

Brennstoffzelle als Range Extender für Elektrofahrzeuge und die Speichermöglichkeiten von Wasserstoff

*Fuel cell as a range extender for electronic vehicles and the potential
for hydrogen storage*

Diplomarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Maschinenbauingenieur (Dipl.-Ing. (FH))

Fachhochschule Brandenburg

Fachbereich Technik
Studiengang Ingenieurwissenschaften
Studienrichtung Maschinenbau
Fachrichtung Produktentwicklung

eingereicht von:	Robert Klebe
Matrikelnummer:	20062220
geboren am:	12.12.1986 in Potsdam
Betreuer Fachhochschule:	Prof. Dr. rer. nat. habil. Zehner
Themenstellender Betrieb:	DUWE „Kapazitätsbörse für KFZ-Systemteile für Berlin/Brandenburg“ GmbH
Betreuer Betrieb:	Dipl.-Ing. (FH) Michael Duwe
Einreichung:	Brandenburg, 10. Mai 2010

*Es sind nicht die äußeren Umstände, die das Leben verändern, sondern die inneren
Veränderungen, die sich im Leben äußern.*

(Wilma Thomalla; Deutsche Publizistin)

Abstract

This diploma thesis examines a fuel cell used as a range extender for an electronic vehicle. The particular components of the system are introduced and furthermore evaluated. Additionally the whole system is reviewed taking in consideration economical and ecological aspects. All of those results lead to an overall conclusion regarding conditions which are necessary for an energy-efficient operation of the system. A replica of the system built within a 1:10 scaled model provides further information about construction and configuration. It also helps to understand the schematic assembly of an electronic vehicle run with a fuel cell for range extension.

Keywords: fuel cell, range extender, electronic vehicles, hydrogen storage

Sperrklausel

Die abgelieferten Arbeiten werden Eigentum der DUWE Kapazitätsbörse GmbH und des Fachbereichs Technik der Fachhochschule Brandenburg, die beide das gemeinsame Recht zur Veröffentlichung und weiteren Nutzung haben. Die Einschaltung Dritter in den Bereich dieser Arbeit erfordert die Zustimmung der DUWE Kapazitätsbörse GmbH. Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Diplomarbeit sind nicht notwendigerweise die der DUWE Kapazitätsbörse GmbH. Die Arbeit wird im Institut öffentlich ausgestellt.

Potsdam den 03.05.2010

Bei Rückfragen wenden Sie sich bitte an:

Dipl. -Ing. (FH) Michael Duwe

Geschäftsführender Gesellschaft

Telefon: 0331/2378523

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und unter Verwendung der angegebenen Literatur angefertigt habe. Weiterhin versichere ich, dass diese Diplomarbeit noch keiner anderen Prüfungskommission vorgelegen hat.

Potsdam, 03.05.2010

Robert Klebe

Inhaltsverzeichnis

Abstract	III
Sperrklausel	IV
Selbständigkeitserklärung	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Vorwort	IX
Zusammenfassung	X
Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen	XII
1. Einleitung	15
1.1 Die Aufgabenstellung der Diplomarbeit.....	15
1.2 Problemanalyse/Zielsetzung	17
1.3 Durchführung	17
1.4 Firmenüberblick.....	18
1.4.1 Ablauf der Auftragsannahme	18
1.4.2 Vorteile und Nutzen	20
2. Grundlagen	22
2.1 Ressourcen und Energiebedarf	22
2.2 Emissionen und Umwelt.....	23
2.3 Energieträger	25
2.3.1 Primäre Energieträger	25
2.3.2 Sekundäre Energieträger.....	26
2.4 Energiewandler und Energiespeicher.....	27
2.5 Klassifizierung von Elektrofahrzeugen	28
2.6 Fahrzeugtechnische Grundlagen	30
3. Systemkomponenten	34
3.1 Wasserstoffspeicher.....	35
3.1.1 Wasserstoff.....	35

Inhaltsverzeichnis

3.1.2 Speichertypen und –methoden.....	40
3.1.3 Systemspeicher.....	49
3.2 Die Brennstoffzelle	50
3.2.1 Funktion und Aufbau einer Brennstoffzelle	50
3.2.2 Brennstoffzellentypen	52
3.2.3 Kenngrößen einer Brennstoffzelle	53
3.2.4 Systembrennstoffzelle.....	55
3.3 Akkumulator	56
3.3.1 Funktion und Aufbau eines Akkumulators.....	56
3.3.2 Batterie-/ Akkumulatorarten.....	56
3.3.3 Eigenschaften einer Batterie/ eines Akkumulators.....	58
3.3.4 Systemakkumulator.....	58
3.4 Kondensator	60
3.5 Elektromotoren	60
3.5.1 Grundsätzliche Funktion und Aufbau eines Elektromotors	61
3.5.2 Motortypen	62
3.5.3 Kenngrößen eines Elektromotors.....	62
3.5.4 Systemelektromotor.....	62
4. Systemaufbau	64
4.1 Betrachtungen des Gesamtsystems	64
4.2 Analyse von Potentialen und Schwachstellen.....	68
4.2.1 Systembedingte Potentiale und Schwachstellen	68
4.2.2 Systemunabhängige Potentiale und Schwachstellen.....	73
4.3 Modellnachbau.....	78
4.3.1 Auslegung	80
4.3.2 Konstruktion	84
4.3.3 Zyklen	84
4.3.4 Aufbau und Zusammenbau	87

Inhaltsverzeichnis

4.4 Sicherheit.....	87
5. Bewertungen.....	88
5.1 Ökologische Bewertung.....	88
5.2 Ökonomische Bewertungen	93
6. Auswertung.....	101
7. Quellen	104
7.1 Abbildungsverzeichnis.....	104
7.2 Tabellenverzeichnis/Diagrammverzeichnis.....	106
7.3 Literaturverzeichnis.....	108
8. Anlagen	112
8.1 Akkumulator Auslegen	112
8.2 Auslegung Brennstoffzelle.....	114
8.3 Wasserstofftank	116
8.4 Kostenaufstellung.....	118
8.5 Wasserstoffbetankung	118
8.6 Fahrzustände	119
8.7 PKW Auslegung.....	120
8.8 Grafische Zusammenfassung.....	123
8.9 Fahrzeugkostenberechnung.....	124
8.10 Blockschaltbilder	129

Vorwort

Am Ende des ersten Jahrzehnts des neuen Jahrtausends, in Mitten einer Wirtschaftskrise, in der die Diskussion über Werte, Nachhaltigkeit und Verantwortung des Einzelnen neu entfacht wird, stellt sich die Frage nach dem neuen Hoffnungsträger für künftiges globales Wirtschaftswachstum.

Der Zukunftsforscher Leo Nefiodow sieht den Beginn des sechsten Kondratjew-Zyklus. Hierbei bezieht sich Nefiodow auf den russischen Ökonomen Nikolai Kondratjew, der die Theorie der „langen Wellen“ in der Wirtschaftsentwicklung begründet hat. Demnach treten in der Wirtschaft nicht nur kurze und mittlere, sondern auch lange Produktionsschwankungen, mit einer Dauer von 40 bis 60 Jahren auf. Nach ihrem Entdecker werden sie als Kondratjew-Zyklen bezeichnet. Verursacht werden diese Schwankungen durch Innovationen, die der Weltwirtschaft über Jahrzehnte hinweg einen kräftigen Produktivitäts- und Wachstumsschub geben [1].

Den letzten Kondratjew-Zyklus bescherte uns die Kommunikationstechnik. Der Forscher ist der Meinung, dass mit der Jahrtausendwende der sechste Zyklus begonnen hat. Er vertritt die These, dass der Megamarkt des 21. Jahrhunderts der Gesundheitssektor sein wird.

Allerdings wird in diesem Zusammenhang auch der Markt „Umwelttechnik“ genannt. „Was wir Umweltschutz nennen, ist in Wirklichkeit Gesundheitsschutz“ [1]. Dazu gehören zwangsläufig auch alternative Energiesysteme und -konzepte.

Ist Wasserstoff der unbegrenzte Energieträger der Zukunft? Ist die Brennstoffzelle als Energieumwandlungssystem denkbar, welches geräuschlos Strom erzeugt und dabei emissionsfrei arbeitet? Wird der Lithium-Ion-Akku eine Möglichkeit sein elektrische Energie sicher, zuverlässig, und dauerhaft zu speichern? Wie ökologisch, ökonomisch und nachhaltig sind diese Technologien heute bzw. werden sie in 20 Jahre sein?

Kritiker behaupten, die Brennstoffzelle wäre 1980 acht bis zehn Jahre von der Serienreife entfernt gewesen - und sei es heute immer noch [2].

Wird sich der Traum vom emissionsfreien Fahren verwirklichen lassen? Und ist Wasserstoff die Lösung des Problems?

Zusammenfassung

Viele Fragen die im Vorwort gestellt wurden müssen mit Nein beantwortet werden. Elektrofahrzeuge sind immer noch aufgrund ihrer geringen Energiespeicherfähigkeit und hohen Herstellungskosten den mit Verbrennungskraftmaschinen betriebenen Fahrzeugen weit unterlegen. Es fehlt ein adäquater Energiespeicher.

Es hat vielmehr den Anschein, als ob Elektrofahrzeuge lediglich ein Instrument der Industrie sind, um sich einen „Grünenanstrich“ zu verleihen und umweltfreundlich zu erscheinen, um so ein Wirtschaftswachstum zu erzwingen. Allerdings kann man „Greenwashing“ nicht der Ökologie zurechnen, das von einer großen Lobby unterstützt wird und so etwas wie modern ist.

Fakt ist, dass die Brennstoffzellentechnologie eine 60 Jährige Vergangenheit hat. Die geringe Weiterentwicklung in den letzten Jahren ist ein Indiz für den hohen Entwicklungsgrad. Somit ist mit Fortschritten in dieser Technologie nicht zu rechnen. Aus diesem Grund wird die Brennstoffzelle auch weiterhin für Spezialanwendungen vorbehalten bleiben. Ein Elektrofahrzeug mit Brennstoffzelle als Range Extender wird sich nur dort ökologisch rentabel einsetzen lassen, wo es auf die Fähigkeit ankommt, extrem lange Betriebszeiten zu gewährleisten. Die kurze Wiederbetankungszeit und der ökologische Vorteil gegenüber anderen Antriebskonzepten wird zu einem hohen Preis erkauft, wie in Abbildung 0-1 gut durch den Energieverlust sichtbar wird.

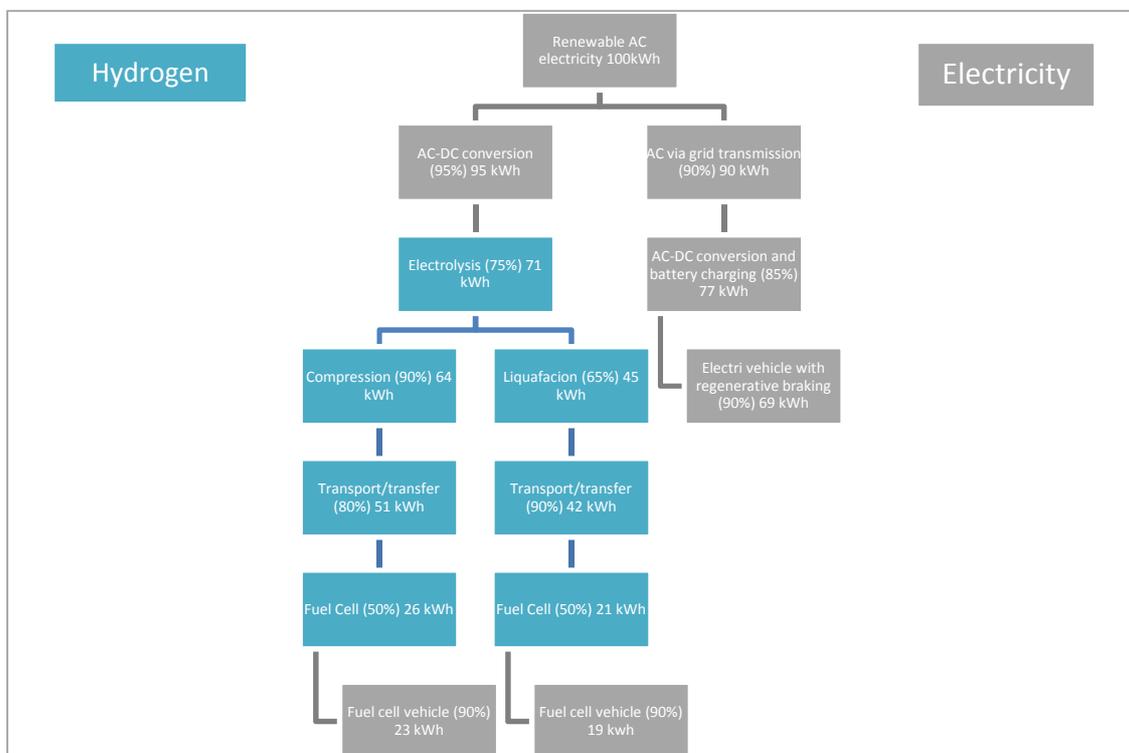
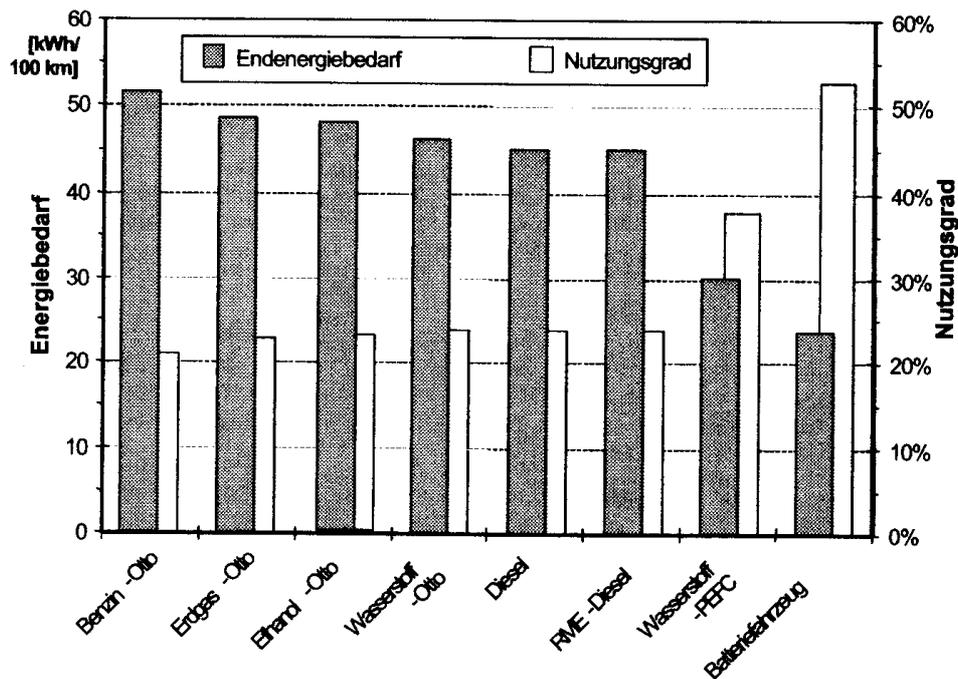


Abbildung 0-1: Vergleich der Prozesskette zwischen Elektrofahrzeug und Wasserstoff betriebenen Fahrzeug [59]

Zusammenfassung

Tatsache ist, dass Lithium Akkumulatoren in Zukunft nicht in ausreichender Stückzahl zur Verfügung stehen, um weltweit Fahrzeuge auszustatten. Der Grund hierfür ist, das weitere Anwachsen des weltweiten Fahrzeugbestands und die begrenzten Ressourcen an Lithium. Hinzu kommt die Leistungsgrenze der Lithiumtechnologie, die den Anforderungen der Fahrzeugindustrie aktuell nicht genügt.

Diagramm 0-1: Energieverbrauch und Nutzungsgrad verschiedener Pkw im NEFZ [13]



Wie im Diagramm 0-1 zu erkennen sind die Wirkungsgrade, sowohl von Wasserstoff als auch von Batteriefahrzeugen, deutlich höher als die der Otto- oder Dieselfahrzeuge. Dieser Vorteil gegenüber herkömmlichen Antrieben kann so lange nicht ausgespielt werden, bis es zu einer Lösung des Energiespeicherproblems kommt. Das Energiespeicherproblem lässt sich mit Wasserstoff oder Lithium-Akkumulatoren weder ökonomisch noch ökologisch lösen.

Es ist allgemein bekannt, dass das Elektrofahrzeug in naher Zukunft in den Massenmarkt eingeführt werden muss. Die Gründe dafür sind allerdings nicht in der Erdölreichweite oder der CO₂-Emission zu sehen, sondern liegen in der Ökonomie. Das kann nur geschehen, wenn die Leistungsfähigkeit eines Energiespeichers im Elektrofahrzeug dem der fossilen Energieträger gleichkommt. Zudem sollte es das Ziel der Weiterentwicklung sein, eine Senkung des allgemeinen Energiebedarfs von Fahrzeugen zum Beispiel durch Gewichtsreduktion herbeizuführen.

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche, Oberfläche	m ²
$a, \frac{dv}{dt}$	Beschleunigung	m/s ²
AFC	Alkaline Fuel Cell	-
BMS	Batterie Management System	-
C	Kohlenstoff	-
C	Kapazität	Ah
C _w	Luftwiderstandsbeiwert	-
Co	Cobalt	-
CO ₂	Kohlendioxid	-
Cd	Cadmium	-
DC	Gleichstrom	-
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell	-
E	Energie	J
e ⁻	Elektron	-
F	Kraft	N
F _B	Beschleunigungswiderstand	N
F _L	Luftwiderstand	N
F _r	Rollwiderstand	N
F _s	Steigungswiderstand	N
f _r	Rollwiderstandsbeiwert	-
g	Normfallbeschleunigung	m/s ²
H ⁺	Proton	-
H ⁻	Hydridion	-
H ₂	Wasserstoff (gasförmig)	-
H ₂ O	Wasser (flüssig)	-
HT	Hochtemperatur BZ (500 - 800°C)	-
I	elektrische Stromstärke	V
j	Stromdichte	A/m ²
Kfz	Kraftfahrzeug	-
LH ₂	flüssiger Wasserstoff	-
Li	Lithium	-
LiPo	Lithium-Polymer	-
M	molare Masse	g/mol

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

m	Masse, Fahrzeugmasse	kg
m_{red}	reduzierte Fahrzeugmasse	kg
MCFC	Molton Carbonat Fuel Cell	-
NaAlH_4	Natriumaluminiumhydrid	-
NEFZ	neuer Europäischer Fahrzyklus	-
Ni	Nickel	-
NiMH	Nickel-Metallhydrid-Akkumulator	-
Nm^3	Normkubikmeter	m^3
NT	Niedertemperatur BZ (0 - 80°C)	-
O_2	Sauerstoff (gasförmig)	-
P	elektrische Leistung	kW
P_L	Luftdichte	kg/m^3
p	Druck	N/mm^2 , bar, psi
PAFC	Phosphor Acid Fuel Cell	-
Pb	Blei	-
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	-
Pkw	Personenkraftwagen	-
PPS	Produktionsplanungs- und Steuerungssystem	-
Q	Wärme	J
R	elektrischer Widerstand	Ω
S	Entropie	J/K
s	Länge, Strecke	km, m, ft, μm , nm
SOFC	Solid Oxid Fuel Cell	-
T	Temperatur	°C, K
t	Zeit	s
Ti	Titan	-
U	innere Energie	J
U	elektrische Spannung	A
V	Volumen	m^3 , cm^3 , l

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

v	Geschwindigkeit	m/s
v_{∞}	Anströmungsgeschwindigkeit	m/s
VM	Verbrennungsmotor	
W	Arbeit	kWh, J
α	Winkel	°
η	Wirkungsgrad	-
ρ	Dichte	g/cm ³ , kg/m ³

1. Einleitung

Niedriger Energieverbrauch, geringe Emissionen und hoher Fahrspaß stehen im Vordergrund der Verbraucher. Diese Anforderungen müssen moderne Fahrzeuge in immer größerem Maße erfüllen. Neben der Optimierung gewöhnlicher Antriebskonzepte, die durch Downsizing gekennzeichnet sind, werden neue Antriebskonzepte, wie zum Beispiel Hybrid-Konzepte, durch die Kombination von Elektromotor und Verbrennungsmotor oder in weiterer Zukunft Brennstoffzellen die Anforderungen der Kunden gerecht werden müssen. Die Brennstoffzelle ermöglicht es lokal ohne Emissionen elektrische Energie zu generieren und diese für den Antrieb eines Fahrzeugs zu nutzen. Eine kurze Einführung in die Aufgabenstellung soll den Inhalt und das Ziel der Diplomarbeit vorstellen. Neben der Aufgabenstellung und deren Analyse wird die betreuende Firma der Diplomarbeit und deren Geschäftsmodell vorgestellt.

1.1 Die Aufgabenstellung der Diplomarbeit

Der Wunsch nach individueller Mobilität stellt die Fahrzeugindustrie unter den ständigen Druck, sich immer schneller auf die sich ändernden wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen einstellen zu müssen. Das bedingt eine stärkere Ausrichtung der Produkte in Richtung Nachhaltigkeit. Die Tatsache, dass in Staaten wie China und Indien, die sich erst am Anfang ihrer Mobilitätsentwicklung befinden, von einer erheblichen Verkehrssteigerung auszugehen ist, bedingt den Anstieg von Energieverbrauch, der vornehmlich durch Rohöl gedeckt wird. Der somit erwartete Anstieg von Benzin- und Dieselpreis bewirkt ein kontinuierliche Arbeit an hocheffizienten Energieversorgungs-/Antriebssystemen. Dabei stehen Hybridsysteme im Fokus der Entwickler. Vor dem Hintergrund der sich ändernden Rohstoffverfügbarkeit ist es notwendig, ökologische Energieversorgungssysteme hinsichtlich ihrer Effizienz zu untersuchen und deren Nachhaltigkeit zu belegen.

Im Speziellen soll die Brennstoffzelle in Kombination mit einem modernen Energiespeichermedium sowie einem Wasserstoffspeicher untersucht werden. Dabei spielen die Faktoren Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Anzahl der Ladezyklen, Recycling, Herstellungskosten, Materialverbrauch, Abfallprodukte und die Energiebilanz eine zentrale Rolle.

1. Einleitung

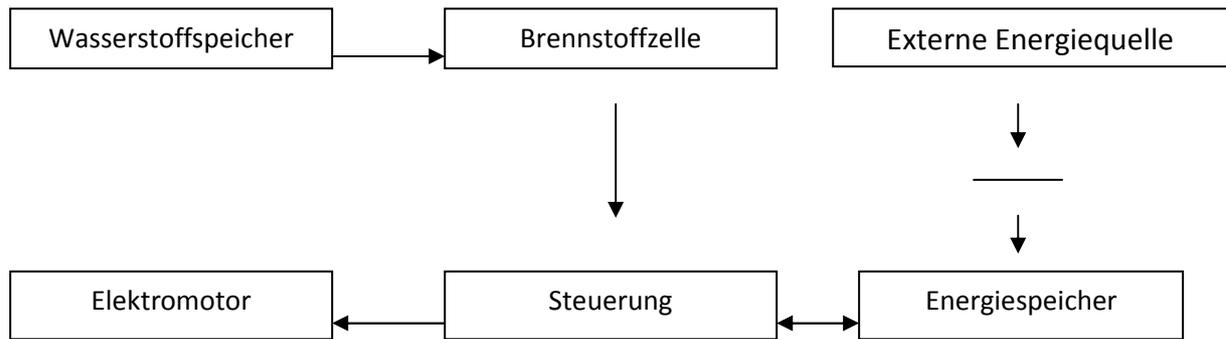


Abbildung 1.1-1: Schematischer Prüfstands-aufbau (Die Pfeile zeigen den Energiefluss, wobei die Verbindung Steckdose/Batterie nicht beständig ist)

Es gibt zwei Möglichkeiten, diese Aufgaben zu erfüllen:

- theoretische Betrachtung und Ausarbeitung,
- reale System-Umsetzung via Prüfstand und Dokumentation

Abschließend ist es Ziel der Arbeit, das vorgestellte System hinsichtlich der ökonomischen und ökologischen Aspekte zu bewerten. Im Zuge dessen sollen Bedingungen für den Einsatz des Systems präzisiert werden.



Abbildung: 1.1-2 Modellfahrzeug im Maßstab 1:10

1. Einleitung

1.2 Problemanalyse/Zielsetzung

Sparsame Antriebskonzepte sind seit je her Wunsch vieler Menschen. Nicht nur Privatpersonen setzen zunehmend auf sparsame Systeme im Fahrzeug- oder Hausbereich. Auch die Industrie muss mit Wirkung der EuP (Energy-using Products) Richtlinie verstärkt auf den Energieverbrauch ihrer Maschinen achten. Am Ende steht die Absicht, die Energiewirtschaft großflächig vom Rohöl abzukoppeln. Damit dies gelingt ist es nicht nur nötig neue energiespeisende Systeme zu entwickeln, sondern auch bestehende energieverbrauchende Systeme zu verbessern oder zu ersetzen. Im Bereich des Fahrzeugbaus existieren seit vielen Jahren Gerüchte über neue Antriebskonzepte und die damit verbundenen Einsparpotentiale. Die Euphorie mancher Visionäre wurde inzwischen von der wirtschaftlich-fossilen Realität eingeholt. Natürlich gibt es bei verschiedenen Systemen viele ökologische Vorteile. Diese müssen aber oft zu hohen Kosten erkaufte werden. Angesichts steigender Energiekosten, hervorgerufen durch die wachsende Nachfrage an Energie, ist es sinnvoll, Alternativen zu prüfen.

In der vorliegenden Arbeit wird die aktuelle technische Realisierbarkeit eines Brennstoffzellen-Hybrid-Systems aufgezeigt und bewertet. Es wird am Ende möglich sein, das Brennstoffzellensystem mit Verbrennungskraftmaschinen oder Elektrofahrzeugen zu vergleichen.

Abschließend erfolgt eine Bewertung des vorgestellten Systems hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Aspekte. Die Benennung der Bedingungen für eine ökologische und ökonomische Einführung wird ausschlaggebend sein einzuschätzen, wie realistisch ein solches System ist.

1.3 Durchführung

Während der intensiven Bearbeitung des Themengebietes wird eine ausführliche Recherche in verschiedenen Medienbereichen vollzogen. Die Abbildung der aktuellen Forschungsergebnisse sowie der technischen Realisierbarkeit sind Grundvoraussetzung für eine Betrachtung des Gesamtsystems und eine sich hieraus ergebene Analyse mit einer Kritikpunkteermittlung.

Die Erarbeitung und konstruktive Umsetzung eines Prüfobjektes ist ein Baustein, um praktische Probleme zu lokalisieren.

Eine Bewertung des Systems hinsichtlich ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkte ist im Anschluss zwingend erforderlich. In dieser Phase erarbeitete Ansichten sind Grundlage für die Generierung von Ideen und Aussagen.

Das so entstandene Bild des Gesamtsystems kann jetzt konstruktiv umgesetzt werden, so dass Potentiale oder Schwachstellen benannt und Kriterien zur Einführung des Range Extender, auf Basis einer Brennstoffzelle, aufgestellt werden können.

1. Einleitung

1.4 Firmenüberblick

Die DUWE „Kapazitätsbörse für Kfz-Systemteile für Berlin/Brandenburg GmbH“ ist ein junges Unternehmen. Ihr derzeitiger Firmensitz ist Potsdam. Sie wurde im Frühjahr 2002 von dem Geschäftsführer Dipl.-Ing. (FH) M. Duwe gegründet. Es handelt sich dabei um eine Unternehmensgründung, basierend auf einer innovativen Idee und einem durchdachten Konzept, welches sich schnell am Markt etablierte. Das Leistungsspektrum setzt sich aus Fertigung und Ingenieurdienstleistungen zusammen. Der Fertigungsumfang wird insbesondere dargestellt aus:

- *Prototypen*
- *Ersatzteilen*
- *Versuchsmustern*
- *Anlauf- und Auslaufserien*
- *Baugruppenmontagen*

Die Ingenieurdienstleistungen bilden den Hauptteil der Arbeit. Dies sind abgeleitet aus den Ansprüchen der Automobilindustrie:

- *Planungs-*,
- *Beschaffungs-*,
- *Logistik-*,
- *Fertigungs-* und
- *Qualitätsdokumentationsprozesse*

1.4.1 Ablauf der Auftragsannahme

Die Kapazitätsbörse ist ein Dienstleistungsunternehmen Sie ist Bindeglied zwischen Automobilproduzenten, deren Systemlieferanten (wie zum Beispiel Bosch) und Klein- bis Mittelstandsunternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus. Diese Schnittstellenfunktion in der logistischen Kette ermöglicht es kleinen Produktionsbetrieben, indirekt für Automobilhersteller zu fertigen, auch wenn diese in keiner Weise zertifiziert sind. Vereinfacht ausgedrückt: Die Kapazitätsbörse übernimmt alle Arbeiten, die nötig sind, damit reine Fertigungsbetriebe den Ansprüchen der Automobilindustrie gerecht werden können. In diesem Zusammenhang entstand auch der Name „Kapazitätsbörse“. Kleine Fertigungsbetriebe melden ihre jeweiligen freien Kapazitäten an die Kapazitätsbörse, die diese dann gezielt ausnutzen kann.

1. Einleitung

Ablauf der Auftragsbearbeitung

Die Kapazitätsbörse ermöglicht Entwicklern der Industrie eine einfache und schnelle Beschaffung von Prototypen und Baugruppen aus einer Hand. Das heißt, der Entwickler hat ausschließlich einen Ansprechpartner, die Kapazitätsbörse. Nach Eingang eines Auftrags in Verbindung mit einer Skizze oder Zeichnung, übernimmt die Kapazitätsbörse die gesamte Planung und Logistik.

- *logistische Bewältigung der Materialbeschaffung (inklusive Urmodell)*
- *Erstellung von Fertigungsplänen*
- *Lieferantenkoordination*
- *Erstellung von Qualitätssicherungsplänen und Messprotokollen*
- *Vertrieb*

Die Fertigung wird überwiegend an verschiedene Produktionsbetriebe (Zulieferer), meist aus Berlin und Brandenburg, in Auftrag gegeben. Somit steht das gesamte Spektrum der Bearbeitungs- und Fertigungsverfahren zur Verfügung.

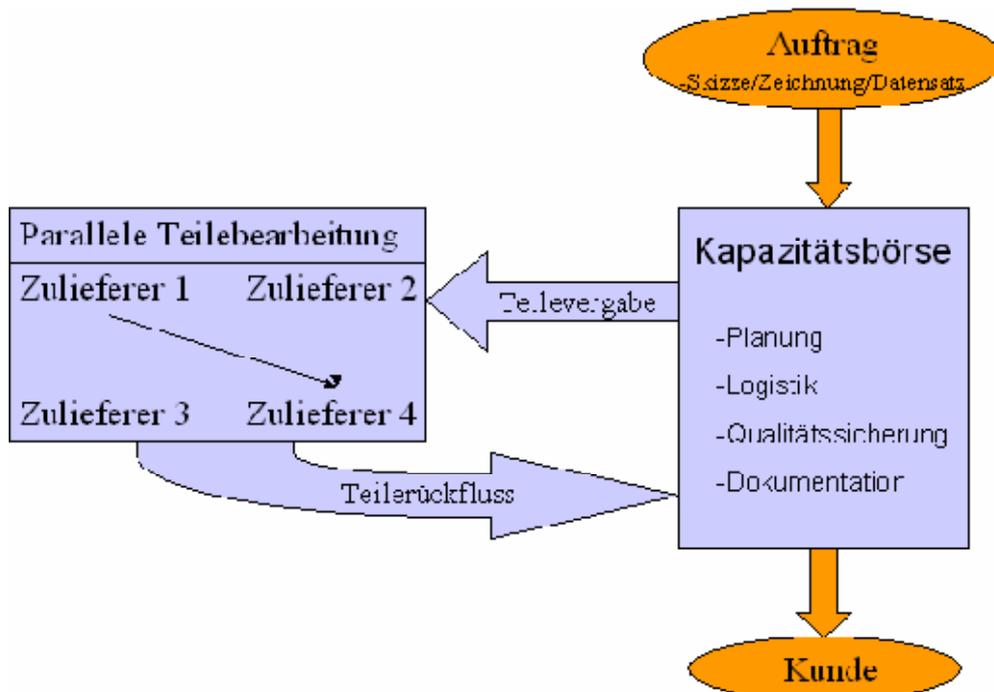


Abbildung 1.4-1 Ablauf [36]

Die Automobilindustrie erhält dann in kürzester Zeit ganze Baugruppen und fertigungsintensive Teile mit Qualitätsnachweisen und der kompletten Dokumentation. Auch eventuelle Reklamationsbearbeitungen werden durch die Kapazitätsbörse abgedeckt.

1. Einleitung

1.4.2 Vorteile und Nutzen

Heute müssen alle Unternehmen auf das schwankende Nachfrageverhalten ihrer Kunden flexibel reagieren und ihre Kapazitäten stetig anpassen. Die in herkömmlichen PPS Systemen verwendeten Ansätze, die von unflexiblen Kapazitäten ausgehen, sind aufgrund der damit verbundenen starren und teuren Über- und Unterkapazitäten sowohl aus logistischer als auch aus ökonomischer Sicht nicht zufriedenstellend. Niedrige Reaktionszeiten und höchste Flexibilität sind in der Produktion kritische Erfolgsfaktoren. Ebenfalls essentiell ist es, die Wünsche der Kunden in der Entwicklung neuer Produkte mit einzubeziehen. Eine enge Zusammenarbeit mit den Kunden erlaubt es, Kundenwünsche vorwegzunehmen und in eigenen Innovationen am Markt umzusetzen. Der größte Vorteil, den die Kapazitätsbörse verschafft, liegt auf Seiten der Automobilindustrie, die kostengünstiger und schneller an Teile und Baugruppen mit kleineren Stückzahlen, gelangt, als über einen mit A- qualifizierten Lieferanten.

Nach der ABC- Analyse zeichnet sich ein mit A- qualifizierter Lieferant durch:

- *hohe und gleichbleibende Materialqualität*
- *hohe Qualitätssicherheit*
- *hohe Liefertreue*
- *Termintreue*
- *Zuverlässigkeit*
- *und diverse weitere Bewertungskriterien aus.*

An diesem Punkt setzt das Konzept der Kapazitätsbörse an. Die genannten Kriterien werden in dieser Form äquivalent durch die Kapazitätsbörse erfüllt, jedoch bietet sie einen deutlichen Preisvorteil. Dieser Kostenvorsprung gegenüber den oben genannten A-Lieferanten, entsteht durch einen allgemein betrachtet geringeren Stundensatz.

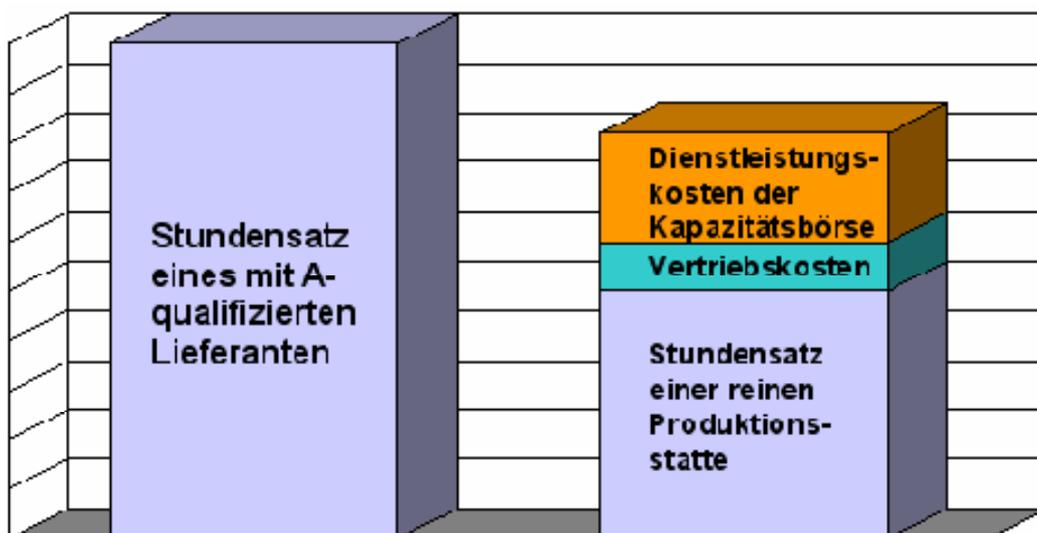


Abbildung 1.4-2 Stundensätze [36]

1. Einleitung

Der genannte Zeitvorteil lässt sich durch das Verteilen von Aufträgen an mehrere Produktionsfirmen mit freien Kapazitäten begründen. Dies macht sich bei Baugruppen aus mehreren Einzelteilen besonders bemerkbar. Es ist durch die Kapazitätsbörse und verschiedenen, von ihr zeitgleich eingesetzten, Produktionsbetrieben möglich die Einzelteile mit ihren Fertigungsstufen synchron bearbeiten zu lassen. Dadurch wird ein enormer Zeitvorteil gegenüber der Bearbeitung der gesamten Baugruppe an nur einer Produktionsstätte erzielt. Auch das Herstellen von Teilen mit großem Fertigungsaufwand (z.B. Abfolge von Drehen, Erodieren, Härten und Schleifen) wird insgesamt schneller ausgeführt. Die Zeitersparnis folgt aus minimalen Wartezeiten zwischen den Fertigungsschritten, da immer freie Kapazitäten genutzt werden.

