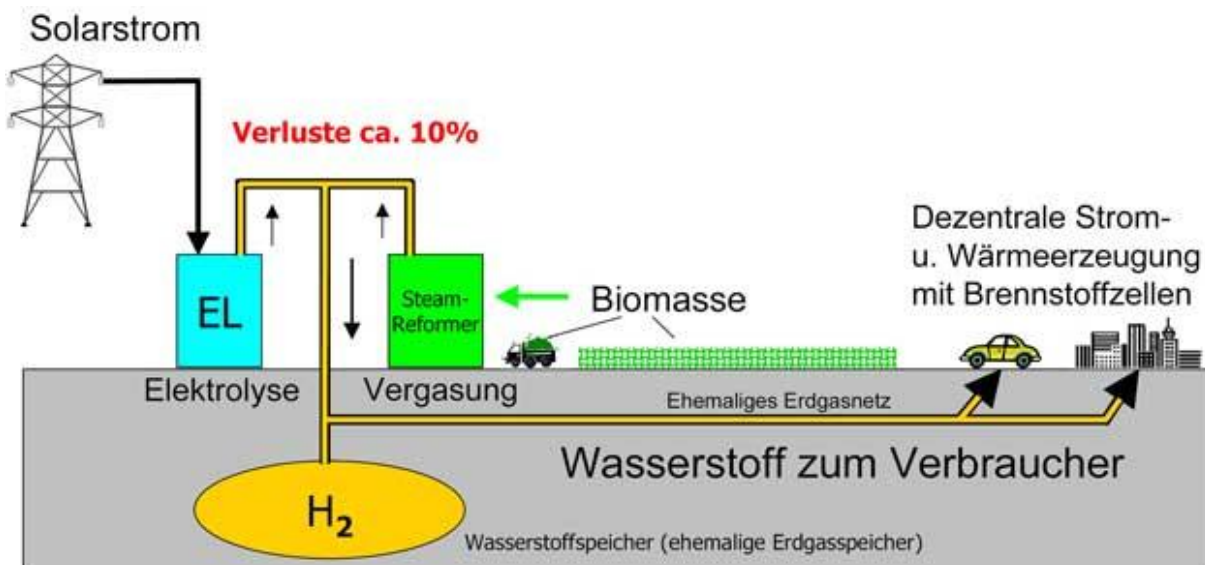


Quelle: (Tetzlaff 2010)

Laut Dipl.-Ing. Karl-Heinz Tetzlaff wird bei der „echten“ **Wasserstoffwirtschaft** auf allen Ebenen mit Wasserstoff gewirtschaftet und gehandelt. Wasserstoff, produziert durch Dampfreformierung aus Biomasse oder durch Elektrolyse aus Solarstrom, wird per Rohrleitungen (siehe Kapitel 3.4.2.) direkt an den Endverbraucher geliefert und die Umwandlung in Strom und Wärme erfolgt vor Ort. Überschüssiger Strom kann in Wärme umgewandelt und zum Heizen verwendet werden. Lediglich bei der Umwandlung der Primärenergiequelle zu Wasserstoff kommt es zu einem Verlust, in einem Bereich von etwa zehn Prozent. Die Umwandlungsverluste von Biomasse in Wasserstoff und von Strom in Wasserstoff sind annähernd gleich hoch. Zum Speichern des Wasserstoffs könnten, im Gegensatz zur „unechten“ Wasserstoffwirtschaft, ehemalige unterirdische Erdgasspeicher verwendet werden (Tetzlaff 2011b, S. 225ff.).

Die „echte“ Wasserstoffwirtschaft wäre als eine Lösung für die gesamte Energiewirtschaft gedacht, welche Strom, Treibstoffe, Wärme und Chemierohstoffe einschließt. Es wäre keine Modifikation der Stromwirtschaft, sondern eine komplett andere Alternative. Die Verwendung von Brennstoffzellen würde zu einem Stromüberschuss führen, welcher einen Handel mit Strom in einem Stromnetz vollkommen überflüssig machen würde (Tetzlaff 2011b, S. 30f.). In Abbildung 26 wird die „echte“ Wasserstoffwirtschaft dargestellt.

Abbildung 26: „Echte“ Wasserstoffwirtschaft



Quelle: (Tetzlaff 2011b, S. 228)

5.2. Wasserstoffinfrastruktur

Für eine erfolgreiche Wasserstoffinfrastruktur ist eine nachhaltige Sicherstellung der langfristigen Versorgung mit Wasserstoff von enormer Bedeutung. Die beiden zentralen Fragen im Hinblick auf eine aufstrebende Wasserstoffinfrastruktur befassen sich mit dem **Ort der Wasserstoffgewinnung** und mit dem **Aggregatzustand** des produzierten Wasserstoffs (Romm 2006, S. 81). Je nach unterschiedlichem Aggregatzustand des Wasserstoffs gibt es verschiedene Möglichkeiten der Speicherung. **Gasförmiger** Wasserstoff wird in Hochdruckbehältnissen, **flüssiger** Wasserstoff in Kryogen-Behältern und **chemisch gebundener** Wasserstoff in Metallhydriden gespeichert (siehe Kapitel 3.3.) (Geitmann 2004, S. 83f.). Beim Produktionsort kann unterschieden werden zwischen Großanlagenproduktion, Produktion direkt im Auto oder Produktion an lokalen Tankstellen (Romm 2006, S 81).

Die Wasserstoffherstellung **direkt im Fahrzeug** mittels Reformierung eines passenden Ausgangsstoffs ist erst vorstellbar, wenn die derzeit noch offenen Fragen der Funktion und Kosten mit umfangreicher Forschungs- und Entwicklungstätigkeit geklärt wurden. Die Wasserstoffproduktion in **Großproduktionsanlagen** gibt die Möglichkeit der Kosteneinsparung aufgrund der großen zu produzierenden Menge. Eine ressourcenzentrierte Wasserstoffproduktion in unmittelbarer Nähe von äußerst ergiebigen Energiequellen bringt mehrere Überlegungen mit sich. Erstens muss der **Rohstoff** zur Wasserstoffproduktion ausgewählt und zweitens muss ein geeigneter **Transportweg** gefunden werden. Billige **Rohstoffe** zur Wasserstoffproduktion, wie Erdgas und Kohle sind nicht kohlenstoffneutral und erneuerbare, kohlenstoffneutrale Energiequellen, wie zum Beispiel Windkraft und Biomasse sind relativ teuer (Romm 2006, S. 81ff.).

Der **Wasserstofftransport** erfolgt entweder in geeigneten Behältnissen, welche meistens per Lastkraftwagen oder Eisenbahn transportiert werden oder mittels Pipelines (siehe Kapitel 3.4.) (Geitmann 2004, S. 102f.) (Feck 2009, S. 45). Die günstigste Variante mittels Lastzügen, welche Flüssigwasserstoff transportieren können, ist enorm energieintensiv und würde die gewünschten Vorteile einer Wasserstoffökonomie so gut wie vollkommen untergraben. Der Transport mittels Pipelines hat den geringsten Energieverbrauch, ist jedoch am teuersten. Außerdem müssten die Pipelineverbindungen erst kostenintensiv errichtet werden, ohne die Garantie der Durchsetzung der Wasserstofftechnologie. Die Herstellung von Wasserstoff in **lokalen Tankstellen** bringt sehr hohe Kosten für den Tankstellenbetreiber mit sich. Solche Tankstellen würden einen Dampfreformer, einen großen Hochdruckspeicher, einen vielstufigen Wasserstoffverdichter, eine Reinigungsanlage für den Wasserstoff, ein neues Betankungssystem und diverse Steuerausrüstungen benötigen (Romm 2006, S. 81ff.).

Wenn die Gewinnung des Wasserstoffs nicht direkt an der Tankstelle erfolgt, wird, wie vorhin erwähnt, eine dichte Infrastruktur benötigt, um die Versorgung des Einzelhandels sicherstellen zu können. Die Erwartungen der Endverbraucher fangen bei der flächendeckenden Wasserstoffversorgung an, gehen über eine kurze Betankungszeit und enden bei der Sicherstellung der Gefahrlosigkeit des verwendeten Produktes. Diese Vorgaben würden unter anderem zu enormen Umrüstungen von Tankstellen führen, welche wesentliche Fortschritte in der Wasserstoffherstellung und- verteilung voraussetzen (Romm 2006, S. 67). Derzeit gibt es

weltweit 215 Wasserstofftankstellen. Die länderspezifische Aufteilung dieser Wasserstofftankstellen lautet: (Forum Elektromobilität e.V. 2012)