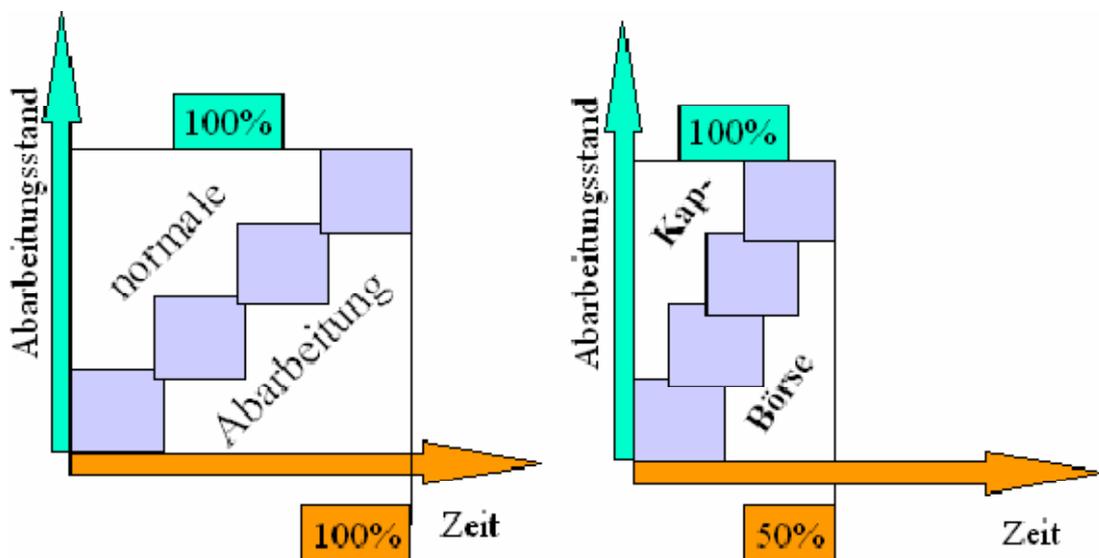


Abbildung 1.4-3 Vorteil [36]

Auch auf Seiten der Fertigungsbetriebe sind Vorteile bei der Zusammenarbeit mit der Kapazitätsbörse gegeben. Zum einen werden freie Kapazitäten gezielt genutzt, zum anderen gelangt der Zulieferer an fundiertes Fertigungs- und Qualitätswissen. Des Weiteren spart sich der Fertigungsbetrieb den zeit- und personalaufwendigen Zertifizierungs- und Qualitätsdokumentationsprozess. Der Nutzen und die Vorteile liegen also auf beiden Seiten der Geschäftspartner der Kapazitätsbörse und sie ist somit die ideale Verbindung zwischen der Automobilindustrie und externer Produktion. Zudem zeigt der Trend eine Verlagerung der Prozesse innerhalb der Automobilindustrie.

(Zitiert nach Bolze/Bragrock [36])

2. Grundlagen

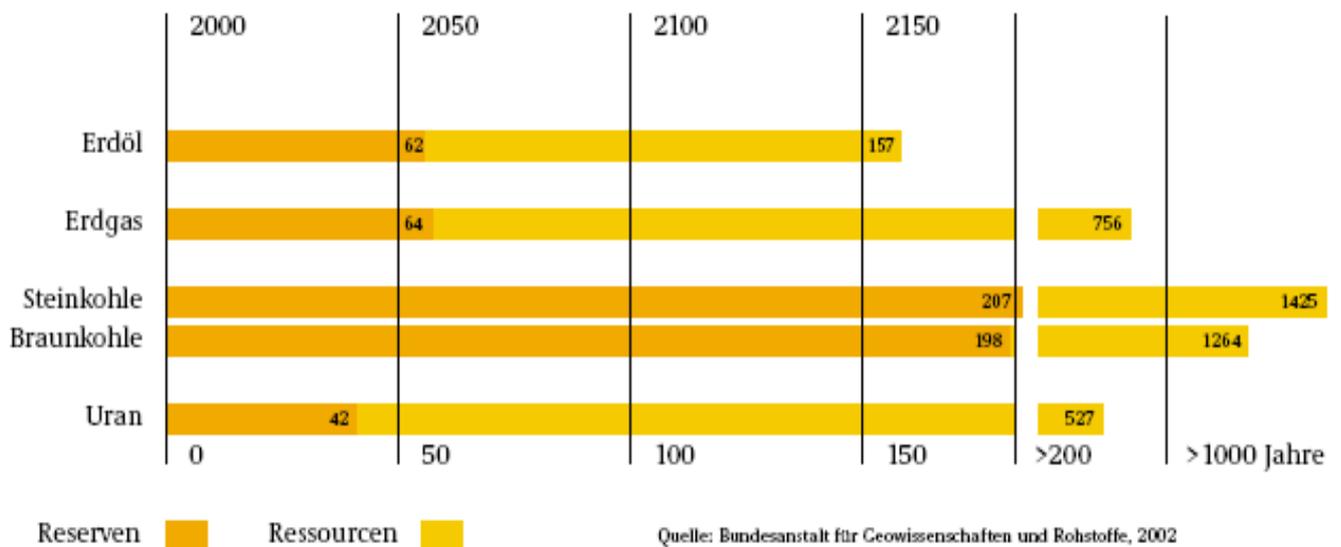
Für den Einstieg in das Themengebiet der Elektrofahrzeuge bzw. wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge bedarf es zunächst eines grundsätzlichen Verständnisses, unter welchen Rahmenbedingungen und Zwängen die Bevölkerung steht. Ausgehend von dem Wissen, dass es zwingend notwendig ist, neue Energiekonzepte, im speziellen Antriebskonzepte, zu entwickeln, werden im Abschnitt 3 alle Systemkomponenten betrachtet.

2.1 Ressourcen und Energiebedarf

Die Zunahme der Weltbevölkerung, die begrenzte Verfügbarkeit fossiler Rohstoffe und deren geographische ungleiche Verteilung, die steigende Umweltbelastung durch die Emission von Schadstoffen sowie der Klimawandel zählen zu den größten Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Trotz unterschiedlicher Meinungen bezüglich der Reichweite von derzeit bekannten Reserven und geschätzten künftig noch abbaubaren Ressourcen an fossilen Rohstoffen ist davon auszugehen, dass deren Verknappung zu entsprechenden Preissteigerungen führen wird [2]. In Diagramm 2.1-1 ist die aktuelle Schätzung der Ressourcen und Reserven abzulesen.

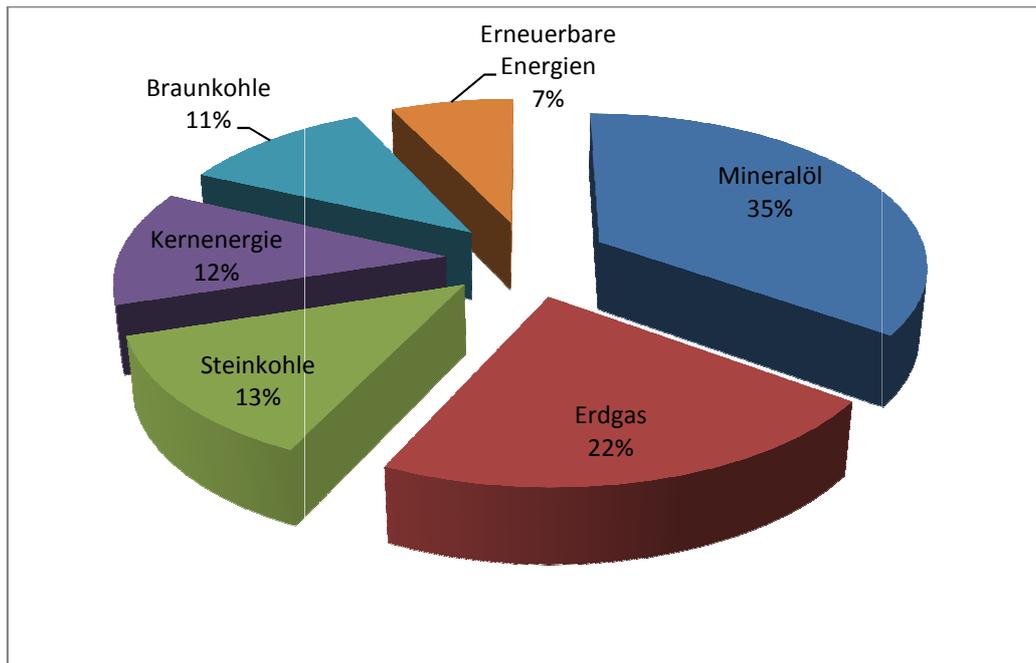
Im Zusammenhang mit Diagramm 2.1-2 ergeben sich daraus in den nächsten Jahren dringende Handlungsbedarfe. Da 81% der Primärenergie aus fossilen Energieträgern gewonnen wird und diese Reserven nach Aussage des Bundesamtes noch ca. 50 Jahre reichen.

Diagramm 2.1-1: Reichweite der derzeit bekannten Reserven und Ressourcen [95]



2. Grundlagen

Diagramm 2.1-2: Primärenergieverbrauch in Deutschland 2008 [96]



2.2 Emissionen und Umwelt

Die Schadstoffemission ist, bedingt durch die starke Nutzung fossiler Kraftstoffe, zu einer Gefahr für Gesundheit und Umwelt geworden. Die ideale Verbrennung von Kohlenstoffwasserstoffen C_xH_x mit Sauerstoff O_2 erzeugt Kohlendioxid CO_2 und Wasser H_2O :

— —

Bei diesen Vorgängen entstehen große Mengen Kohlendioxid. Bei der Verbrennung von 1 kg Benzin oder Diesel entstehen ca. 3,2 kg CO_2 bei einer Wärmeleistung von etwa 43 MJ (11,9 kWh). Im Vergleich stellt Erdgas (Methan CH_4) eine umweltfreundliche Alternative dar, denn pro Kilogramm Methan fallen ca. 2,8 kg CO_2 an bei einer Wärmeleistung von 50 MJ (13,9 kWh) [2].

Da die reale Verbrennung fossiler Energieträger aber nicht ideal verläuft, anfallen neben Kohlendioxid eine Reihe weiterer Schadstoffe: Durch unvollständige Verbrennung entsteht Kohlenstoff, die Basis zur Bildung von Ruß und Feinstaub, durch lokalen Luftmangel bilden sich gasförmiges Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe, durch hohe Temperaturen entstehen Stickoxide und durch Einschlüsse im Kraftstoff z.B. Schwefelverbindungen [3].

2. Grundlagen

Diese Nebenprodukte der Verbrennung fossiler Kraftstoffe tragen zu einem Großteil der Globalen Erderwärmung (siehe Abbildung 3.2-1) bei, und rufen in hoch belasteten Gebieten vermehrt sogenannten Zivilisationskrankheiten hervor.

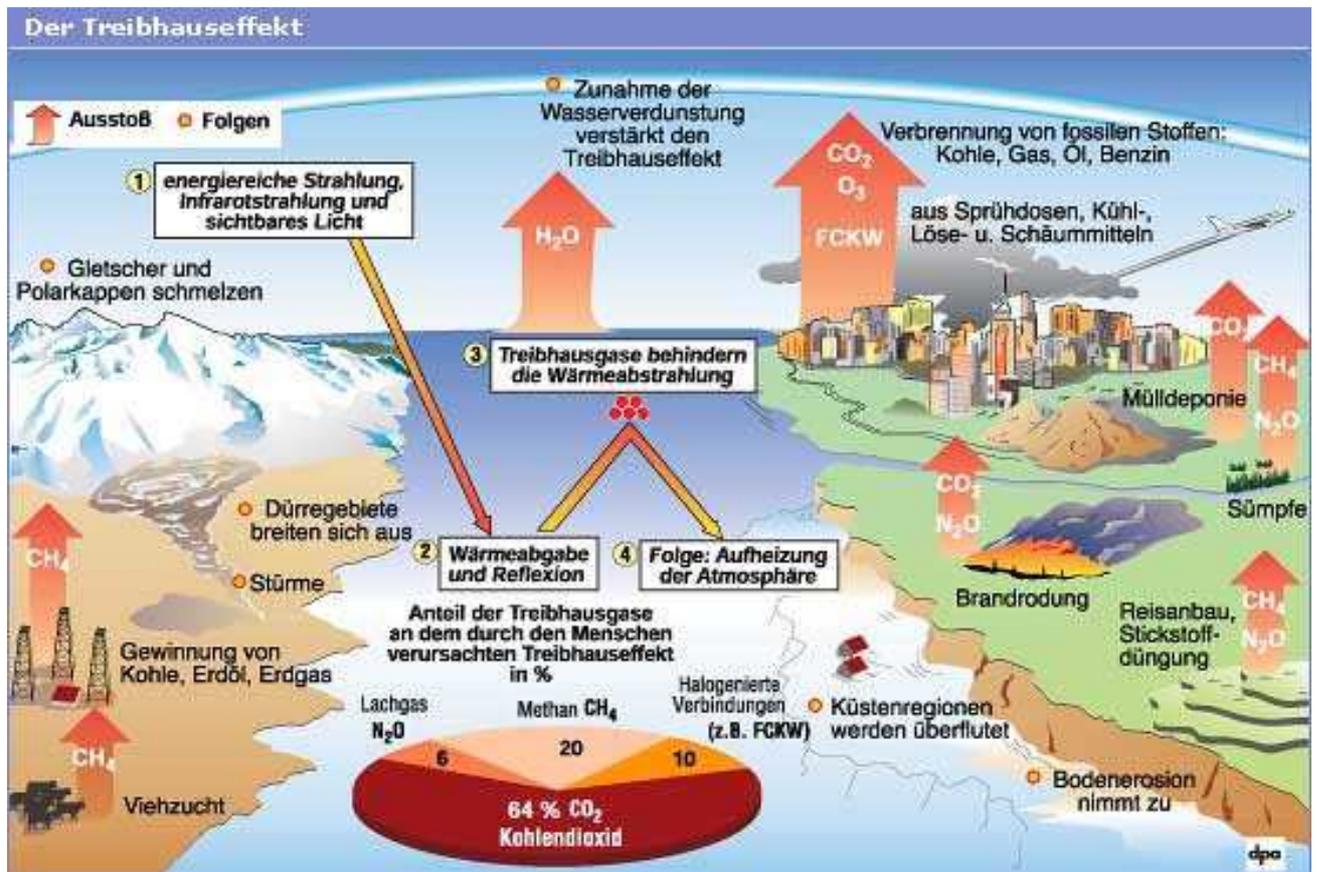


Abbildung 2.2-1: Treibhauseffekt [37]

2. Grundlagen

2.3 Energieträger

Es wird zwischen primären und sekundären Energieträgern unterschieden. Die primären Energieträger enthalten Energie in chemischer oder physikalischer Form, welche direkt zur Energiegewinnung genutzt werden kann. Bei sekundären Energieträgern handelt es sich um nicht natürliche Energieträger, die mit Hilfe von Primären Energieträgern erzeugt werden müssen.

In Abbildung 2.3-1 ist die Höhe der Emissionen der einzelnen Energieträger aufgezeigt. Das Emissionsaufkommen bei fossilen Energieträgern ist deutlich erkennbar.

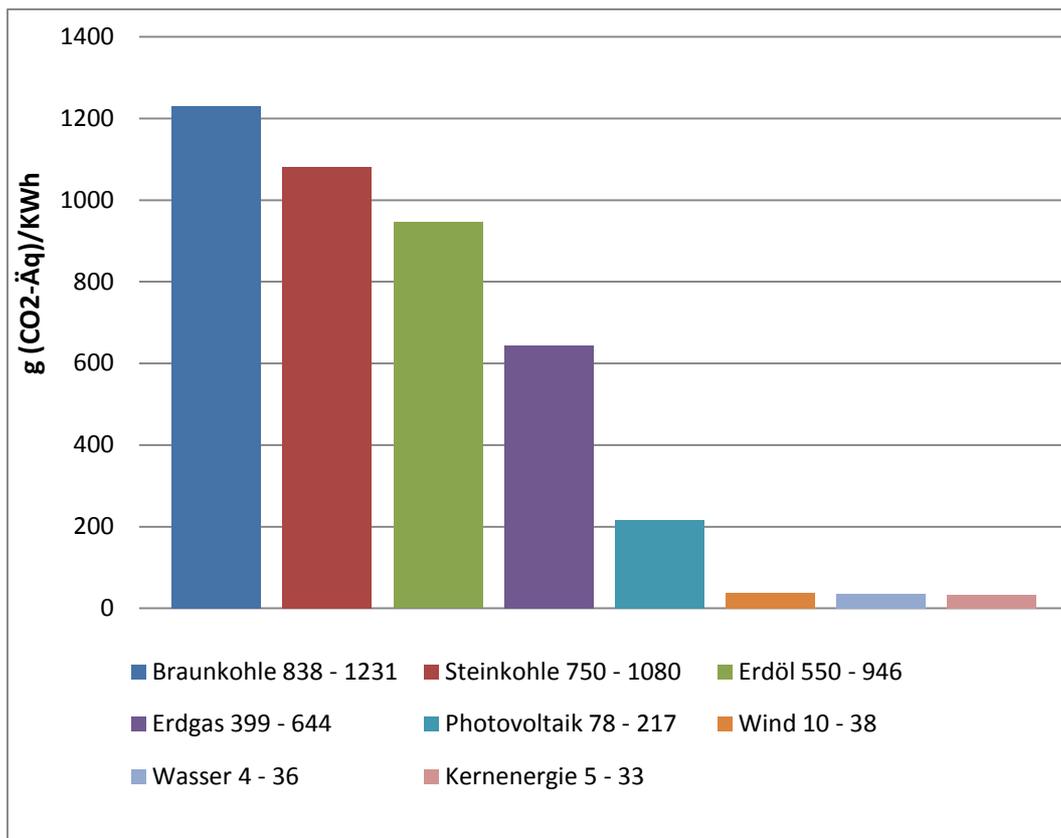


Abb. 2.3-1: Treibhausgasemissionen verschiedener Energieträger unter Berücksichtigung der Lebenszyklus-Analyse [97]

2.3.1 Primäre Energieträger

Fossile Energieträger

Durch biologische und physikalische Prozesse gelangt über sehr lange Zeiträume Biomasse in die fossilen Energieträger, die heute zur Verfügung stehen. Sie reichen vom Erdöl und Erdgas, über Stein- und Braunkohle bis hin zum Torf und zu den bisher ungenutzten Vorkommen an Methanhydraten in den Tiefen der Meere [4].

2. Grundlagen

Pflanzliche Energieträger

Diese erneuerbaren Energieträger entstehen durch Bildung von Kohlenwasserstoffbindungen in der Photosynthese. Die Verbrennung dieser Energieträger wird oft als CO₂ neutral bezeichnet. Pflanzliche Energieträger können direkt verbrannt oder durch chemische Umwandlungen zu sekundären Energieträgern aufbereitet werden [2].

Alternative Energieträger

Diese Form der Energieträger ist erneuerbar und theoretisch unbegrenzt vorhanden. Großes Potential wird der Sonnenenergie, Windenergie und dem Tidenhub des Meeres zugesprochen. Die derzeitigen Kosten zur Erzeugung von Energie durch alternative Energieträger sind allerdings deutlich höher als bei fossilen Energieträgern. Die oft geringen Wirkungsgrade und der unvorhersehbare Verschleiß sind häufig von nicht beeinflussbaren Größen abhängig.

Nukleare Energieträger

Durch die Kernspaltung von Uran wird Energie frei, die in einem Wärmekraftkreislauf über Dampfturbinen Strom erzeugt. Der Prozess verläuft CO₂-frei, er erfordert aber hohe technische Sicherheitsvorkehrungen. Die Lagerung des entstehenden radioaktiven Atommülls ist bisher nicht zufriedenstellend gelöst. Sterne nutzen die Energie aus der Kernfusion von Wasserstoff. Da dieser Prozess sehr hohe Drücke und Temperaturen erfordert, ist er derzeit noch nicht technisch nutzbar. Es wurde ein weltweites Forschungsprojekt dazu initiiert [5].

2.3.2 Sekundäre Energieträger

Flüssige Kraftstoffe

Kraftstoffe sind mit ihrer hohen Energiedichte und einfachen Handhabung ausgesprochen gut für den Einsatz im mobilen Sektor geeignet. Durch ihre oft organische Herkunft entstehen bei der Verbrennung Kohlendioxid sowie andere Schadstoffe, welche für das Klima schwerwiegende Folgen haben.

Elektrischer Strom

Elektrischer Strom gehört zu den universellsten Energieträgern, die genutzt werden. Probleme bestehen immer noch in der Speicherung und beim Transport über weite Strecken, wobei in diesen beiden Bereichen im Zuge der Erforschung der Supraleitertechnik Fortschritte zu erwarten sind. Strom kann aus allen Primärenergiequellen erzeugt werden[2].

2. Grundlagen

Wasserstoff

Aufgrund der hohen Reaktivität von Wasserstoff kommt er nur sehr selten in Reinform vor. Daher ist es fast immer zwingend erforderlich, Primärenergien einzusetzen, um Wasserstoff zu gewinnen. Der Prozess der Gewinnung ist schadstofffrei und hoch effizient. Wasserstoff wird auch als chemischer Grundstoff für viele Prozesse genutzt. Allerdings bereiten die Speicherung und die Verwendung als transportabler Energieträger Probleme.

Als nachhaltige CO₂-freie Energienutzung ohne Belastung der Umwelt gilt die Version der Wasserstoffwirtschaft [6].

2.4 Energiewandler und Energiespeicher

1. Hauptsatz der Thermodynamik: $\Delta U = Q + W$ [7]

Dies besagt, dass Energie nicht verloren gehen kann, sondern nur umgewandelt wird. Gleichzeitig lässt diese Abhängigkeit auch keine Energieerzeugung und Energievernichtung zu, das heißt alle genutzten Maschinen sind „Wandler“.

Derzeit sind fünf Energieformen bekannt: Mechanische Energie, Chemische Energie, Thermische Energie, Magnetische Energie und Elektrische Energie [10]. Diese fünf Arten können beliebig in einander umgewandelt werden, wobei die Summe immer gleich bleibt.

2. Hauptsatz der Thermodynamik: $\Delta S \geq 0$ [7]

Die Thermodynamik gibt mit dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik eine weitere Bedingung für eine Umwandlung vor: Die Entropie eines abgeschlossenen Systems kann nicht abnehmen. [8]

Um hohe Wirkungsgrade zu erreichen, sollte in Wärmeumwandlungsprozessen die Wärme bei möglichst hoher Temperatur zugeführt und bei möglichst niedriger Temperatur abgeführt werden [3]

Thermischer Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{W}{Q_o} = \frac{\Delta S(T_o - T_u)}{T_o \Delta S} = \frac{T_o - T_u}{T_o} = \eta_{carnot} \quad [9]$$

Da die technische Realisierung von Energieumwandlungsprozessen nicht der Theorie gleicht, kommt es in der Praxis immer zu unerwünschten Umwandlungen von Energie. Dazu gehören die benannten Wärmeverluste bei der Umwandlung von Energie mit Hilfe der Verbrennungskraftmaschine. Die Nebenprodukte der primären Umwandlung führen zu Verlusten nutzbarer Energie und mindern so den Ertrag eines Energiewandlers. Ein Maß für die Effizienz eines Systems ist der Wirkungsgrad.

2. Grundlagen

Energiespeicher ermöglichen dem Verbraucher die zeitliche und örtlich beliebige Nutzung, wobei sich die Energieträger unterschiedlich gut speichern lassen. Es wird zwischen Kurz- und Langzeitspeichern unterschieden. Trotz des begrenzten Wirkungsgrades und der Umweltprobleme bei der Energieumwandlung durch Verbrennung [2] ist die Speicherung von flüssigen Kraftstoffen am weitesten verbreitet. Strom als zukünftiger Energieträger ist indes nur durch technisch komplexe Geräte über eine begrenzte Zeit mittels Kondensatoren, Batterien oder Spulen speicherbar. Für die dauerhafte Wasserstoffspeicherung (gasförmig oder flüssig) existieren verschiedene Methoden und Möglichkeiten [11]. Allerdings sind auch diese Strategien technisch aufwendig [2].

2.5 Klassifizierung von Elektrofahrzeugen

Um den Einstieg in das Themengebiet der Elektrofahrzeuge zu vereinfachen, bedarf es eines grundsätzlichen Verständnisses. Die Abgrenzung von konventionell angetriebenen Fahrzeugen ist äußerst wichtig. Ausgehend von diesem Grundwissen können im Weiteren Elektrofahrzeuge in unterschiedliche Klassen eingeteilt werden.

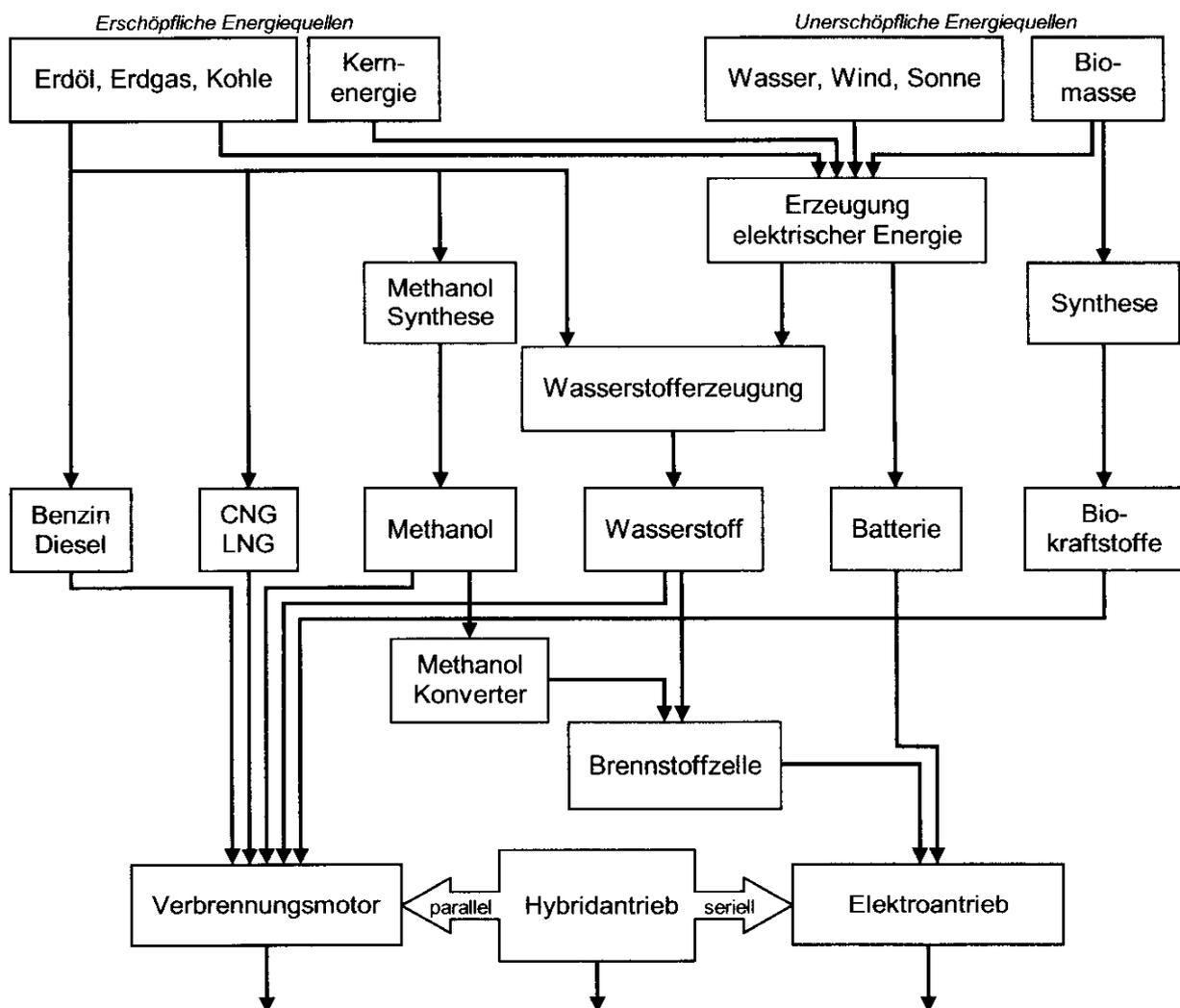


Abbildung 2.5-1: Prozesskette von Primär- zur Fahrenergie [13]

2. Grundlagen

Die in der Abbildung 2.5-1 beschriebenen Wege zum Elektroantrieb weisen eine große Vielfalt auf. Auch die Herstellung von Wasserstoff kann über unterschiedliche Zwischenschritte geschehen. Die Brennstoffzelle ist nach dieser Darstellung nicht als Antrieb einzuordnen. Sie ist eine vorgeschaltete Ebene zum Elektroantrieb, weil es sich hierbei lediglich um ein Energiewandlungssystem handelt [32]. Die Unterscheidung zwischen Seriellen und Parallelen Hybriden wird in Abbildung 2.5-2 sichtbar.

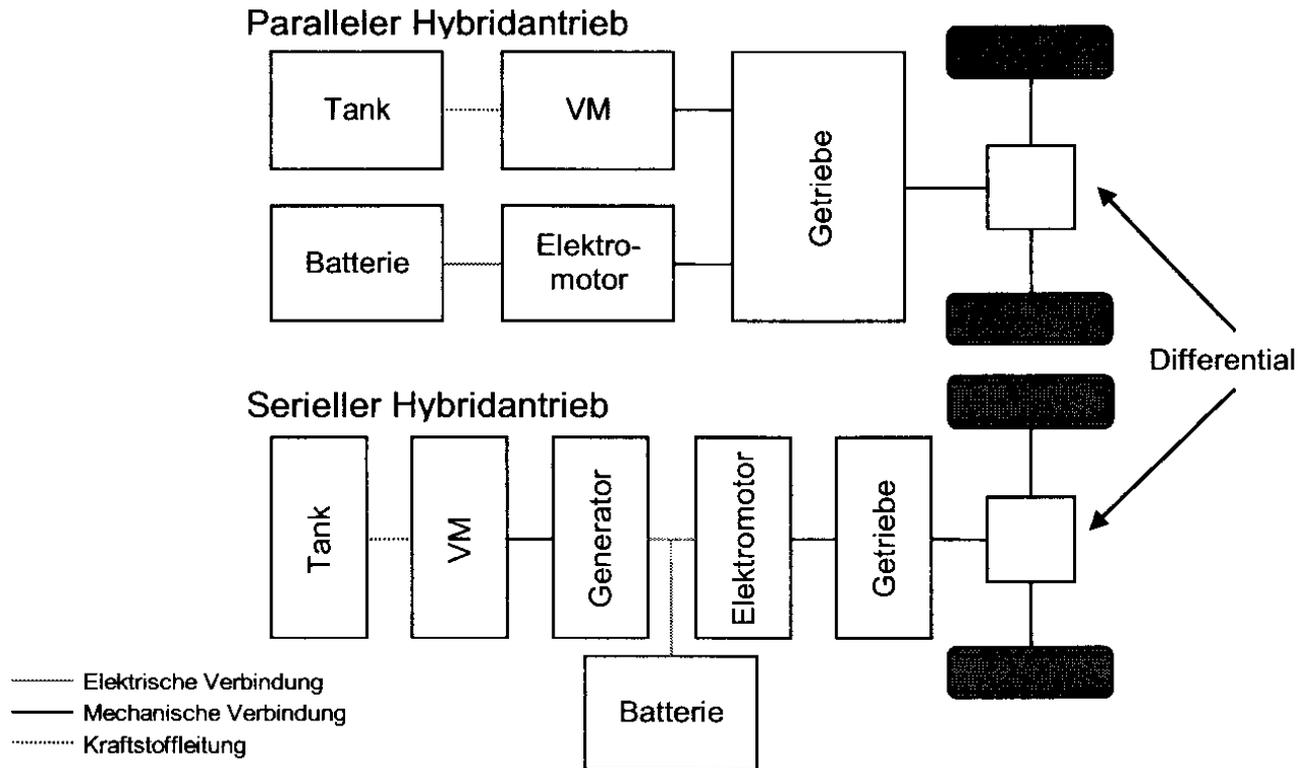


Abbildung 2.5-2: Paralleler und Serieller Hybrid [13]

Eine eindeutige Abgrenzung zwischen konventionellen und elektrischen Antrieben ist nicht möglich. Die Kopplung beider Systeme in einem (Hybrid) und die Bereitstellung der Primärenergie lässt diese Unterscheidung eher in einer Grauzone stattfinden.

Es existieren drei unterschiedliche Klassen nach Klauke [32]:

- Batterie-Elektrofahrzeuge
- Hybrid-Elektrofahrzeuge
- Brennstoffzellen-Fahrzeuge

Hybridisierungsgrade nach BOSCH [99]

- Mild Hybrid
- Full Hybrid
- Plug-In-Hybrid

2. Grundlagen

Die Behandlung der Brennstoffzelle als Rang Extender und somit als Zusatzsystem bedingt die Betrachtung eines Hybrid-Elektrofahrzeuges, wobei der Rang Extender sowohl Parallel als auch Seriell geschaltet werden könnte. Beides soll im Folgenden Betrachtung finden.

Auf Abbildung 2.5-2 bezogen würde das bedeuten, dass der Tank dem Wasserstofftank und der Verbrennungsmotor (VM) der Brennstoffzelle gleichzusetzen wäre. Würde man den Range Extender gleichwertig einer externen Stromquelle betrachten, so würde das Elektrofahrzeug mit Range Extender auf Basis einer Brennstoffzelle mit einem Plug-In-Hybrid vergleichbar sein.

2.6 Fahrzeugtechnische Grundlagen

Die qualitative Darstellung des Leistungsbedarfs eines Fahrzeuges und das zu erwartende Leistungsangebot hinsichtlich der Antriebscharakteristik werden Aufschluss darüber geben, ob eine Serielle oder Parallele Schaltung der Brennstoffzelle Vorteile hat.

Leistungsbedarf eines Fahrzeuges

Für die Fortbewegung müssen die folgend aufgezählten Teilwiderstände überwunden werden:

- Rollwiderstand
- Steigungswiderstand
- Luftwiderstand
- Beschleunigungswiderstand

Die Drucklast des Fahrzeuges bewirkt eine Verformung des Rads beim Abrollen und führt so zu einem Widerstand F_r . Sämtliche sonstige Rollwiderstände, wie zum Beispiel Walkung, Lagerreibung, Schwallwiderstand oder Widerstände durch Schräglauf der Räder, sind zu vernachlässigen.

$$F_r = m \times g \times \cos \alpha \times f_r$$

Das Rad federt bei jeder Umdrehung ein und aus, so dass der Reifen relativ zur Fahrbahn abgleitet und Abrieb erzeugt. Dieser Effekt wird im Rollwiderstandsbeiwert f_r berücksichtigt [32].

Die Hangabtriebskraft F_s wirkt, wenn sich das Fahrzeug auf einer schiefen Ebene befindet. Sie wird mittels Steigungswinkel α und Gewichtskraft F_G ermittelt.

$$F_s = m \times g \times \sin \alpha$$

2. Grundlagen

Um sich in einem Medium zu bewegen, muss dieses verdrängt werden. Es liegt nahe, dass dabei Fahrgeschwindigkeit oder Strömungsgeschwindigkeit des Mediums, sowie Dichte des Mediums beachtet werden müssen. Diese maßgebenden Faktoren sind in der Anströmungsgeschwindigkeit v_∞ und der Luftdichte ρ_L berücksichtigt. Es gehen zusätzlich die Fahrzeugoberfläche A und die aerodynamische Güte des Körpers der Luftwiderstandsbeiwert c_w ein [54].

$$F_L = \frac{1}{2} c_w \times A \times \rho_L \times v_\infty^2$$

Der Beschleunigungswiderstand F_B berücksichtigt ferner die Trägheitskraft des Fahrzeuges. Diese muss überwunden werden, sobald die Ist-Geschwindigkeit verändert wird.

Diese setzt sich aus einem translatorischen und einem rotatorischen Anteil zusammen. Ersterer resultiert aus der instationären Bewegung der Fahrzeugmasse, letzterer durch die Beschleunigung der drehenden Teile des Antriebsstrangs, angefangen vom Motor über das Getriebe bis hin zu den Rädern. Zur Vereinfachung werden diese Massenträgheitsmomente zu einer auf die Antriebsachse reduzierte Masse m_{red} zusammengefasst (54).

$$F_B = (m_{red} + m) \frac{dv}{dt}$$

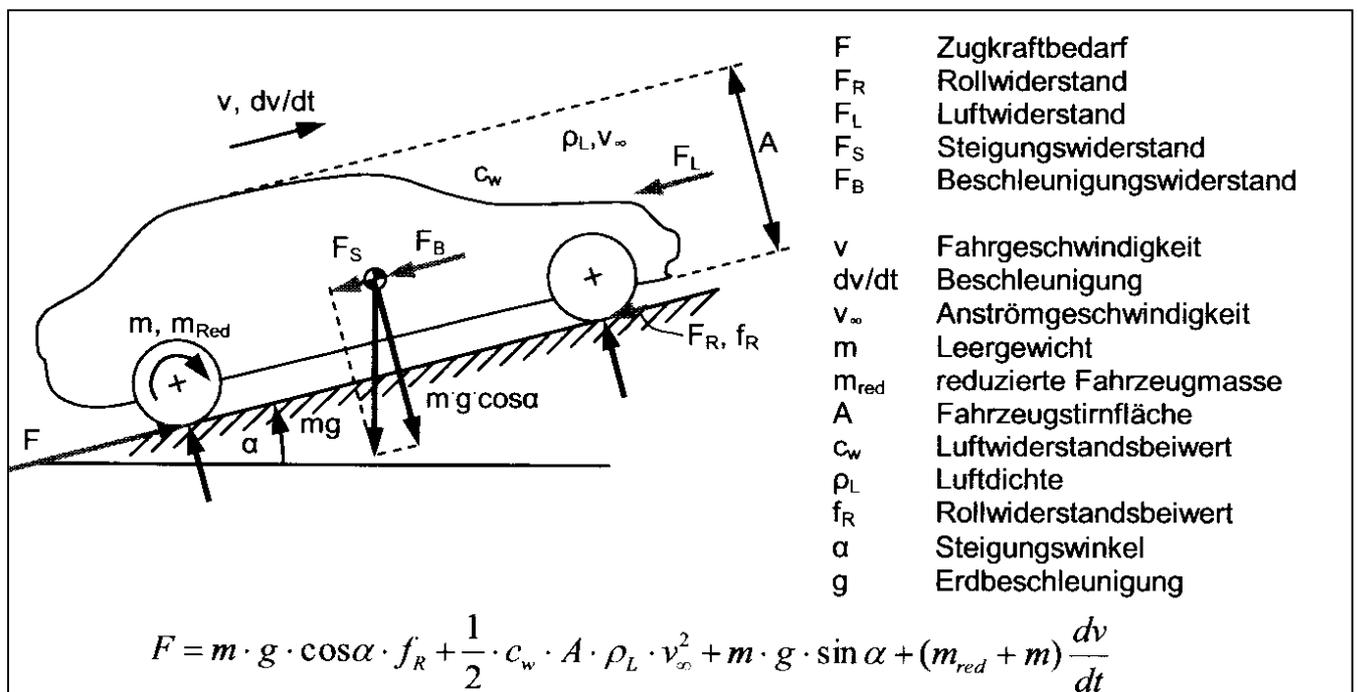


Abbildung 2.6-1: Fahrwiderstände eines PKW [55].

2. Grundlagen

Auf Grundlage der Abbildung 2.6-1 und den voran gestellten Formeln können nun verschiedene Lastfälle ermittelt werden.