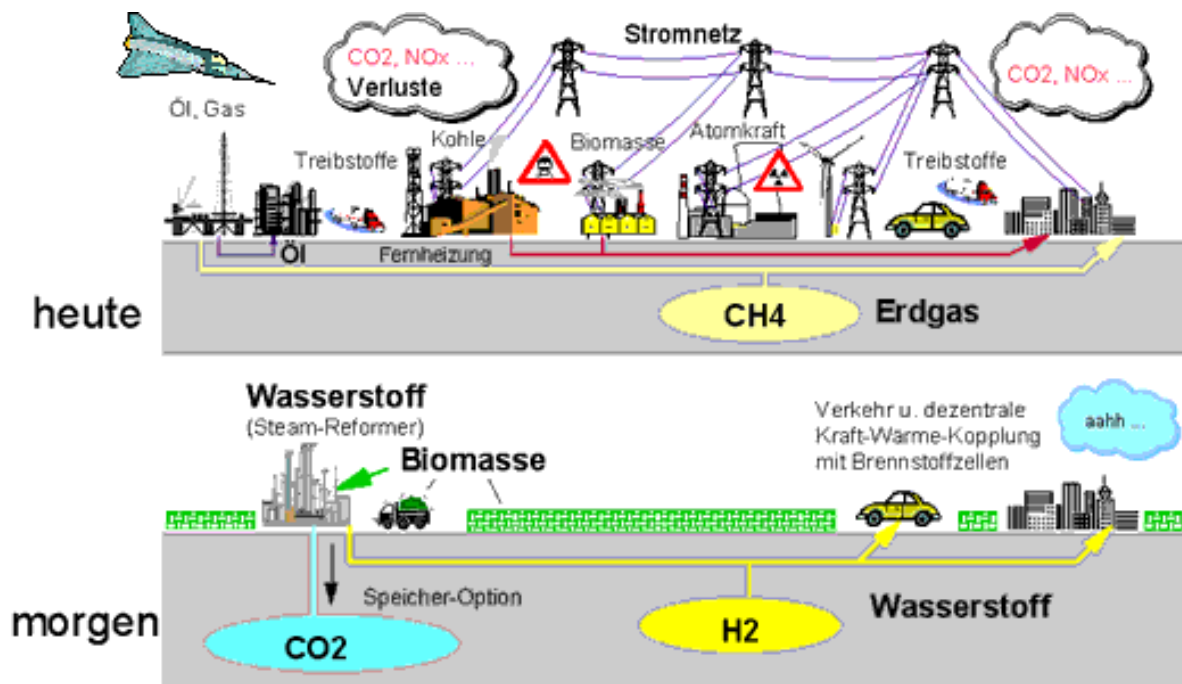
- Europa: 85 Wasserstofftankstellen
- Nordamerika: 80 Wasserstofftankstellen
- Asien: 47 Wasserstofftankstellen
- Südamerika: drei Wasserstofftankstellen

In Planung befinden sich weitere 122 Wasserstofftankstellen. Im Jahr 2011 wurden in Europa neun neue Wasserstofftankstellen eröffnet. Anfang 2012 wurde die erste Wasserstofftankstelle in Finnland eröffnet und eine zusätzliche ist geplant (Forum Elektromobilität e.V. 2012).

Die Änderungen der Infrastruktur bei der Einführung der „echten“ Wasserstoffwirtschaft (siehe Kapitel 5.1.) von Dipl.-Ing. Karl-Hein Tetzlaff wären anders, als die eben beschriebenen. Die wesentliche Infrastruktur der „echten“ Wasserstoffwirtschaftsinfrastruktur gründet sich auf das bereits vorhandene Erdgasnetz. Es müsste lediglich eine Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff erfolgen. Die als Rohstoff verwendete Biomasse würde, zu Wasserstofffabriken in einem Einzugsradius zwischen fünf und 20 Kilometer transportiert werden, wo sie zu Wasserstoff umgewandelt wird. Es besteht die Möglichkeit die Biomasse sowohl trocken, als auch feucht zu speichern und zu verarbeiten. Unterirdische Kavernen und das Leitungsnetz dienen als Speicherort für den produzierten Wasserstoff. Das bei der Wasserstoffproduktion entstehende reine Kohlendioxid kann tiefschichtig unter der Erde eingelagert werden, wodurch neue Kohlenstofflager für eine zukünftige Nutzung entstehen (Tetzlaff 2012).

Die Gefahr der Werkstoffversprödung ist bei den verwendeten Gaspipelines nicht gegeben, da diese aus ferritischem Stahl gefertigt wurden. Das Verspröden von ferritischem Stahl kann durch eine gering gehaltene Spannung im eingesetzten Material und eine schützende Oberflächenbeschichtung verhindert werden (h2works 2012). Abbildung 27 zeigt einen grafischen Vergleich der Infrastruktur von heute und der Infrastruktur von morgen bei der Einführung der „echten“ Wasserstoffwirtschaft.

Abbildung 27: Infrastrukturvergleich

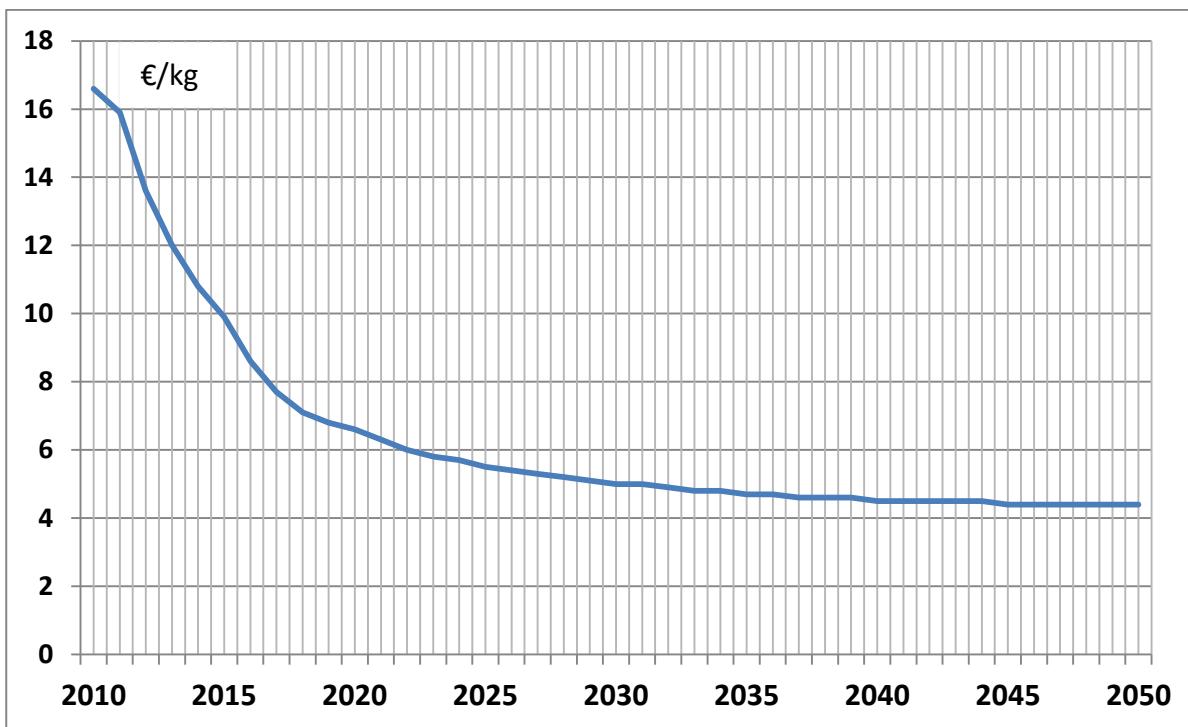


Quelle: (Tetzlaff 2012)

5.3. Anfallende Kosten

Laut einer Studie aus dem Jahr 2010 werden sich die Kosten für Wasserstoff an der Tankstelle bis zum Jahr 2025 um 70 Prozent reduzieren. Anfangs wird der Preis für Wasserstoff verhältnismäßig hoch sein, da es sich um einen noch zu entwickelnden Markt handelt. Sobald die Nutzung von Wasserstoff steigt und die Tankstellen an Größe zunehmen, wird der Preis für Wasserstoff sinken. Bei der Produktion mittels erneuerbarer Energiequellen belief sich der Preis pro Kilogramm Wasserstoff im Jahr 2010 auf 16,60 Euro. Bis zum Jahr 2012 konnte dieser Preis auf 13,6 Euro reduziert werden. Die Studie prognostiziert bis zum Jahr 2050 eine stark preissenkende Entwicklung, welche in Abbildung 28 genauer dargestellt wird (EU-Study 2010, S. 38f.).