Aus den hier vorgestellten Formeln ist die Vermeidung von hohen Massen als Vorteil zu erkennen. Auch die Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit und der maximalen Beschleunigung führt zu Einsparung von Energie.

Leistungsangebot einer Brennstoffzelle

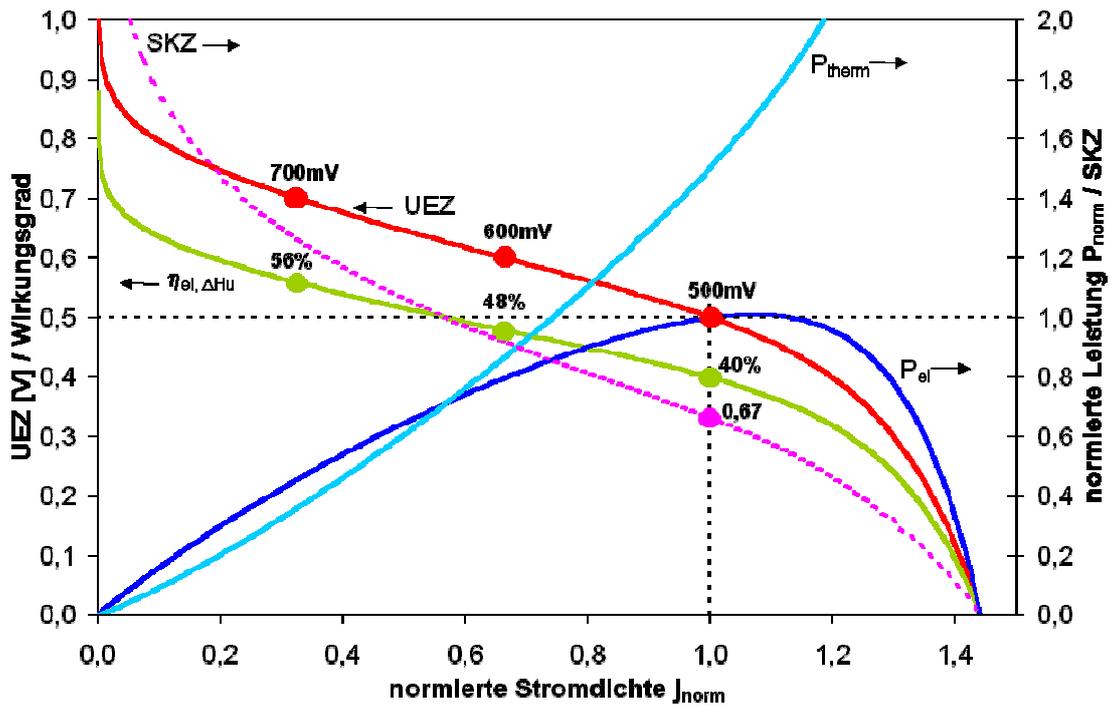


Abbildung 2.6-2: Kennlinie einer PEMFC [56].

Die Abbildung 2.6-2 zeigt den typischen Verlauf einer U-I-Kennlinie (rote). Die Stromdichte ist hier normiert auf den Punkt maximaler elektrischer Leistung (dunkelblau). Weiterhin sind die thermische Leistung (hellblau), der elektrische Wirkungsgrad (grün) und die Stromkennzahl (gestrichelt) eingezeichnet. Alle Angaben beziehen sich auf den Heizwert von Wasserstoff.

Die U-I-Kennlinie fällt zuerst bei kleinen Stromdichten stark ab. Dieser große Spannungsabfall bei sehr kleinen und kleinen Stromdichten wird durch die Überspannung der Sauerstoffreduktionsreaktion verursacht. Im Bereich mittlerer Stromdichte gibt es einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung, der durch den inneren Widerstand der Brennstoffzelle verursacht wird. Bei hohen Stromdichten wird die Reaktionskinetik durch Diffusion begrenzt, hier fällt die Zellspannung schnell ab und geht gegen Null [56].

2. Grundlagen

Der schmale Korridor von hohem Wirkungsgrad und elektrischer Leistung begrenzen die Verwendung der Brennstoffzelle. Um die Schwankungen eines im Fahrbetrieb befindlichen Elektromotors zwischen zu federn bietet sich der Seriell-Hybridantrieb an. So wird gewährleistet, dass die Brennstoffzelle im optimalen Arbeitspunkt bleibt und somit beste Verbrauchswerte an Wasserstoff erreicht werden.

Die Pufferung der Leistungsabnahme via Akkumulator gewährleistet zu dem einen geringen Verschleiß der Brennstoffzelle.

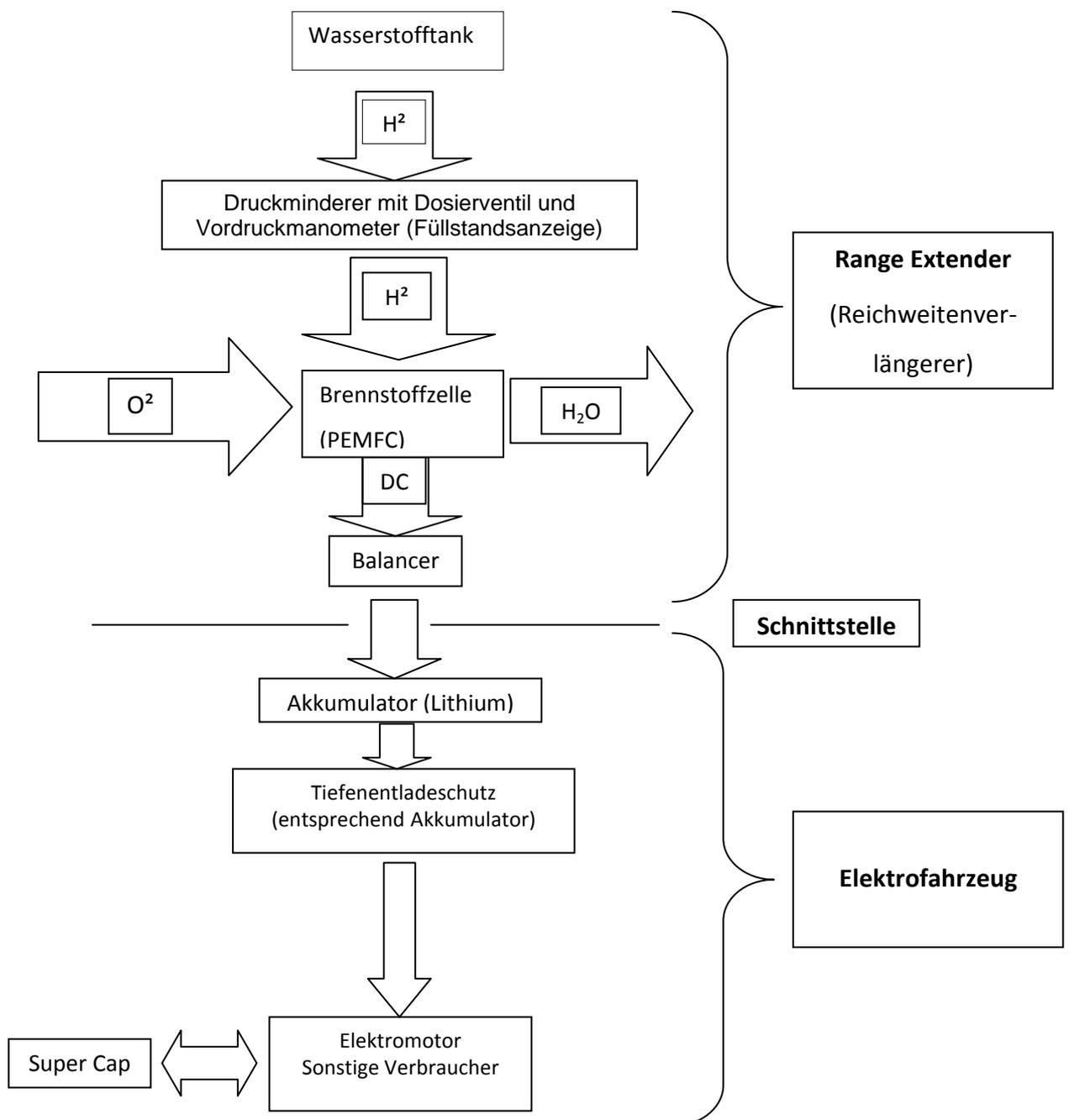
Um ein Brennstoffzellensystem im Fahrzeug zu betreiben, werden folgende Managementsysteme benötigt:

- Hydrogen Air Management (HAM)
- Thermisches Management (THM)
- Elektrisches Energiemanagement (EEM)

(nach BOSCH [99])

3. Systemkomponenten

Um die Systemkomponenten zu betrachten, ist es notwendig, auf die einzelnen eigenständigen Systeme, wie zum Beispiel Akkumulator, Brennstoffzelle, etc. unter Einbeziehung der Grundlagen zu betrachten und zu analysieren. Neben dem technischen Verständnis über Aufbau und Funktion ist die Potentialabschätzung der Teilsysteme ein grundsätzliches Ziel dieses Kapitels. Die Teilsysteme sind in Energieflussrichtung betrachtet, demzufolge wird mit dem Wasserstoffspeicher (Kapitel 3.1) begonnen und dem Elektromotor (Kapitel 3.5) das Kapitel geschlossen. Um ein Verständnis für das betrachtete System zu erlangen folgt eine skizzenhafte Darstellung:



3. Systemkomponenten

3.1 Wasserstoffspeicher

Die Speicher und die Speicherungsart von Wasserstoff stellen eines der wichtigsten Forschungsgebiete der vergangenen und folgenden Jahre dar. Aufgrund der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Wasserstoffes ist das Speicherverhalten sehr komplex. Die Speicherart sowie die gespeicherte Form von Wasserstoff hängen von den das Speichersystem umgebenden Faktoren ab. Schlussendlich entscheidet jedoch die Betriebswirtschaftlichkeit eines Systems über die praktische Umsetzung. Im nun folgenden Kapitel werden die Speichermöglichkeit von Wasserstoff und die dazu gehörigen realisierbaren Systeme beschrieben.

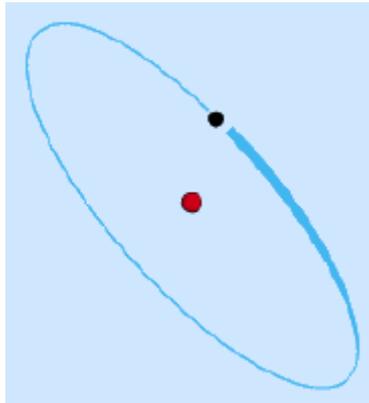


Abbildung 3.1-1: vereinfachtes Modell des Wasserstoffatoms [57]

3.1.1 Wasserstoff

Wasserstoff ist mit einer Häufigkeit von 92,7 % das mit Abstand am häufigsten im Universum vorkommende Element [2]. Neben Helium mit 7,2% kommen alle anderen Elemente im Universum nur zu 0,1% vor. Das sich im Weltall befindende interstellare Gas besteht fast ausschließlich aus Wasserstoff und besitzt ca. ein Wasserstoffatom pro cm^3 . Da Wasserstoff unter irdischen Verhältnissen nur in molekularer Form auftritt, beziehen sich alle Betrachtungen auf das Molekül Wasserstoff H_2 . Aufgrund seiner hohen Reaktivität ist Wasserstoff höchst selten in seiner Reinform zu finden. Dabei geht Wasserstoff am häufigsten die Bindung mit Sauerstoff zu Wasser H_2O ein.

3.1.1.1 Eigenschaften

Das Wasserstoffatom ist das kleinste und einfachste Atom. Es besteht nur aus einem Proton im Kern, das von einem Elektron umkreist wird. Es ist das erste Element im Periodensystem mit der Ordnungszahl 1. Das Wasserstoffatom hat einen Durchmesser von 0,07nm, seine molare Masse beträgt 1,0079 g/mol. Das freie Elektron bestimmt das chemische Verhalten des Wasserstoffatoms [2]. In der folgenden Tabelle sind die entscheidenden physikalischen Eigenschaften unter wichtigen Bedingungen genannt. Dies dient der Nachvollziehbarkeit der jeweiligen Speichersysteme.

3. Systemkomponenten

Tabelle 3.1-1 Eigenschaften von Wasserstoff

Eigenschaften	Wert [Einheit]
Molmasse	2,016 kg/kmol
Spezielle Gaskonstante R	4124 J/kgK
(gravimetrischer) Heizwert H_u	120 MJ/kg = 33,33kWh/kg
Brennwert B	142 MJ/kg = 38,44 kWh/kg
am Tripelpunkt:	
Temperatur (Schmelzpunkt)	-259,35°C (13,8K)
Druck	0,07 bar
Dichte gasförmig	0,125 kg/m ³
Dichte flüssig	77kg/m ³
Schmelzwärme	58,5 kJ/kg = 16,25 kWh/kg
am Siedepunkt bei Normaldruck 1,01325 bar:	
Siedetemperatur T_s	-252,85 °C (20,3 K)
Verdampfungswärme	445 kJ/kg = 123,7 kWh/kg
Flüssige Phase:	
Dichte	70,8 kg/m ³
(volumetrischer) Heizwert	8,5 MJ/dm ³ = 2,36 kWh/dm ³
Realgasfaktor	0,017
spezifische Wärmekapazität c_p	9,8 kJ/kgK
spezifische Wärmekapazität c_v	5,8 kJ/kgK
Wärmeleitfähigkeit	0,099 W/mK
Dynamische Viskosität	11,9 10 ⁻⁶ Ns/m ²
Schallgeschwindigkeit	1089 m/s
Dampfphase:	
Dichte	1,34 kg/m ³
(volumetrischer) Heizwert	0,16 MJ/dm ³
Realgasfaktor	0,906
spezifische Wärmekapazität c_p	12,2 kJ/kgK
spezifische Wärmekapazität c_v	6,6 kJ/kgK
Wärmeleitfähigkeit	0,017 W/mK
Dynamische Viskosität	1,11 10 ⁻⁶ Ns/m ²
Schallgeschwindigkeit	355 m/s
am kritischen Punkt:	
Temperatur	-239,95 °C (33,2 K)

3. Systemkomponenten

Druck	13,1 bar
Dichte	31,4 kg/m ³
bei Normalbedingungen 0 °C und 1,01325 bar:	
Dichte	0,09 kg/m ³
(volumetrischer) Heizwert	0,01 MJ/dm ³ = 2,8 Wh/dm ³
Realgasfaktor	1,0005
spezifische Wärmekapazität c_p	14,32 kJ/kgK
spezifische Wärmekapazität c_v	10,17 kJ/kgK
Isentropenexponent κ	1,4
Wärmeleitfähigkeit	0,184 W/mK
Diffusionskoeffizient	0,61 cm ² /s
Dynamische Viskosität	8,91 10 ⁻⁶ Ns/m ²
Dielektrische Konstante	1,00027
Schallgeschwindigkeit	1246 m/s
Gemische mit Luft:	
untere Explosionsgrenze (Zündgrenze)	4 Vol% H ₂ (λ =10,1)
untere Detonationsgrenze	18 Vol% (λ = 1,9)
stöchiometrisches Gemisch	29,6 Vol% H ₂ (λ =1)
obere Detonationsgrenze	58,9 Vol% (λ =0,29)
obere Explosionsgrenze (Zündgrenze)	75,6 Vol% H ₂ (λ =0,13)
Zündtemperatur	585 °C
minimale Zündenergie	0,017 mJ
maximale laminare Flammgeschwindigkeit	ca. 3 m/s
Adiabate Verbrennungstemperatur	ca. 2100 °C

Vorteile für die Verwendung von H₂ als zukünftigen Energiespeicher:

- umwandelbar in alle Energieformen
- Transport in gasförmigem, flüssigem und festem Zustand möglich
- gute Speicherbarkeit
- nachhaltiger Energieträger bei Gewinnung aus Wasser oder Biomasse

3. Systemkomponenten

Nachteile sind:

- Gefahrenmomente; Knallgas
- H₂ diffundiert leicht durch Spalten und Ritzen
- manche Metalle verspröden bei längerem Kontakt
- relativ geringe Energiedichte gegenüber anderen Gasen oder flüssigen Energieträgern wie beispielsweise Kraftstoffe
- Herstellung teilweise energieintensiv

(nach Rummich [40])

3.1.1.2 Chemische Reaktionen

Die wichtigste Eigenschaft des Wasserstoffs ist seine Fähigkeit, Elektronen aufzunehmen (Reduktion zum Hydridion H⁻) oder abzugeben (Oxidation zum Proton H⁺). In Gemischen mit Luft, Sauerstoff und Chlorgas reagiert Wasserstoff explosionsartig (Knallgas-, Chlorgasreaktion). Abgesehen davon ist das Molekül bei Raumtemperatur beständig.

Für chemische Verbindungen mit Wasserstoff ist allgemein die Bezeichnung „Hydrid“ üblich. Wasserstoff kann mit anderen Elementen Ionenbindungen, Metallbindungen oder Atombindungen eingehen. In metallischen Gittern lagert sich Wasserstoff in Gitterlücken ein. Diese Einlagerungen erfolgen meist bei erhöhter Temperatur, wobei der molekulare Wasserstoff an der Oberfläche der Metalle dissoziiert. Vanadium, Niobium und Tantal können bei 200 °C 5, 11 bzw. 22 Atomprozent Wasserstoff aufnehmen, ohne dass ihr kubisches raumzentriertes Gitter verzerrt wird. Höhere Einlagerungsraten führen zu sicherheitsbedenklicher Versprödung des Materials, sie resultieren aus der Verzerrung des Gitters und nehmen mit sinkender Temperatur zu. Vor allem mit Übergangsmetallen bildet der Wasserstoff Einlagerungsverbindungen, die teils große Mengen Wasserstoff binden. Palladium kann etwa ein 900-fach höheres Volumen an Wasserstoff aufnehmen, als sein Eigenvolumen beträgt [2].

3.1.1.3 Erzeugung

Um eine nachhaltige und unerschöpfliche Erzeugung von Wasserstoff zu gewährleisten, ist es zwingend erforderlich, auf alternative Energieträger zu setzen. Zurzeit werden weltweit circa 600 Milliarden Nm³ Wasserstoff pro Jahr erzeugt und verbraucht [2]. Davon sind 40% Nebenprodukt der Industrie. Die anderen 60% werden zum Großteil durch Reformierung fossiler Kohlenwasserstoffe erzeugt. Es werden Verfahren zur Wasserstoffgewinnung durch biologische und photochemische Prozesse erforscht. Allerdings liefern diese Prozesse meist Gasgemische, die erst separiert werden müssen. Die derzeit produzierten Mengen solcher organischer Produzenten erfüllen die technischen

3. Systemkomponenten

Anforderungen nicht. Es folgt ein kurzer Überblick über die wichtigsten Verfahren und deren Wirkungsgrade und die benötigten Energieträger.

Diagramm 3.1-1: Energieaufwand verschiedener Herstellungsverfahren von Wasserstoff [2]

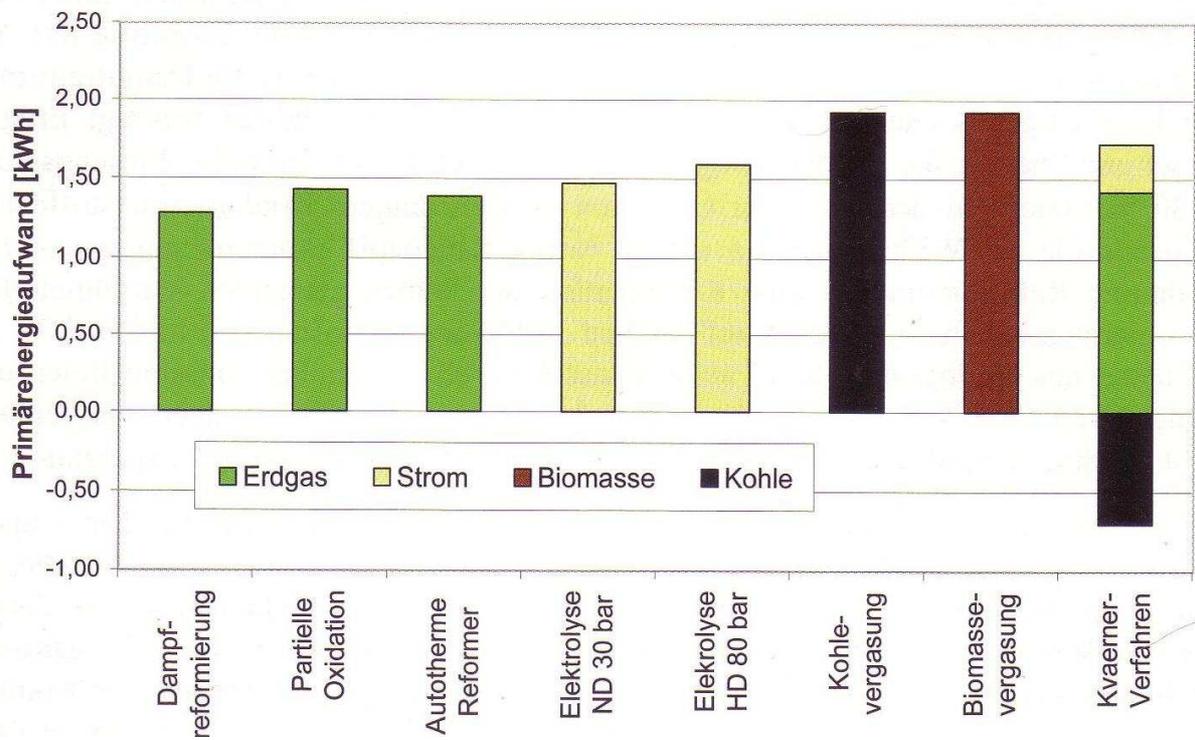
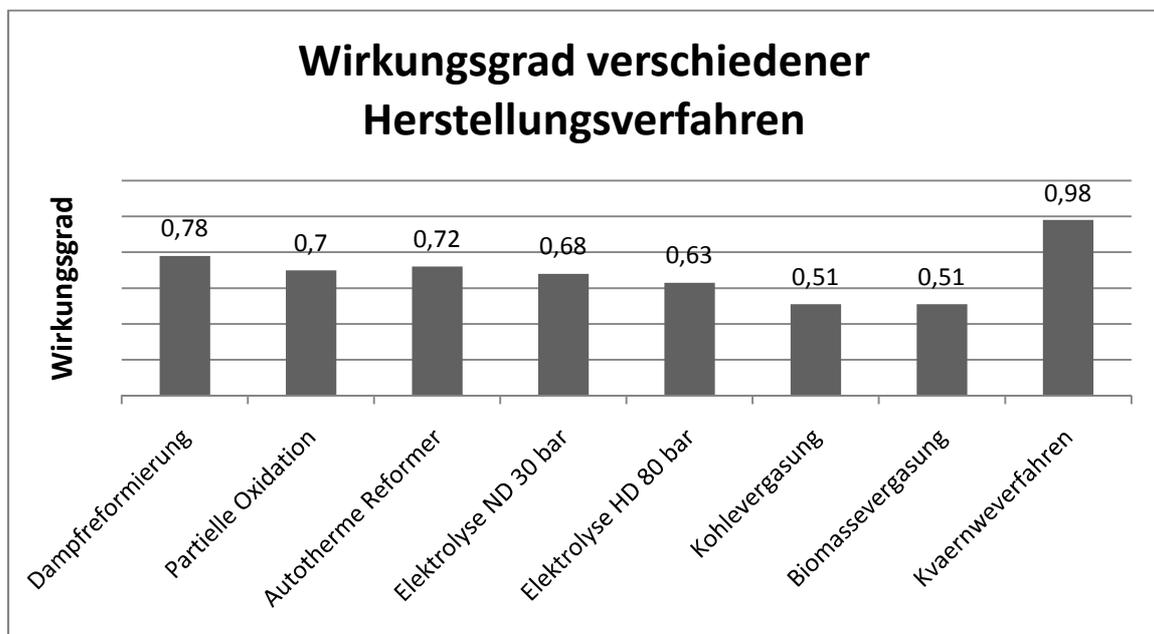


Diagramm 3.1-2: Wirkungsgrad verschiedener Herstellungsverfahren von Wasserstoff [2]



Zusammenfassend zeigt Diagramm 3.1-1 die zur Erzeugung von 1 Kilowattstunde Wasserstoff notwendige Primärenergie bei verschiedenen Herstellungsverfahren. In der Energiebilanz ist auch der Energieaufwand zum Bau der jeweiligen Anlage berücksichtigt. Die Wirkungsgrade der

3. Systemkomponenten

genannten Verfahren werden in Diagramm 3.1-2 dargestellt. Ausgehend von diesem Wissen ist zu erkennen, dass nur das Verfahren der Elektrolyse auf Dauer die Anforderungen nach Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit erfüllt.

3.1.2 Speichertypen und -methoden

Neben dem Brennstoffzellensystem (siehe Kapitel 3.2) ist der Wasserstoffspeicher die zweite entscheidende Komponente [13] im System. Gegenüber den konventionellen Kraftstoffen auf fossiler Basis ist die auf das Volumen bezogene gespeicherte Energiemenge in einem Wasserstofftanksystem deutlich geringer. Ohne einen adäquaten Wasserstoffspeicher ist das gesamte System (Rang Extender) nicht wirtschaftlich umsetzbar. Tabelle 3.1-2 zeigt verschiedene Umstände und ihre Auswirkungen auf die gespeicherte Energiemenge.

Tabelle 3.1-2 Dichte und Energiegehalt von Wasserstoff [2]

Wasserstoff	Druck [bar]	Temperatur [°C]	Dichte [kg/m³]	Energiegehalt In MJ	Energieinhalt In kWh
1 kg	1	25	0,08	120	33,3
1 Nm³	1	25	0,08	10,7	3,0
1 m³ Gas	200	25	14,5	1685	468
1 m³ Gas	350	25	23,3	2630	731
1 m³ Gas	750	25	39,3	4276	1188
1 m³ Gas	900	25	46,3	4691	1303
1 m³ flüssig	1	-253	70,8	8495	2360

3.1.2.1 Speichertypen

Je nach Anwendungsfall lassen sich folgende Speichertypen unterscheiden

- **Stationäre Großspeicher:** Speicher in der Produktions- und Transportebene, meist an der Produktionsstätte, am Anfang oder Ende von Pipelines und anderen Transportwegen. Der zu speichernde Wasserstoff muss grundsätzlich eine Maschinenanlage (Verdichteranlage, Kältemaschinen) durchlaufen, damit die Durchführung des Speicherzyklus ermöglicht wird. So muss beispielsweise bei Druckspeichern der Gasdruck angehoben werden, um eine Entladetiefe zu ermöglichen, oder bei LH₂-Speicher die Verflüssigung vorgenommen werden. Man unterscheidet also den speicherkapazitätsbezogenen Systemteil, d.h. das Speicherreservoir und den leistungsbezogenen Systemteil, d.h. die dazugehörige Maschinenanlage. Die Kosten beider Komponenten müssen bei der Kostenrechnung eines Großspeichers berücksichtigt werden.

3. Systemkomponenten

- **Stationäre Kleinspeicher:** Kleinere stationäre Speicher in der Verteilungs- und Endnutzungsebene, beispielsweise Speicher für die Bedarfsdeckung einer Industrieanlage. Hier brauchen im Allgemeinen nur die kapazitätsbezogenen Kosten berücksichtigt werden.
- **Mobile Speicher für Transport- und Verteilungszwecke:** Dies können sowohl Großspeicher (LH₂-Tanker) wie auch Kleinspeicher (LH₂-Trailer) sein, wobei das gemeinsame Merkmal Mobilität zum Transportzweck sein soll. Als Kostenkomponenten sind hier die – kapazitätsabhängigen – Investitionskosten, eventuelle Wasserstoffverluste während des Transports und die Antriebskosten („Betriebskosten“) zu betrachten.
- **Kraftstoffreservoirs:** Mobile Behälter zur Speicherung der für Wasserstoff angetriebene Kraftfahrzeuge benötigten Wasserstoffmenge (Kfz-Tanks). Obwohl in diesem Fall das Fahrzeug nicht zum Wasserstofftransport dient, sondern ihm eine andere „Nutzung“ zugewiesen wird, sollen die unter Umständen erheblichen Kosten, welche durch den „Mittransport“ der Tankmasse entstehen, zu den Betriebskosten zugeschlagen werden.

Einteilung der Speichertypen nach Carl-Jochen Winter und Joachim Nitsch [11].

Die Einteilung ist notwendig, um verschiedene Kosten ihren Stellen zuzuordnen. Das heißt zum Beispiel, die Verflüssigung des Wasserstoffes ist ein Kostenpunkt der bei Stationären Großspeichern anfällt, Verluste beim Umfüllen/Tanken sind Kostenstellen, die zwischen allen Speichern auftreten.

Zu den vielversprechendsten heute bekannten Verfahren zählen die Wasserstoffspeicherung in chemischen und reversiblen metallischen Hydriden, sowie die Speicherung über Kryoadsorption und Physisorption [13].

3. Systemkomponenten

3.1.2.2 Speicherungsmethoden

Die Wasserstoffspeicherung nach „konventionellen“ Methoden, wie Druckspeicherung und Flüssigspeicherung, ist erprobt und für entsprechende Anwendungen wirtschaftlich [11].

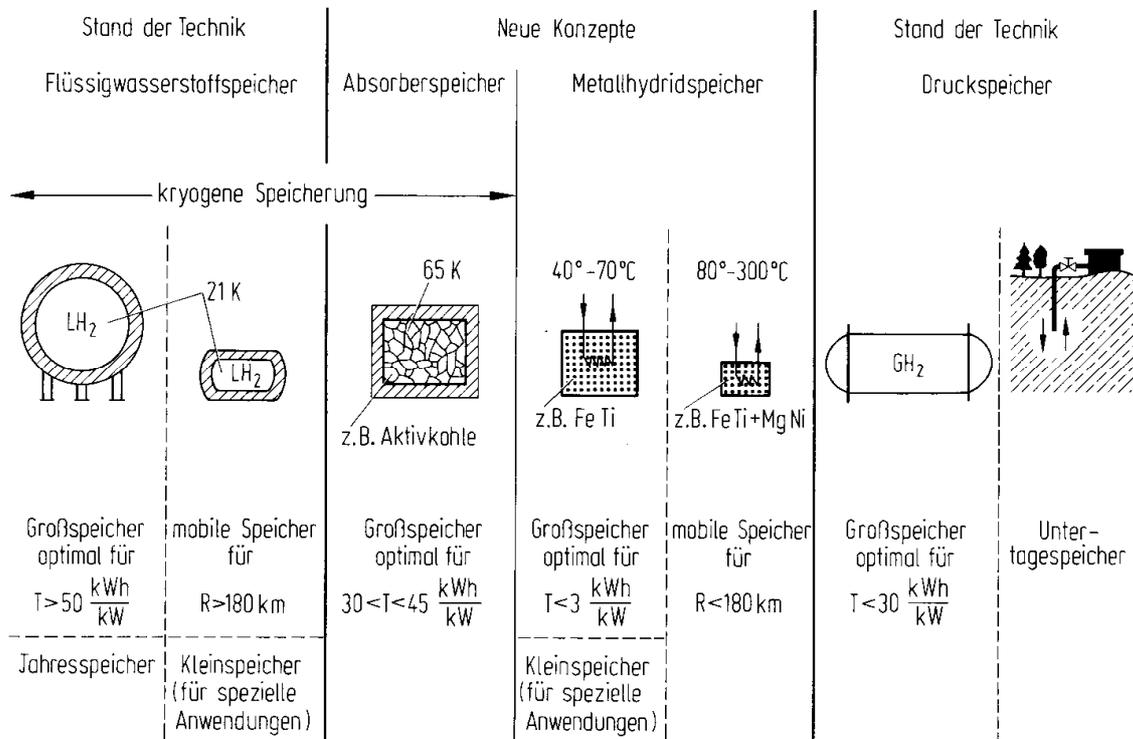


Abbildung 3.1-2: Verschiedene Konzepte zur Wasserstoffspeicherung (schematische Darstellung)

Die optimalen Anwendungsbereiche werden für stationäre Großspeicher durch den Parameter T (spezifische Kapazität, kWh/kW) und für mobile Speicher durch den Parameter R (Reichweite, km) definiert [11].

Die Abbildung 3.1-2 bezieht sich auf den Stand von 1986. Die Grundgedanken sind heute immer noch gleich. Es sind keine nennenswerten neuen Möglichkeiten, Wasserstoff zu speichern, dazu gekommen. Die in Abbildung 3.1-2 als „Neue Konzepte“ beschriebenen Speicher sind nach heutigen Grundsätzen erforscht und technisch zu realisieren.

Druckspeicher

In der Regel wird Wasserstoff mit Drücken zwischen 200 und 350 bar gespeichert. Tanks mit über 700 bar Speicherdruck sind derzeit in der Erprobung. Die gasförmige Speicherung von Wasserstoff bildet ein geschlossenes System, d.h. gasförmiger Wasserstoff kann auch über längere Zeit verlustfrei gespeichert werden, vorausgesetzt die eingesetzten Materialien verhindern die Diffusion des Wasserstoffs [2]. Bei einer solch hohen Verdichtung beträgt der Wirkungsgrad der Verdichtung circa 0,85. Hinzukommen Verluste durch Be- und Entladung. Gleichzeitig steigen mit steigendem Druck auch die Komplexität und das Gewicht des Tanks. Derzeit liegt das Speichergewicht bei 20 bis 40 kg je

3. Systemkomponenten

Kilogramm gespeicherten Wasserstoffs. Dies entspricht einer gravimetrischen Speicherdichte von 5 bis 2,5 %. Aus Platzmangel sind in der Fahrzeugindustrie Freiformtanks erwünscht. Diese sind zur Zeit noch nicht umsetzbar, da es an entsprechenden Werkstoffen fehlt. Es wird aber mit Nachdruck dazu geforscht. Verwendung finden bevorzugt Zylindertanks. Druckgase werden seit langem in Zylindern verschiedenen Größen gelagert und mit Maximaldrücken in Österreich 200 bar und Deutschland 300 bar vertrieben. Wasserstoffflaschen mit einem Volumen von 1 bis 5 l sind ohne Weiteres erhältlich. Um Gewicht einzusparen und gleichzeitig die hohen Anforderungen einzuhalten, werden vermehrt Composite-Behälter verwendet. Dabei besteht der Innenbehälter (Liner) aus Metall (Stahl oder Aluminium) und sorgt so für Dichtigkeit. Um die Stabilität und Festigkeit zu gewährleisten ist der Liner mit einem Netz von Kohlenstoff-Fasern umgeben. Der so gewonnene Gewichtsvorteil ist mit höheren Produktionskosten erkauft.

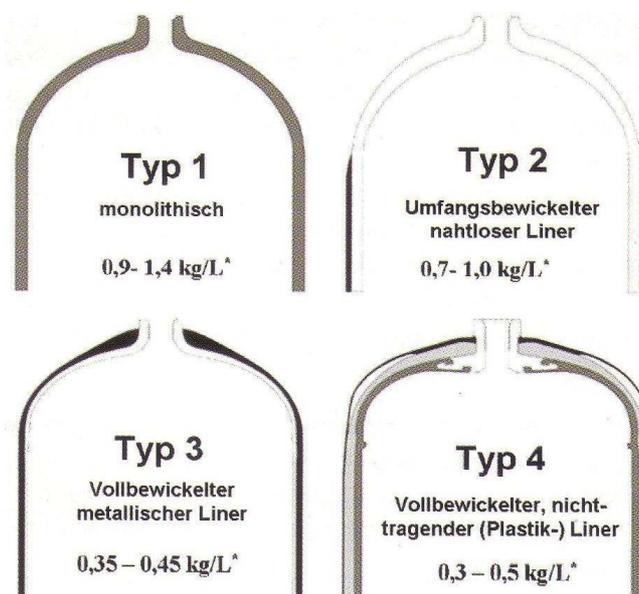


Abbildung 3.1-3: Druckflaschen Wasserstoff [14]

Außer dem Gastank werden Ventile zum Reduzieren der Drücke, sowie Gasleitungen, Sensorik zum Überwachen von Drücken, Temperatur und Dichtigkeit benötigt [2]. In Abbildung 3.1-4 ist ein Tanksystem mit Anschluss verschiedener Sensoren zu sehen.

3. Systemkomponenten

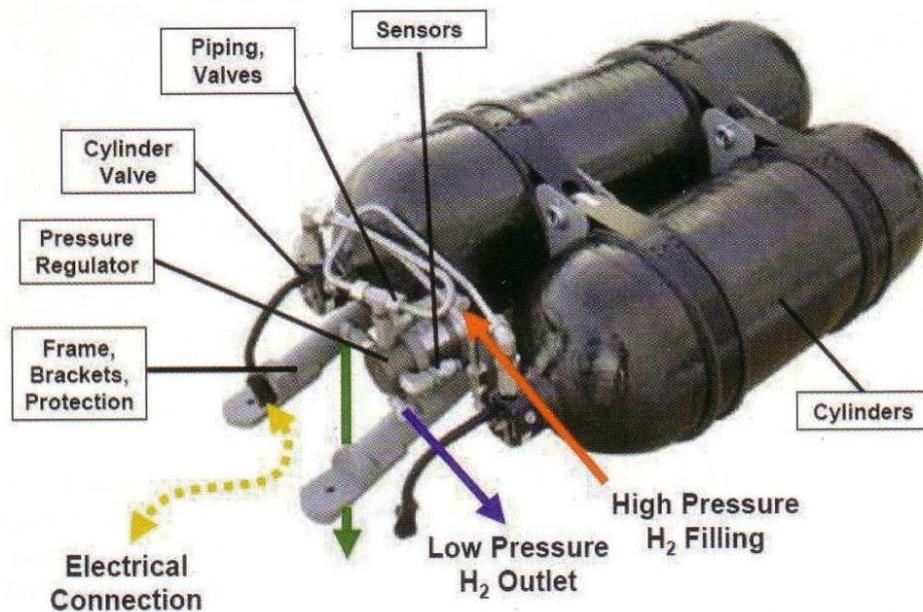


Abbildung 3.1-4: Fahrzeugtank für 350 bar CGH₂ [14]

Flüssigwasserstoffspeicherung

Diese Art der Speicherung ist von besonderer Wichtigkeit, weil sie technisch-wirtschaftlich günstige Lösungen bietet. Dies gilt sowohl für Großspeicher und mobile Speicher, als auch für Wasserstoffbetriebene Kraftfahrzeuge [11]. Derzeit in Betrieb stehende Anlagen in den USA verflüssigen mit einem Wirkungsgrad von 0,7. Es gibt dabei zwei grundlegende Verfahren, das Hochdruck- und das Niederdruckverfahren. Für die automotive Anwendung sind sogenannte Kryospeicher von hohem Interesse, da diese Systeme den verflüssigten Wasserstoff tiefkalt, bei Temperaturen von wenigen Kelvin, speichern. Allerdings benötigt die Verflüssigung, wie bereits erwähnt einen nicht unerheblichen Energieaufwand Außerdem stellt flüssiger Wasserstoff hohe technische Anforderungen an die Anlagen. Kryospeicher bestehen aus einem Innen- und Außentank. Beide sind zumeist durch ein Vakuum getrennt, um Wärmeverluste durch Konvektion zu vermeiden. Die Tanks bestehen aus austenitischem Edelstahl, der auch bei sehr niedrigen Temperaturen sein gutes Verformungsvermögen behält. Außerdem neigen die Tanks nicht zur Versprödung [2].