Abbildung 28: Prognostizierte Preisentwicklung von Wasserstoff 2010 - 2050



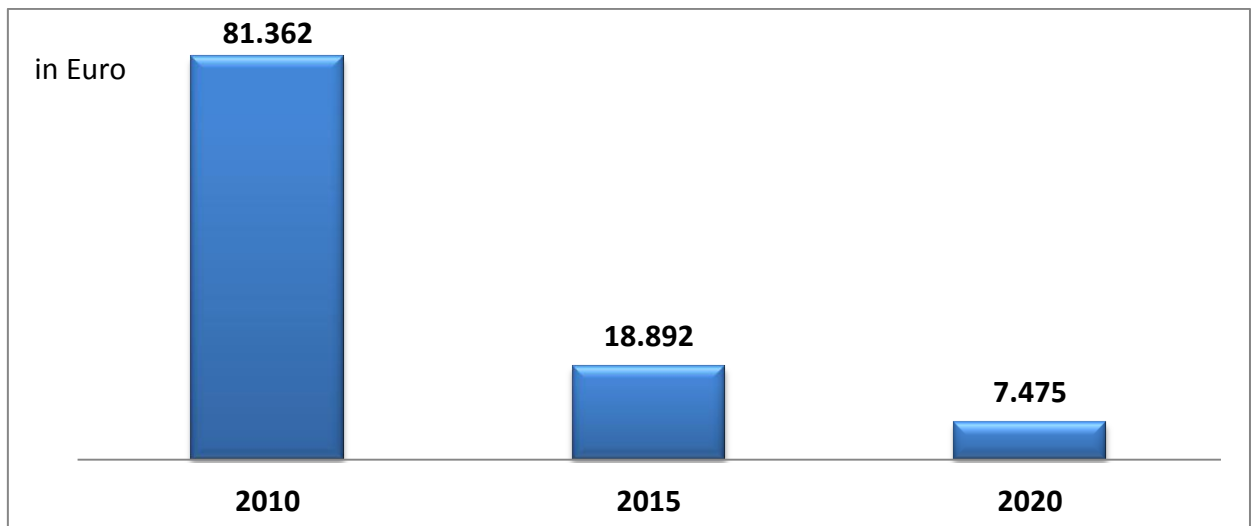
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (EU-Study 2010, S. 38)

Der prognostizierte Preis für ein Kilogramm Wasserstoff im Jahr 2015 würde 8,60 Euro betragen, welcher bis zum Jahr 2020 auf 6,60 Euro sinken soll. Von den Jahren 2010 bis 2025 würde es eine Preissenkung um genau 67 Prozent von 16,60 auf 5,50 Euro pro Kilogramm geben. Die weiteren vorhergesagten Preise für ein Kilogramm Wasserstoff sind für die Jahre 2030 5,00 Euro, 2035 4,70 Euro, 2040 4,50 Euro, 2045 und 2050 4,40 Euro (EU-Study 2010, S. 38f.). Die Menge von 2,75 Kilogramm Benzin entspricht einem Kilogramm Wasserstoff (Rühle 2005, S. 67). Der Energiegehalt von einem Kilogramm Wasserstoff lässt sich auf 3,7 Liter Benzin umrechnen (Budde 2011). Bei einem Benzinpreis von 1,50 Euro pro Liter ergibt das einen Preis von 5,55 Euro für 3,7 Liter Benzin. Am 20. Juli 2012 schwankten in Österreich der Benzinpreis pro Liter im Bereich von 1,40 bis 1,50 und der Dieselpreis pro Liter im Bereich von 1,30 bis 1,40. Am 26. Juni 2012 wurden Höchstpreis für einen Liter Benzin von 1,629 Euro und einen Liter Diesel von 1,569 Euro gemessen (ÖAMTC 2012).

Aufgrund der Vorteile der Möglichkeit der Massenproduktion und der reduzierten Verwendung von teuren Platinanteilen wird bis zum Jahr 2020 eine enorme Kostensenkung bei Brennstoffzellensystemen erwartet. Sobald alle kritischen technologischen Hindernisse

überwunden werden, kann sich die Kostenreduktion auf die Effizienz des Produktes konzentrieren. Hierzu zählen die Designverbesserung, die Verwendung kostengünstiger Materialien und die Produktionstechnikverbesserung (EU-Study 2010, S. 34). Die Veränderungen der Kosten im Bereich der Brennstoffzellentechnologie werden in den Abbildungen 29, 30 und 31 gezeigt.

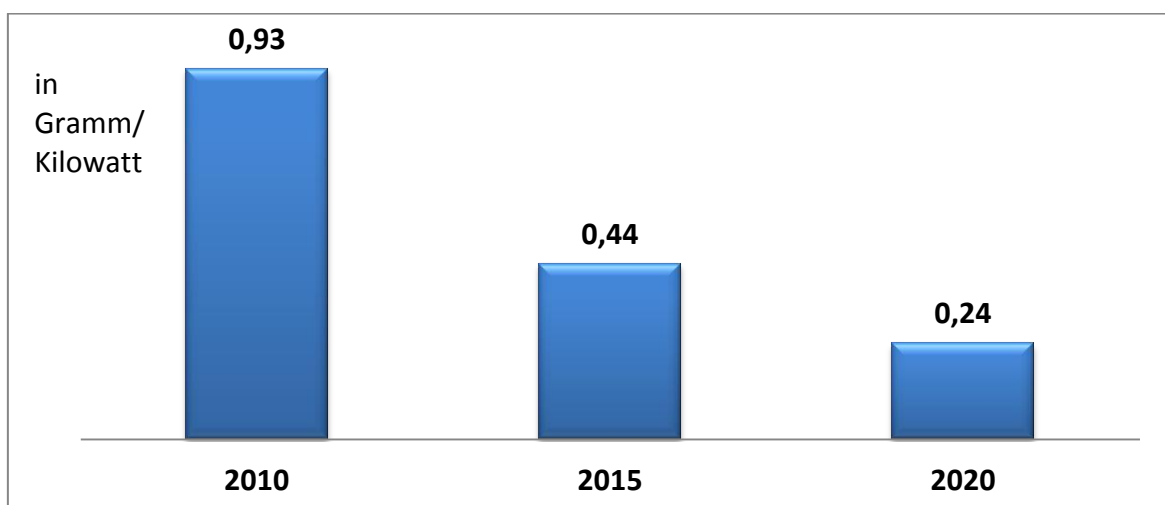
Abbildung 29: Prognostizierte preisliche Änderungen bei Brennstoffzellensystemen



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (EU-Study 2010, S. 34)

Im Jahr 2010 belief sich der Preis für ein Brennstoffzellensystem in etwa auf 81.362 Euro, welcher sich bis 2015 auf ungefähr 18.892 Euro und bis 2020 auf 7.475 Euro senken soll (EU-Study 2010, S. 34).

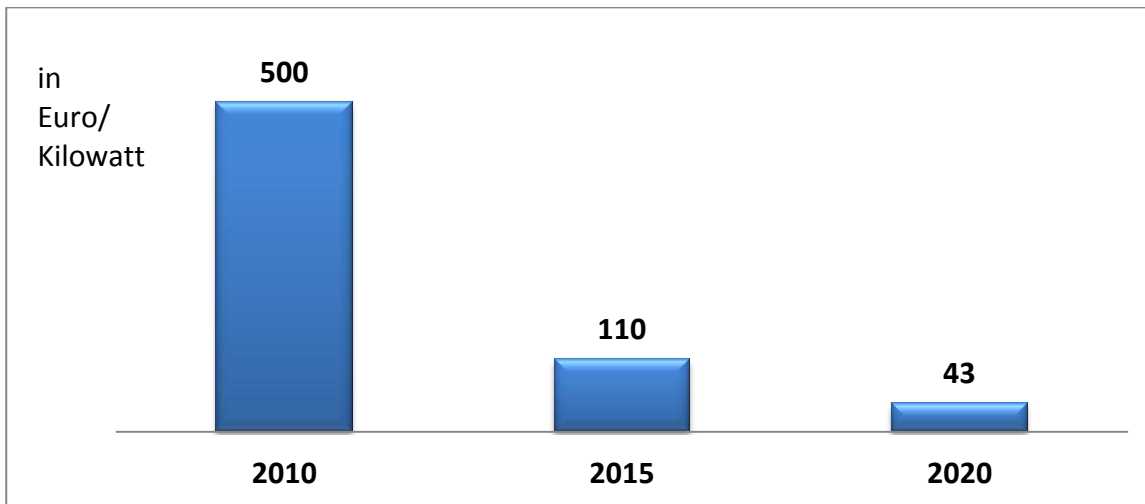
Abbildung 30: Prognostizierte Änderungen beim Platinanteil



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (EU-Study 2010, S. 34)

Der Anteil des verwendeten Platins betrug 2010 0,93 Gramm pro Kilowatt und soll 2015 auf 0,44 Gramm und 2020 sogar auf 0,24 Gramm pro Kilowatt gesenkt werden können, was zu einer enormen Kosteneinsparung führen würde (EU-Study 2010, S. 34).

Abbildung 31: Prognostizierte durchschnittliche Kostenänderung für einen Stack



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (EU-Study 2010, S. 34)

Die durchschnittlichen Kosten für einen Stack (siehe Kapitel 4.3.) ändern sich laut der Prognose von 500 Euro pro Kilowatt im Jahr 2010 auf 110 Euro pro Kilowatt fünf Jahre später und auf nur noch 43 Euro pro Kilowatt im Jahr 2020 (EU-Study 2010, S. 34). Unter einem Stack werden mehrere in Reihe geschaltete Brennstoffzellen verstanden (Geitmann 2004, S. 138f.).