Die Isolation besteht im evakuierten Bereich aus MLI (Multi Layer Insulation) mit mehreren Lagen Aluminiumfolie im Wechsel mit Glasfaser-Matten, die die Wärmestrahlung minimieren soll. Ein Wärmeverlust tritt an allen Leitungen und Durchführungen, sowie bei Befüllung und Entnahme, am Behälter auf. Durch den unvermeidbaren Wärmeeintrag kommt es zum Verdampfen von Wasserstoff im Behälter und damit zu einer Zunahme von Druck und Temperatur. Die Behälter für flüssigen Wasserstoff sind daher stets mit einem geeigneten Druckentlastungssystem und einem Sicherheitsventil auszustatten. Die Flüssigspeicherung erfolgt also in einem offenen System, bei dem nach einer Druckaufbauphase ab Erreichen des sogenannten Boil-Off-Drucks Wasserstoff abgelassen

3. Systemkomponenten

werden muss. Die Abdampfverluste liegen bei heutigen Tankanlagen in der Größenordnung von 0,3 % bis 1 % pro Tag, wobei größere Tankanlagen wegen der geringeren Oberfläche im Verhältnis zum Volumen im Vorteil sind [2]. Es werden auch hier aus Kostengründen meist Zylindertanks gewählt, so in Abbildung 3.1-5 von der Firma Magna-Steyr zu sehen.



Abbildung 3.1-5: LH₂-Tanksystem für automotive Anwendung [15]

Der Betriebsdruck eines Kryospeichers sollte bei 2 bis 4 bar liegen. Der im Behälter verdampfte Wasserstoff kann dann katalytisch verbrannt oder mittels einer Brennstoffzelle zur Stromerzeugung verwendet werden. Aufwändig wird das System durch sämtliche Nebenaggregate, Elektronik, Steuerung zur Befüllung, Druckregelung etc. Auch die benötigte Infrastruktur für flüssigen Wasserstoff ist höchst komplex. Sämtliche Leitungen und Anschlüsse müssen aus hochwertigem Material und isoliert sein. Siehe hierzu das Kapitel 4.4 „Sicherheit“. Das Flüssigwasserstofftanksystem von der Firma MAGNA in Graz hat ein Volumen von ca. 170 Litern und fasst ca. 10 kg Wasserstoff bei einem Eigengewicht von ca. 150 kg. Es erlaubt eine Reichweite von ca. 250 km für einen Mittelklassewagen. Eine interessante Kombination aus Kryo und Drucktank stellt das Konzept Kryo-Drucktank dar. Dieser wird mit flüssigem Wasserstoff befüllt und weist damit den Vorteil der höheren volumetrischen Energiedichte auf. Um Boil-Off Verluste zu vermeiden, ist der Tank als geschlossenes System ausgeführt, das heißt, durch das Verdampfen von flüssigem Wasserstoff steigt der Druck im System, bis im Extremfall der Wasserstoff wie in einem Drucktank gasförmig vorliegt [2]. Allerdings können dabei Drücke von weit über 1000 bar entstehen. Außerdem müsste beim Betanken der Druck ausgeglichen oder abgesenkt werden. Das stellt einen hohen Aufwand bei der Betankungstechnik dar.

3. Systemkomponenten

Speicherung in physikalisch und chemisch gebundener Form

Wasserstoff kann mit vielen anderen Stoffen eine physikalische oder chemische Verbindung eingehen, dabei sind verschiedene Aggregate (fest, flüssig, gasförmig) möglich. Als Bewertungskriterien für die Eignung einer Verbindung als Wasserstoffspeicher sind zu nennen:

- Wasserstoffmenge, die pro Gewichts- und Volumeneinheit gespeichert wird,
- Bedingungen für die Be- und Entladung des Speichers (Temperatur, Druck, Kinetik), und
- Anzahl der möglichen Beladungszyklen (Lebensdauer)[2].

Obwohl theoretisch sehr hohe gravimetrische und volumetrische Speicherdichten möglich sind, sind aktuell nur Feststoffspeicher mit 3 Masseprozent Wasserstoff erhältlich. Durch den Einsatz eines speziellen Typs von Titan-Nanopartikeln sind Be- und Entladezeiten von 7 bis 8 Minuten unter Laborbedingungen zu schaffen [16].

Physikalische Adsorption auf Festkörperoberflächen

In Abhängigkeit von Druck und Temperatur adsorbiert Wasserstoff physikalisch in molekularer Form oder chemisch in atomarer Form auf Festkörperoberflächen. Bei der physikalischen Adsorption (auch Physisorption) kommt es zur Bindung durch Wechselwirkungen ohne strukturelle Änderung des Wasserstoffmoleküls. Die Bindungsenergie ist bei der physikalischen Adsorption deutlich geringer. Der Werkstoff sollte eine große Oberfläche (Poren) besitzen, um die Speicherfläche zu maximieren [2].

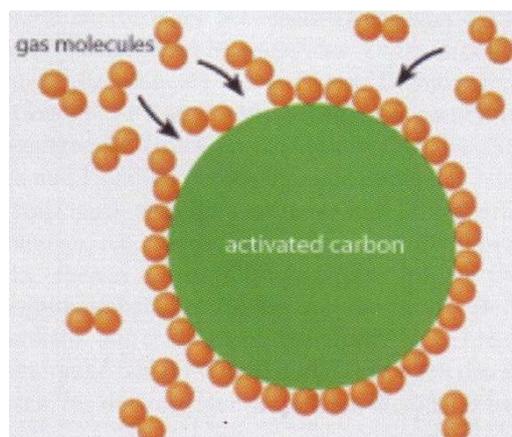


Abbildung 3.1-6: Physikalische Adsorption von Wasserstoff [19]

Die physikalische Adsorption von Wasserstoff auf Kohlenstoff (siehe Abb. 3.1-6) wurde eingehend untersucht. Kohlenstoffatome können Fullerene bilden, das sind mehrere fünf- und sechseckige Kohlenstoffringe, die zusammen ein Gitter formen. Diese Gitter können zu zylindrischen Röhren aufgerollt werden, so genannte Nanotubes. Durch physikalische Adsorption an der Oberfläche dieser

3. Systemkomponenten

Gitter wird Wasserstoff bei meist niedrigen Temperaturen von 50 K bis 80 K gespeichert[2]. Nach anfänglicher Euphorie, man sagte 1998 Speicherdichten von über 60 Gewichtsprozent Wasserstoff voraus [17], konnten bisher Speicherdichten von 3 bis 5 Gewichtsprozent umgesetzt werden [18]. Da auch die Widerfreisetzung von Wasserstoff viele Probleme bereitet, sind noch keine Nanospeicher am Markt etabliert [2].

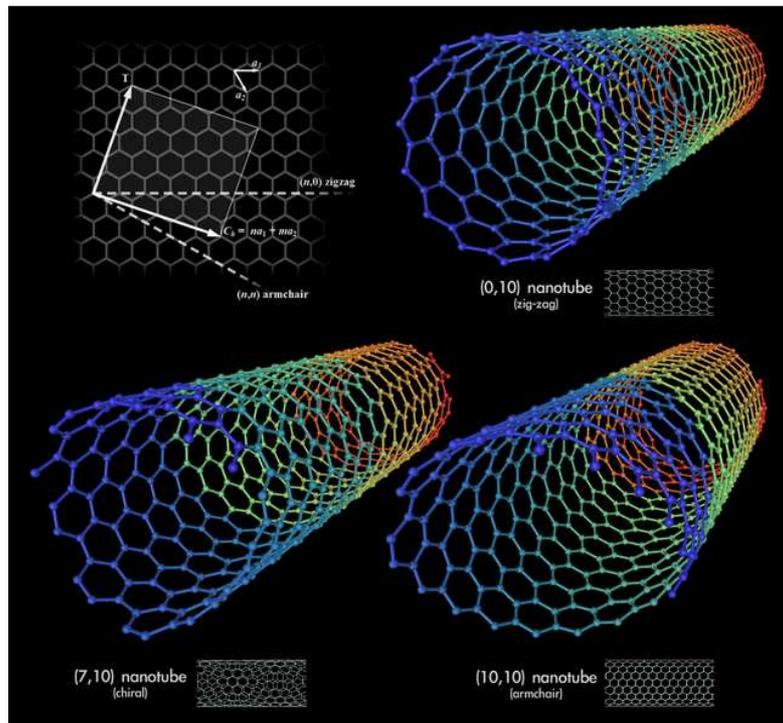


Abbildung 3.1-7: Struktur Nanotubes [20]

Untersucht wird auch die Adsorption an anderen Strukturen, wie Microsheres (siehe Abb. 3.1-7). Neue Forschungen sprechen auch davon, dass einige Kunststoffe (Polyanilin, Polypyrrol) bis zu 8 Gewichtsprozent Wasserstoff speichern können. Die Verfahren befinden sich allerdings noch im Laborforschungsstadium [2]. Ein sehr vielversprechendes Verfahren der Wasserstoffspeicherung, zu dem jedoch momentan noch Grundlagenforschung betrieben wird, ist die *Graphitnanofaserverspeicherung*. Dabei lagert sich Wasserstoff bei einem Druck von 136 bar in mehreren Lagen auf Graphitfasern, mit Querschnitten von 5 - 100 nm und Längen von 5 - 100 μm , an. Der Anlagerungsmechanismus ist noch nicht genau geklärt, jedoch wird vermutet, dass sowohl Absorption als auch Adsorption stattfinden. In Graphitnanospeichern (GNF) sollen zwischen 7,5 und 75 % des Karbongewichts in Form von Wasserstoff gespeichert werden können. Die Northeastern University in Boston hat in ersten Versuchen mit sogenannten Carbonnanotubes bereits eine Speicherfähigkeit von 10 bis 15 % des Karbongewichts nachgewiesen. Ein GNF-Fahrzeugtank von etwa 25 l Volumen und 15 kg Graphitmasse könnte einem viersitzigen Kleinwagen mit Brennstoffzellenantrieb umgerechnet mindestens 1.500 km Reichweite ermöglichen, evtl. auch

3. Systemkomponenten

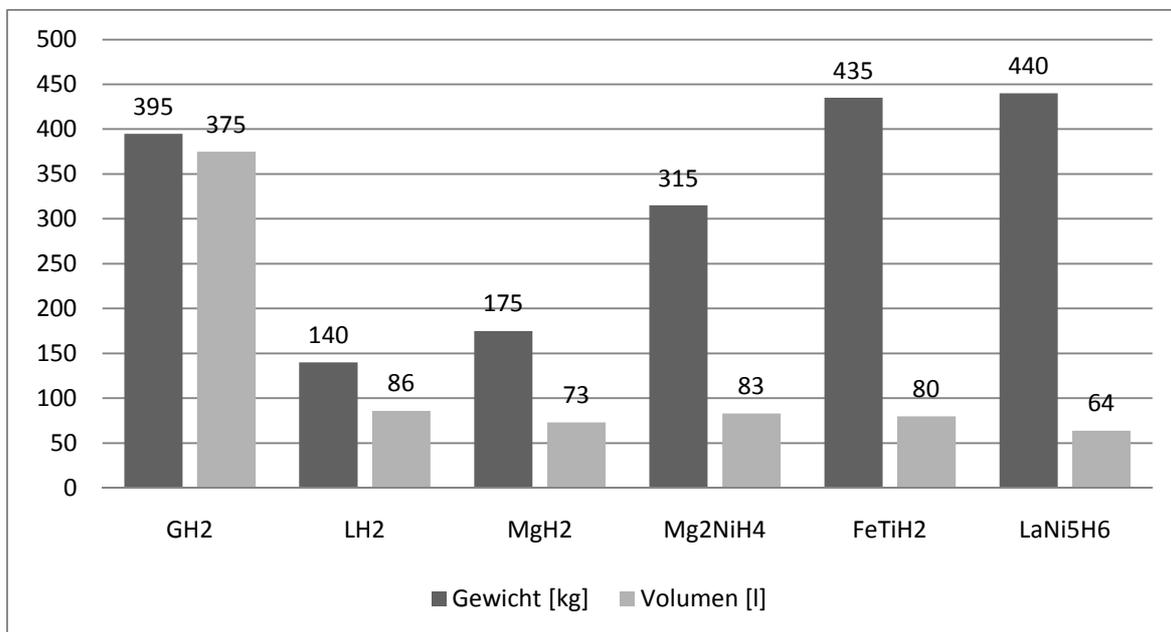
deutlich mehr (bis zu 6000 km werden vermutet). Durch diese extrem hohe Speicherdichte ist es auch vorstellbar, dass die Betankung eines Fahrzeuges beispielsweise durch das Auswechseln von Kartuschen erfolgen könnte und anstelle des Fahrzeugtankes sich ein Steckplatz für die Kartuschen im Fahrzeug befinden würde [23].

Chemische Adsorption in Hydriden

Wegen der hohen Reaktivität von Wasserstoff existieren verschiedene Verbindungen, so z.B. mit Halb- und Nichtmetallen aus der 3. bis 7. Hauptgruppe, ionischen Verbindungen (salzartige Hydride) und metallischen Hydriden.

Die metallischen Hydride sind die wichtigsten Wasserstoffspeicher, wie zum Beispiel Palladium, Magnesium, Lanthan, Aluminium oder auch Legierungen aus diesen Metallen. Dabei werden Wasserstoffatome chemisch in das Metallgitter eingebunden. Das Interesse der Forscher richtet sich insbesondere auf intermetallische Verbindungen, die aus einem Element mit hoher Wasserstoffaffinität und aus einem Element mit niedriger Wasserstoffaffinität bestehen (z.B. $ZrMn_2$, $LaNi_5$, Mg_2Ni) [2]. Das folgende Diagramm 3.1-3 zeigt die verschiedenen Metallhydridspeicher im Vergleich zu Gewicht und Volumen.

Diagramm 3.1-3 Metallhydridspeicher Verleich, für Reichweite von 500 km [21]



Zurzeit wird $NaAlH_4$, dotiert mit Ti, als bestes Speichermaterial angesehen. Der Universität Heidelberg ist es gelungen kostengünstige Wasserstoffmaterialien zu entwickeln, die eine schnelle reversible Aufnahme/Abgabe von Wasserstoff unter annehmbaren Bedingungen sicherstellen. Die innovativen Materialien sind Bor-, Aluminium oder Galliumverbindungen und können hinsichtlich der

3. Systemkomponenten

gewünschten Anwendung maßgeschneidert werden. Sie sind entweder als molekularer, oligomerer oder polymerer Feststoff, aber auch in flüssiger Form einsetzbar [22].

3.1.3 Systemspeicher

Für ein Fahrzeug sind bestimmte Rahmenbedingungen bei der Auswahl eines Tanksystems von großer Bedeutung. Der begrenzte Raum und das Gewicht spielen dabei eine große Rolle. Außerdem müssen weitere sicherheitsrelevante Faktoren erfüllt werden. Die Produktionskosten von Tanksystemen sind stark abhängig von den Stückzahlen und den Rohstoffkosten. Am Markt sind aktuell zwei Tanksysteme etabliert und in großen Stückzahlen erhältlich. Diese sind zum einen der Druckspeicher und der Flüssigwasserstoffspeicher. Alle anderen Tanksysteme befinden sich noch im Forschungsstadium oder sind nicht in ausreichender Stückzahlen erhältlich. Beide Systeme, sowohl Druckspeicher als auch Flüssigwasserstoffspeicher, sind seit Jahren im realen Betrieb und haben sich bewährt. Die hohen Sicherheitsanforderungen an Tankanlagen stellen ein zu lösendes Problem dar. Die Gewichtsnachteile müssen bei der Einführung von Wasserstofffahrzeugen in Kauf genommen werden. Die Verwendung von Nanotubes Graphitnanofasern ist auch in ferner Zukunft fraglich, da es immer wieder Meldungen über extreme Gesundheitsgefährdungen gibt. Auch die Kosten und viele umsetzungsrelevante Fragen sind nicht geklärt. Sinnvoll in großen Stückzahlen derzeit zu realisieren ist einzig allein ein Druckspeicher.

3. Systemkomponenten

3.2 Die Brennstoffzelle

Schon 1838 wurde von Christian Friedrich Schönbein das Funktionsprinzip entdeckt und im folgenden Jahr von Sir William Robert Grove in Form der ersten Brennstoffzelle umgesetzt. Doch bis heute fristet die Brennstoffzelle eine Nischendasein (Raumfahrt, Spezialanwendungen).

3.2.1 Funktion und Aufbau einer Brennstoffzelle

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler. Sie wandeln chemische Energie direkt in elektrische Energie um. Die Besonderheit einer Brennstoffzelle besteht darin, dass der Brennstoff nicht direkt mit dem Luftsauerstoff reagiert, sondern seine Elektronen zunächst an die Anode abgibt. Über den äußeren Stromkreis des Verbrauchers fließen die Elektronen zur Kathode und werden dort erst vom anderen Reaktionspartner, meistens Luftsauerstoff, aufgenommen. Man kann das Funktionsprinzip auch als Umkehrung der Elektrolyse bezeichnen [24].

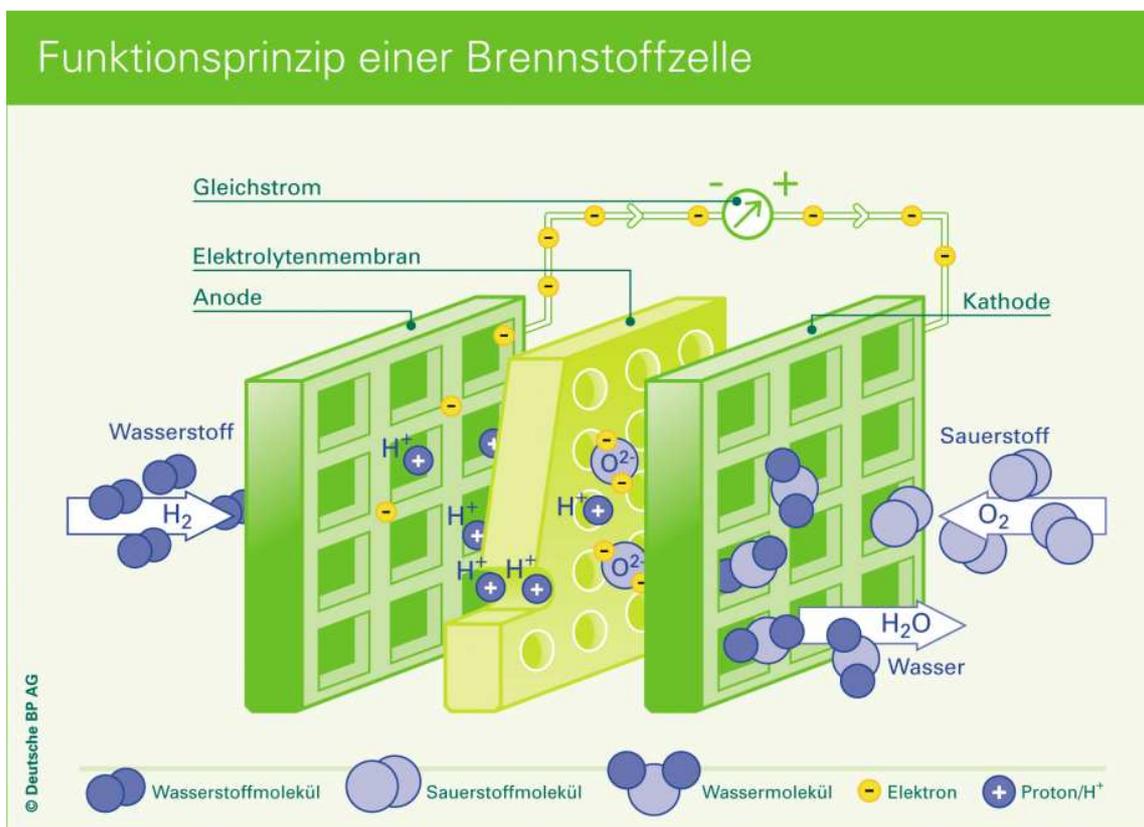
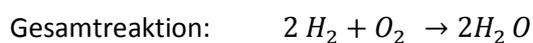
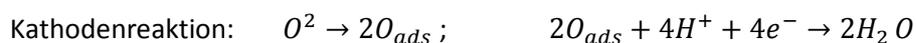
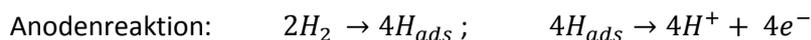


Abbildung 3.2-1 Aufbau und Funktion einer Brennstoffzelle [25]



3. Systemkomponenten

Die Reaktionsgleichungen zeigen die Einfachheit der chemischen Grundprozesse. Vernachlässigt wurden Nebenprozesse, die zur Alterung bzw. zum Verschleiß einzelner Bauelemente der Brennstoffzelle führen.

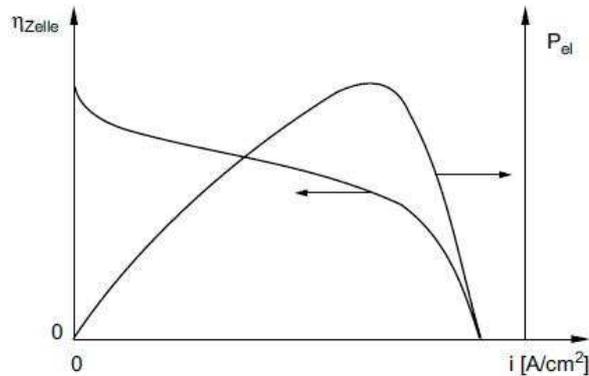


Abbildung 3.2-2: Wirkungsgrad und Leistung einer Zelle als Funktion der Stromdichte

Da die elektrische Zelleistung das Produkt von Strom und Spannung der Zelle ist, ergibt sich das Leistungsmaximum kurz vor dem rapiden Anstieg der Diffusionsverluste (Abbildung 3.2-2). Somit muss bei der Systemauslegung bei den Brennstoffzellen ebenso wie bei den Anlagen der konventionellen Energieerzeugung ein Kompromiss zwischen hoher Leistungsdichte und hohem Wirkungsgrad gesucht werden [79].

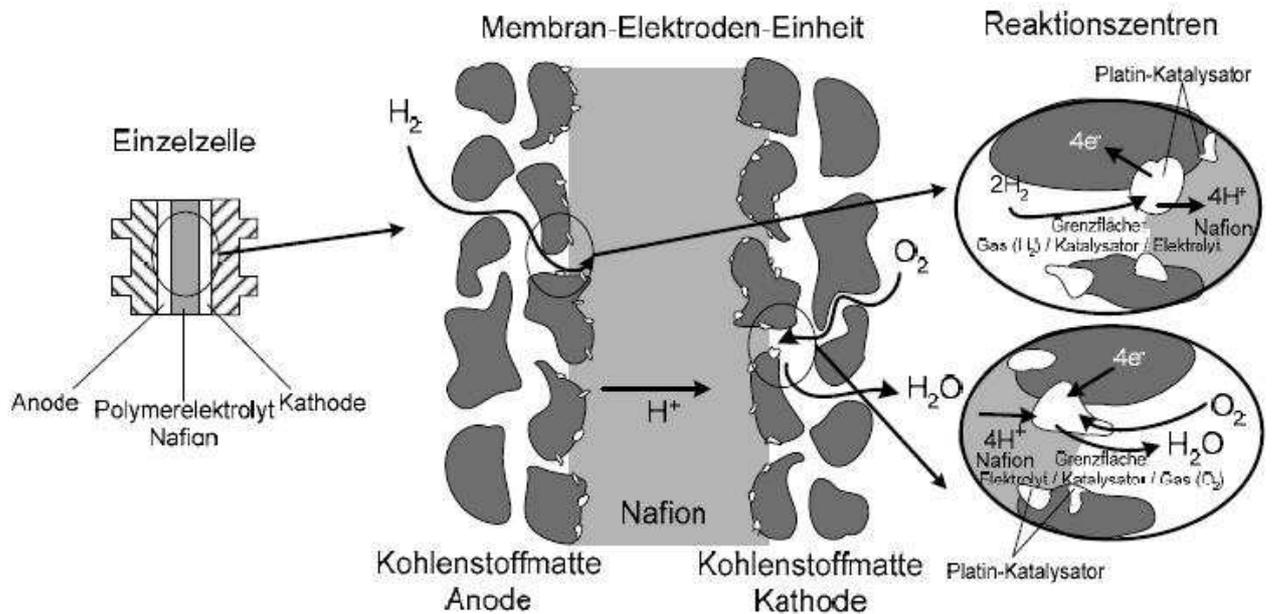


Abbildung 3.2-3: Schnitt durch eine PEMFC [79]

3. Systemkomponenten

In der Abbildung 3.2-3 wird deutlich wie wichtig ein poröses Elektrodenmaterial und dessen katalytischen und elektrisch leitenden Eigenschaften sind. Die wichtigste Funktion übernimmt das Platin bei der Katalyse, sowie das Nafion beim Protonentransport.

3.2.2 Brennstoffzellentypen

Es gibt verschiedene Arten von Brennstoffzellen, dies sind die Bekanntesten:

Tabelle 3.2-1 Brennstoffzellentypen [26]

Typ	Betriebs- temperatur	Elektrolyt	Ionen- leitung	CO ₂ - Verträglichkeit	Brennstoff	Temp.- Bereich
AFC	60 °C bis 80 °C	Wässrige Kalilauge	OH ⁻	≤ 1 ppm	H ₂	NT
PEMFC						
DMFC	ca. 80 °C	Protonenleit- ende Membran	H ⁺	-	CH ₃ OH	NT
NT- PEMFC	60 °C bis 120 °C	Protonenleitende Membran	H ⁺	≤ 100 ppm	H ₂	NT
HT- PEMFC	120 °C bis 200 °C	Protonenleitende Membran	H ⁺	≤ 500 ppm bis 1 %	H ₂	NT
PAFC	160 °C bis 200 °C	Konzentrierte Phosphorsäure	H ⁺	≤ 1 %	H ₂	NT
MCFC	ca. 650 °C	Karbonat- Schmelze	CO ₃ ²⁻	verträglich	H ₂ CO	HT
SOFC	ca. 1000 °C	Dotiertes Zirkoniumdioxid	O ⁻	verträglich	H ₂ CO	HT

Sie werden unterteilt in:

- Hochtemperatur Brennstoffzellen HT (500 - 800°C)
- Niedertemperatur Brennstoffzellen NT (0 - 80°C)

3. Systemkomponenten

Einen Überblick über die Einsatzgebiete und Eigenschaften gibt Tabelle 3.2-2.

Tabelle 3.2-2 Brennstoffzellentypen und ihre Eigenschaften [26]

Brennstoffzelle	Leistung [kW]	elektrischer Wirkungsgrad [%]	Anwendung
AFC	10-100	Zelle 60-70, System 60	Raumfahrt, Fahrzeuge
PEMFC	0,1-500	Zelle 50-70, System 30-50	Raumfahrt, Fahrzeuge
DMFC	0,01-1	Zelle 20-30	Kleingeräte
PAFC	bis 10.000	Zelle 55, System 40	Kleinkraftwerke
MCFC	bis 100.000	Zelle 55, System 50	Kraftwerke
SOFC	bis 100.000	Zelle 60-65, System 55-60	Kraftwerke mit APU

Bei der Betrachtung der Tabelle 3.2-2 und 3.2-3 ist erkennbar, dass für den mobilen Einsatz nur zwei Systeme in Frage kommen. Das sind AFC und PEMFC, beide kommen aufgrund ihrer Leistung und Betriebstemperatur in die engere Auswahl. Der unterschiedliche Wirkungsgrad zwischen Zelle und System resultiert durch Kopplungsverluste der Zellen miteinander, dazu gehören zum Beispiel Kühlsysteme.

3.2.3 Kenngrößen einer Brennstoffzelle

Wie jedes andere Gerät bzw. jede andere Anlage auch werden Brennstoffzellen

durch bestimmte Kenngrößen charakterisiert. Die Wichtigsten davon sind die Folgenden:

Stromdichte

Diese Kenngröße charakterisiert die Leistungsfähigkeit einer Brennstoffzelle. Sie wird in mA/cm² gemessen, gelegentlich auch in A/ft². Beide Größen sind aber fast identisch, denn 1 mA/cm² entspricht 0,8 A/ft². Weil diese Kenngröße auch von der Zellspannung abhängt, bezieht man die Stromdichte üblicherweise auf eine Zellspannung zwischen 0,6 und 0,7 V. Die Stromdichte hängt hauptsächlich von der effektiven Zellfläche ab. Diese Fläche ist in der Regel tausendmal größer als ihre mechanische Fläche. Dies wird, wie erwähnt, durch die poröse Gestaltung der Oberfläche der Elektroden erreicht. Eine Linearität zwischen den beiden Größen existiert aber nicht. Eine Verdoppelung der Zellfläche führt also nicht unbedingt zu einer Verdoppelung der Stromdichte. Die Gründe dafür sind bisher nicht ganz geklärt. Sie hängen aber höchstwahrscheinlich mit chemischen Reaktionen zusammen, die sich an den Elektroden abspielen.

3. Systemkomponenten

Stromkennzahl

Als Stromkennzahl S_k bezeichnet man das Verhältnis von der gewonnenen elektrischen Energie zu der gewonnenen Wärmeenergie. Mit steigender elektrischer Leistung einer Brennstoffzelle steigt auch ihre Stromkennzahl und entsprechend sinkt die erzeugte Wärmeenergie. Damit kann man zwischen wärmegeführtem und stromgeführtem Betrieb wahlweise wechseln. Üblicherweise kann die Stromkennzahl zwischen 1,3 und 0,6 eingestellt werden. Beträgt z.B. die Gesamtleistung einer Brennstoffzelle 100 kW und die Stromkennzahl $S_k = 1$, dann liefert diese Brennstoffzelle 50 kW elektrische Energie und 50 kW Wärmeenergie. Bei $S_k = 1,2$ beträgt die elektrische Energie 55 kW und die Wärmeenergie 45 kW. Bei $S_k = 0,6$ sinkt die elektrische Energie auf 38 kW, und die Wärmeenergie steigt auf 62 kW.

Leistung

Mit dieser Kenngröße wird die Gesamtleistung (elektrische und thermische) einer Brennstoffzelle charakterisiert. Sie wird in W-, kW- oder MW-Einheiten angegeben. Neben dieser Kenngröße wird meistens auch die elektrische (Wel.) bzw. die thermische Leistung (W_{th.}) zusätzlich genannt.

Leistungsdichte

Die Leistungsdichte charakterisiert die volumetrische Leistungsfähigkeit einer Brennstoffzelle. Sie wird in kW/m³ angegeben.

Spezifische Leistung

Diese Kenngröße charakterisiert die massenbezogene Leistungsfähigkeit einer Brennstoffzelle. Sie wird in W/kg angegeben.

Wirkungsgrad

Es wurde gezielt dargelegt, dass auch die Brennstoffzelle wie jeder andere Energiewandler einen Wirkungsgrad hat, der stets kleiner als 1 bzw. kleiner als 100% ist. Bei Brennstoffzellen unterscheidet man zwischen dem System- und dem Stack-Wirkungsgrad. Der erste Wert ist kleiner als der zweite, weil auch die Zusatzeinrichtungen des Systems «Brennstoffzelle» Energieverluste verursachen.

Lebensdauer

Die Lebensdauer kann nicht mit konkreten Zahlen angegeben werden, weil die Grenzen für die Lebensdauer einer Brennstoffzelle schwer definierbar sind. Deswegen wird meistens der Begriff «Degradation» verwendet. Dieser Begriff gibt den prozentualen Leistungsabfall einer Brennstoffzelle pro Betriebsstunde an. Als Maßeinheit hierfür wird der Wert mV/1000 Betriebsstunden verwendet. Will man dennoch die Lebensdauer einer Brennstoffzelle in Zahlen angeben, so gelten z. Zt. Werte zwischen 40000 Betriebsstunden für stationäre und 5000 Betriebsstunden für mobile Systeme.

3. Systemkomponenten

Leistungsspezifische Kosten

Hiermit werden die Herstellkosten von Brennstoffzellen charakterisiert, bezogen auf eine Leistung von 1 kW. Sie werden meistens in \$/kW angegeben. Als Ziel gilt der Wert von 1000 \$/kW für stationäre Anwendungen. Die heutigen Herstellungskosten liegen wesentlich höher.

(nach Karamanolis [28])

3.2.4 Systembrennstoffzelle

Die Wahl der Brennstoffzelle für eine mobile Anwendung wird stark durch die Umgebungsbedingungen eingeschränkt. Große Schwierigkeiten bereitet die Erreichung der Betriebstemperatur, vor allem bei Temperaturen von unter 0 °C. Das Konditionieren einer Brennstoffzelle ist primär von der Temperatur abhängig. Die zur Erwärmung benötigte Energie muss durch beispielsweise eine Batterie bereitgestellt werden. Wie beim Wasserstofftank bleiben auch bei der Brennstoffzelle nur zwei Typen übrig, die den Anforderungen genügen, die AFC und PEMFC. Beide Systeme haben hohe Systemwirkungsgrade und wurden bereits in der Praxis getestet und haben sich teilweise bewährt.

Im Vergleich zu anderen Brennstoffzellen ist die AFC robust und einfach aufgebaut und erreicht gute Wirkungsgrade. Als Nachteil ist die Verwendung von Kalilauge als Elektrolyt zu sehen, was ein Sicherheitsrisiko darstellt und durch Korrosion der Elektroden zu einer kurzen Lebensdauer führt [2]. Zusätzlich muss die AFC mit reinem Sauerstoff versorgt werden, der in Sondertanks mitgeführt werden müsste.

Im Bereich der PEMFC käme die NT-PEMFC in Frage, da diese eine hohe Stromdichte und ein gutes dynamisches Verhalten aufweist. Die Betriebstemperatur liegt mit 60 bis 120 °C im unteren Bereich. Allerdings benötigen die Zellen ein aufwändiges Wassermanagement und sind empfindlich gegen Verunreinigungen durch Kohlenmonoxid, Ammoniak und Schwefelverbindungen. Diese Stoffe entstehen im Betrieb und können durch einfaches Lüften aus der Brennstoffzelle befördert werden. Das Lüften gestaltet sich so, dass mittels Überdruck die Zelle „durchgeblasen“ wird. Dies führt zu einem Verlust von Wasserstoff und schlägt sich negativ im Verbrauch nieder.

3. Systemkomponenten

3.3 Akkumulator

Die technologischen und wirtschaftlichen Anforderungen an elektrische Speicher für den stationären und mobilen Bereich sind sehr unterschiedlich. Für den Einsatz in Powertools, Hybrid- oder Elektrofahrzeugen werden hohe spezifische Speicherkapazitäten bezogen auf Gewicht und Volumen gefordert. Für den stationären Einsatz sind dagegen geringe Investitions- und Betriebskosten und hohe Wirkungsgrade für einen wirtschaftlichen Einsatz von höchster Wichtigkeit [12].

3.3.1 Funktion und Aufbau eines Akkumulators

Der Akkumulator ist ein Speicher für elektrische Energie. Diese wird in chemischer Energie reversibel umgewandelt. Die von einer elektrochemischen Zelle elektrische Nennspannung ist von ihrem Material abhängig. In Abbildung 3.3-1 ist eine Lithium-Ion-Batterie schematisch dargestellt. Durch Anlegen einer Spannung werden Ionen eingelagert und führen so zum Speichern von Energie.

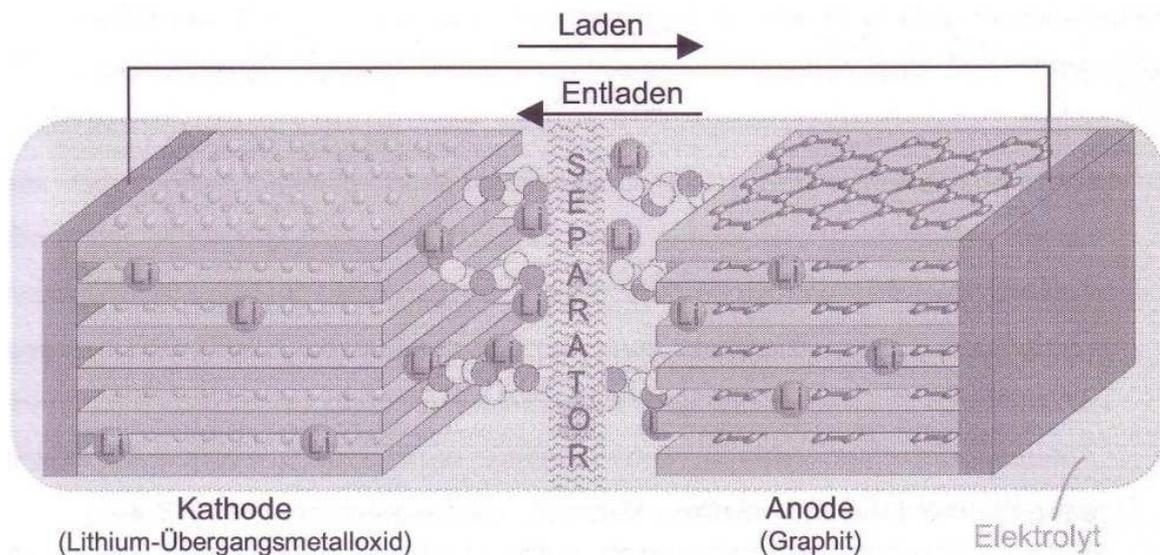


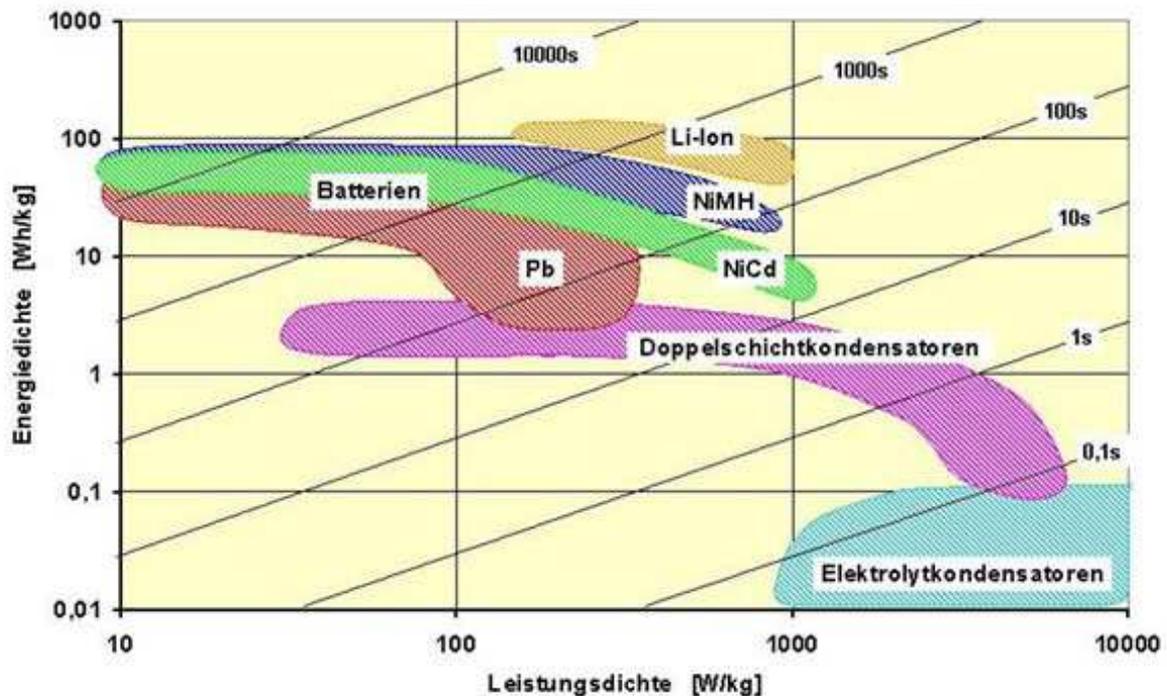
Abbildung 3.3-1 Aufbau und Lade- /Entladevorgang bei der Li-Ion-Batterie [30]

3.3.2 Batterie-/ Akkumulatorarten

Man unterscheidet Batterien in Primärbatterien und Sekundärbatterien. Bei Primärbatterien handelt es sich um Einwegbatterien, die nicht nachgeladen werden können. Sekundärbatterien sind Akkumulatoren, die mehrfach Be- und Entladen werden können. Sie sind für Anwendungen mit Auf- und Entladungszyklen (z.B. Handy, Laptop, ...) konzipiert. Im hier betrachteten System sind aufgrund ihrer Wiederaufladefähigkeit ausschließlich Akkumulatoren interessant. Davon abgesehen gibt es auch Sondersysteme zur elektrischen Energiespeicherung, wie z.B. Redoxakkumulatoren, Solarzellen und Isotopenbatterien, allerdings erfüllen diese Systeme aufgrund ihrer Eigenschaften nicht die Anforderungen an ein preiswertes Massenprodukt.

3. Systemkomponenten

Diagramm 3.3-1 Ragone-Diagramm elektrische Energiespeicher [58]



Neben den Kriterien Nennspannung, Kapazität, Belastbarkeit, Selbstentladung und Tiefenentladeschwelle sind vor allem die Materialeigenschaften wichtig, die die Leistungsfähigkeit eines Akkumulators beschreiben.

Wie im Diagramm 3.3-1 zu erkennen, ist die Energiedichte von Li-Ionen-Akkumulatoren von allen Batterien am höchsten. Gleichzeitig weist auch die Leistungsdichte ein sehr hohes Niveau auf. Der Grund für den Vorteil gegenüber anderen Akkumulatoren ist, dass Lithium ein sehr niedriges Atomgewicht aufweist. Es ist das leichteste unter den Metallen und lässt sehr hohe gewichtsspezifische Leistungsdaten der Batterie erwarten. Zudem befindet es sich im Periodensystem am negativen Ende der Voltaschen Spannungsreihe und hat mit -3,04 Volt das negativste Potential aller Elemente. In Kombination mit verschiedenen Kathodenmaterialien werden dadurch hohe Zellspannungen möglich [32]. Das System eignet sich daher für die Anwendung im mobilen Bereich.

3. Systemkomponenten

3.3.3 Eigenschaften einer Batterie/ eines Akkumulators

Folgende Parameter einer Batterie sind von hohem technischem Wert:

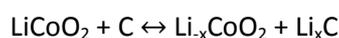
- Nennspannung [V]
- Kapazität und Belastbarkeit [Ah]
- Selbstentladung [%]
- Tiefentladeschwelle [V]
- Spez. Energie [Wh/kg]
- Energiedichte [Wh/l]
- Spez. Leistung [W/kg]
- Leistungsdichte [W/l]
- Verfügbarkeit [hoch, mittel, niedrig]
- Lebensdauer [Zyklusanzahl]
- Wirkungsgrad [%]
- Ladefähigkeit [C]
- Kosten [€/kWh]
- Umweltverträglichkeit [hoch, mittel, niedrig]
- Zuverlässigkeit [hoch, mittel, niedrig]

Hinzu kommen noch verschiedene Sicherheitsaspekte, die dem jeweiligen Einsatzgebiet geschuldet sind. Bei Kraftfahrzeugen sind diese um ein Vielfaches höher als bei stationären Anwendungen, somit steigen im Allgemeinen auch die Kosten.

3.3.4 Systemakkumulator

Die in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Eigenschaften von Lithium vereinfachen die Entscheidung. Im hier beschriebenen System ist ein Akkumulator mit Lithium zu favorisieren. Lithiumbatterien gehören zu den aussichtsreichsten elektrochemischen Energiespeichern für automobiler Anwendungen [29]. Das Lithium-Ionen-System verwendet kathodenseitig ein Li-interkalierendes Metalloxid (MO_2) und als Anode ein Kohlenstoffmaterial, das ebenfalls zur Einlagerung von Lithium fähig ist. Ein Elektrolyt ist ein Gemisch aus organischen Lösungsmitteln mit einem Li-Leitsalz. Für die Kathode bei Fahrzeugbatterien werden zurzeit Lithium-Nickel- und Lithium-Manganoxide bevorzugt [13].

Die Elementar-Reaktion einer Lithium-Ionen-Zelle lautet:



3. Systemkomponenten

Der größte Vorteil der Li-Ionen-Zellen besteht in der hohen Spannung der Einzelzelle, die es ermöglicht, einen Batterieverband mit einer verhältnismäßig geringen Anzahl von Zellen aufzubauen. Allerdings müssen alle Einzelzellen in einem solchen Batterieverband zuverlässig in einem Spannungsfenster von 2,7 V bis 4,2 V gehalten werden. Dies macht ein aktives Batteriemanagementsystem erforderlich [13].

Tabelle 3.3-1: Übersicht Lithium Akkumulator

Nennspannung	3,6 bis 4,2 V/Zelle	Kapazität	je nach Größe
Selbstentladung	0,4 bis 0,8 %/Monat	Tiefentladeschwelle	k.A.
Spez. Energie (theor.)	149 (630) Wh/kg	Energiedichte	313 Wh/l
Spez. Leistung	664 W/kg	Leistungsdichte	1392 W/kg
Lebensdauer	über 600 Zyklen	Wirkungsgrad	80%
Ladefähigkeit	k.A.	Kosten	750 bis 1000 €/kWh
Verfügbarkeit	Hoch	Umweltverträglichkeit	k.A.
Sicherheit	Niedrig	Zuverlässigkeit	Mittel-hoch

Höchst geeignet aber noch zu lösende Sicherheits- und Lebensdauerprobleme [31].

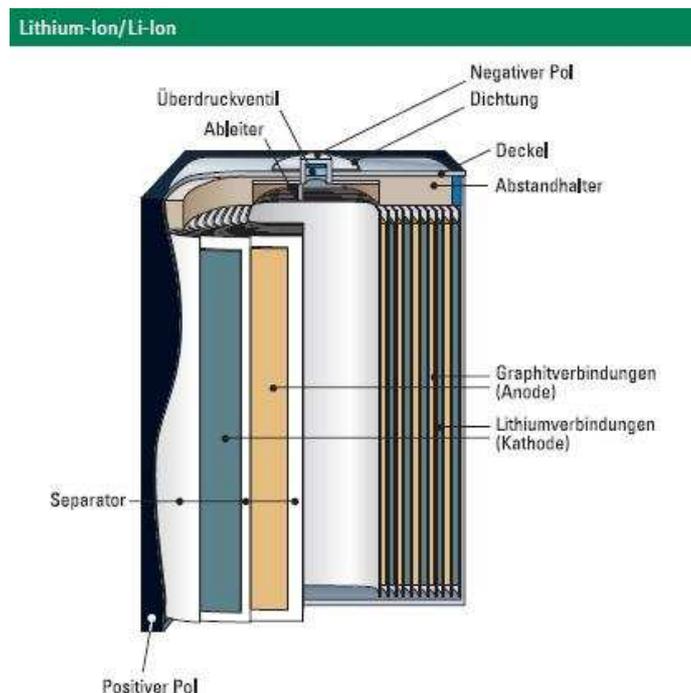


Abbildung 3.3-2: Aufbau Lithium-Ion Akkumulator [68]

3. Systemkomponenten

Der keramische Separator ist eine Erfindung der Evonik-Tochter Li-Tec. Das Potential dieser unter dem Markennamen „Separion“ entwickelten Membran ist durch die Nominierung zum Deutschen Zukunftspreis 2007 bereits zu erahnen. Es handelt sich dabei um einen Verbundwerkstoff aus Keramik und Hochtemperaturpolymeren. Der sehr spröde Keramikwerkstoff wurde zu feinen Nanopartikeln zerbrochen und zur Verbesserung der Härte und des Verschleißverhaltens mit Zirkonoxid ergänzt. Ergebnis ist ein hochtemperaturbeständiges, aber dennoch flexibles, Material. Extremszenarien mit gezielten Überladungen, Kurzschlüssen oder eine mit einem Nagel durchschlagene Batteriezelle, zeigen, dass diese neuartige Membran ein wirksamer Brandschutz ist. Gerade der letzte genannte Härtetest belegt das stark verbesserte Crashverhalten [32]. Auch das schlechte Ladeverhalten bei niedrigen Temperaturen ist negativ zu nennen und bedarf einer Lösung [40]. Anders als bei üblichen Kunststoff-Separatoren wird die Ladung trotz Beschädigung der Membran langsam und nicht explosionsartig freigesetzt. Diese Neuentwicklung zeigt, dass die Sicherheitsproblematik der Lithium-Ionen-Technologie kontrolliert werden kann [33].

3.4 Kondensator

Kondensatoren, im Automobilbereich oft als SuperCaps bezeichnet, weisen immer dann ein Einsatzpotential auf, wenn große Leistungen über einen kurzen Zeitraum gespeichert oder zur Verfügung gestellt werden müssen. Dies gilt besonders bei tiefen Temperaturen [13]. Um die Batterie vor einer hohen Pulsrate und Spitzenleistungen zu schützen, bietet es sich an, einen Kondensator als Ausgleich und gleichzeitigem Schutz in das System zu integrieren, um die grundlegende Lebensdauer des Systems zu erhöhen. Das Funktionsprinzip dieses Hochleistungskondensators in Form der Ladungsverschiebung beruht nicht auf reversibler chemischer Reaktion, sondern ist rein physikalischer Natur. Dies begründet auch die äußerst hohe Lebensdauer von bis zu 500.000 Zyklen [32]. Festzuhalten ist, dass ein solcher Supercap einen enormen Fortschritt für das gesamte System darstellt und in Bezug auf die Kosten nur gering ins Gewicht fällt.

3.5 Elektromotoren

Elektromotoren von mehr als 20 KW Leistung sind nur bedingt in Serienproduktion, was einen deutlichen Engpass und gleichzeitiges Potential für die kommenden Jahre darstellt. Die sehr spezifischen Anforderungen an Elektromotoren für den Antrieb von Elektrofahrzeugen sind folgende:

- ein hohes Verhältnis von Leistung zu Gewicht (kW/kg) zur Verringerung der Fahrzeugmasse
- einen hohen Wirkungsgrad sowohl im Bereich der Nennleistung als auch bei niedrigen Leistungsanforderungen
- die Rückgewinnung der Bremsenergie, das heißt schnelle Umschaltung vom Motor- in den Generatorbetrieb
- eine hohe Unempfindlichkeit gegenüber Beschleunigungskräften (Schockfestigkeit)

3. Systemkomponenten

- Wasserkühlung
- sicherer und zuverlässiger Betrieb
- niedrige Produktionskosten [13]

Vor allem der letzte Punkt ist für die hohe Stückzahlproduktion sehr bedeutend.

3.5.1 Grundsätzliche Funktion und Aufbau eines Elektromotors

Der Drehstrom-Generator (Abbildung 3.5-1) erzeugt gleichzeitig in den Spulen Sp_1 , Sp_2 und Sp_3 einen jeweils um 120° verschobenen Wechselstrom. Durch gemeinsame Leitungsführung der Neutralleiter N kann man Leitungen einsparen und kommt bei symmetrischer Belastung mit den drei Leitungen L_1 , L_2 und L_3 statt 6 Einzelleitungen aus. Unsere (häusliche) Stromversorgung verwendet für die einzelnen Stromkreise jeweils einen der drei Außenleiter L_1 , L_2 oder L_3 in Kombination mit dem Neutralleiter N , was eine Spannung von 230V ergibt, während der Spannungsunterschied zwischen zwei Außenleitern ca. 400 Volt beträgt. Durch das Vertauschen zweier Außenleiter kann man die Drehrichtung des Drehstrommotors ändern, weil dann das sich drehende Magnetfeld einen anderen Drehsinn aufweist [35].

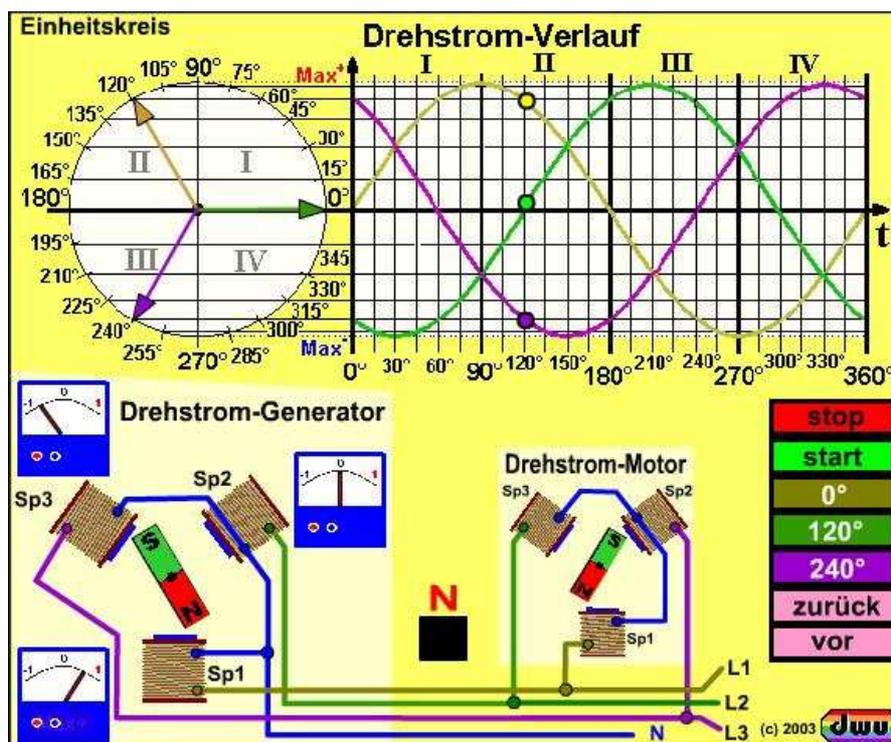


Abbildung 3.5-1: Funktion Drehstromgenerator [35]

3. Systemkomponenten

3.5.2 Motortypen

Im Fahrzeugbau wird standartmäßig das Zentralmotor-System bevorzugt. Für dieses System stehen folgende Motoren zur Auswahl:

1. die Gleichstrommaschine mit Reihen- und Nebenschlusswicklung (GM)
2. die Asynchronmaschine (ASM)
3. die Permanentmagnet-erregte Synchronmaschine (PSMSM)
4. die geschaltete Reluktanzmaschine (GRM)
5. die Transversalflussmaschine (TFM)

(Einteilung nach Naunin [13])

3.5.3 Kenngrößen eines Elektromotors

Neben den technischen Größen spielen vor allem die Kosten bei einer Serienproduktion eine zentrale Rolle. Diesem wichtigsten Faktor werden alle anderen Größen je nach Qualität untergeordnet.

Tabelle 3.5-1: Kenngrößen eines Elektromotors

Nennleistung	20 bis 80 kW	Maschinengewicht	je nach Ausführung
ECE-Zyklusreichweite	Motor spezifisch in %	Drehmoment	Motor spezifisch
Nenn Drehzahl	Motor spezifisch	Maximaldrehzahl	Motor spezifisch
Polpaaranzahl	1 bis 3 Stück	Wirkungsgrad	bis > 90%
Kosten	k.A.		

3.5.4 Systemelektromotor

Für den Antrieb eines Elektrofahrzeugs kommen nur Drehstrommaschinen in Frage [32]. Aufgrund ihres reibungsarmen Wirkprinzips sind Drehstrommaschinen nahezu wartungsfrei und sehr robust. Bei der Anordnung im Fahrzeug ist die Radnabenvariante am sinnvollsten. Der Vorteil, des Verzichts auf Übertragungselemente (Getriebe) wirkt extrem energie- und platzeffizient auf das gesamte System Fahrzeug. Wie schon in den vorhergehenden Kapiteln aufgezeigt werden die Kosten das ausschlaggebende Kriterium bei der Entscheidung für den Motortypen sein. Dazu gehört auch das Kühlsystem, wobei die Wasserkühlung bevorzugt wird, vor allem weil in Hybridfahrzeugen ohnehin ein Wasserkühlsystem vorhanden ist. Wasserkühlung statt Luftkühlung ist aufwändiger, führt aber zu leichteren Motoren. Die PMSM ist hier im Vorteil, da sie keine Verlustwärme im Läufer aufweist [13]. Die Tabelle 3.5-2 gibt eine Übersicht zu verschiedenen Antriebsmaschinen.

3. Systemkomponenten

Tabelle 3.5-2: Kostenvergleich zwischen ASM, PMSM und GRM bei 25 KW [13]

	Asynchronmotor (ASM)	Permanent-Magnet- erregter Synchron- motor (PMSM)	Geschalteter Reluk- tanzmotor (GRM)
Nennleistung	25 KW	25 KW	25 KW
max. Drehmoment	130 Nm	150 Nm	130 Nm
max. Drehzahl	13.500 /min	11.500 /min	13.500 /min
Motorgewicht	59 kg	55 kg	65 kg
Ständerdurchmesser	235 mm	235 mm	235 mm
Ständerlänge	125 mm	125 mm	125 mm
Luftspaltbreite	0,5 mm	1 mm	0,4 mm
ECE-Zyklenreichweite	100 %	105 %	102,5 %
max. Strom im WR	400 A	600 A	400 A
Drehmoment- Oszillator	2,5 %	3 %	10 bis 15 %
Geräusche	keine elektromagnetischen Geräusche	eventuell geringe Geräusche von Magnetpolkanten	hohe Geräusche vor allem bei hoher Drehzahl
spezifisches magnetisches Material	Standartmaterial 5,3 W/kg	hochwertiges Material 3,2 W/kg	höherwertiges Material 2 W/kg
Systemkosten bei 10.000 Antrieben/a	100 %	120 %	108 %

Für das hier betrachtete System wird ein ASM empfohlen. Das geringe Gewicht und die hohe Leistung sind positiv zu erwähnen. Da sich dieser Motor auch schon im Alltag bewährt hat, fällt die Wahl auf ihn. Der hohe Entwicklungsstand und die geringen Kosten sind positiv zu erwähnen [98].

4. Systemaufbau

Im vorangegangenen Kapitel konnte durch die Erläuterung der einzelnen Systemkomponenten ein Eindruck über den Stand der Technik gewonnen werden. Gleichzeitig wurden die Potentiale der jeweiligen Komponenten aufgezeigt. Der Vergleich von Neuentwicklungen und alter Technik beweist die hohe Entwicklungsgeschwindigkeit in diesem Bereich, und verdeutlicht so die Aktualität des Themengebietes. Das nun folgende Kapitel befasst sich mit dem Zusammenwirken der Systemkomponenten im Kontext zu den Umweltbedingungen.

4.1 Betrachtungen des Gesamtsystems

Das System besteht aus fünf Komponenten die jeweils eigene Systeme bilden. Die jeweiligen Wirkungsgrade führen zum Wirkungsgrad des Gesamtsystems. Allgemein spricht man von einem offenen System, da die Systemgrenzen variabel sind und ein Stoff- und Wärmetransport stattfindet. Dieser Umstand bedingt, dass das System eingegrenzt wird. In Abbildung 4.1-1 werden die Bilanzgrenzen aufgezeigt. Dabei ist der Ausgangsenergiegehalt 100% Wasserstoff und wird in das Endprodukt einer Rotationsenergie umgesetzt.

Es gilt allgemein:
$$\eta_{gesamt} = \frac{Nutzen}{Aufwand}$$

Für einen Carnot'schen Wirkungsgrad gilt:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_o}{T_u}$$

Und im betrachteten System gilt:

$$\eta_{hydrogen\ to\ wheel} = \eta_{Speicher} \times \eta_{Brennstoffzelle} \times \eta_{Akku} \times \eta_{Elektromotor}$$

Aufgrund der schwankenden Angaben zu den verschiedenen Systemwirkungsgraden wird der schlechteste oder ungünstigste anzunehmende Fall „worst case“ betrachtet und mit dem besten anzunehmenden Fall „best case“ verglichen. Es werden ausschließlich die im Punkt 3 erwähnten Systemkomponenten zur Berechnung herangezogen.

Um das System in einem betriebswirtschaftlichen Kontext zu sehen, müssen die Kosten für einen Kilometer Fahrstrecke ermittelt werden. Das ist nur möglich, wenn die Kosten für den Energieträger Wasserstoff zuverlässig angegeben werden können. Die Entwicklung der Wasserstoffkosten wird im Punkt 4.2 eingehend erläutert.

Für die Speicherung von elektrischer Energie in Verbindung mit einem Range-Extender sind nur Speichersysteme mit Langzeitspeicherung primär von Priorität. Speziell in der betrachteten Variante soll ein Lithium-Ion-Akku Verwendung finden. In vielen Berichten ist oft von einem Lithium

4. Systemaufbau

Mangel die Rede. Es ist zu klären, wie groß die Vorkommen sind und ob sich daraus in der Zukunft Versorgungsengpässe ergeben könnten. Dazu mehr in Abschnitt 4.2.

Um die im Wasserstoff gespeicherte Energie für den Vortrieb eines Fahrzeuges zu nutzen, gibt es verschiedene Energieflüsse (siehe Abbildung 4.1-1).

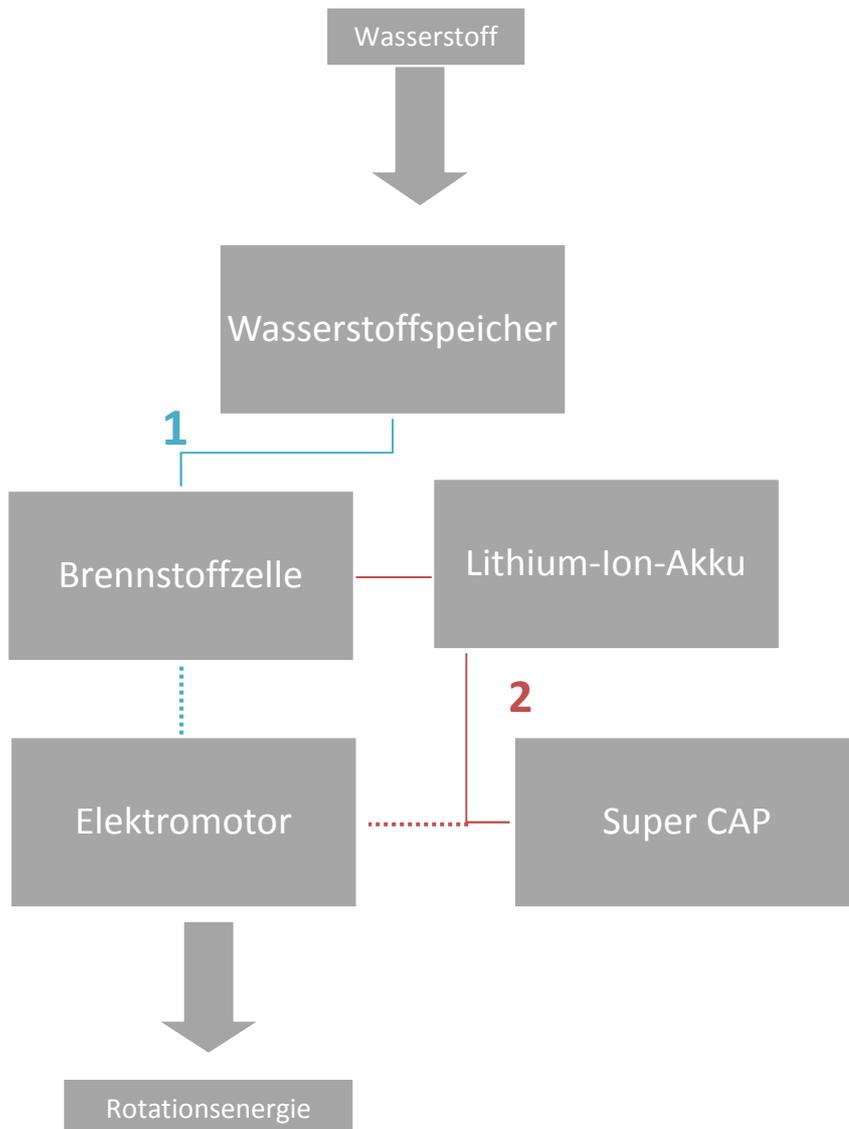


Abbildung 4.1-1: Energieflüsse bei Wasserstoffbetriebenen Range-Extender PKW

Aus beiden Energieflüssen ergeben sich unterschiedliche Wirkungsgrade. Es werden beide Varianten betrachtet.

4. Systemaufbau

Tabelle 4.1-1: Wirkungsgrad min/max

Systemkomponenten	η_{\max}	η_{\min}
H ₂ Druckspeicher	1	0,98 pro Tag
NT-PEMFC	0,5 [39]	0,3 [39]
Lithium-Ion-Akku	0,8 [31]	0,8 [43]
Super Cap	0,99 [41]	0,9 [40]
PMSM	0,95 [42]	0,65 [42]

Energieflussvariante 1:

$$\eta_{V1 \text{ hydrogen to wheel}} = \eta_{H_2 \text{ Druckspeicher}} \times \eta_{NT-PEMFC} \times \eta_{PMSM}$$

Tabelle 4.1-2: Cases bei Variante 1

	best case	worst case
η	0,475	0,1911

Energieflussvariante 2:

$$\eta_{V1 \text{ hydrogen to wheel}} = \eta_{H_2 \text{ Druckspeicher}} \times \eta_{NT-PEMFC} \times \eta_{Lithium-Ion-Akku} \times \eta_{Super \text{ Cap}} \times \eta_{PMSM}$$

Tabelle 4.1-3: Cases bei Variante 2

	best case	worst case
η	0,3762	0,1376

Die Energieverluste bei Nutzung der Brennstoffzelle sind doch erheblich. Mit einem Wirkungsgrad von 0,3 bis 0,5 nähern sie sich den heute üblichen Wirkungsgraden von Verbrennungskraftmaschinen. Im Vergleich der beiden Energieflussvarianten wird deutlich, dass der Zwischenspeicherschnitt Lithium-Ion-Akku/Super Cap ca. 10% der Energie kostet und somit nicht stark in die Bilanz fällt.

Würde man an dieser Stelle über die Bilanzgrenze hinaus gehen und noch berücksichtigen, dass der Wasserstoff mit einem Energieaufwand von 0,3 (Wirkungsgrad) [11] verdichtet wird, ergeben sich lediglich Gesamtwirkungsgrade von 0,1425 bis 0,0412.

4. Systemaufbau

Des Weiteren muss beachtet werden, dass sowohl mit Schnittstellenverlusten als auch mit Alterungsverlusten zu rechnen ist. Diese gehen mit wenigen Prozent in die Betrachtung ein und werden daher vernachlässigt.

Im europäischen Stadtfahrzyklus (European Driving Cycle EDC, siehe Punkt 4.3.3) wird für ein Brennstoffzellenfahrzeug ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 36% angegeben, das baugleiche Dieselfahrzeug erreicht 22% [44].

Fazit des Vergleiches zwischen Verbrennungskraftmaschine und Brennstoffzelle als Range Extender ist, dass die theoretischen Wirkungsgradvorteile in der Praxis verpuffen und lediglich einen minimalen Vorsprung erkennen lassen, der jedoch mit Betrachtung des Wirkungsgrades der zur Speicherung benötigten Verdichtung gänzlich verloren geht.

Ein endgültiges Ergebnis im Vergleich zwischen Verbrennungsmotor und Brennstoffzellenantrieb kann an dieser Stelle noch nicht formuliert werden. Allerdings ist bereits erkennbar, dass der Brennstoffzellenantrieb keinen Wirkungsgradvorteil gegenüber dem Verbrennungsmotor aufweist. Dies ist der Vielzahl an Teilsystemen und hohen Speicheraufwand des Wasserstoffes geschuldet.

Auch der häufig erwähnte Vorteil des schadstofffreien Betriebs wird relativiert, wenn deutlich wird, dass die Energie zur Erzeugung von Wasserstoff aktuell zu über 80% aus fossilen Energieträgern stammt. Somit lässt sich das Argument eines schadstofffreien Antriebes zurückzuweisen. Lediglich der Ort der Emission wird verlagert. Auch bis 2020 wird sich der Anteil der erneuerbaren Energien lediglich auf 20% erhöhen.

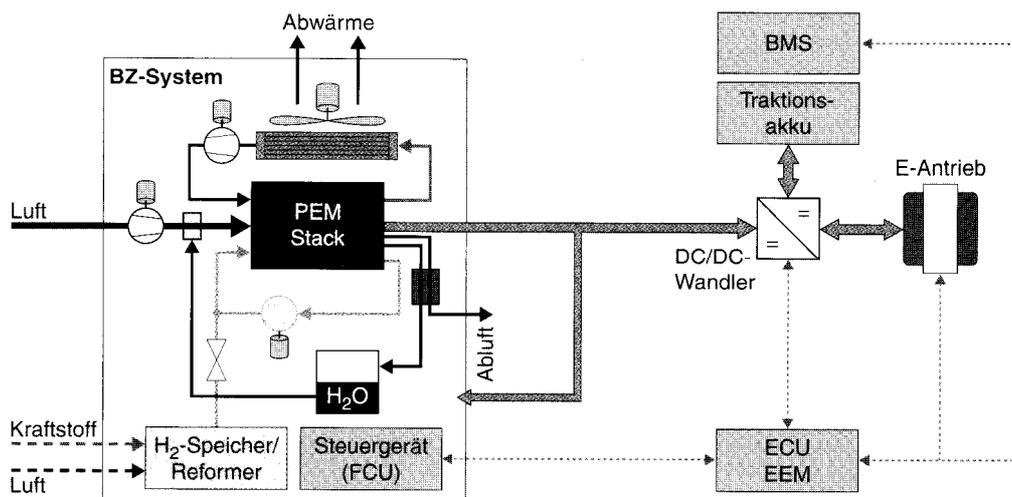


Abbildung 4.1-2: Elektroantrieb mit Brennstoffzelle [99]

4. Systemaufbau

4.2 Analyse von Potentialen und Schwachstellen

Das komplexe Zusammenwirken von einzelnen Systemkomponenten bzw. die Systemkomponenten selbst bergen einen großen Pool an Potential und Problemen. Es muss bei der Betrachtung von Potentialen und Problemen in „systembedingt“ (Punkt 4.2.1) und „systemunabhängig“ (Punkt 4.2.2) unterschieden werden. Die Aufteilung bewirkt, dass konkret differenzieren wird zwischen Umweltfaktoren, die als grundlegend angesehen werden müssen und darüber entscheiden, ob die Voraussetzungen für ein solches System überhaupt vorhanden sind bzw. zu realisieren sind. Der Abschnitt Systembedingte Potentiale und Schwachstellen wird die Möglichkeiten des Systems selbst betrachten und Grenz dessen aufzeigen. Auf die Kriterien Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Recycling, Kosten und Wirkungsgrad (Effizienz) wird dabei immer referenziert.

4.2.1 Systembedingte Potentiale und Schwachstellen

Range Extender System

Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle als das zentrale System im betrachteten Gesamtsystem birgt selbst noch ein enorm hohes Entwicklungspotential. Die Differenz zwischen dem praktisch zu erreichenden und dem theoretisch möglichen Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle beträgt je nach Art fast 40%. Insbesondere die Schwankung der Zellspannungen von 0,6 bis 0,7 V [28] und deren geringe Höhe sind durch die Verwendung besserer Katalysatoren auf der Kathodenseite der Zelle zu optimieren. Dabei wird erreicht, dass bei der Sauerstoff-Reduktions-Reaktion Massetransportverluste verringert werden. Hier besteht nach wie vor ein großer Forschungsbedarf, nicht nur auf dem Gebiet der Elektrochemie, sondern auch in der Modellierung von Mehrphasenreaktionen [13]. Weiterhin lassen sich durch Optimierung der Materialien die Widerstände in den Zelle selbst (Eigenleitfähigkeit), als auch in den Stacks durch verbesserte Ankopplung der einzeln in Serie geschalteten Brennstoffzellen senken. Bipolarplatten, Gasdiffusionsschichten und Polymermembranen können ebenfalls durch die Verbesserung von Materialien zu einer Wirkungsgradsteigerung führen. All diese Potentiale müssen durch entsprechend höherwertige Materialien erkaufte werden. Das hat zur Folge, dass die Produktkosten ansteigen. Neben der angehobenen Zellspannung in der Polarisationskurve ist der Betrieb von Brennstoffzellen bei höheren Stromdichten und dennoch akzeptablen, nicht signifikant reduzierten, Zellspannungen eine weitere große Herausforderung für die Brennstoffzellenforschung. Die heute üblichen Stromdichten von 0,5 bis 1,0 A/cm² sind für zukünftige Systemauslegungen ungenügend [13].

Die Erreichung dieses Ziels hat mehrere Vorteile: Zum einen wird Bauraum im Fahrzeug geschont, zum anderen verringert sich die Gesamtfläche einer Brennstoffzelle und somit sinkt der Materialverbrauch an seltenem Platin, der als Katalysator eingesetzt werden, sinkt. Auch die „Start

4. Systemaufbau

Up“ Zeit wird durch eine geringere Masse begünstigt. Sämtliche Probleme sind bis heute ungelöst. Unzuverlässiger Membrane, die bei Temperaturen von über 100 °C schlechte Verschleißwerte besitzen, höheren Leistungsdichten und die von der Automobilindustrie geforderten 5.000 Betriebsstunden nicht eingehalten werden, sind aktueller Stand der Entwicklung. Hinzu kommen Probleme mit einer gleichmäßigen Gaskonzentrationsverteilung und einer gleichmäßigen Kühlleistung an der aktiven Membranfläche. In mobilen Anwendungen ist zudem nicht nur die maximale Betriebstemperatur begrenzt, sondern der Betrieb der Brennstoffzelle muss auch bei Außentemperaturen unterhalb des Gefrierpunktes gegeben sein. Vor allem beim „Start“ sollte die Brennstoffzelle nach einer geringen Zeit in der Lage sein, genügend für den Vortrieb benötigte Energie zu erzeugen. Potentiale lassen sich durch ein aktives Wassermanagement, optimierte Gasversorgung der elektrochemischen Reaktion der Zelle, Standfestigkeit der Membran und Elektrodenschichten und Ionenleitfähigkeit der Membran (gleichmäßig verteilt über die aktive Membran) nutzen. Die hohen Kosten einer Brennstoffzelle könnten durch die Serienproduktion deutlich gesenkt werden und so dazu beitragen, das Gesamtsystem attraktiv für den Kunden zu machen.

Wasserstoffspeicher

Bei Wasserstoffdrucktanks sind aus physikalischen Gründen in nächster Zeit keine Verbesserungen zu erwarten. Die volumetrisch zu großen und zu schweren haben die Grenze des Möglichen erreicht. Vorerst sind ausschließlich Drucktanks in großen Stückzahlen zu produzieren. Die Entwicklung von Werkstoffen mit günstigen Kostenstrukturen für Druckspeichersysteme ist derzeit eine zentrale Aufgabe im Automobilbereich. Potentiale zur größeren Energieaufnahme und sicheren Handhabung haben chemische und reversible metallische Hydride, sowie Kryoadsorption und Physisorption [13].

Fazit

Brennstoffzellensysteme werden sich in Zukunft am Markt durchsetzen, wenn auch mit geringen Stückzahlen. Zuvor müssen aber noch qualitativ hochwertige Ergebnisse aus der Grundlagenforschung für den Kunden, in überzeugenden Produktkonzepten, nutzbar werden. Für das Gelingen entscheidend ist die Funktionalität des Brennstoffzellensystems, welche zukünftig die begrenzten Energiespeichermengen an Wasserstoff durch einen deutlich gesteigerten Wirkungsgrad, ausgleichen muss. Wichtige Punkte sind hier Robustheit, Performance, Dauerhaltbarkeit und signifikant reduzierte Systemkosten von etwa einer Größenordnung gegenüber heute bekannten Abschätzungen [13].

4. Systemaufbau

Unterstütztes System

Lithium-Akku

Die Verschaltung mehrerer Batteriezellen in einem Lithium-Akku macht es erforderlich, jede Zelle permanent bzgl. der Ladezustands zu prüfen, da die Leistung des Akkumulators von der schwächsten Zelle abhängig ist. Das heißt eine Überwachung dieses Systems lässt sich nicht vermeiden und fordert somit eine Steuereinheit (BMS). Die Temperaturempfindlichkeit erschwert den Einsatz im mobilen Grundsystem und kann nur durch die Verwendung von Kühl- und Heizkreisläufen gewährleistet werden. Um alle Daten zu erfassen und auszuwerten, ist ein Batteriemanagementsystem (BMS) unabdingbar. Die Art des Be- und Entladen von Lithium Akkumulatoren hat großen Einfluss auf die Lebensdauer. Es haben sich das IU-Ladeverfahren und das gepulste I-Laden bewährt [40].