5.4. Andere alternative Kraftstoffe zum Vergleich

Der Trend Brennstoffe mit wenigen oder so gut wie gar keinen Anteilen von Kohlenstoff zu bevorzugen, führt zu einem Wandel im Brennstoffsektor. Da die Verbrennung von Kohlenstoff zu einer Schadstofffreisetzung führt, werden immer häufiger Alternativen bevorzugt. Diese sind unter anderem Wasserstoff, Biodiesel, Pflanzenöl, Flüssiggas, synthetische Biokraftstoffe, Erdgas, Biogas, Methanol und Strom. Aus umweltschützenden Aspekten ist der Anteil des Kohlenstoffs in den verwendeten Energieträgern von großer Bedeutung. Zusätzliche Unterscheidungsmerkmale der jeweiligen Kraftstoffe bieten das unterschiedliche thermische Verhalten und die verschiedenen Aggregatzustände. Je größer der Kohlenstoffanteil ist, desto höher ist auch der Kraftstoffsiedepunkt. Da Diesel und Benzin einen sehr hohen

Siedepunkt haben können sie in flüssiger Form gespeichert werden. Alle anderen genannten Kraftstoffe sind bei normaler Temperatur jedoch gasförmig und müssen in Druckbehältern aufbewahrt werden (siehe Kapitel 3.3.1.). Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den alternativen Kraftstoffen Biodiesel, Pflanzenöl, Flüssiggas, Methanol und Erdgas. Wasserstoff als alternativer Kraftstoff wurde in Kapitel 4 bereits ausführlich behandelt (Geitmann 2005, S. 52ff.).

5.4.1. Biodiesel

Für Biodiesel werden Pflanzenöle oder tierische Fette als Rohstoffe verwendet. Das Patent zum Biodieselherstellungsverfahren wurde 1937 vom Belgier Chavanne angemeldet. Chemisch betrachtet besteht Biodiesel aus Fettsäure-Methylester (FAME). In Mitteleuropa wird am häufigsten Raps zur Biodieselproduktion verwendet. Aus der Rapssaat wird mit Hilfe von Ölmühlen der Rohstoff Rapsöl gewonnen. Das dabei entstehende Nebenprodukt Rapsschrot findet seine Verwendung in der Futtermittelindustrie. Aus dem Rapsöl wird in einer Umesterungsanlage Rapsöl-Methylester (RME). Bei diesem Prozess kommen Methanol, Rapsöl und ein Katalysator, wie zum Beispiel Natronlauge, bei Temperaturen zwischen 50 und 60 Grad Celsius in ein sogenanntes Reaktionsgefäß. In diesem Gefäß entstehen Glycerin und der Biodiesel Rapsöl-Methylester (Quaschnig 2010, S. 277f.).

Reiner Biodiesel sollte nur für Motoren verwendet werden, welche dafür vom Hersteller eine Freigabe bekommen haben. Ansonsten besteht die Gefahr der Zersetzung von Dichtungen und Schläuchen, welche zu einem Motorschaden führen kann. Die Beimengung von kleinen Mengen Biodiesel zu herkömmlichen Diesel ist jedoch auch ohne Herstellerfreigabe problemlos möglich (Quaschnig 2010, S. 277f.). Der Flammpunkt von Biodiesel liegt zwischen 100 und 135 Grad Celsius. Der Schmelzpunkt bewegt sich in den Bereichen von -12 bis -22 Grad Celsius, abhängig von der Anzahl der enthaltenen Doppelbindungen (Geitmann 2005, S. 60f.). Bei einer Treibstoffpreisanalyse von der österreichischen Bundeskammer für Arbeiter und Angestellte, im Zeitraum vom 12. bis 13 Juni 2012, war Biodiesel um 5,7 Prozent günstiger als herkömmlicher Diesel. Der Maximalwert von Biodiesel in diesem Zeitraum belief sich auf 1,339 Euro und der Minimalwert auf 1,229 Euro (Arbeiterkammer 2012). Tabelle 11 gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile von Biodiesel.

Tabelle 11: Vor- und Nachteile von Biodiesel

Vorteile	Nachteile
• so gut wie schwefelfrei • hat einen höheren Energiegehalt als Benzin • weder Aromate, noch Benzol enthalten • gute Schmierfähigkeit • hoher Sauerstoffgehalt (11 Prozent) reduziert Rußemissionen • Kohlenstoffdioxidabgabemenge bei Verbrennung fast gleich wie Kohlenstoffdioxidaufnahmemenge beim Wachstum der Pflanze • biologisch abbaubar → keine Gefährdung des Bodens bei Unfall • ungiftig → kein Gefahrgut	• Wirkeigenschaften von Lösungsmittel → Motorölverdünnung, Lackbeschädigung • zieht Wasser an • bei zu hohem Wassergehalt und geringen Temperaturen → Zersetzung des Kraftstofffilters • mögliche Bildung von Ablagerungen, wie zum Beispiel Glycerin → Beschädigung der Einspritzpumpe • eventuelle Filterverstopfung durch beinhaltenes Alkali • Methanol wird zur Umesterung benötigt → Erzeugung aus fossilen Primärenergieträgern • Ausweitung der Anbauflächen → Bedrohung für Tierarten • intensive Stickstoffdüngernutzung → Gewässerüberdüngung → Bodenflächenversauerung • Freisetzung von Lachgas, ein starkes Treibhausgas → Umweltbelastung

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Geitmann 2005, S. 59f.) (Rettberg 2007, S. 113)

5.4.2. Pflanzenöl

Pflanzenöl, als Dieselerersatz, kann aus mehreren verschiedenen Ölpflanzen hergestellt werden. Diese Pflanzen unterscheiden sich in ihren verschiedenen hohen Anteilen an Fettsäuren, wie zum Beispiel Stearin-, Öl-, Linolen- und Linolsäure. Zur Pflanzenölproduktion werden am häufigsten Sonnenblumen und Raps verwendet. Beim Herstellungsprozess werden die Pflan-

zensamen zermahlen und danach kalt gepresst. Durch eine anschließende Sedimentation oder Filtration werden Schwebstoffe entfernt. Durchschnittlich bleibt ein Restölanteil von in etwa 13 Prozent im verwendeten Schrot. Diese Reste, auch Presskuchen genannt, werden als Tierfutter verwendet oder auch energetisch genutzt. Im Gegensatz zu dem vorhin beschriebenen Biodiesel wird reines Pflanzenöl nicht chemisch aufbereitet. Aufgrund eines natürlichen Umwandlungsprozesses, bei dem Sauerstoff mit den jeweiligen Bestandteilen des Pflanzenöls reagiert, kann Pflanzenöl nur begrenzt gelagert werden. Sechs Monate beträgt die empfohlene Lagerdauer, welche allerhöchstens auf ein Jahr ausgeweitet werden kann. Um ein Dieselfahrzeug mit Pflanzenöl antreiben zu können, bedarf es einiger Umrüstungen, welche je nach Modell Kosten in der Höhe von etwa 2.500 bis 3.500 Euro verursachen (Geitmann 2008, S. 73ff.). Das verwendete Öl ist reines Pflanzenöl, welches auch in jedem Supermarkt erhältlich ist. Am 13. Juli 2012 belief sich der Durchschnittspreis von einem Liter Pflanzenöl auf 1,355 Euro (Niegsch 2012).

Durch den Antrieb mit Pflanzenöl werden die Motorengeräusche leiser und die Motorenlebensdauer verlängert. Bei kälteren Temperaturen kann das Vorwärmen des Motors vor dem Start notwendig werden und zusätzlich müssen Kraftstofffilter häufiger gewechselt werden. Die Umweltbelastungen beschränken sich, aufgrund der fehlenden chemischen Behandlung, auf die Freisetzung jener Emissionen, welche während der Anbauphase, bei der Düngung, bei dem Erntevorgang und beim Herstellungsprozess entstehen (Geitmann 2008, S. 76ff.).

5.4.3. Erdgas

Erdgas ist ein unsichtbares, geruchloses und ungiftiges Gas, welches leichter als Luft ist (Fachverband Gas Wärme o.J.). Es besteht aus Methan, welches bei Umgebungstemperatur gasförmig ist und unter Druck in Gasbehältern gespeichert werden kann. International wird es als „Compressed Natural Gas (CNG)“, verdichtetes Erdgas bezeichnet. Um es als Flüssigkraftstoff, international auch „Liquefied Natural Gas (LNG)“ genannt, verwenden zu können, muss das Erdgas beim Verflüssigungsprozess auf eine Temperatur von -16 Grad Celsius tiefgekühlt werden (Geitmann 2005, S. 80ff.).

Erdgasautos werden sowohl mit einem monovalenten Antrieb, welcher ausschließlich mit Erdgas läuft, als auch mit einem bivalenten Antrieb, welcher mit Erdgas, aber auch mit Benzin läuft, hergestellt. Beim Nachrüsten eines Fahrzeuges wird der benötigte Tank meistens

im Kofferraum untergebracht. Dies führt oft zu einem Platzmangel, da das Reserverad auch mitgeführt werden muss. Bei neuen Erdgasautos werden die Tankbehälter meistens in Unterflur-Bauweise eingebaut. Somit sind die Tanks unter dem Fahrzeugboden und im Kofferraum ist genügend Stauraum vorhanden. Je nach Leistung und Fahrzeug haben Erdgasautos eine Reichweite von 300 bis 600 Kilometer. Benzin entzündet sich bei einer Temperatur von 360 Grad Celsius, Erdgas hingegen erst bei 600 Grad Celsius und hat somit eine geringere Explosionsgefahr. Der Tankvorgang dauert eben so lange wie die Betankung mit Benzin. Aus Sicherheitsgründen verfügen die Tanks über Ventile, welche das kontrollierte Ablassen des Gases ermöglichen (Fachverband Gas Wärme o.J.).