Lithium-Ion

Die verschiedenen Ansätze zeigen, dass die Grundprobleme von Lithium-Ionen-Batteriesystemen lösbar sind und in naher Zukunft deutliche technische Fortschritte erwarten lassen [13]. An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass das Entwicklungspotential dieser Technik noch längst nicht ausgeschöpft ist. Mithilfe eines Verbunds von Kohlenstoff mit eingelagerten Silizium-Nanodrähten können rund zehnmals mehr Lithium-Ionen im Vergleich zum Graphit gespeichert werden, was mindestens einer Verdreifachung der bisherigen Kapazität entspricht. Dies fanden Forscher im Dezember 2007 an der Stanford University heraus [45]. Ebenfalls an der Anode setzt das Unternehmen Altair Nanotechnologies an. Es ersetzte den herkömmlichen Graphit durch nanostrukturiertes Lithium-Titanat. Der Hersteller wirbt mit einer enormen Lebensdauer von 15.000 Zyklen, einer thermischen Stabilität bis 250°C und einer Schnellladefähigkeit von weniger als 2 Minuten [46]. Obwohl die sehr junge und leistungsfähige Lithium-Ionen-Technologie noch einige Grundprobleme hinsichtlich der Lebensdauer und Sicherheit zu bewältigen hat, lassen die aktuellen vielversprechenden Lösungskonzepte und die Vielfalt an Kombinationsmöglichkeiten von Lithium mit anderen Werkstoffen das große Entwicklungspotential erahnen [32].

Lithium-Polymer

Die größten Vorteile bei Lithium-Polymer-Systemen ergeben sich aus dem Wegfall des Gehäuses und der daraus endstehenden Formflexibilität. Außerdem können typische Grundprobleme der Lithium-Ion-Technologie gelöst werden, wie z.B. mechanische Stabilität, Reaktivität gegenüber Lithium und Auskommen ohne flüchtige Bestandteile. Insgesamt ist eine höhere Sicherheit gegeben [47]. Im Falle einer Serienproduktion erhofft man sich Herstellungskosten, die mit jenen von Blei-Batterien

4. Systemaufbau

vergleichbar sind [48]. Entwicklungsbedarf besteht allerdings bei der etwas schlechteren Energiedichte von 140 Wh/kg und der mit etwa 300 Zyklen zu geringeren Lebensdauer [48]. Es kann geschlossen werden, dass sich die Lithium-Polymer-Technologie nicht als das überlegene Konzept erweist. Es ist unter den Lithium-Batterien zweifelsohne das System mit der höchsten Designflexibilität, aber das grundsätzliche Lebensdauerproblem besteht auch hier weiterhin [32].

Elektromotoren

Insgesamt lässt sich festhalten, dass bei Elektrofahrzeugen einzig Drehstrommaschinen anzutreffen sein werden und der Radnabenantrieb als die favorisierte Anordnungsvariante gilt [32]. Der hohe erreichbare Wirkungsgrad, nahezu Wartungsfreiheit und Robustheit lassen eine Verbesserung nur unter größten Aufwand zu. Momentan werden Elektromotoren mit supraleitenden Lagern erprobt. Die Anwendung im Automobil ist allerdings fraglich, da die Kühltechnik ein weiteres komplexes System bedeutet und der Nutzen nur bei hohen Betriebsstunden rentabel ist. Der Vorteil gegenüber Verbrennungskraftmaschinen ist jedoch so enorm, dass sich der Elektromotor durchsetzen wird. Ob vorerst als Kombination aus Brennstoffzelle/Elektromotor,

Verbrennungskraftmaschine/Elektromotor oder Batterie/Elektromotor ist noch offen. Der Verzicht auf Getriebe und kraftübertragende Elemente bedeutet im Gesamtsystem Einsparungen von Verlusten, steigert so die Effizienz und senkt gleichzeitig die Kosten für Konstruktion und Produktion. Es sind vor allem im Bereich der Leistungselektronik Fortschritte zu erwarten [69]. Fakt ist, dass der Elektromotor in den kommenden Jahren nach Aufbau entsprechender Fertigungskapazitäten nicht mehr aus dem Fahrzeugbau wegzudenken sein wird!

Leistungselektronik

Die Leistungselektronik formt die bereitgestellte elektrische Energie in die vom Verbraucher benötigte Form um. Diese Umwandlung erfolgt verlustarm durch den Einsatz elektronischer Schalter. Durch den Schalterbetrieb unterscheidet sich die Leistungselektronik von der Analogelektronik.

4. Systemaufbau

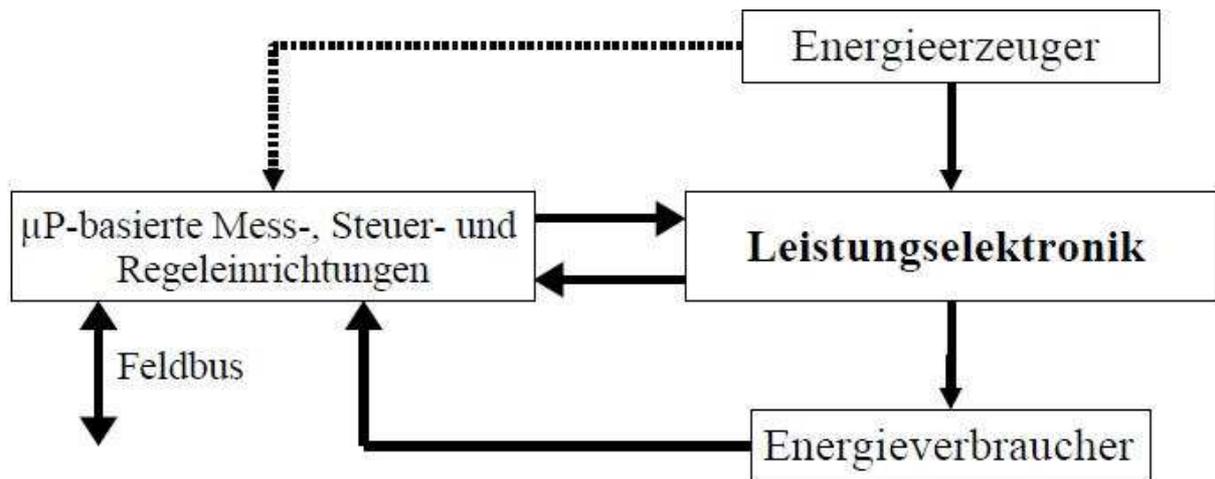


Abbildung 4.2-1: Übersicht Leistungselektronik [80]

Darüber hinaus führt der zunehmende Einsatz der Leistungselektronik zu einer erhöhten Zuverlässigkeit elektrischer Systeme und zu Geräusch- und Gewichtsreduktionen. Die Leistungselektronik stellt daher eine Schlüsseltechnologie mechatronischer Systeme dar. Da elektrische Energie in unterschiedlichen Formen eingesetzt wird, wie z. B. als Gleich-, Wechsel- oder Drehstromenergie, sind bei der Energieumformung verschiedene Funktionen erforderlich [80].

Eine speziell ausgelegte Leistungselektronik bringt Wirkungsgradvorteile und spart so Energie und Kosten. Das gesamte System wird effizienter. Die Verwendung von neuen Werkstoffen hat in den letzten Jahren die Entwicklung der Leistungselektronik voran getrieben und so zu immer besseren Bauelementen geführt. Dennoch liegen weiterhin Potentiale im Bereich Masse und Kosten.

Gesamtsystem

Die Verschaltung von Range Extender, Batterie und Elektroantrieb bringen keinen direkten Nutzen. Die zusätzlich gespeicherte Energie in Form von Wasserstoff führt zu einer Verlängerung der Reichweite. Diese ist durch hohe Zusatzkosten erkauft. Potentiale sind unter Anderem im Energiemanagement zu finden. Auch das Verwenden der einzelnen Systeme in einer bestimmten Reihenfolge können zu einer Energieersparnis führen, beispielsweise indem beim Anlaufen des Systems mit Energie aus der Batterie sämtliche andere Systeme betrieben werden. Die erzeugte Abwärme sollte die Brennstoffzelle auf Betriebstemperatur bringen. Die so eingesparte Anlaufphase des Range Extender System verringert den Verlust von Energie. Auch denkbar ist die Verschaltung der Komponenten über einen Kreislauf, welcher mittels Flüssigkeit den Wasserstofftank kühlt und die restlichen Komponenten auf Betriebstemperatur bringt. Die Verbindung von Wasserstofftank zum Beispiel Kryotank und Brennstoffzelle scheint sehr Erfolgsversprechend. Die Verschaltung der Kühlung der einen Komponente mit der Beheizung der anderen bringt Energieeinsparungen.

4. Systemaufbau

4.2.2 Systemunabhängige Potentiale und Schwachstellen

Ob ein System erfolgreich ist, hängt nicht vom System ab, sondern von den Umständen in denen es sich befindet. Schaut man zurück ins 19. und 20. Jahrhundert, so fällt auf, dass es schon damals Elektrofahrzeuge gab. Um 1900 gab es ca. 15.000 Elektrofahrzeuge in den USA, 1905 wurden in Berlin und anderen Großstädten Droschkenunternehmen gegründet, die nur mit Elektrodroschken fahren. Es gab Batterieladestationen und Batterieaustauschstationen. 1945 gab es in Deutschland 22.000 Elektrofahrzeuge. Doch wie bei vielen genialen Systemen spielt für die Serienherstellung letztendlich nur eine einzige Größe die alles entscheidende Rolle: Die Wirtschaftlichkeit.

Wasserstoff

Dieser muss mittels Elektrolyse aus Wasser gewonnen werden. Die Wirkungsgrade bei diesem Verfahren sind sehr hoch (0,9 bis 0,99) und daher kaum noch zu erhöhen. Doch solange die dafür verwendete Energie nicht aus pflanzlichen Energieträgern oder alternativen Energieträgern stammt, wird die Emission nicht verringert, sondern nur verlagert.

Der so erzeugte Wasserstoff ist aufgrund seiner geringen Dichte nicht zum Speichern von energie in Fahrzeugen geeignet und muss verdichtet oder verflüssigt werden. Die dafür benötigte Energie beträgt circa 30% der im Wasserstoff gespeicherten Energie. Das heißt 1 kWh Wasserstoff benötigt zur z.B. Verdichtung 0,3 kWh. Potentiale sieht man in der Rückgewinnung von Energie durch Nutzung der Kryoenergie und Kompressionsenergie. Dies gestaltet sich allerdings schwierig.

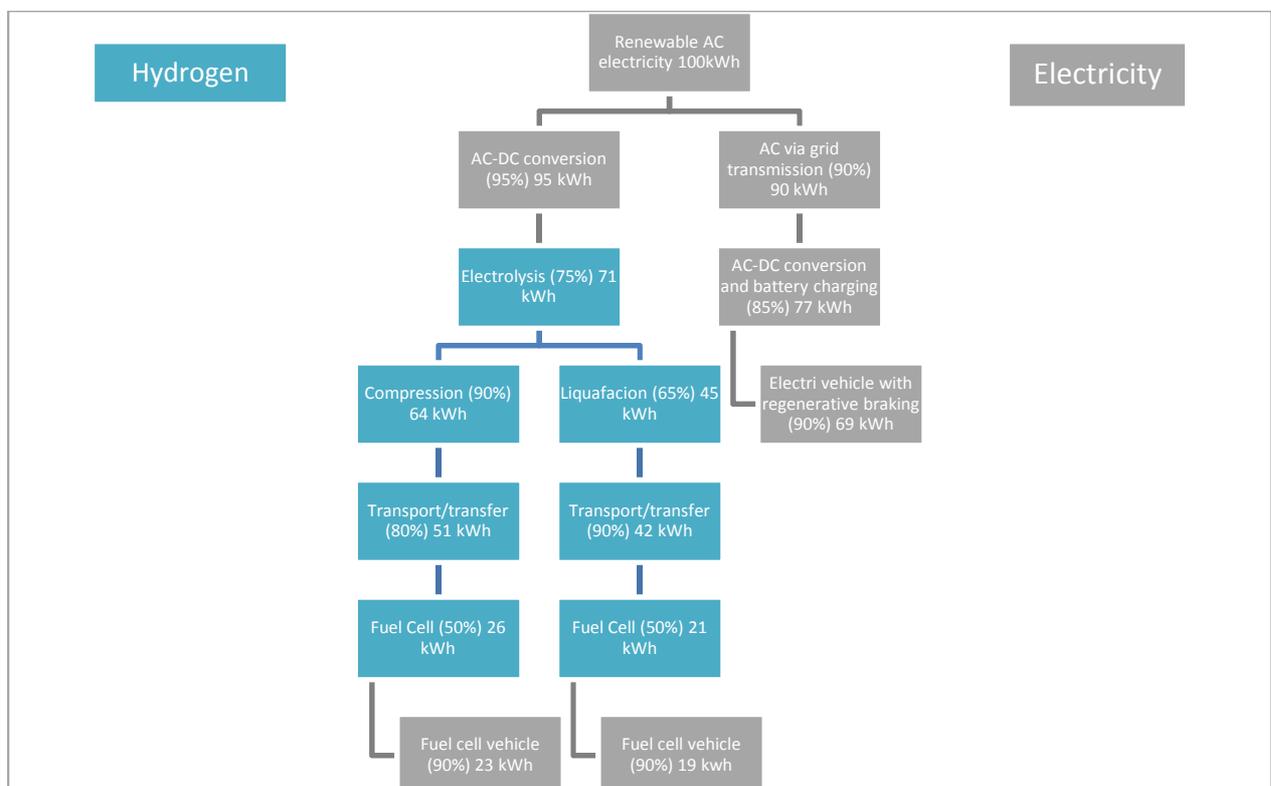


Abbildung 4.2-2: Wasserstoffherstellung und -transport und deren Wirkungsgrade [59]

4. Systemaufbau

Der Weg der erneuerbaren Energie von der Erzeugung bis zum Fahrzeug ist in Abbildung 4.2-2 dargestellt. Der Vergleich zwischen Wasserstoff und Akkumulator zeigt eindeutig die Nachteile der vielen Prozessschritte bei der Wasserstoffgewinnung und -speicherung.

Außerdem kommen Kosten für Verteilung von Wasserstoff hinzu. In diesem Zusammenhang muss auf die Unterschiede zweier Wirtschaftssysteme hingewiesen werden, zum einen das System der Stromwirtschaft und zum anderen das der Wasserstoffwirtschaft. Der Unterschied zwischen beiden ist lediglich der Grundenergieträger, bei der Stromwirtschaft Strom und bei der Wasserstoffwirtschaft Wasserstoff (siehe Abbildung 4.2-3).

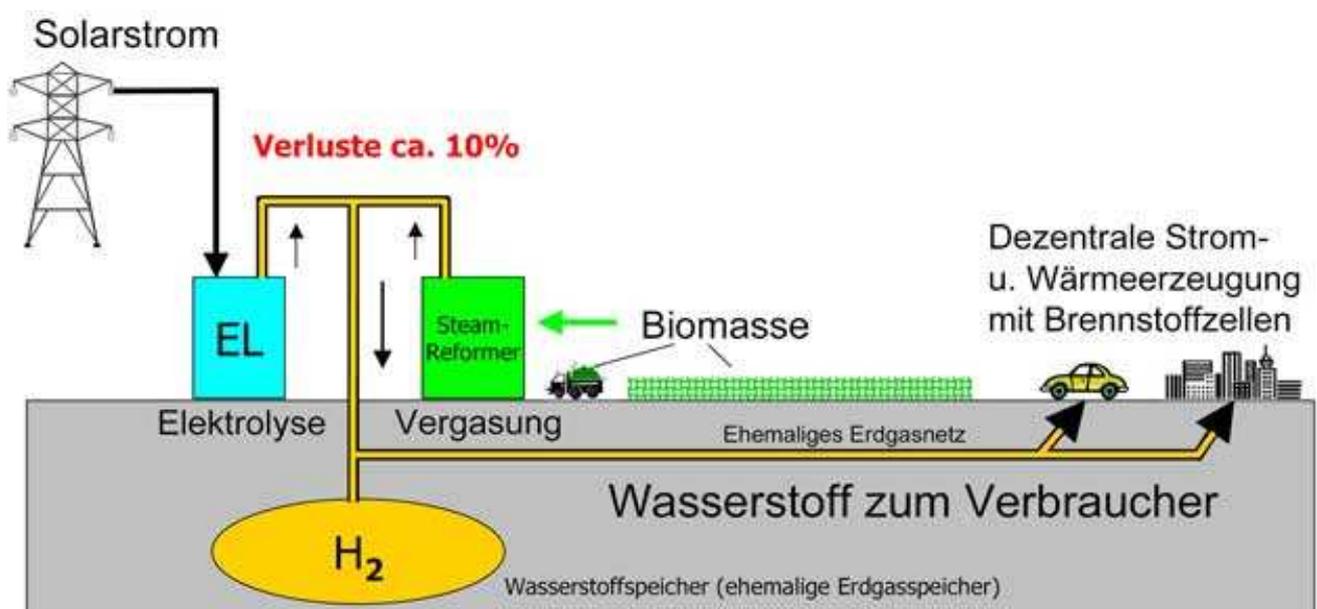


Abbildung 4.2-3: Beispiel einer Wasserstoffwirtschaft [49]

Das in Abbildung 4.2-3 als Transportweg genutzte Erdgasnetz würde für den Wasserstofftransport nicht zur Nutzung fähig sein, da Wasserstoff eine extrem hohe Reaktivität aufweist und um ein vielfaches flüchtiger ist als Erdgas. Die so entstehenden Verluste und die daraus folgende Gefährdung würden nicht tragbar sein. Um eine Wasserstoffwirtschaft zu realisieren müsste ein gesamtheitliches Netz an Versorgungsstrukturen neu aufgebaut werden. Das Netz der Stromwirtschaft besteht bereits und bietet somit einen guten Ansatz zur Elektrifizierung der Fahrzeuge.

Tankanlagen

Um den Traum von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen in die Tat umzusetzen, würden Infrastrukturen geschaffen, Gesetze erlassen, Anforderungen definiert und Umdenken beschleunigt werden müssen. Der Aufbau einer gesamten Infrastruktur würde nicht nur Milliarden kosten, sondern zudem auch Jahrzehnte dauern. Die hohen Anforderungen an die Tanktechnik ist nur durch

4. Systemaufbau

die Verwendung einer komplexen Apparatur zu realisieren. Der Vorgang der Betankung ließe sich am schnellsten durch eine automatisierten Prozess verwirklichen. Tankanlagen existieren von den gängigen Herstellern, wie zum Beispiel Magna oder OMV.

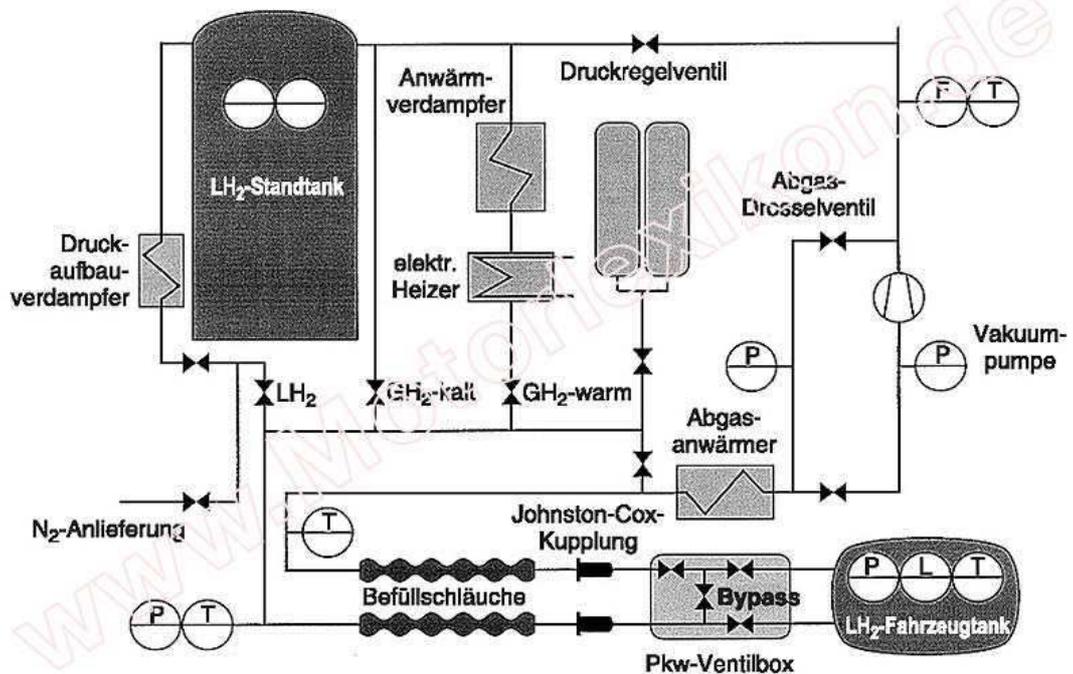


Abbildung 4.2-4: Tankanlage [61]



Abbildung 4.2-5: OMV Wasserstofftankstelle [60]

4. Systemaufbau

Brennstoffzelle

Die Verwendung von Edelmetallen wie Platin oder Silber und der gleichzeitig steigende Rohstoffpreis macht es bei Beibehaltung, unmöglich, verkaufsfähige Produktionspreise zu gewährleisten. Neue Entwicklungen sprechen von Einsparungen von 50% [62] bis 100% Platin [63]. Gleichzeitig soll dies durch die Verwendung von Silber oder Nickel ausgeglichen werden. Unklar bleibt, inwieweit sich die Einsparungen direkt umsetzen lassen, oder ob es sich nur um Messwerte unter Laborbedingungen handelt.

Lithium

Im Alltag wird nach kleinen und leichten Energiespeichern verlangt. Zudem sollten diese umweltfreundlich und robust sein. Dies alles, so der Glaube vieler Wissenschaftler, vereint ein Metall: Lithium. Angestrebt ist mittels Lithium-Batterie den gesamten Tank zu ersetzen und so ein Fahrzeug über lange Strecken zu bewegen. Wollte man ein Auto mit üblicher Reichweite per Bleiakku antreiben, würde die Batterie etwa eine Tonne wiegen. Etwas günstiger erscheint da der Metallhydrid-Akkumulator, aber für einen reinen Elektroantrieb ist auch dieser nicht leistungsfähig genug. Nickel oder Cadmium, die oft verwendet werden, haben ebenfalls eine große spezifische Masse. Dennoch unterstützt solch ein Speicher bereits den Verbrennungsmotor des Hybrid-Autos Toyota Prius. Mit einem Metallhydrid-Akku allein käme ein Auto jedoch nicht weit [50]. Experten des französischen Beratungsunternehmens Meridian International Research warnen in einem 57-Seitigen Bericht „The Trouble with Lithium“ vor knappen Rohstoffbeständen und aufwändiger Verarbeitung des Lithiums. Sie prophezeien eine Lithium-Lücke die bald auf dem Weltmarkt zu finden sein werde. Aufgrund von fehlenden Ersatztechnologien sind alle Akkumulatoren Hersteller auf Lithium aus Bolivien, Chile, China und Argentinien angewiesen. Die Nachfrage ist jetzt schon hoch und würde bei der Serienfertigung von Elektroautos mit Lithium-Technologie die Lage auf den Rohstoffmärkten noch verschärfen. Es wird geschätzt, dass 2015 gerade mal 30.000 Tonnen Lithium für die Elektrofahrzeuge zur Verfügung stehen. Das reicht für ca. 1,5 Millionen Hybridfahrzeuge [64]. In dem französischen Bericht heißt es weiter, dass die massive Zerstörung des Salzsees unumgänglich wäre. Auch die Aussage, dass nur eine Million Tonnen aus dem chilenischen Lithium-Gesamtvorrat verwendbar sei, lässt Zweifel zu [64]. Bei einem Weltvorrat von 11 Millionen Tonnen [67] und einem Jahresverbrauch von aktuell 100.000 Tonnen, würden die Vorräte 110 Jahre reichen. Bei einem Verbrauch pro Fahrzeugbatterie von 20 Kilogramm würden diese Vorräte für 550 Millionen Hybridfahrzeuge ausreichen. Nach Schätzungen einiger Quellen sind weltweit derzeit ca. 4 Milliarden Fahrzeuge im Einsatz. Das heißt wiederum, dass maximal 25 % aller Fahrzeuge jemals mit Lithium-Technologie ausgestattet werden können. Allein in Deutschland werden jährlich mehr als 3,6

4. Systemaufbau

Millionen [66] Personenkraftwagen neu zugelassen. Die Zahl von 1,5 Millionen Fahrzeugen weltweit, erscheint im Bezug sehr gering dazu. Zudem muss sich die Automobilindustrie die begrenzten Lithium-Vorkommen mit der Elektroartikelbranche und der Luftfahrtindustrie teilen [64].

Recycling

Lithium-Manganoxyd-Primärzellen können ebenfalls mit Hilfe der Vakuumdestillation wiederverwertet werden. Hierbei werden vor allem nickelhaltiges Eisen und Ferromangan gewonnen. Die wiederaufladbaren Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Akkus werden metallurgisch aufbereitet, wobei vor allem Kobalt, Nickel und Kupfer recycelt werden [68]. Das Recycling von Akkumulatoren wird unabdingbar sein, wenn eine nachhaltige Verwendung stattfinden soll.

Produktionskapazitäten

Der Ausbau der Produktionskapazitäten, sowohl bei Akkumulatoren, Brennstoffzellen als auch bei Elektromotoren, werden einen Preisverfall bewirken [69]. Es können so die Produktionskosten zumindest auf ein Minimum reduziert werden. Die Einführung des Systems in einen Teilmarkt bewirkt gleichzeitig eine Akzeptanz im Markt und führt so zu einem zusätzlichen „Push-“ Effekt. Die Umsetzung dieser Produktionskapazitäten ist lediglich eine Frage von Investitionen.

4. Systemaufbau

4.3 Modellnachbau

Um eine Technik bzw. ein System kennen zu lernen, bietet sich es an, das System in der Praxis selbst zu testen. Hierzu dient ein Modell, da die Umsetzung im Originalmaßstab große Kosten verursachen würde. Dabei betragen die Ausgaben für Elektromotoren, Karosserie, Fahrwerk und Steuerung ca. 10 % bezogen an den Gesamtkosten. Die Range Extender Einheit und der Akkumulator nehmen die verbleibenden 90 % in Anspruch. Dabei kann man davon ausgehen, dass eine 1W Brennstoffzelle knapp 50 bis 200 €, je nach Leistungsgröße der Gesamteinheit, kostet. Der Bau eines Modells hat zudem viele weitere Vorteile, wie zum Beispiel Kostenersparnis, Übersichtlichkeit, schnelle Umsetzung, einfacher Aufbau, etc. Der Umstand, dass das Modell auf ein bestehendes System aufbaut, birgt den Vorteil, dass Fehlerquellen schnell eingegrenzt werden können. Dies führt zügig zu einem schnellen Wachstum an Verständnis über das Systems. Auch der Vorteil, die gespeicherte Energie schnell zu leeren führt zu einem Beschleunigen der Versuche und ersetzt Zeitrafferverfahren. Es können so Alterungs- und Verschleißerscheinungen deutlich früher ermittelt werden. Das Modell sollte kostengünstig sein und einem Fahrzeug im Original ähneln. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass Raumbudget nicht zu überschreiten. Die Betriebszeit inklusive Range Extender sollte mindestens zwei Stunden betragen.

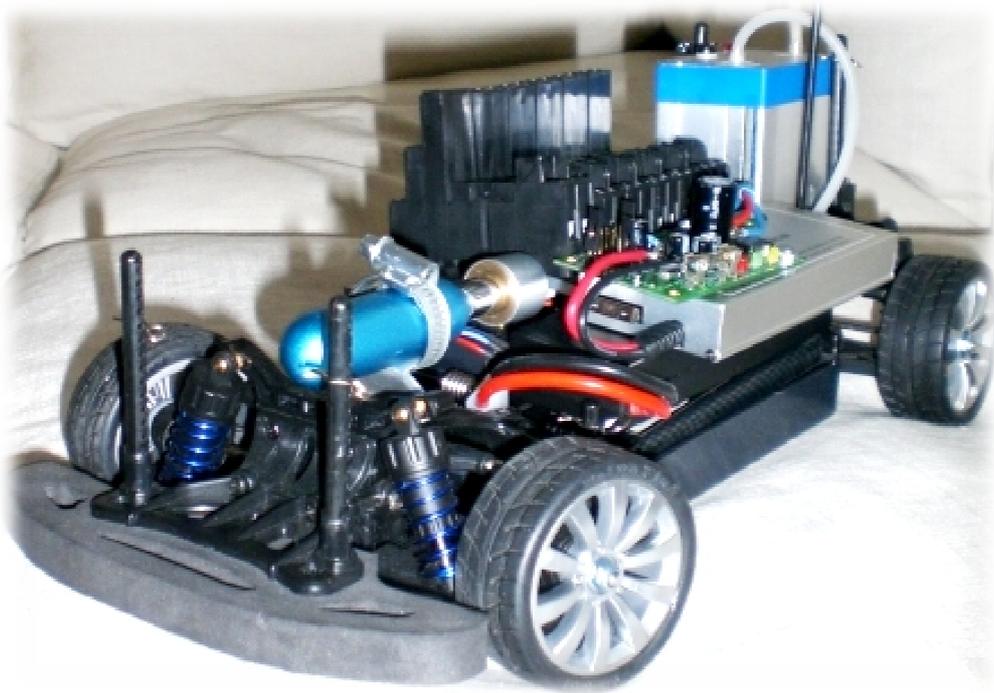


Abbildung 4.3-1: Modellfahrzeug mit Brennstoffzelle als Range Extender

4. Systemaufbau

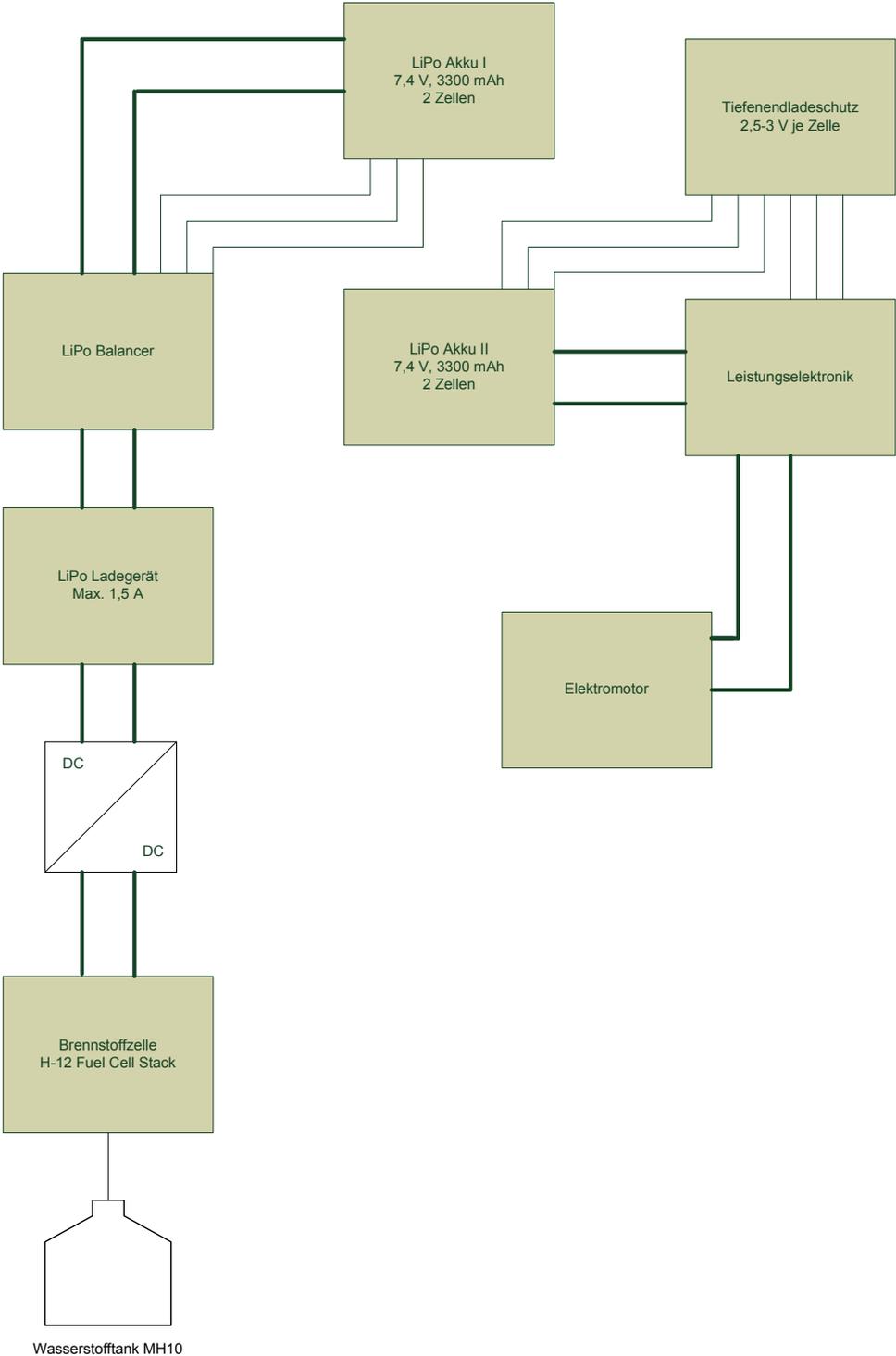


Abbildung 4.3-2: umgesetztes System

4. Systemaufbau

4.3.1 Auslegung

Die Erarbeitung der Systemkennzahlen ist ein wichtiger Schritt, um bilanzieren zu können und so das ganze System transparent zu bewerten. Es werden im Folgenden antriebstechnische, kinematische und elektrotechnische Werte ermittelt.

Leistungsbedarf des Elektromotors

$$P = \frac{1}{\eta} \times F \times v$$

$$F = F_R + F_L + F_S + F_B$$

Fahrzeug mit Rang Extender System

$$F_{R\ BZ} = 2,5\ kg \times 9,81\ \frac{kg}{s^2} \times 0,02 = 0,4905\ N$$

$f_R = 0,02$ (Reifen auf Asphalt trocken) [7]

$$F_{L\ BZ} = \frac{1}{2} \times 0,15 \times 1,2041\ \frac{kg}{m^3} \times 0,02264\ m^2 \times 9,722^2\ \frac{m^2}{s^2} = 0,1932\ N$$

$c_w = 0,15$ (Rennwagen) [7]; $v = 35\ km/h$ [70]; $A = 160\ mm \times 141,5\ mm = 0,02264\ m^2$ [70]

$$F_{S\ BZ} = 0\ N$$

Das Fahrzeug wird in einer horizontalen Ebene betrachtet, somit ist α gleich Null.

$$F_{B\ BZ} = 2,5\ kg \times 1,944\ \frac{m}{s^2} = 4,86\ N$$

$m_{red} = 0$, da auf Gesamtsystem bezogen zu vernachlässigende Masse; $a = 25,2\ m/s^2$, ausgehend von der Höchstgeschwindigkeit $35\ km/h$ [70] soll diese in 5 Sekunden erreicht werden.

$$F_{Motor\ BZ\ Beschleunigt} = 0,4905\ N + 0,1932\ N + 4,86\ N = 5,544\ N$$

Stark zu erkennen ist der hohe Kraftaufwand beim Beschleunigen. Dieser macht circa 90 % der Gesamtkraft aus.

$$P_{Motor\ BZ\ Beschleunigt} = \frac{1}{0,55} \times 5,544\ N \times 9,722\ \frac{m}{s} = 97,99\ W$$

4. Systemaufbau

Der enorm hohe Leistungsbedarf resultiert aus der Annahme, dass permanent beschleunigt wird und eine Anströmungsgeschwindigkeit der Luft von 35 km/h vorherrscht.

$$F_{Motor\ BZ} = 0,4905\ N + 0,1932\ N = 0,6837\ N$$

$$P_{Motor\ BZ} = \frac{1}{0,55} \times 0,6837\ N \times 9,722\ \frac{m}{s} = 12,085\ W$$

Der theoretisch reale Leistungsbedarf bei 35km/h liegt deutlich unter dem zuvor genannten.

Fahrzeug ohne Rang Extender System

Vergleicht man den Leistungsbedarf des Elektromotors mit Range Extender Aufbau und dem Originalfahrzeug,

$$F_B = 1,4\ kg \times 1,944\ \frac{m}{s^2} = 2,7216\ N$$

$$F_{Motor\ Beschleunigt} = 0,2747\ N + 0,1932\ N + 2,7216\ N = 3,1878\ N$$

$$P_{Motor\ Beschleunigt} = \frac{1}{0,55} \times 3,1878\ N \times 9,722\ \frac{m}{s} = 56,349\ W$$

steigt der Leistungsbedarf im Beschleunigungsfall, um circa 60% beim Fahrzeug mit Range Extender System.

$$F_{Motor} = 0,2747\ N + 0,1932\ N = 0,4679\ N$$

$$P_{Motor} = \frac{1}{0,55} \times 0,4679\ N \times 9,722\ \frac{m}{s} = 8,270\ W$$

Gleichermaßen verhält sich der Mehrbedarf an Leistung beim stationären Fahren mit 35 km/h. Hierbei ist der Verbrauch ohne Range Extender System ebenso um circa 30 % niedriger. Der erhöhte Verbrauch ergibt sich allein aus der höheren Masse beim Fahrzeug mit Range Extender. In der realen Umsetzung im Pkw kann dies ebenso beobachtet werden. Es kann jedoch im Modell der Tank nicht verkleinert oder die Masse verringert werden, da dieser als Einkaufsartikel von der Firma Linde geordert wird. Der Elektromotor kann mit einer Abgabeleistung von 65 Watt die gewünschten Beschleunigungswerte, bei Aufbau des Range Extender Systems, nicht erreichen. Um die gleichen Beschleunigungswerte, wie beim Fahrzeug ohne Range Extender System zu erreichen ($a_{max}=3,789\ m/s^2$), müsste ein Elektromotor mit einem Energiebedarf von 178 Watt und einer Abgabeleistung von 98 Watt, bei gleichbleibenden Ausgangswerten, verwendet werden. Dies entspricht dem doppelten und würde bei der Umsetzung zusätzlich die Kosten erhöhen.

4. Systemaufbau

Elektrische Wertermittlung

Um die Funktionstüchtigkeit aller elektrischen Bauteile zu gewährleisten, müssen verschiedenste Größen ermittelt werden.