Eine Umrüstung auf Erdgas ist für jedes benzinbetriebene Fahrzeug möglich. Die Kosten hierfür belaufen sich in etwa zwischen 3.900 und 4.700 Euro (Goerke 2009, S. 147). Der Preis für ein Kilogramm Erdgas pendelt sich derzeit zwischen 1,10 und 1,20 Euro ein (ÖAMTC 2012). Die zusammengefassten Vor- und Nachteile sind in Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12: Vor- und Nachteile von Erdgas

Vorteile	Nachteile
• gleichmäßige Gemischverteilung • günstiger Kraftstoffpreis • serienmäßige Herstellung im Gange • Möglichkeit der Umrüstungsförderung • Betankung mit Biogas auch möglich • verminderter Emissionsausstoß • kaum Rußbildung • höhere Laufruhe	• Leistungseinbußen • große und schwere Tanks bei Nachrüstung • Tankstellennetz derzeit unzureichend ausgebaut • hohe Umrüstungskosten → hohe Amortisationsdauer

Quellen: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Kulis o.J.) (Geitmann 2005, S. 80ff.) (Fachverband Gas Wärme o.J.)

5.4.4. Flüssiggas

Flüssiggas, auch bekannt als „Autogas“ oder „Treibgas“ wird international als „Liquefied Petroleum Gas (LPG)“ bezeichnet. In seinem Normalzustand ist es ein gasförmiges Brenngas, welches unter Druck verflüssigt werden kann. Seine Zusammensetzung beinhaltet leicht zu

verflüssigende Kohlenwasserstoffverbindungen mit drei oder vier Kohlenstoffatomen. Die Hauptbestandteile von Flüssiggas sind Propan, Propen, Butan und Buten. In Europa ist, je nach Jahreszeit und Ort, das Mischungsverhältnis von Butan und Propan bei der Flüssiggasproduktion sehr unterschiedlich. Die Zusammensetzung variiert mit der jeweiligen Umgebungstemperatur. In wärmeren Landesteilen ist die vermehrte Verwendung von Butan möglich, da aufgrund der höheren Temperaturen keine Kondensationsgefahr besteht. Da Butan günstiger als Propan ist und einen höheren Heizwert hat, wird versucht so viel Butan wie möglich zu verwenden. Ein hoher Reinheitsgrad ermöglicht eine zeitlich unbefristete Lagerung des Gases (Geitmann 2005, S. 70ff.).

Flüssiggas ist im Gegensatz zu Wasserstoff und Erdgas nicht leichter als Luft und führt zu einem Absinken des Gases auf den Boden. Aus diesem Grund müssen geeignete Lüftungstechnische und bauliche Maßnahmen zur Verwendung von Flüssiggas vorgenommen werden. Das reine Gas hat keinen eigenen Geruch und ist farblos, da es jedoch als industrielles Abfallprodukt auftritt, ist es dadurch geruchbelastet. Zu Nutzung im Bereich der Kraftfahrzeuge wird es mit einer Substanz versetzt, welche einen ganz bestimmten Geruch erzeugen. Butan und Propan sind ungiftig, können aber in zu hohen Dosen eine narkotisierende Wirkung haben. Normalerweise wird Flüssiggas in flüssiger Form in geeigneten Tanks gespeichert. Auf dem Weg zum Motor wird es jedoch in einem Verdampfer in den gasförmigen Aggregatzustand versetzt und anschließend eingeblasen. Kraftstoffe wie Benzin und Diesel werden hingegen der Brennkammer über Düsen oder über einen Vergaser als kleine Tröpfchen eingefüllt. Gasförmiger Kraftstoff benötigt mehr Platz als flüssiger Kraftstoff, da er eine größere Dichte hat. Die Masse von einem Liter Benzin entspricht 0,73 Kilogramm, bei einem Liter Flüssiggas jedoch nur 0,54 Kilogramm (Geitmann 2005, S. 70ff.).

Angewendet wird Flüssiggas in umgerüsteten Ottomotoren. Mit Flüssiggas betriebene Fahrzeuge haben ähnlich gute Emissionswerte wie erdgasbetriebene Fahrzeuge. Der Verbrauch im Vergleich zu Fahrzeugen, welche mit Diesel, Benzin oder Erdgas betrieben werden ist jedoch ziemlich hoch. Kompensiert wird dies durch den niedrigen Preis von Flüssiggas. Da derzeit nur eine geringe Zahl an flüssiggasbetriebenen Serienfahrzeugen gefertigt wird, besteht lediglich die Möglichkeit einer Fahrzeugumrüstung um dieses System nutzen zu können. Je nach Modell, belaufen sich die Kosten für die Umrüstung auf bis zu 2.400 Euro (Goerke 2009,

S. 148). Der Preis für einen Liter Autogas liegt derzeit zwischen 77 und 80 Eurocent (ÖAMTC 2012). Tabelle 13 gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile von Flüssiggas.

Tabelle 13: Vor- und Nachteile von Flüssiggas

Vorteile	Nachteile
• geringere Treibstoffkosten • problemlose Umrüstung von Fahrzeugen mit Ottomotor • geringerer Schadstoffausstoß • hohe Oktanzahl → hohe Klopfestigkeit • geringe Amortisationszeit • längere Motorlebensdauer • bei bivalentem Betrieb hohe Reichweiten möglich • wachsende Versorgungsdichte	• höherer Verbrauch • leichte Leistungseinbußen • kaum Neufahrzeuge mit eingebauter Autogasanlage • Platzprobleme im Kofferraum wegen großem Tank und Reserverad

Quellen: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Kulis o.J.)(Geitmann 2005, S. 78)

5.4.5. Methanol

Der Alkohol Methanol, früher auch Holzgeist oder Methylalkohol genannt, ist nicht zum Verzehr geeignet, da er giftig ist und zur Erblindung führen kann. Die Verwendung in Verbrennungsmotoren ist jedoch durchaus möglich. Alle Kohlenstoffquellen können zur Herstellung von Methanol herangezogen werden. Am häufigsten wird Methanol aus Erdgas oder durch Kohlevergasung produziert und ist somit nicht vom Primärenergieträger Erdöl abhängig. Das in großen Mengen vorhandene Erdgas kann aus Deponiegas, Biomasse oder aus chemischen Prozessgasen hergestellt werden. Das größte Problem, welches die Verwendung von Methanol mit sich bringen würde, ist die gute Wasserlöslichkeit des Alkohols. Wird Methanol, beispielsweise durch eine unvorsichtige Handhabung, vergossen, sickert in den Boden und vermischt sich mit dem Grundwasser, wird dieses verseucht und kann nur mit enorm hohem Aufwand wieder gereinigt werden. Der Grund wieso Methanol trotzdem immer wieder als alternativer Kraftstoff gehandelt wird, ist die kohlendioxidneutrale Produktionsmöglichkeit,

da es aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden kann. Es ergibt sich ein geschlossener Kreislauf, bei dem dieselbe Menge Kohlendioxid der Atmosphäre bei der Anpflanzung und Verarbeitung entzogen wird, wie ihr bei der Verbrennung wieder zugeführt wird. Im Vergleich zur Benzinverwendung würde die Methanolverwendung den Ausstoß von Kohlendioxid um 30 Prozent senken (Geitmann 2005, S. 96ff.).

Die Verwendung von Methanol kann entweder direkt in Verbrennungsmotoren erfolgen oder er wird indirekt als Wasserstofflieferant verwendet, damit eine Wasserstoffproduktion mit Hilfe eines Reformers direkt an Bord des Fahrzeuges stattfinden kann. Um Methanol in Verbrennungskraftmaschinen verwenden zu können, muss neben Methanol auch Wasser für den Verdampfungsvorgang mitgeführt werden (Geitmann 2005, S. 97). Der Alkohol würde bei diesem Vorgang mit Wasser vermischt, verdampft und bei Temperaturen von 250 bis 300 Grad Celsius in Wasserstoff und Kohlendioxid zerlegt werden. Dieser Vorgang wird durch einen Katalysator aus Zinkoxid und Kupfer beschleunigt. Der Preis von Methanol ist etwas niedriger als Benzin, jedoch ist der geringere Energiegehalt zu berücksichtigen, welcher zu einem Mehrverbrauch führt (Rühle 2005, S. 71f.). Die Speicherung von Methanol erfolgt in herkömmlichen Tanks und der Tankvorgang unterscheidet sich nicht von dem Tankvorgang mit Benzin. Die vorhandene Infrastruktur müsste nur geringfügig geändert werden, da konventionelle Lager-, Tank- und Transporttechniken verwendet werden können (Geitmann 2005, S. 97f.).

5.5. Ausblick

Für die Ökonomie wird der Übergang in eine Wirtschaft mit Wasserstoff viele Veränderungen mit sich bringen. Neue Partnerschaften zwischen Lieferanten, Behörden, Fahrzeugproduzenten, Umweltgruppen und Verbrauchern müssen geschlossen werden. Wichtige Entscheidungen, wie beispielsweise die Einigung auf die verwendeten Produktionsarten, die herangezogenen Transportwege und die Speicherungsform von Wasserstoff müssen getroffen werden. In den kommenden Jahrzehnten werden sowohl technische, sicherheitsrelevante, ökologische, als auch infrastrukturelle Herausforderungen zu bewältigen sein. Während dieser Zeit besteht die Möglichkeit über die vielen Alternativen alles Wissenswerte zu lernen und danach zwischen verwirklichtbaren Ansätzen und Illusionen unterscheiden zu können. Um den Übergang in eine Wasserstoffwirtschaft zu erleichtern und voranzutreiben haben

sich um das Themengebiet Wasserstoff etliche Projekte entwickelt. Als Beispiel für ein solches Projekt kann das Island-Experiment genannt werden (Romm 2006, S. 133).

Island ist eine im Nordatlantik liegende Insel mit einer Größe von 100.000 Quadratkilometern, welche nahe am Polarkreis liegt, aber vom Golfstrom gewärmt wird. Die Anzahl der heißen Quellen, aktiven Vulkane und Geysire ist in dieser Größenordnung einzigartig. Island ist für einen kurzfristigen Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft sehr gut geeignet, da ein enormer Überschuss an erneuerbaren Energiequellen, welche zur Wasserstoffherstellung verwendet werden können, vorherrscht. Es wurde ein Sechs-Stufen-Plan von dem Programm „Icelandic New Energy“ ausgearbeitet, welcher den Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft ebnen soll. Diese sechs Stufen lauten: (Romm 2006, S. 137)

- **Phase Eins:**
 - Eröffnung der ersten Wasserstofftankstelle im April 2003
 - Einsatz von drei Brennstoffzellenbussen
 - Ausführliche Analyse von Kosten, Nutzen und ungelösten Probleme
- **Phase Zwei:** Schrittweiser Austausch der bisherigen verwendeten Busse durch brennstoffzellenbetriebene Busse
- **Phase Drei:** Einführung des brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeuges für private Haushalte
- **Phase Vier:** Testbetrieb mit Booten mit Brennstoffzellentechnik
- **Phase Fünf:** Schrittweiser Austausch der Fischereischiffe durch Brennstoffzellenschiffe
- **Phase Sechs:** Wasserstoffexport nach Kontinentaleuropa

Die genauen Zeitpunkte der einzelnen Phasen sind abhängig vom Fortschritt der jeweiligen Vorphase. Im Jahr 2007 startete die zweite Phase, welche noch nicht abgeschlossen ist. Der Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft in Island wird zwischen 2030 und 2040 prognostiziert (Romm 2006, S. 137).

Diese und zahlreiche weitere Bemühungen alternative Kraftstoffe realistisch umzusetzen, zeigen den voranschreitenden Wandel in diesem Bereich. Zum jetzigen Zeitpunkt ist noch nicht absehbar, welche Alternativen sich durchsetzen werden und welche wieder verworfen werden müssen. Wasserstoff als Energieträger weist großes Potential auf, jedoch werden für

den Einsatz im großen Stil noch mindestens zehn bis 20 Jahre vergehen müssen, um die Entwicklungen in diesem Bereich zufriedenstellend vorantreiben zu können. Neben der Erschließung eines komplett neuen Marktes, wird vor allem eine auf regenerativen Energien aufgebaute, gut funktionierende Wasserstoffwirtschaft mit einer angepassten Infrastruktur notwendig sein (Quaschning 2010, S. 303f.).

6. Conclusio

Die Technologie um den Energieträger Wasserstoff erlebte in den letzten beiden Jahrzehnten einen regelrechten Boom, welcher von dem Wunsch nach einer nachhaltigen alternativen Energiewirtschaft ausgelöst wurde. Wasserstoff ist auf der Erde das am häufigsten vorkommende Element und verfügt im Vergleich mit anderen Energieträgern über mehrere positive Eigenschaften, wie zum Beispiel das geringe Gewicht, die Fähigkeiten schnell zu verbrennen und verdampfen und hat außerdem eine hohe Energiedichte. Wasserstoff ist in Verbindung mit Sauerstoff als Wasser in fast unerschöpflichem Maße auf der Erde vorhanden (Geitmann 2004, S. 263f.).

Die Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse, welche durch erneuerbare Energiequellen angetrieben wird, bietet eine emissionsfreie Alternative für die Energiewirtschaft. Derzeit steht jedoch nicht genügend aus regenerativen Quellen erzeugter Strom zur Verfügung, um Wasserstoff ökonomisch sinnvoll herstellen zu können. Aus diesem Grund müssen die Techniken weiterhin optimiert und die Kosten nachdrücklich gesenkt werden. Aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades wird die Brennstoffzellentechnik bei der Umstrukturierung des Energiesektors eine bedeutende Rolle im Bezug auf die, wegen dem steigenden Energiebedarf, wichtige Effizienzsteigerung einnehmen (Geitmann 2004, S. 264).

Erfahrungswerte von verwendeten Techniken zur Speicherung, zum Transport und zur Betankung von Erd- und Flüssiggas bieten die Möglichkeit eines leichteren Überganges von der Mineralöl- zu einer Wasserstoffwirtschaft. Mittlerweile sind die entwickelten Verfahren fortschrittlich genug, um einen sicheren Transport in einem passenden Speicherungsmedium garantieren zu können. Zur Weiterentwicklung dieser Techniken gibt es laufend neue Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesen Bereichen. Um eine Konkurrenzfähigkeit am Markt zu erreichen müssen die Kosten in der Wasserstofftechnologie gesenkt und die Leistungsfähigkeit erhöht werden. Eine aufkommende Marktreife der angebotenen Techniken, die Möglichkeit der Serienproduktion und das Angebot einer ausreichenden Infrastruktur sind Schlüsselemente des zukünftigen Erfolges. Aus diesem Grund wird in der Anfangsbeziehungsweise Übergangsphase der Zugriff auf vorhandene Energieträger wie Erd- und Biogas unumgänglich sein. Dies wird die Kostenreduktion ermöglichen, um somit die Etablierung der Wasserstofftechnologie voranzutreiben. Auf langfristige Sicht müssen der Wechsel

von fossilen auf erneuerbare Energiequellen und die Steigerung der Effizienz als zu erreichendes Ziel angesehen werden (Geitmann 2004, S. 265ff.).

Diese Ausarbeitung widmete sich den Anwendungsgebieten und dem ökonomischen Potential von Wasserstoff. Einführend gaben Hintergrundinformationen einen Einblick in den Energiesektor und seinen aktuellen Stand. Anschließend wurden die verschiedenen Produktions-, Speicherungs- und Transportmöglichkeiten des Energieträgers Wasserstoff vorgestellt. Sicherheitshinweise über den Umgang mit Wasserstoff und der aktuelle Stand der Forschungs- und Entwicklungsarbeit runden die Vorstellung des behandelten Energieträgers ab. Potentielle Anwendungsgebiete, angefangen von Wasserstoffheizungen, über Wasserstoffmotoren, bis hin zur Brennstoffzellentechnologie geben einen Überblick über die Vielfalt der Verwendungsmöglichkeiten. Durch die Veranschaulichung einer möglichen Wasserstoffwirtschaft und der dazugehörigen Infrastruktur wurde das ökonomische Potential betrachtet. Abschließend wurden andere alternative Kraftstoffe diskutiert und ein möglicher Ausblick in die Zukunft gegeben.

Literaturverzeichnis

Adunka, F. (1999) *Handbuch der Wärmeverbrauchsmessung*. 3. Auflage., Vulkan-Verlag: Essen.

Agenda 21 (2005) *Lexikon Peta Joule*.
<http://www.agenda21-treffpunkt.de/lexikon/PetaJoule.htm> [Zugriff am 20.05.2012].

Anker, S. (2009) *BMW glaubt nicht mehr an den Wasserstoffmotor*.
<http://www.welt.de/motor/article5450945/BMW-glaubt-nicht-mehr-an-den-Wasserstoffmotor.html> [Zugriff am 21. 05.2012].

Arbeiterkammer (2012) *Treibstoffpreisanalyse Juni 2012*.
http://www.arbeiterkammer.at/pictures/d154/Treibstoffpreisanalyse_Juni_2012.pdf [Zugriff am 01.07.2012].

Biermayr, P. (2011) *Erneuerbare Energie in Zahlen 2010*.
http://www.lebensministerium.at/umwelt/energie-erneuerbar/ERneuerbare_Zahlen.html [Zugriff am 06.05.2012].