Maximaler Entladestrom

$$P = U \times I$$

$$U_{max} = \frac{97,99 \text{ W}}{5 \text{ V}} = 19,6 \text{ A}$$

Der vom Hersteller Akkumulator angegebene maximale Entladestrom beträgt 66 A [72] und liegt somit weit über dem maximalen Entladestrom. Die vom Hersteller als unterste Grenze angegebene Zellspannung beträgt 2,5 Volt [72]. Daraus ergibt sich bei zwei Zellen eine Mindestspannung von 5 Volt.

Maximal zulässiger Dauerstrom

$$U_{max \text{ dauer}} = 0,5 \times 66 \text{ A} = 33 \text{ A}$$

„Wenn keine konkreten Herstellerangaben vorliegen, sollte der Akku auf Dauer nicht höher als mit ca. 50 % des maximal zulässigen Spitzenstromes belastet werden.“ [72] Der Wert liegt geringfügig unter dem maximalen Entladestrom und würde so bei einer dauerhaften Beschleunigung zur Beschädigung des Akkumulators führen. Da der Elektromotor eine circa 30 % geringere Leistung hat, wird der berechnete maximale Entladestrom nie erreicht. Somit liegen keine Gründe vor, das Fahrzeug nicht zu betreiben.

Maximaler Ladestrom der Brennstoffzelle

$$U_{max \text{ laden}} = \frac{13 \text{ W}}{6,6 \text{ V}} = 1,969 \text{ A}$$

Der maximale Ladestrom der Brennstoffzelle liegt unter dem vom Hersteller des Akkumulators (3,3 A [72]) und ist somit nicht bedenklich. Jedoch muss ein DC/DC Spannungswandler verbaut werden.

4. Systemaufbau

Reichweiten Verlängerung bei der Verwendung verschiedener Druckflaschen, durch den Range Extender. Ausgehend von einem Volumenverbrauch von 180 ml/min [71] ergeben sich folgende Ergebnisse:

Tabelle 4.3-1: Vergleich von Wasserstoffspeichern

	Linde MINICAN®	Linde ECOCYL®	MH 10 Udomi
Volumen [l]	1	1	0,15
Tankinhalt [NI]	12	150	10
Leergewicht [kg]	0,54	2,4	0,11
Aufladezeit [h]	einweg	ca. 0,15	ca. 0,5
Anschaffungskosten	57,00 €	350,00 €	85,00 €
Betriebsdauer [min]	66,67	833,33	55,56
res. Leistung [W]	13,33	166,67	11,11
Verlängerung [%]	54,60	682,50	45,50

Die Berechnung macht deutlich, dass der Gebrauch einer Linde ECOCYL® Druckflasche vollkommen den Anforderungen genügt.

Aus Konstruktions- und Kostengründen ist die Brennstoffzelle entsprechend gewählt. Da die Leistung lediglich 12 Watt beträgt und der Leistungsbedarf bei 35 km/h circa 12 Watt, kann das Fahrzeug im Range Extender Betrieb nicht die volle Leistung erbringen. Um die volle Leistung dennoch zu gewährleisten wird ein zweiter Akkumulator verbaut, somit kann ein Akkumulator geladen und der zweite für den Fahrbetrieb dienen. Bei realen Fahrzeugen spricht man von der Partitionierung des Akkumulators. In Bezug auf die Sicherheit im Straßenverkehr ist an dieser Stelle die Bremsenergie zu erwähnen. Bei der Berechnung geht die Masse als Faktor ein. Aufgrund dessen ist der Bremsweg um ein vielfaches länger. In der Realität bedeutet das ein Sicherheitsrisiko, bei nicht entsprechend größer dimensionierten Bremsen. Wie schon zu in Kapitel 2.6 genannt ist die Fahrzeugmasse der schwerwiegendste Faktor bei der Bestimmung des Energiebedarfs.

4. Systemaufbau

4.3.2 Konstruktion

Wie auch beim PKW sind die Anforderungen an ein Modell ähnlich, neben Gewicht und Bauraum spielen ebenso die Fahreigenschaften, Lage des Schwerpunktes und ein leichter Zugang zum Tank eine wichtige Rolle. Diese Faktoren müssen konstruktiv berücksichtigt werden. Die Konstruktionsarbeit liegt in der Integration eines Halteapparates, der das Range Extender System sicher am Fahrzeug unterbringt.

Die Folgenden Komponenten gehören dazu:

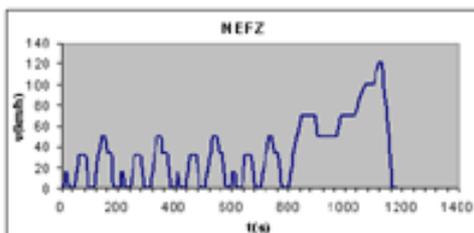
- Brennstoffzelle
- H²-Tank
- Druckminderer
- Balancer
- Leistungselektronik
- Kabel
- Schläuche
- Akkumulatoren

Die mehr Belastung des Modellfahrzeugs durch das Gewicht der Komponenten ist gleichermaßen auf ein Fahrzeug referenzieren. Zusätzlich müssen Bremsen und Fahrwerkskomponenten auf die erhöhte Belastung ausgelegt werden.

4.3.3 Zyklen

Der Kraftstoffverbrauch wird mit steigenden Erdölpreisen ein immer wichtigeres Thema. In der folgenden Übersicht werden die wichtigsten Fahrzyklen weltweit kurz vorgestellt. Die Grafiken zeigen die jeweiligen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Zeit.

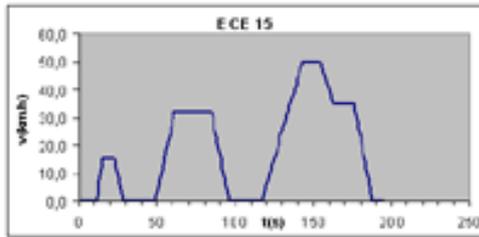
NEFZ: Neuer Europäischer Fahrzyklus



NEFZ ist die Kurzform für Neuer Europäischer Fahrzyklus. Er wird in Europa für die objektive Bewertung des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen verwendet und besteht aus vier aneinandergereihten Stadtfahrten ECE und

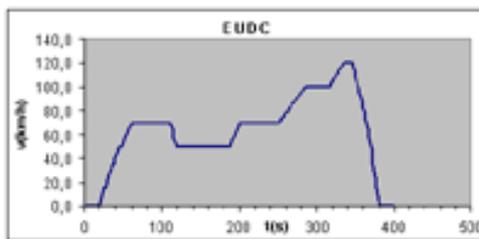
einer Überlandfahrt EUDC. Insgesamt wird 20 Minuten gefahren.

4. Systemaufbau



Der Stadtzyklus des NEFZ wird ECE 15 genannt. Er besteht aus vier Konstantfahrten mit einer Geschwindigkeit von 15, 32, 40 und 50 km/h. Ampelphasen mit großen Stopp/Startanteilen werden ebenfalls berücksichtigt. Die

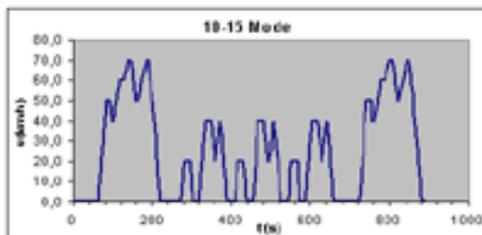
Verbrauchsangaben in Europa für den Stadtteil werden mittels dieses Zyklus ermittelt.



Die Überlandfahrt des NEFZ wird EUDC genannt. Verschiedene konstante Geschwindigkeitsbereiche sollen sowohl Landstraßen als auch Autobahnfahrten mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h realisieren. Die Verbrauchsangaben in Europa für Automobile werden

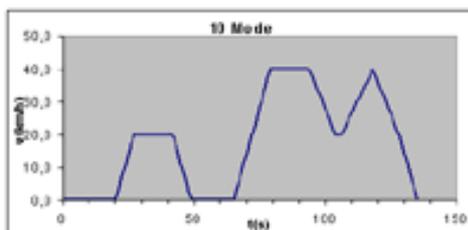
mittels dieses Zyklus ermittelt.

10-15 Mode: Japanischer Fahrzyklus

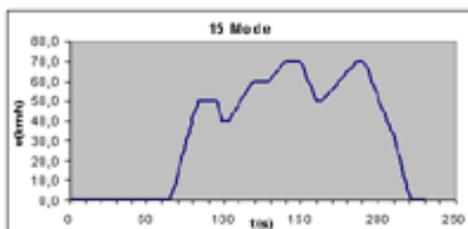


10-15 Mode ist die Bezeichnung für den offiziellen japanischen Fahrzyklus. In Japan zugelassenen Fahrzeuge werden mittels diesem Fahrzyklus objektiv hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs bewertet. Am Anfang und am Ende des Zyklus wird jeweils eine Überlandfahrt der sogenannte 15

Mode durchgeführt. Der Mittelteil besteht aus drei Stadtfahrten dem 10 Mode.



Der japanische Stadtzyklus wird 10 Mode genannt. Er besteht aus zwei Konstantfahrten mit einer Geschwindigkeit von 20 und 40 km/h, sowie zwei Ampelphasen mit großen Stopp/Startanteilen. Die städtischen Verbrauchsangaben werden so in Japan ermittelt.

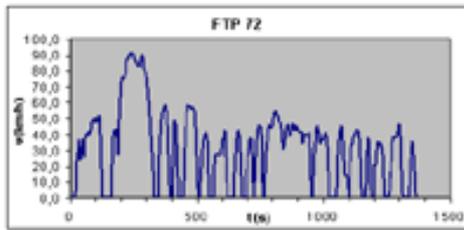


Die Überlandfahrt des 10-15 Mode wird 15 Mode genannt. Durch verschiedene konstante Geschwindigkeitsbereiche sollen sowohl Landstraßen als auch Autobahnfahrten realisiert werden. Die maximale Höchstgeschwindigkeit beträgt dabei 80 km/h. Die japanischen Verbrauchsangaben

für Ausserorts werden mittels diesem Zyklus ermittelt.

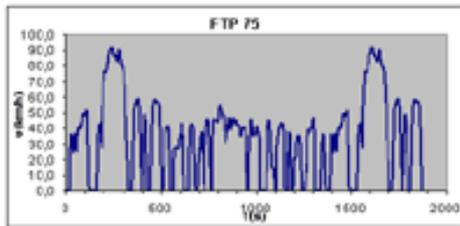
4. Systemaufbau

FTP 72 & FTP75: Amerikanischer Fahrzyklus



Der FTP 72 war der offizielle amerikanische Fahrzyklus. Ein Teil des Zykluses. Wie man anhand des Geschwindigkeitsprofils schon erkennen kann, wurde dieser Zyklus aus einer Messfahrt abgeleitet und stellt somit ein realitätsnahes

Fahrverhalten dar.



Der FTP 75 ist der offizielle amerikanische Fahrzyklus und stellt eine Weiterentwicklung des FTP 72 dar, da der ursprüngliche Zyklus um ein Teil ergänzt wurde, der mit einem warmgelaufenen Verbrennungsmotor bewältigt werden muss. Das Prüffahrzeug muss dabei eine maximale

Geschwindigkeit von ca. 90 km/h erreichen .

Quelle: [51]

Es kann an dieser Stelle eine Aussage dazu getroffen werden, dass die Fahrzyklen nicht mit dem Modellfahrzeug gefahren werden können. Es ist aber eine Nachempfindung möglich. Die Aussage in Abschnitt 4.3.1, dass aufgrund der erhöhten Masse ein erheblicher Mehrverbrauch zu erwarten ist, wird ohne konkreten Fahrzyklus empirisch aufgezeigt.

4. Systemaufbau

4.3.4 Aufbau und Zusammenbau

Durch die Verwendung eines Grundsystems muss der Range Extender lediglich in das bestehende System integriert werden. Hierzu ist eine besondere Halterung notwendig, die im Rahmen dieser Arbeit konstruiert und gebaut wurde. Die Brennstoffzelle wird mittels Schläuchen aus dem Drucktank mit Wasserstoff versorgt, der zwischengeschaltete Druckminderer begrenzt den Druck und schützt so vor Beschädigung der Brennstoffzelle. Der erzeugte Strom wird über einen DC/DC Konverter an einen Li-Po Ladegerät und passiven Balancer weitergegeben, welche den Ladezustand der einzelnen Zellen optimal regelt. Das passive Balancieren des Akkus bedeutet zusätzliche Verluste. Ein Aktives Balancieren ist lediglich durch eine komplexe Software möglich. Die Funktion der Brennstoffzelle wird zudem über Ventil gesteuert. Der energetische Tankinhalt ist so gering, dass maximal 12 Wh zur Verfügung stehen. So ist gewährleistet, dass die Akkuzellen keinesfalls überladen werden. Der Vergleich zwischen Abbildung 4.3-1 und -2 macht den schaltungsnahen Nachbau deutlich. Aufgrund der zusätzlichen Komponenten am Fahrzeug steigt das Gewicht von ursprünglich 1,4 kg auf circa 2,5 kg. Die enorme Gewichtszunahme führt zu einem höheren Energiebedarf und einem allgemeinen trägen Fahrverhalten.

4.4 Sicherheit

Zu Einhaltung der Sicherheit und der nationalen und internationalen Richtlinien wurden im Laufe der Entwicklung und Feldversuche zu folgenden Punkten Dokumente angefertigt.

- allgemeine Richtlinien
- Kraftstoffe
- Fahrzeuge
- Gastanks und Druckbehälter
- kryogene Behälter und Tanks
- Komponenten
- Werkstoffe und Materialien

Nachzulesen in "Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik (Eichsler, Klell)".

5. Bewertungen

Das ausführlich vorgestellte System, also Range Extender und Elektroantrieb, werden im folgenden Kapitel hinsichtlich der Ökologie und Ökonomie bewertet. Es wird eine Aussage darüber getroffen, welche Faktoren zutreffen müssen, um das System sinnvoll unter ökologischen und ökonomischen Aspekten zu betreiben. Der Schwerpunkt liegt vor allem auf Nachhaltigkeit. Die im Kapitel 4 beschriebenen Schwachstellen und Potentiale dienen als Grundlage.

5.1 Ökologische Bewertung

„Der falsche Denkansatz des Ressourcen- und Natur- ‚Verbrauches‘ muss endlich überwunden werden. Demokrit hat schon vor 2500 Jahren gewusst, dass Nichts aus dem Nichts kommt, und Nichts ins Nichts verschwindet. Die Ressourcen reichen für alle gegenwärtigen und zukünftigen Generationen. Sie sind in Wahrheit unerschöpfbar, obwohl sie nicht unbegrenzt vorhanden sind. Wir verbrauchen sie nämlich nicht, wir gebrauchen sie nur.“ [81]

Ausgehend von dieser Behauptung, die der gegenwärtigen Bewusstseinslage widerspricht, wird ökologisch bewertet. „Denn diese Behauptung ist aus drei Gründen richtig:

- Die derzeitigen und künftigen Stoffströme sind klein im Verhältnis zu den Vorräten und die erforderlichen Energieströme sind klein im Verhältnis zum Energieumsatz der Natur,
- die verwendeten Rohstoffe verschwinden nicht, sondern verbleiben im technischen Kreislauf, werden immer wieder verwendet (Schrott) und
- es gibt für jede Ressource Ersatz. Der mit der Knappheit steigende Preis schützt alle Ressourcen vor der völligen Erschöpfung, weil Ersatzlösungen irgendwann billiger werden.“ [81]

Rohstoffe

Schlussfolgernd ist aus der Aussage abzuleiten, dass lediglich die Gewinnung der Ressourcen und deren Rückführung in die Natur oder deren Verbleib im Kreislauf ökologisch sein müssen. Bei der Gewinnung von Metallen, die für die Produktion von Elektromotoren oder Drucktanks verwendet werden, bleibt das gewonnene Material im Kreislauf. Auch seltene Metalle, wie zum Beispiel Platin, das in der Brennstoffzelle als Katalysator agiert, bleiben im technischen Kreislauf erhalten. Die geringen Weltvorkommen an Lithium lassen darauf schließen, dass auch dieser Rohstoff im technischen Kreislauf erhalten bleibt, was den Abbau sinnvoll erscheinen lässt.

5. Bewertungen

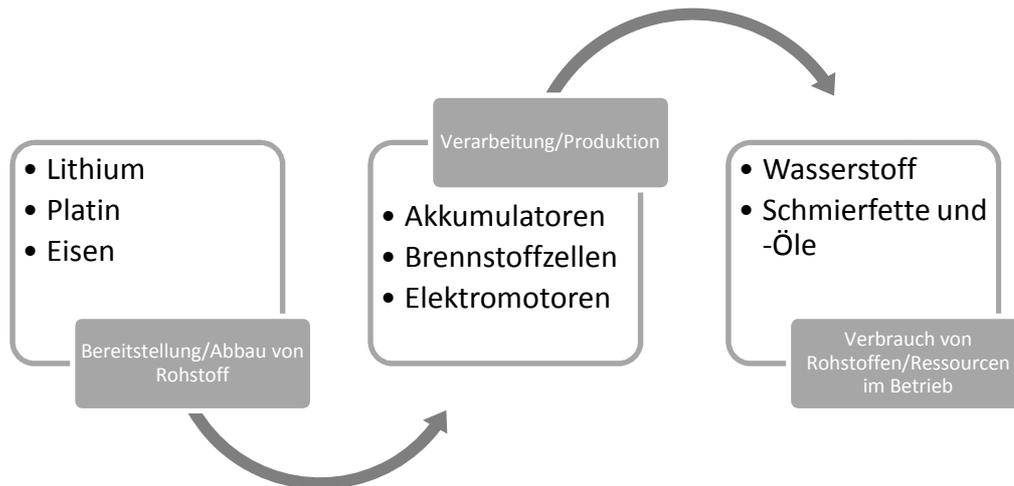


Abbildung 5.1-1: vereinfachter Rohstoffverbrauchsprozess

Doch der zumeist sehr hohe Aufwand und mit schweren Folgen für die Umwelt verbundene Abbau trübt das Bild deutlich ein. Immer wieder wird die Frage der Nachhaltigkeit aufgeworfen! Die hohe Lebensdauer von Elektromotoren und Drucktanks zeigt eindeutig den sinnvollen Einsatz der Ressourcen. Der geringe Verbrauch an Betriebsstoffen, wie zum Beispiel Ölen, die beim Verbrennungsmotor benötigt werden, entfallen. Im Vergleich zum Verbrennungsmotor ist der Elektroantrieb bei der Produktion nicht ressourcenschonender. Das lässt sich einfach über die deutlich höhere Masse von Elektrofahrzeugen belegen. Auch der technisch höhere Aufwand und der deutlich höhere Energieverbrauch bei der Produktion lassen einen ökologischen Vorteil nur noch zu, wenn bei den verbrauchten Ressourcen Energie aus alternativen Rohstoffen stammt.

Energieherkunft

Für die Produktion von Wasserstoff als Energieträger wird elektrischer Strom benötigt. Elektrischer Strom ist gleichzeitig für Elektrofahrzeuge die wichtigste Energieform, die in Akkumulatoren gespeichert wird. Die Herkunft von elektrischem Strom ist ausschlaggebend für die ökologische Bilanz des Systems.

5. Bewertungen

Diagramm 5.1-1: Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch [84]

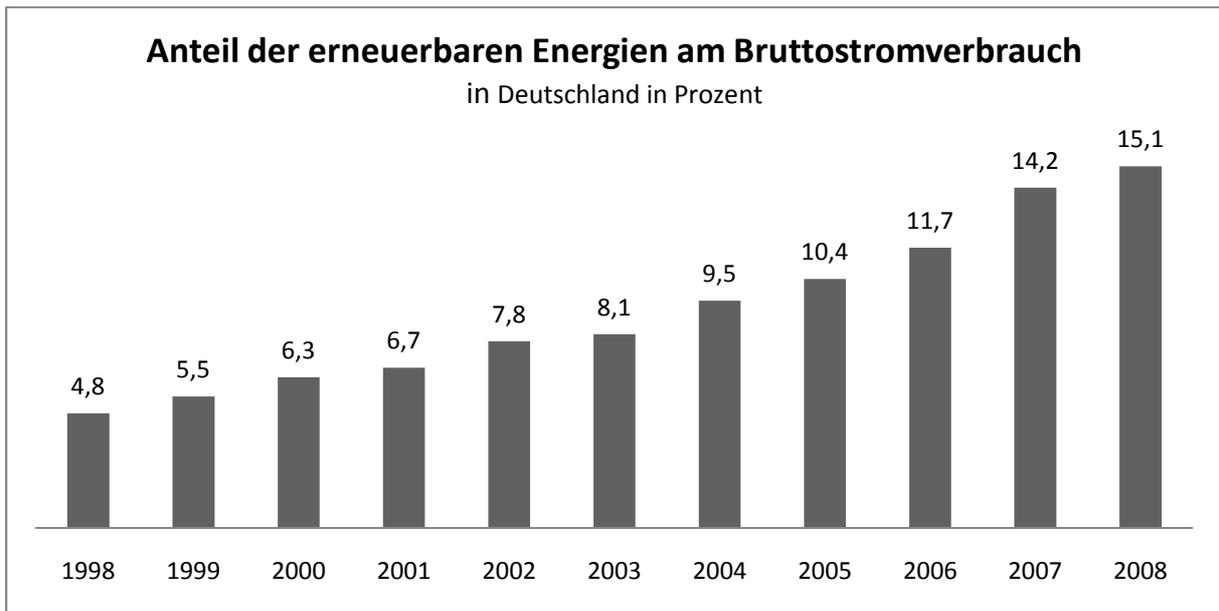
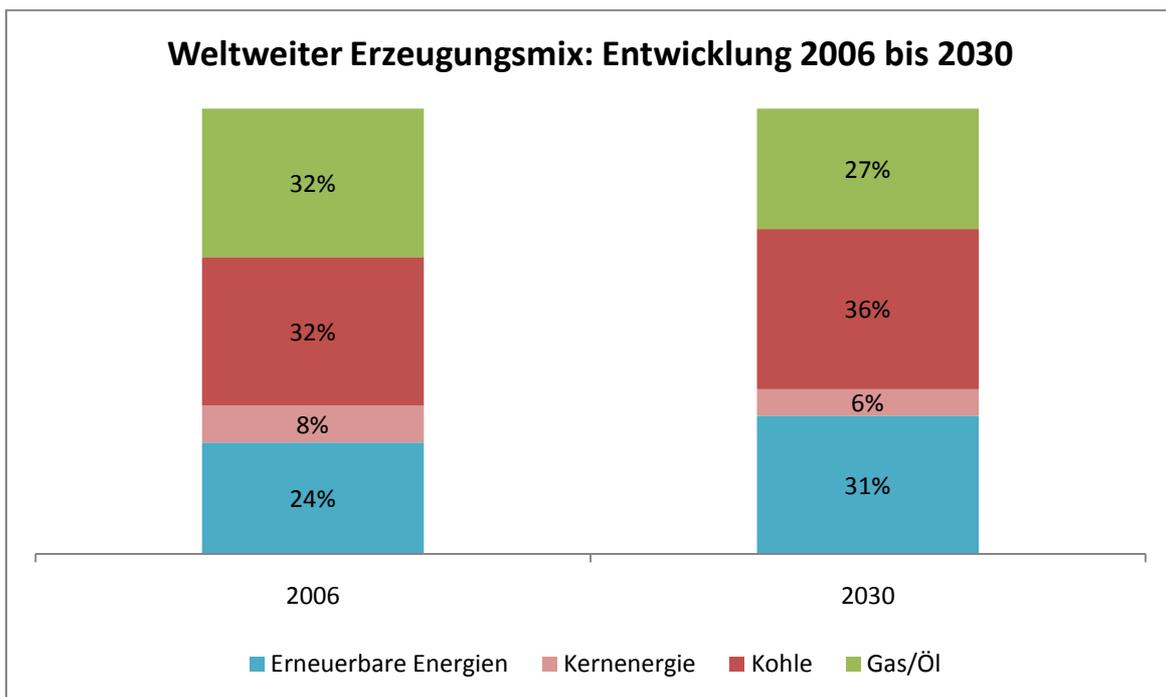


Diagramm 5.1-2: Energiemix Vergleich 2006 und 2030 [83]



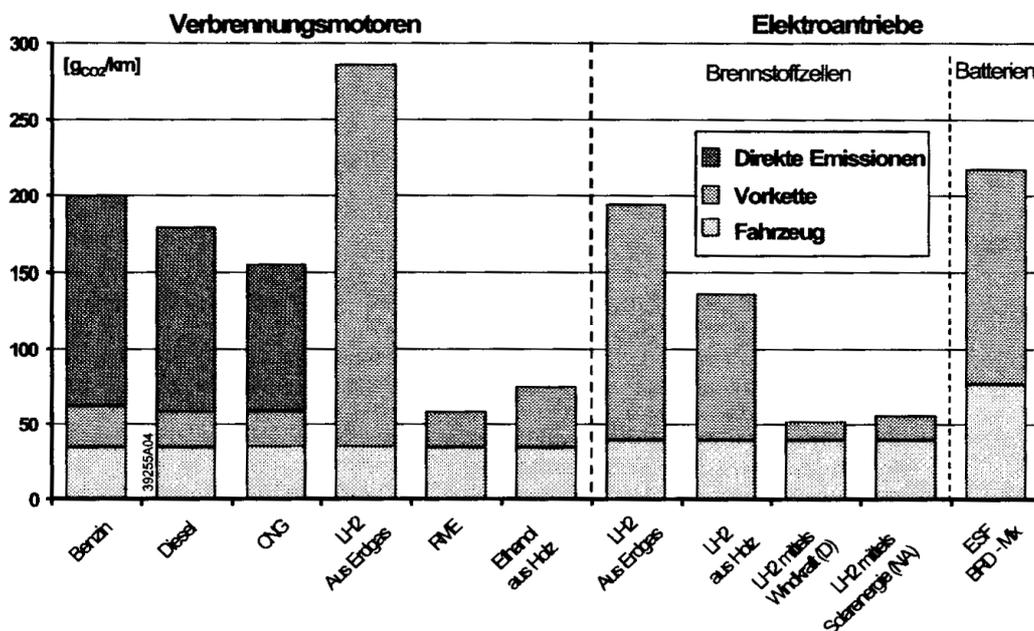
Der in Diagramm 5.1-1 zu erkennende Anstieg der erneuerbaren Energien in Deutschland am gesamten Bruttostromverbrauch macht deutlich, wie gering dieser Anteil ist. Wie in Diagramm 5.1-2 abzulesen, werden weltweit bis 2030 31 % der Energie aus erneuerbaren Energien bereitgestellt. Die Einbindungskonzepte, damit Elektrofahrzeuge Teil des Stromnetzes werden und überschüssige Energie gespeichert wird, bringen auch Nachteile und würde den im Fahrzeug genutzten Anteil an erneuerbarem Strom nur minimal erhöhen. Gleichzeitig würde die Beanspruchung des Akkumulators

5. Bewertungen

steigen. Die so entstehende kürzere Lebensdauer der Akkumulatoren verschlechtert die ökologische Bilanz. Auch der Betrieb von Elektrolyse mittels überschüssiger Energie aus erneuerbaren Energien ist nur bedingt umsetzbar. Die Schwankungen würden ein zyklisches An- und Abschalten der Anlagen bewirken, welches wiederum zu erhöhten Verschleißerscheinungen führt.

Da der sowohl im Range Extender als auch im Elektroantrieb (via Akkumulator) verbrauchte Strom nur zu 31 % im Jahr 2030 aus erneuerbaren Energien bestehen wird, wird das den ökologischen Nachteil des erhöhten Energieverbrauchs bei der Produktion nicht ausgleichen können. Das hat zur Folge, dass sowohl Elektrofahrzeuge als auch Elektrofahrzeuge mit Range Extender in den nächsten Jahrzehnten keine wesentlich bessere ökologische Bilanz als Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen haben werden (siehe Abb. 5.1-4). Schlüsselfaktoren sind die höheren Energieverbräuche bei der Produktion, geschuldet dem technisch deutlich komplexeren Aufbau aufgrund von zusätzlichen Grundfunktionen, wie zum Beispiel Bremsenergierückgewinnung, Start-/Stopp-Betrieb, Boost-Betrieb beim Abruf von Spitzenleistung. Der Verbrauch von Materialien, die nicht im technischen Kreislauf vorhanden sind, wie zum Beispiel Lithium und der Verbrauch von elektrischen Strom der zu zwei Dritteln fossilen Energieträgern entstammt, sind zusätzliche ökologische Belastungen.

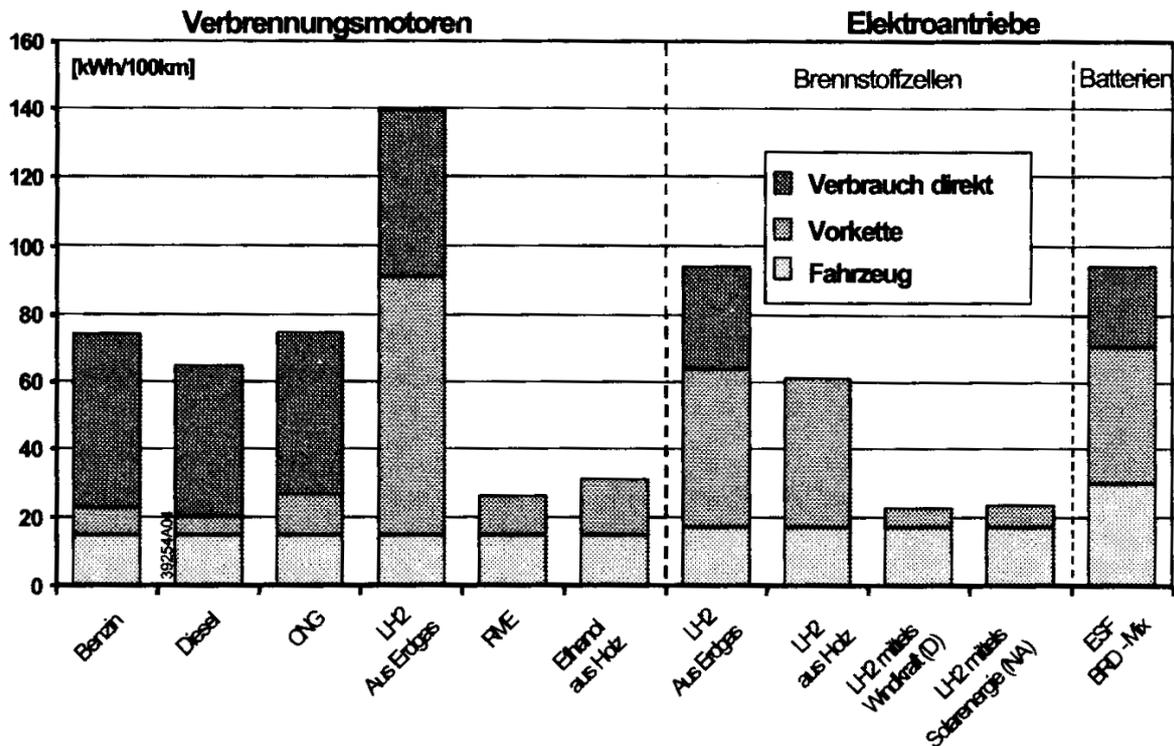
Diagramm 5.1-3: Spezifische kumulierte CO₂-Emissionen für einen Mittelklasse-Pkw [13]



Die Brennstoffzelle bietet sich als Range Extender genau so wenig, wie als alleinige Antriebsart an. Grund ist weiterhin der zu geringe Gesamtwirkungsgrad von 19-25 % der gesamten Prozesskette (H₂-Herstellung bis zur Umwandlung in der Brennstoffzelle und Antrieb des Fahrzeugs).

5. Bewertungen

Diagramm 5.1-4: Spezifischer KNRA für einen Mittelklasse-Pkw [13]



Der Vorteil eines Range Extender in Form einer Brennstoffzelle liegt in der Verschaltung von Akkumulator und Brennstoffzelle. Dabei werden der gute Wirkungsgrad und die Dynamik des Akkumulators kombiniert und führen so zu einem optimierten Energieverbrauch und einem optimalen Bereitstellen von abrufbarer Energie. Die Möglichkeit, Wasserstoff aus überflüssiger Energie aus dem Stromnetz, welche durch erneuerbare Energien erzeugt wurde, zu nutzen, mindert die CO₂-Bilanz stark und bietet so die Möglichkeit, geringere Emissionswerte als reine Elektrofahrzeuge zu liefern. Siehe hierzu Diagramm 5.2-4.

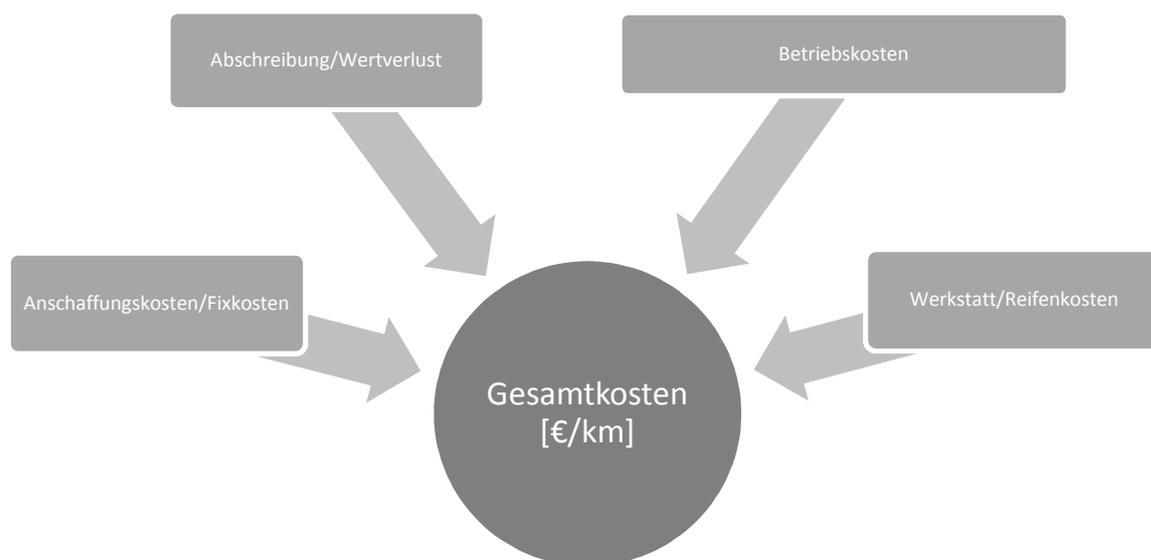
Voraussetzungen für eine positive ökologische Bilanz wären erreichbar, wenn folgende Punkte umgesetzt würden:

- Energieursprung 100 % aus erneuerbaren Energien
- Senkung der Fahrzeugmasse um mindestens 50 %
- Verbesserung der Wirkungsgrade bei Brennstoffzelle sowie Verzicht auf seltene Rohstoffe
- Nutzung der Kryoenergie beziehungsweise der Kompressionsenergie bei Wasserstofftanks
- Entwicklung von transportablen physikalischen Energiespeichern für den mobilen Einsatz
- Verwendung eines Energiemanagement Systems

5.2 Ökonomische Bewertungen

Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben sind kein Zukunftstraum mehr, sondern aus der Perspektive der Entwicklung längst Tatsache [13]. Auch die Möglichkeit heute schon ein Auto bauen zu können, das vorwiegend aus Holz und Keramik besteht [81] ist denkbar. Das ist und wird allerdings auch in der Zukunft unwirtschaftlich bleiben. Grund dafür sind die verwendeten Ressourcen, die günstigste Wahl ist immer unter ökonomischen Gesichtspunkten zu treffen. Gleiches gilt für Verbrauchsressourcen, wie zum Beispiel Benzin, Diesel, Wasserstoff und Strom.

Daraus folgernd muss die ökonomische Charakterisierung eines Systems in zwei Begebenheiten unterschieden werden. Zum einen sind das die Fixkosten und zum anderen die Betriebskosten. Der Vergleich dieser beiden Kostenstellen mit schon vorhandenen Systemen, wie zum Beispiel dem Otto-Hybrid oder Diesel, führt zu einem aussagekräftigen Ergebnis. Zusätzliche Kostenstellen, wie zum



Beispiel Steuern und Versicherungen, werden angelegt, wie in Abbildung 5.2-1 dargelegt.