BMW (o.J.) *Hydrogen 7*.
http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/cleanenergy/phase_2/cleanenergy.html [Zugriff am 20.06.2012].

BNSF, Weidelich, F. (2009) *Leise Lok dank Brennstoffzelle*.
<http://railomotive.com/2009/08/leise-lok-dank-brennstoffzellen/> [Zugriff am 28.06.2012].

Bockhorst, M. (o.J.) *Elektrolyse*.
<http://www.energieinfo.de/eglossar/elektrolyse.html> [Zugriff am 18.05.2012].

Böhme, D., Dürrschmidt, W., Van Mark, M. (2011) *Erneuerbare Energien in Zahlen*.
http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_ee_zahlen_bf.pdf [Zugriff am 05.05.2012].

Budde, A. (2011) *Entdeckungsreise in die Nanowelt*.
<http://extraenergy.org/main.php?language=de&category=events&subcateg=145&id=5991> [Zugriff am 10.07.2012].

Bundeszentrale für politische Bildung (2011) *Primärenergie-Versorgung*.
<http://www.bpb.de/wissen/QDNZZC,0,Prim%E4renergieVersorgung.html> [Zugriff am 03.02.2012].

BWF-Energie (2010) *Energiesituation*.
<http://bwf-energie.de/index.php/energie> [Zugriff am 02.03.2012].

Focus (2011) *EADS arbeitet an Wasserstoff-Airbus.*

http://www.focus.de/finanzen/news/unternehmen/luftfahrt/luftfahrt-eads-arbeitet-an-wasserstoff-airbus_aid_598797.html [Zugriff am 01.07.2012].

Forum Elektromobilität e.V. (2012) *2011 entstanden weltweit zwölf neue Wasserstoff-Tankstellen.*

http://www.forum-elektromobilitaet.de/flycms/de/web/136/-XzsjZSLvJy2GAEtNEkAeATLs,3sg/News.html?orderDir=D&offset=0&categories=branchennews_nachrichten [Zugriff am 05.05.2012].

Fraunhofer-Gesellschaft (2010) *Ökostrom als Erdgas speichern.*

<http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2010/04/strom-erdgas-speicher.html> [Zugriff am 15.02.2012].

Geitmann, S. (2008) *Alternative Kraftstoffe: Erdgas & Flüssiggas – Biodiesel & Pflanzenöl – Ethanol & Wasserstoff; womit fahre ich am besten?* 1. Auflage., Hydrogeit Verlag: Oberkrämer.

Geitmann, S. (2005) *Erneuerbare Energien und alternative Kraftstoffe.* 2. Auflage., Hydrogeit Verlag: Kremen.

Geitmann, S. (2009) *Erneuerbare Energien: Mit neuer Energie in die Zukunft.* 1. Auflage., Hydrogeit Verlag: Oberkrämer

Geitmann, S. (2004) *Wasserstoff und Brennstoffzellen.* 1. Auflage., Hydrogeit Verlag: Kremen.

GIACOMINI (2008) *Technik Mitteilung Nr. 0228D.*

Goerke, U. (2009) *Einfach Energie sparen.* 1. Auflage., Rudolf Haufe Verlag: München.

h2works (2012) *Umstellung des Gasnetzes.*

<http://h2works.org/de/inhaltliches/wasserstofftransport/umstellung-des-gasnetzes> [Zugriff am 20.06.2012].

Hartmann, H. (Hrsg.), Kaltschmitt, M. (2001) *Energie aus Biomasse.* 1. Auflage., Springer Verlag: Berlin Heidelberg.

Helmholtz-Zentrum (2012) *Benzinalternative Wasserstoff: Geesthachter Wissenschaftler erforschen Bor im Tank.*

http://www.hzg.de/public_relations/press_releases/031987/index_0031987.html.de.pdf [Zugriff am 07.06.2012].

Hennicke, P., Fishedick, M. (2007) *Erneuerbare Energien.* 1. Auflage., Verlag C.H. Beck: München.

- Heyne, D. (2011) *SUV mit Brennstoffzellenantrieb*.
<http://www.auto-motor-und-sport.de/fahrberichte/hyundai-ix-35-fcev-suv-mit-brennstoffzellenantrieb-4074738.html> [Zugriff am 25.05.2012].
- Hirn, G. (2012) *BINE Informationsdienst: Neue Wege in der Hausenergieversorgung*.
 Projektinfo 05/2012. FIZ Karlsruhe GmbH Leibnitz-Institut für Informationsstruktur.
http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Projektinfos_2012/Projekt_05-2012/ProjektInfo_0512_internetx.pdf [Zugriff am 01.07.2012].
- H-Tech (2011) *Solarer Wasserstoff, Erneuerbare Energien und Brennstoffzellentechnik*.
<http://www.h-tec.com/fileadmin/content/edu/Lehrmaterialien/Praesentation.pdf>
 [Zugriff am 20.04.2012].
- Hufnagel, S. (2010) *Photovoltaik in der Stadt- und Regionalplanung*. Diplomica Verlag: Hamburg.
- Hyundai (2012) *Vorfahrt für die Zukunft. Brennstoffzellenautos von Hyundai*.
<http://www.hyundai.de/news/page/id/82> [Zugriff am 01.07.2012].
- International Energy Agency (2011) *Key World Energy Statistics 2011*.
http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2011/key_world_energy_stats.pdf [Zugriff am 02.03.2012]
- Jordan, T. (2008) *Wasserstofftechnologie. Version 2.3*
http://www.hysafe.org/download/1576/Wasserstofftechnologie_V2p3.pdf [Zugriff am 18.05.2012].
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A. (2005) *Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 4. Auflage., Springer Verlag: Berlin Heidelberg.
- Kern, J. (2008a) *Sicherheitsaspekte bei der Verwendung von Wasserstoff*.
<http://hycar.de/sicherheit.htm> [Zugriff am 20.03.2011].
- Kern, J. (2008b) *Wankelmotor*.
<http://www.hycar.de/gifs/wankel.jpg> [Zugriff am 20.06.2012].
- Koller, S., Raabe, S. (2011) *Autobauer zweifeln an Wundersprit Carbazol*.
<http://www.ftd.de/wissen/technik/kraftstoff-der-zukunft-autobauer-zweifeln-an-wundersprit-carbazol/60075452.html> [Zugriff am 21.01.2012].
- Kulis, T. (o.J.) *Vergleich Autogas oder Erdgas*.
<http://www.autogas-informationen.de/vergleich-autogas-oder-erdgas.htm> [Zugriff am 01.07.2012].
- Kurpjuweit, K. (2009) *Versuch mit Wasserstoffbussen verpufft*.
<http://www.tagesspiegel.de/berlin/bvg-versuch-mit-wasserstoffbussen-verpufft/1467844.html> [Zugriff am 20.05.2012].

- Lebensmittelministerium (2009) *Erneuerbare Energie 2020: Potentiale und Verwendung in Österreich*.
http://www.energiestrategie.at/images/stories/pdf/02_bmlfuw_09_erneuerbare2020.pdf [Zugriff am 20.05.2012].
- Maline, R., von Stackelber, F. (o.J.) *Rohrleitungsverkehr*.
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/rohrleitungsverkehr.html> [Zugriff am 20.06.2012].
- MAN (2006) *Pressemitteilung MAN Nutzfahrzeuge*.
http://www.man.eu/MAN-Downloadgalleries/DE/Presse/2006_DE/02.06.2006_Pressemitteilung_MAN_Nutzfahrzeuge.pdf [Zugriff am 01.06.2012].
- Mazda (2010) *A Legacy of Technological Innovation*.
<http://www.mazda-news.eu/2010/08/06/mazda-%E2%80%93-a-legacy-of-technological-innovation/> [Zugriff am 20.06.2012].
- Mergel, J. (2004) *Zukunftstechnik Brennstoffzelle*.
<http://www.brennstoffzellen.fh-koeln.de/aktivitaeten/Ringvorlesungen/Ringvorlesung-Mergel.pdf> [Zugriff am 01.07.2012].
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg (2012) *Die Brennstoffzelle*.
http://www.themenpark-umwelt.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/26389/?viewMode=popupView&TB_iframe=true&height=643&width=750 [Zugriff am 29. 04.2012].
- Müller, B., Müller, K., Teichmann, D., Artl, W. (2011) Energiespeicherung mittels Methan und energietragenden Stoffen-ein thermodynamischer Vergleich. *Chemie Ingenieur Technik* 83 (11). 2002-2013.
- Niegsch, S. (2012) *Pflanzenöl statt Diesel*.
<http://fmpo.de/> [Zugriff am 13.07.2012].
- ÖAMTC (2012) *Sprit-Applikation*.
<http://www.oeamtc.at/?id=2500,,,11156> [Zugriff am 18.07.2012].
- Obermayr, V. (2012) *Österreich wird Atomstrom-frei*.
<http://oe1.orf.at/artikel/302769> [Zugriff am 05.05.2012].
- OEM-AG (2012) *Biokraftstoff*.
<http://www.oem-ag.at/service/news/4877669260/> [Zugriff am 09.05.2012].
- Paschotta, R. (o.J.) *Kloppfestigkeit*.
<http://www.energie-lexikon.info/kloppfestigkeit.html> [Zugriff am 20.05.2012].

- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2012) *Energiewende kommt voran*.
<http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2012/06/2012-06-04-artikel-energiewende-langfassung.html;jsessionid=17E8CACFA7FB91A309D39BD28DD4D06A.s2t2> [Zugriff am 18.06.2012].
- Quaschnig, V. (2010) *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. 2. Auflage., Carl Hanser Verlag: München.
- Rebhan, E. (2002) *Energiehandbuch – Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*. 1. Auflage., Springer Verlag: Berlin Heidelberg.
- Regionalverkehr (2006) *MAN Wasserstoffbusse für Berlin*.
http://www.regionalverkehr.de/pages/rv_arch006.htm [Zugriff am 20. 05.2012].
- REN21 (2012) *RENEWABLES 2012 GLOBAL STATUS REPORT*.
http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012_low.pdf [Zugriff am 20.06.2012].
- Rettberg, U. (2007) *Alles, was sie über Rohstoffe wissen müssen*. 1. Auflage., FinanzBuch Verlag: München.
- Romm, J. (2006) *Der Wasserstoff-Boom*. 1. Auflage., Wiley-VCH-Verlag: Airlington.
- Rühle, A., Geitmann, S. (Hrsg) (2005) *Wasserstoff & Wirtschaft*. 1. Auflage., Hydrozeit Verlag: Kremen.
- SauberBus (2012a) *Der Saueberbus im Überblick*.
http://www.sauberbus.de/wps/wcm/connect/fcbd4d00474b3ea386aed789fcb2c1a6/111101+SauberBusDownload_final_DE.pdf?MOD=AJPERES [Zugriff am 28.06.2012].
- SauberBus (2012b) *Sauberbus Fotografie*.
<http://www.sauberbus.de/wps/wcm/connect/1408fd8048018b5895eab7cd5f06cdf8/700x378-SauberBus3.jpg?MOD=AJPERES&CACHEID=1408fd8048018b5895eab7cd5f06cdf8> [Zugriff am 02.07.2012].
- Schabbach, T., Wesselak, V. (2009) *Regenerative Energietechnik*. 1.Auflage., Springer Verlag: Nordhausen.
- Schuitmaker, L. (2012) *De Binnenvaart*.
http://www.debinnenvaart.nl/schip_detail/11825/ [Zugriff am 30.06.2012].
- Schünemann, C. (2011) *Energieeinheiten*.
<http://www.regenerative-zukunft.de/grundlagen/energieeinheiten> [Zugriff am 03.02.2012].
- SCS Engineers (2008) *SCS Energy Design and Construction Projects*.
<http://www.scsengineers.com/Energy/projects.html> [Zugriff am 30.06.2012].

- Spiegel Online (2012) *BMW setzt auf Toyota statt auf GM bei der Brennstoffzelle.*
<http://www.spiegel.de/auto/aktuell/bmw-setzt-auf-toyota-statt-auf-gm-bei-der-brennstoffzelle-a-841456.html> [Zugriff am 29.06.2012].
- Spiegel Online (2011a) *Erneuerbare Energien.*
<http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,761443,00.html> [Zugriff am 02.01.2012].
- Spiegel online (2011b) *Fukushima.*
<http://www.spiegel.de/thema/fukushima/> [Zugriff am 04.04 2012].
- Stahl, S., Maier, F. (2011) *Carbazol –Wasserstoffwunder mit vielen Problemen.*
<http://www.motorvision.de/artikel/carbazol-wasserstoff-wunder-mit-vielen-problemen,10076.html> [Zugriff am 20.01.2012].
- Strobl, T., Zunic, F. (2006) *Wasserbau – Aktuelle Grundlagen – Neue Entwicklungen.*
 1. Auflage., Springer Verlag: Berlin Heidelberg.
- Swain, M. (2001) *Fuel Leak Simulation.* Proceedings of U.S. DOE Hydrogen Program Review: Baltimore. 679-689.
- Tetzlaff, K. (2011a) *Bio-Wasserstoff.*
<http://www.bio-wasserstoff.de/h2/Buch/buch.html> [Zugriff am 20.06.2012].
- Tetzlaff, K. (2010) *Etikettenschwindel.*
http://www.bio-wasserstoff.de/h2/pro_u_kontra_H2/Etikettenschwindel/etikettenschwindel.html [Zugriff am 20.06.2012].
- Tetzlaff, K. (2012) *Infrastruktur.*
<http://www.bio-wasserstoff.de/h2/Infrastruktur/infrastruktur.html> [Zugriff am 22.05.2012].
- Tetzlaff, K. (2011b) *Wasserstoff für alle.* 3. Auflage. Books on Demand: Norderstedt.
- Thayer, R. (2012) *ARGE Biokraft – Biokraftstoffproduktion 2011 auf konstantem Niveau.*
<http://www.biokraft-austria.at/DE/www.biokraft-austria.at/Aktuelles/Presseinformation+-+Biokraftstoffproduktion+2011+a.aspx> [Zugriff am 07.05.2012].
- Trendsderzukunft (2012) *Neuartiger Solarreaktor erzeugt sauberen Wasserstoff aus Sonnenlicht, Zinkoxid und Wasser.*
<http://www.trendsderzukunft.de/neuartiger-solar-reaktor-erzeugt-sauberen-wasserstoff-aus-sonnenlicht-und-zinkoxid/2012/04/08/> [Zugriff 02.05.2012].

Umweltbundesamt (2012) *Erneuerbare Energieträger*.

<http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/energie/erneuerbare/> [Zugriff am 20.05.2012].

Vaillant Group (2012) *Brennstoffzellen-Heizgerät*.

<http://www.vaillant.de/stepone2/data/downloads/79/4c/00/Factsheet-Vaillant-Group-BZH.pdf> [Zugriff am 01.07.2012].

Wasserwirtschaft.Steiermark (2012) *Definitionen*.

<http://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/ziel/4652547/DE/> [Zugriff am 15.04.2012].

Wichtermann, J. (2012) *Brennstoffzellen-Heizgerät Daten und Fakten*.

<http://www.vaillant.de/stepone2/data/downloads/79/4c/00/Factsheet-Vaillant-Group-BZH.pdf> [Zugriff am 01.07.2012].

Winter, R. (2011) *Biokraftstoffe im Verkehrssektor 2011*.

http://extranet.fcio.at/uploads/austria_2011_de_132494_DE.pdf [Zugriff am 05.05.2012].

Zeitler, J., Simon, G. (2011) *Physik für Techniker*. 6. Auflage. Carl Hanser Verlag: München.

Appendix A: Abstract

Der begrenzte Bestand fossiler Energieträger, der weltweit ständig wachsende Energiebedarf, die Klimaproblematik und das immer stärker werdende Umweltbewusstsein führen zu einer Suche nach alternativen Energiekonzepten. Eines dieser Konzepte handelt von dem Energieträger Wasserstoff.

Aus diesem Grund beschäftigt sich die vorliegende Ausarbeitung mit möglichen Anwendungsgebieten und dem ökonomischen Potential von Wasserstoff.

Anfänglich geben einige Hintergrundinformationen einen Überblick über die heutige Situation im Energiesektor. Die Vorstellung des Energieträgers Wasserstoff, angefangen vom geschichtlichen Hintergrund, über die verschiedenen Erzeugungs-, Speicherungs- und Transportmethoden, bis hin zu möglichen Sicherheitsbedenken und dem aktuellen Stand der Forschung, geben einen Einblick in die behandelte Thematik.

Anschließend werden potentielle Anwendungsgebiete ausführlich erklärt und anhand von Beispielen veranschaulicht. Das ökonomische Potential wird durch die genaue Betrachtung einer möglichen Wasserstoffwirtschaft mit der dazugehörigen Infrastruktur analysiert. Abschließend werden andere alternative Kraftstoffe zum Vergleich vorgestellt.

Appendix B: Lebenslauf

Persönliche Angaben

Alice Steiger, Bakk.

Geboren in Wien, am 04. August 1985

Staatsangehörigkeit Österreich

Ausbildung

2010 – 2012 Magisterstudium der Betriebswirtschaft, Universität Wien

Spezialisierung: Innovations- und Technologiemanagement
Electronic Business

Magisterarbeit: „Anwendungsgebiete und ökonomisches Potential
von Wasserstoff“

2006 – 2010 Bakkalaureatsstudium der Betriebswirtschaft, Universität Wien

Spezialisierung: Organisations- und Personalmanagement
Produktionsmanagement
Rechnungslegung

Bakkalaureatsarbeiten: „BioFit – alternative Kraftstoffe, Befragung von
Opinion Leader“
„Unternehmensanalyse der Zumtobel AG“

1999 – 2005 Bundeshandelsakademie 1220 Wien

Schwerpunkt Wirtschaftsinformatik und Organisation

1995 – 1999 Hauptschule in 1220 Wien

1991 – 1995 Volksschule in 1220 Wien