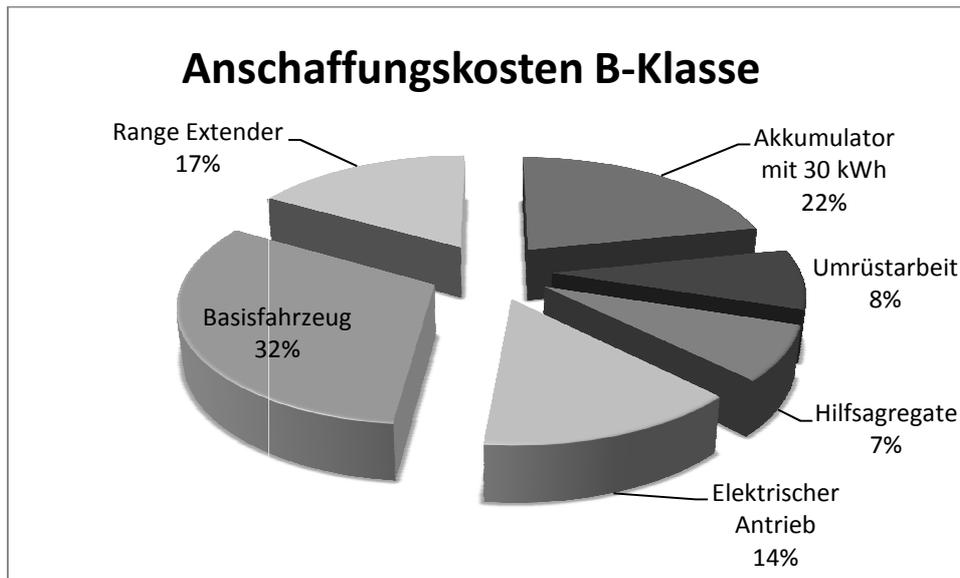
Abbildung 5.2-1: Betrachtung Kostenstellen Anschaffungskosten/Fixkosten

Die Fixkosten, in denen die Anschaffungskosten enthalten sind, sind für die Konkurrenzfähigkeit eines Fahrzeugs ausschlaggebend. Das Elektrofahrzeug wird mit ca. 40 % - 50 % höheren Anschaffungskosten beziffert, als ein Auto mit normalem Verbrennungsmotor. Die Preise von Wasserstoff oder Elektrofahrzeugen mit Range Extender Brennstoffzelle sind ähnlich zu veranschlagen. Eine breitere Einführung wird erst dann möglich sein, wenn gesetzliche Vorschriften über die Emissionen dazu zwingen oder staatliche Förderungen locken [85]. Der Anschaffungskostenunterschied verhindert bisher eine Umsetzung. Als Beispiel dient die B-Klasse von

5. Bewertungen

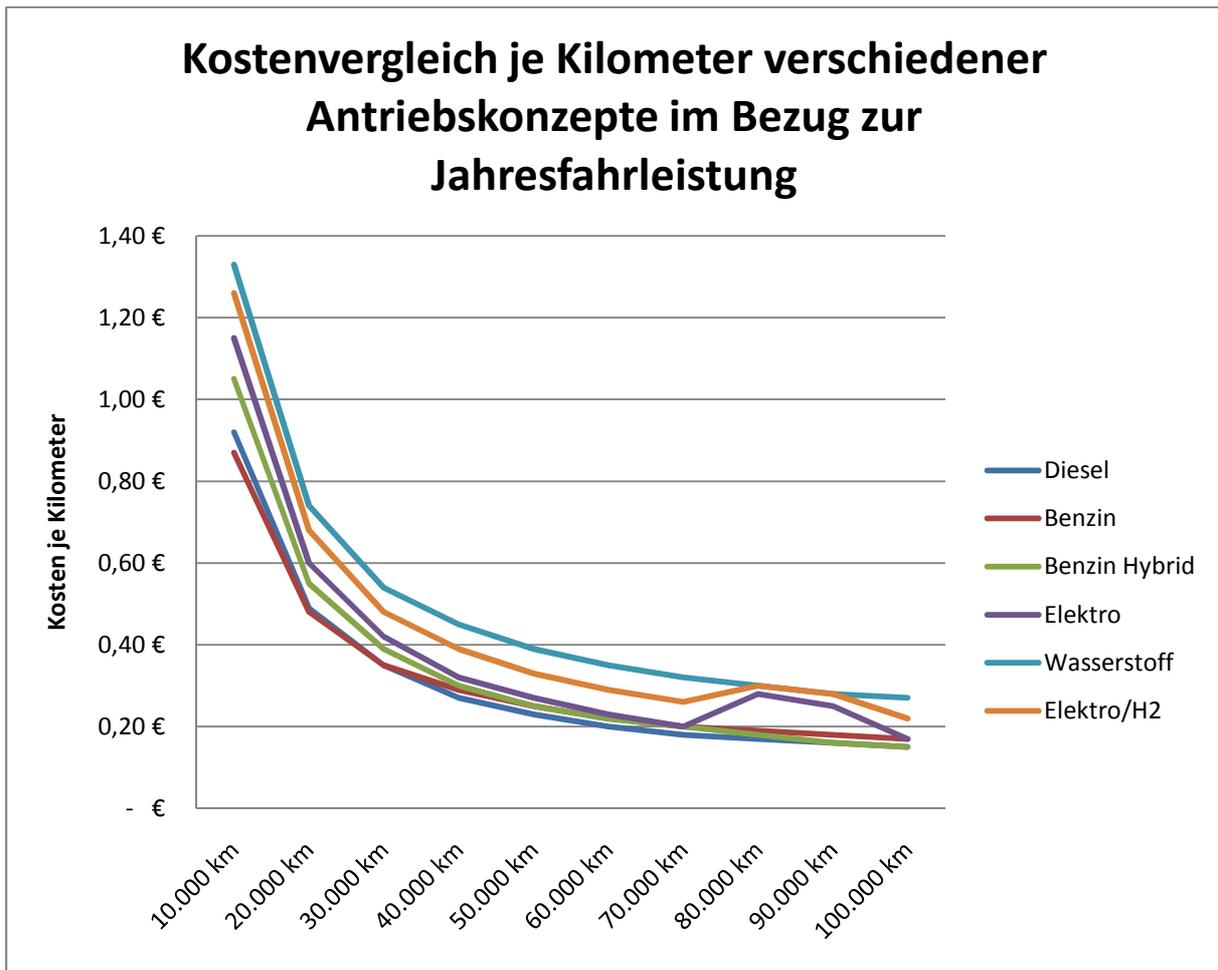
Mercedes-Benz. Dieses Fahrzeug wird immer wieder auf Ausstellungen mit neusten Antriebskonzepten präsentiert und ist somit ein Fahrzeug, das auch in Fachkreisen als Zukunftsträger gilt. Die Anschaffungskosten belaufen sich bei einer B-Klasse Sports Tourer 160 (Benzin) auf 26.400 € und bei einer B-Klasse mit Elektromotor mit Range Extender Brennstoffzelle auf das 1,6-fache (47.840 €) mit Akkumulator (20 kWh). Der Lithium-Akkumulator wird mit Kosten von 250 €/kWh angegeben [85]. Daraus ergeben sich bei einem nutzbaren Energiegehalt von 20 kWh, Kosten von 5000 €. Die hohe Kostenstelle Akkumulator wird sich in Zukunft nicht vermeiden lassen, da die Rohstoffpreise mit hoher Wahrscheinlichkeit weiter steigen werden und nur begrenzt sinkenden Produktionskosten gegenüberstehen. Hinzu kommt, dass in zwei Arten von Fahrzeugen unterschieden werden, zum einen "*Conversion Design*" (umgerüstete Fahrzeuge) und "*Purpose Design*" (spezielle Leichtbaufahrzeuge). Der Energieverbrauch von Conversion-Design-Fahrzeugen wird mit 20-30 kWh auf 100 km im ECE-Stadtzyklus beziffert. Bei Purpose-Design-Fahrzeugen wird ein Verbrauch von 15-20 kWh auf 100 km im ECE-Stadtzyklus angegeben [85]. Der Unterschied ist auf die Gewichtsreduzierung zurückzuführen. In der Berechnung wird von einem Verbrauch von 20 kW pro 100 km ausgegangen. Das heißt, dass ein Akkumulator mit 30 kWh nutzbarer Energie für Fahrzeuge im täglichen Betrieb mit einer Reichweite von circa 150 km, bei einem Verbrauch von 20 kWh auf 100 km, ausreichend ist. Für die Fahrt von 500 km muss allerdings ein Zusatzsystem in das Elektrofahrzeug integriert werden. Das Ziel der Entwickler und Produzenten ist es, eine Brennstoffzelle in der Serienfertigung umzusetzen, die 750 €/KW kosten soll [28]. Zum Laden des Akkumulators ist eine Brennstoffzelle mit 20 kW Leistung ausreichend. Ein entsprechender Wasserstofftank müsste für eine Reichweite von 400 km ausgelegt werden und somit ein Wasserstoffvolumen von circa 160 m³ aufnehmen können. Die Kosten des Range Extender setzen sich aus den Hauptkostenstellen Brennstoffzelle und Wasserstofftank zusammen.

Diagramm 5.2-1: Kostenverteilung am Beispiel B-Klasse



Wie im Diagramm 5.2-1 dargestellt verteilen sich knapp 36 % auf den elektrischen Antrieb und der Speicher des Fahrzeugs. Das ist im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren sehr viel. In der Serienproduktion würden sich die Kosten, wie oben genannt, auf das Doppelte bis 1,6 fache eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor belaufen. Neben den einmaligen Anschaffungskosten kommen zyklische Kosten für den Wechsel des Akkumulators und der Brennstoffzelle hinzu. Der Wechsel der Brennstoffzelle erfolgt nach 5000 Betriebsstunden [28], das entspricht einer Fahrleistung von weit über 200.000 km mit Hilfe des Range Extender. Die Ladezyklen von Lithium Akkumulatoren sind begrenzt und müssen alle 600 Zyklen [40] ausgetauscht werden. Dies würde beim betrachteten Beispiel einen Wechsel des Akkumulators alle 75.000 km zur Folge haben. Die extrem hohen Wiederholungskosten von Akkumulator und Brennstoffzelle lassen eine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit nicht zu. Siehe hierzu Diagramm 5.2-2.

Diagramm 5.2-2: Kostendarstellung je Kilometer im Jahr



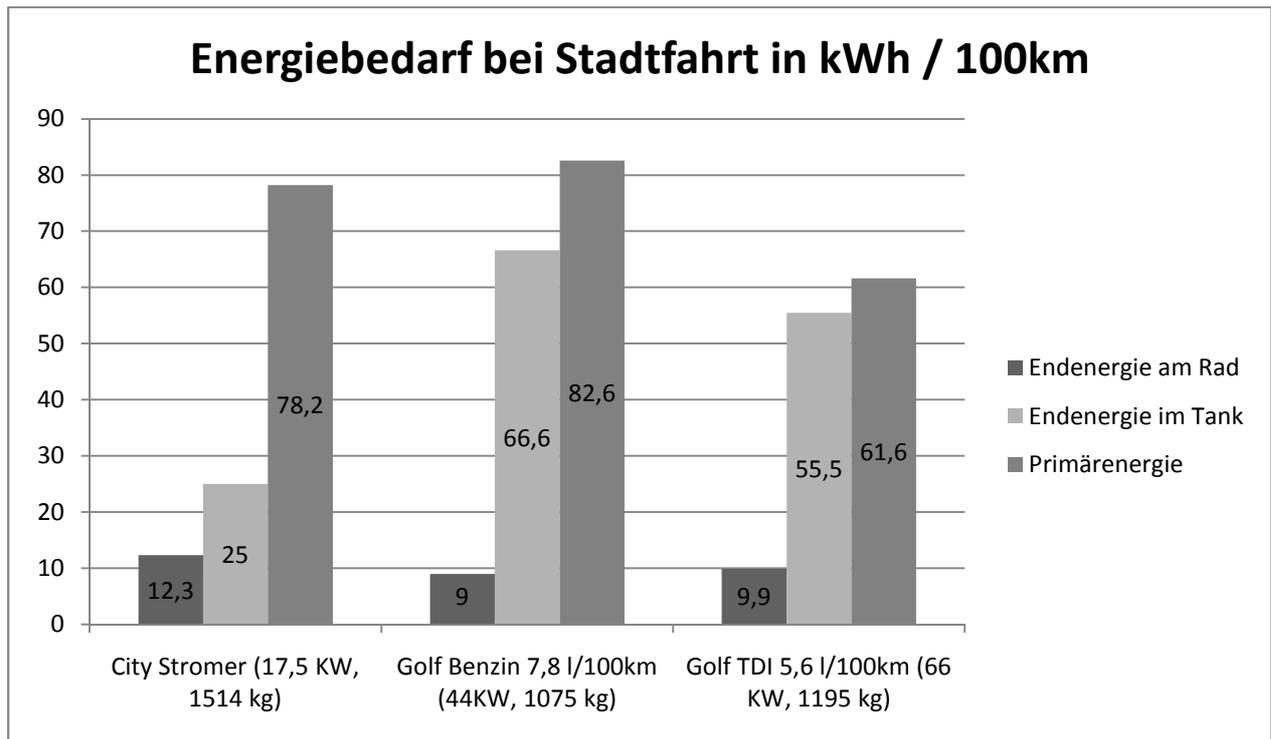
Der Mehrkostenanteil wird nicht durch eine Steigerung der Produktionsstückzahlen auszugleichen sein [13]. Der Grund dafür sind die Betriebskosten. Der teure Wasserstoff und die hohen Produktionskosten von Brennstoffzellen lassen einen ökonomischen Vergleich zum Verbrennungsmotor nicht zu. Die Einführung eines solchen Produktes kann nur geschehen, wenn Steuerliche Anreize gesetzt werden und so die Betriebskosten den höheren Anschaffungspreis saldieren.

Betriebskosten

Die Betriebskosten setzen sich aus dem streckenbezogenen Kraftstoffverbrauch und dem Schmierkostenanteil zusammen, wobei sich die Kraftstoffkosten aus Strompreis und Wirkungsgrad der zur Erzeugung benötigten Maschinen ermitteln lassen. In Diagramm 5.2-3 ist der benötigte Energiebedarf verschiedener Antriebsarten verdeutlicht. Eindeutig zu erkennen ist der höhere Energiemengenverbrauch am Rad aufgrund des höheren Gewichts. Der hohe Primärenergiebedarf des „City Stromer“ (Golf) fällt extrem hoch aus. Die B-Klasse lässt sich aufgrund ihres ähnlichen Gewichts und ähnlicher Maße mit dem City Stromer vergleichen.

5. Bewertungen

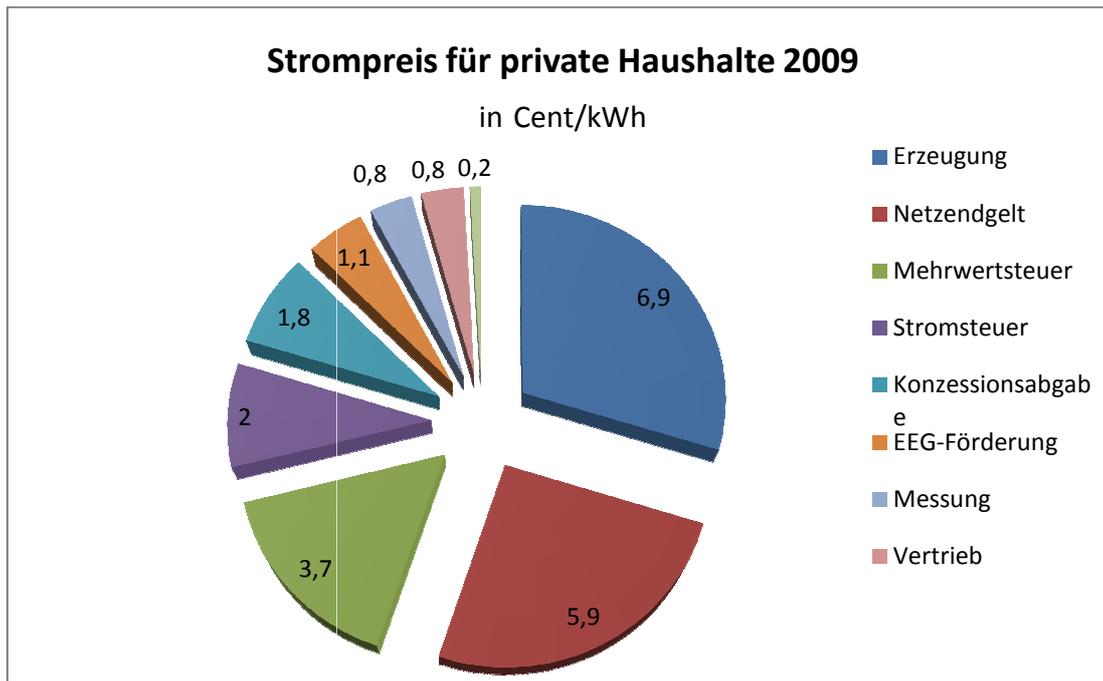
Diagramm 5.2-3: Energiebedarf bei Stadtfahrt [85]



Schlussfolgernd aus der Diagramm 5.2-3 ist zu nennen, das der Primärenergiebedarf eines reinen Elektrofahrzeugs gleich eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor ist. Allerdings ist die gespeicherte Energie im Fahrzeug selbst um circa die Hälfte kleiner als beim gleichwertigen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Die Energie am Rad ist um 30 % höher als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Das hat zur Folge, dass Elektrofahrzeuge aufgrund ihres höheren Gewichts mehr Energie verbrauchen als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Um den Kraftstoffpreis zu ermitteln, muss vom Strompreis ausgegangen werden. Der Strompreis liegt laut Diagramm 5.2-4 für Privathaushalte bei 0,23 €/KWh.

5. Bewertungen

Diagramm 5.2-4: Kostenstellen Strompreis für private Haushalte [84]

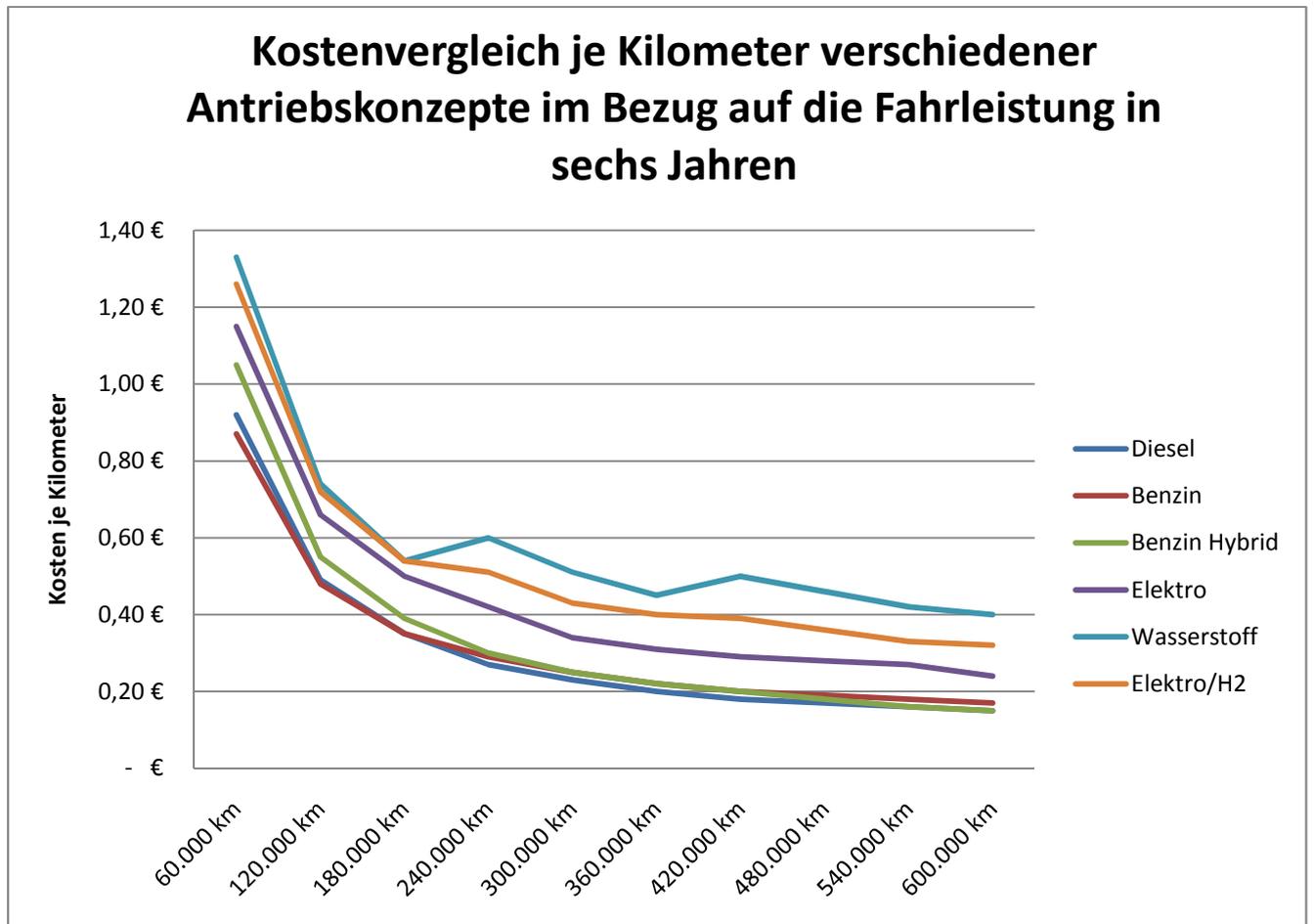


Laut Berechnung des Wirkungsgrades in Kapitel 4.1 wird Wasserstoff inklusive Speicherung mit einem Wirkungsgrad von 0,63 produziert, das heißt, der Wasserstoff ist per Elektrolyse mittels Verdichter in eine Druckflasche mit bis zu 700 bar verdichtet worden. Durch die Umwandlung der Energie in der Brennstoffzelle kommt ein weiterer Verlust von circa 50 % hinzu. Somit gelangen nur 31,5% der Primärenergie direkt zum Elektromotor oder zum Akkumulator. Es ergeben sich demnach Kosten von 0,73 €/KWh. Der indirekte Weg der Energie über den Akkumulator bedeuten weitere Verluste von 20%. Der Verlust im Elektromotor ist lediglich mit 5 % beziffert. Um den Bezug zur B-Klasse herzustellen, würde dies bei einer Verbrauchsenergie von 20 kWh auf 100 km und reinem Elektroantrieb via Akkumulator Kosten von 5,52 € verursachen. Der Betrieb des Range Extender würde bei gleichbleibenden Werten Belastungen von 14,60 € bedingen. Ausgehend vom beschriebenen „Best Case“ in Kapitel 4.1. Die Wasserstoffproduktion und -verdichtung müsste zudem in großtechnischen Anlagen realisiert werden, da sonst die Wirkungsgrade geringer ausfallen. Die Spanne zwischen Betrieb via Wasserstoff und via Strom durch den Akkumulator lässt den Vorteil eines reinen Elektrofahrzeugs deutlich werden. Der klare Vorteil des Fahrzeugs mit Range Extender ist die Reichweite. Im Diagramm 5.2-5 sind die Kosten für verschiedene Antriebskonzepte nach ihrer Fahrleistung in einem Abschreibungszeitraum von sechs Jahren aufgeführt. Eindeutig zu erkennen sind die höheren Anschaffungskosten sowie die Erneuerungsintervalle von Brennstoffzelle und Akkumulator. Zu berücksichtigen sind die Kenndaten der jeweiligen Antriebsstränge. Das Brennstoffzellenfahrzeug hat eine Leistung von circa 40 KW und eine Reichweite von 500 km, das Elektrofahrzeug eine Leistung von 20 KW und eine Reichweite von 150 km, das Range Extender

5. Bewertungen

Fahrzeug (Elektro/H2) eine Leistung von 20 KW und eine Reichweite von 500 km. Die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren haben Leistungen von 66 bis 92 KW und Reichweiten von mehr als 500 km.

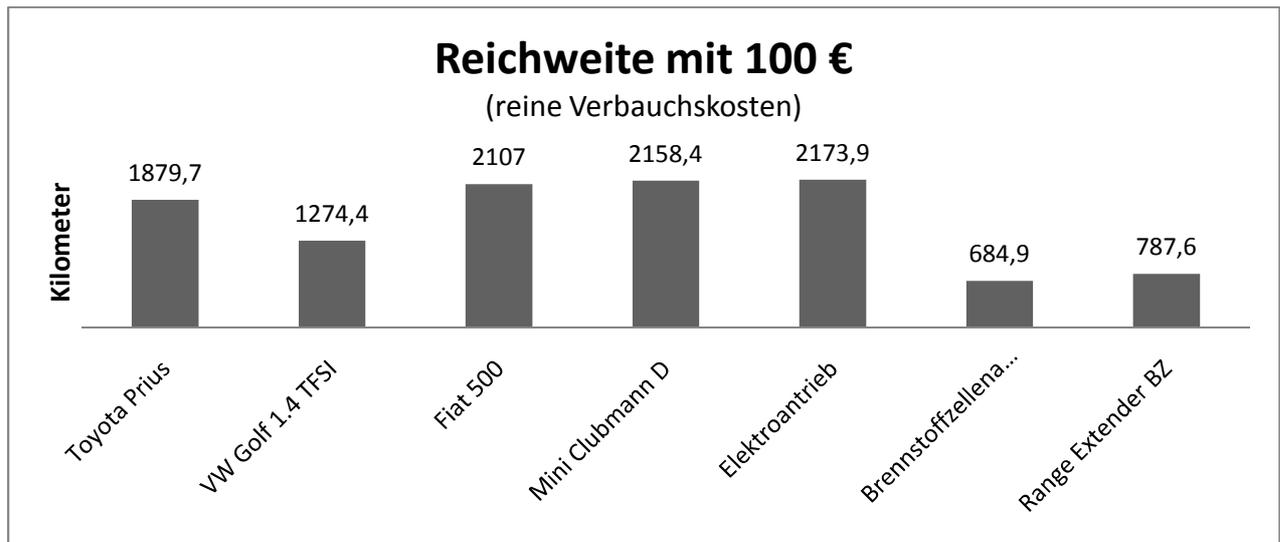
Diagramm 5.2-5: Kostendarstellung je Kilometer in sechs Jahren



Abschließend ist die ökonomische Bewertung des Range Extender Systems aufbauend auf einer Brennstoffzelle, als bedingt empfehlenswert einzuschätzen. Grund dafür sind die hohen Anschaffungs- und Unterhaltskosten, sowie die hohen Betriebskosten. Auch steuerliche Vorteile von 25 % Strompreisersparnis würden das System lediglich in den Verbrauchskosten mit einem Verbrennungsmotor betriebenen Fahrzeug gleichsetzen. Im nachfolgenden Diagramm ist die Reichweite verschiedener Fahrzeuge im Vergleich zum elektro- sowie wasserstoffbetriebenen Fahrzeug abgebildet. Unmissverständlich bleibt das Fahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb hinter dem gesamten Feld zurück.

5. Bewertungen

Diagramm 5.2-6: Vergleich verschiedener Fahrzeuge



Die Berechnungen basieren auf der Grundlage des EU-Normverbrauchs und des aktuellen bundesdurchschnittlichen Super Benzin (1,33 €/l) und Diesel (1,13 €/l) Preises [92].

Sowohl der im Diagramm 5.2-6 abgebildete Elektro- als auch Brennstoffzellenantrieb hat einen Verbrauch von 20 kWh auf 100 km. Die Kosten wurden den oben aufgeführten Daten entnommen. Aus der Annahme heraus, dass fossile Energieträger zur Neige gehen, lässt sich für die hier betrachteten Systeme schlussfolgern, dass die Nutzung eines Fahrzeugs bei der Kaufentscheidung, insbesondere bei der Wahl des Antriebskonzeptes, eine noch größere Rolle zukommen wird, als das bisher der Fall ist. Der Gebrauch eines Fahrzeugs mit Range Extender (Brennstoffzelle) wird lediglich ein Kompromiss bei der Reichweite sein. Einem Fahrzeug mit reinen Antriebsformen (Elektro/Wasserstoff) wird das Fahrzeug mit Range Extender nur auf gesonderten Disziplinen erfolgreich gegenüberstehen können.

Die Voraussetzung für eine positive ökonomische Bilanz wären folgende Punkte:

- Anschaffungskosten sind gleich denen heutiger Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren
- Erneuerungszyklen von Akkumulator und Brennstoffzelle sind gleich eines Fahrzeugabschreibungszeitraums
- die Kosten einer Range-Extender-Brennstoffzelle sind geringer als ein vergleichbarer Akkumulator
- Kosten für Wasserstoff betragen weniger als 55 Cent je kWh
- Der Benzin- und Dieselpreis übersteigt den Preis von zwei Euro pro Liter, bei gleichbleibenden Strompreisen
- Es werden durch Steuererleichterungen Anreize für den Kauf von Fahrzeugen mit Elektroantrieb erzeugt

6. Auswertung

Gegenwärtig werden zur Energiebedarfsdeckung im Verkehrssektor hauptsächlich fossile Energieträger verwendet. Es ist an der Zeit, Antriebskonzepte so auszulegen, das auf fossile Energieträger ganzheitlich verzichtet werden kann. Gleichzeitig dürfen die Kosten für solche Systeme nicht die der Antriebskonzepte mit Verbrennungsmotoren übersteigen. Grund für dieses Anstreben ist die weltweit steigende Energienachfrage und dadurch verursachte Belastung der Umwelt durch Schadstoffe. Im Sinne der Technikbewertung wurde auf die ökologischen Folgen des betrachteten Systems eingegangen. Grundsätzlich bietet das Elektrofahrzeug mit seiner lokalen Emissionslosigkeit eine Basis für vielfältige Lösungsvarianten. Auch die Verwendung von Wasserstoff als Energieträger bietet sich als Speichermedium an. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurde auf die Bestandteile eines Elektrofahrzeugs mit Range Extender mittels Brennstoffzelle eingegangen. Der Nachweis zur Eignung eines solchen Systems wurde theoretisch als auch praktisch erbracht. Die Anwendung eines brennstoffzellenbetriebenen Range Extender bewies sich als bedingt geeignet. Zur ganzheitlichen Bilanzierung wurden unterschiedliche Antriebskonzepte zum Vergleich herangezogen und bewertet. Die Darstellung der verfügbaren Ressourcen und deren Potentiale erwiesen sich als hilfreich um Aussagen für die Zukunft zu treffen. In Betrachtung verschiedenster Versorgungspfade wurde der energetisch sinnvollste Pfad herausgearbeitet.

Es lassen sich folgende Aussagen aus der Arbeit ableiten:

- Der hohe Herstellungsaufwand und die damit verbundenen Kosten eines Elektrofahrzeugs mit Range Extender auf Basis einer Brennstoffzelle können durch die Serienproduktion nicht ausgeglichen werden. Die Gesamtkosten für den Antriebsstrang bleiben höher als bei Elektrofahrzeugen.
- Die Verwendung seltener Ressourcen bei Akkumulatoren und Brennstoffzellen führt zu steigenden Produktionskosten aufgrund steigender Rohstoffkosten.
- Eine kostengünstige und realistische Wasserstoffspeicherung lässt sich durch komprimierten Wasserstoff in Drucktanks verwirklichen. Die infrastrukturellen Anstrengungen für eine flächendeckende Versorgung sind nur durch staatliche Hilfen zu realisieren. Grund hierfür sind die hohen technischen Anforderungen an Betankungsanlagen und Drucktanks, sowie der Gebrauch von hochwertigen Werkstoffen.
- Die CO₂-Emission wird durch den erhöhten Einsatz von erneuerbaren Energien in Elektrofahrzeugen nicht verringert werden können, sondern lokal verlagert. Die Gründe liegen am prozentual zu geringen Anteil an erneuerbaren Energien bis voraussichtlich 2030.

6. Auswertung

- Energiemanagementsysteme sind in zukünftigen Elektrofahrzeugen zwingend erforderlich, um Einsparpotentiale durch Regeln zu generieren. Vor allem bei Elektrofahrzeugen mit zusätzlichen Aggregaten, wie zum Beispiel eines Range Extenders, bringen Managementsysteme einen erheblichen Vorteil gegenüber Fahrzeugen ohne Managementsystem.
- Mittelfristig ergeben sich bei elektrischen Antrieben die größten Verbesserungspotentiale, diese beziehen sich auf die Energiespeicherung und die Umwandlung von Wasserstoff in elektrische Energie.

Fazit

Ein Range Extender System auf Grundlage einer Brennstoffzelle ist aus ökologischen Gesichtspunkten zu empfehlen, da es die Möglichkeit aufwirft, Energie aus erneuerbaren Rohstoffen zu äußerst geringen Emissionswerten zu nutzen. Aus ökonomischen Gesichtspunkten ist der Gebrauch nur bedingt zu empfehlen. Der Grund hierfür sind die hohen Betriebskosten wegen der hohen Produktionskosten von Wasserstoff. Die fehlende Infrastruktur sowie die Kosten sind dem geringen ökologischen Nutzen weit überlegen. Der Vergleich mit einem reinen Elektrofahrzeug zeigt deutliche Schwächen der Brennstoffzellentechnologie beim Thema Betriebskosten. Die lange diskutierten Energiespeicherprobleme werden in Zukunft nicht mit Lithium-Akkumulatoren oder Wasserstoff gelöst. Es bleibt weiterhin die Aufgabe der Forschung und Entwicklung, Energiespeicher zu konzipieren, die deutlich bessere Eigenschaften als Wasserstoff und Akkumulatoren haben.

Auf lange Sicht wird die Brennstoffzellentechnologie ein Exot bleiben. Die extrem hohen Kosten verbieten eine Einführung in den Massenmarkt.

7. Quellen

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildungsnummer	Bezeichnung	Seite
Abbildung 0-1	Vergleich der Prozesskette zwischen Elektrofahrzeug und Wasserstoff betriebenen Fahrzeug	X
Abbildung 1.1-1	Schematischer Prüfstandsaufbau	16
Abbildung 1.1-2	Modellfahrzeug mit Brennstoffzelle als Range Extender	16
Abbildung 1.4-1	Ablauf [36]	19
Abbildung 1.4-2	Stundensätze [36]	20
Abbildung 1.4-3	Vorteil [36]	21
Abbildung 2.2-1	Treibhauseffekt [37]	24
Abbildung 2.3-1	Treibhausgasemission verschiedener Energieträger unter Berücksichtigung der Lebenszyklus-Analyse [97]	25
Abbildung 2.5-1	Prozesskette von Primär- zur Fahrenergie [13]	28
Abbildung 2.5-2	Paralleler und Serieller Hybrid [13]	29
Abbildung 2.6-1	Fahrwiderstände eines PKW [55]	31
Abbildung 2.6-2	Kennlinie einer PEMFC [56]	32
Abbildung 3.1-1	vereinfachtes Modell des Wasserstoffatoms [57]	35
Abbildung 3.1-2	verschiedene Konzepte zur Wasserstoffspeicherung [11]	42
Abbildung 3.1-3	Druckflaschen Wasserstoff [14]	43
Abbildung 3.1-4	Fahrzeugtank für 350 bar CGH ₂ [14]	44
Abbildung 3.1-5	LH ₂ -Tanksystem für Automotive Anwendungen [15]	45
Abbildung 3.1-6	Physikalische Adsorption von Wasserstoff [19]	46
Abbildung 3.1-7	Struktur Nanotubes [20]	47

7. Quellen

Abbildung 3.2-1	Aufbau und Funktion einer Brennstoffzelle [35]	50
Abbildung 3.2-2	Wirkungsgrad und Leistung einer Zelle als Funktion der Stromdichte [79]	51
Abbildung 3.2-3	Schnitt durch eine PEMFC [79]	51
Abbildung 3.3-1	Aufbau und Lade- /Endladevorgang bei Li-Ion-Batterie [30]	56
Abbildung 3.3-2	Aufbau Lithium-Ion Akkumulator [68]	59
Abbildung 3.5-1	Funktion Drehstromgenerator [35]	61
Abbildung 4.1-1	Energieflüsse bei Wasserstoffbetriebenen Range Extender PKW	65
Abbildung 4.1-2	Elektroantrieb mit Brennstoffzelle [99]	67
Abbildung 4.2-1	Übersicht Leistungselektronik [80]	72
Abbildung 4.2-2	Wasserstoffherstellung und –Transport und deren Wirkungsgrade [59]	73
Abbildung 4.2-3	Beispiel einer Wasserstoffwirtschaft [49]	74
Abbildung 4.2-4	Tankanlage [61]	75
Abbildung 4.2-5	OMV Wasserstofftankstelle [60]	75
Abbildung 4.3-1	Modellfahrzeug mit Brennstoffzelle als Range Extender	78
Abbildung 4.3-2	umzusetzendes System [61]	79
Abbildung 5.1-1	vereinfachter Rohstoffverbrauchsprozess	89
Abbildung 5.2-1	Betrachtung Kostenstellen	93

7. Quellen

7.2 Tabellenverzeichnis/Diagrammverzeichnis

Tabellenummer	Bezeichnung	Seite
Tabelle 3.1-1	Eigenschaften von Wasserstoff [2]	36
Tabelle 3.1-2	Dichte und Energiegehalt von Wasserstoff [2]	40
Tabelle 3.2-1	Brennstoffzellentypen [26]	52
Tabelle 3.2-2	Brennstoffzellentypen und ihre Eigenschaften [26]	53
Tabelle 3.3-1	Übersicht Lithium Akkumulator [31]	59
Tabelle 3.5-1	Kenngößen eines Elektromotors	62
Tabelle 3.5-2	Kostenvergleich zwischen ASM, PMSM und GRM bei 26 KW [13]	63
Tabelle 4.1-1	Wirkungsgrad min/max	66
Tabelle 4.1-2	Cases bei Variante 1	66
Tabelle 4.1-3	Cases bei Variante 2	66
Tabelle 4.3-1	Vergleich von Wasserstoffspeichern	83
Diagrammnummer	Bezeichnung	Seite
Diagramm 0-1	Energieverbrauch und Nutzungsgrad verschiedener Pkw im NEFZ [13]	XI
Diagramm 2.1-1	Reichweite der derzeit bekannten Reserven und Ressourcen [95]	22
Diagramm 2.1-2	Primärenergieverbrauch in Deutschland 2008 [96]	23
Diagramm 3.1-1	Energieaufwand verschiedener Herstellungsverfahren von Wasserstoff [2]	39
Diagramm 3.1-2	Wirkungsgrad verschiedener Herstellungsverfahren von Wasserstoff [2]	39
Diagramm 3.1-3	Metallhydridspeicher Vergleich, für Reichweite von 500 km [21]	48

7. Quellen

Diagramm 3.3-1	Ragone-Diagramm elektrische Energiespeicher [58]	57
Diagramm 5.1-1	Anteil der erneuerbaren Energien am Brutostromverbrauch [84]	90
Diagramm 5.1-2	Energiemix Vergleich 2006 und 2030 [83]	90
Diagramm 5.1-3	Spezifische kumulierte CO ₂ -Emission für einen Mittelklasse-Pkw [13]	91
Diagramm 5.1-4	Spezifischer KNRA für einen Mittelklasse-Pkw [13]	92
Diagramm 5.2-1	Kostenverteilung Beispiel B-Klasse	95
Diagramm 5.2-2	Kostendarstellung je Kilometer im Jahr	96
Diagramm 5.2-3	Energiebedarf bei Stadtfahrt [85]	97
Diagramm 5.2-4	Kostenstellen Strompreis für private Haushalte [84]	98
Diagramm 5.2-5	Kostendarstellung je Kilometer in sechs Jahren	99
Diagramm 5.2-6	Vergleich verschiedener Fahrzeuge	100

7. Quellen

7.3 Literaturverzeichnis

- [1] **Börse Online** (2009, Ausgabe 49): Artikel, *Ökonomisch Wertvoll*, Börse Online Verlag
- [2] **Helmut Eichseder, Manfred Klell** (2008, 1. Auflage): *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*, Vieweg + Teubner Verlag
- [3] **R. Pischinger, M. Klell, T. Sams** (2009, 3. Auflage): *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*, Springer Verlag
- [4] www.weltderphysik.de, Stichwort: *fossile Energieträger*
- [5] www.iter.org, IIFEO, Stichwort: *nukleare Energie*
- [6] **J. Rifkin** (2002): *Die H₂-Revolution*, Campus Verlag
- [7] **Tafelwerk** (1999, 7. Auflage): *Formeln und Tabellen*, Patec Verlag,
- [8] www.wikipedia.de, Stichwort: *Energie*
- [9] **R. Malessa** (2007, WS): *Thermodynamik I*, Vorlesungsskript FH Brandenburg,
- [10] **Schüler Duden** (1995, 3. Auflage): *Die Physik*, Dudenverlag,
- [11] **C.-J. Winter, J. Nitsch** (1986): *Wasserstoff als Energieträger*, Springer Verlag
- [12] **Forschungszentrum Jülich** (2007): *Stromspeicher*, Förderkonzept
- [13] **D. Naunin** (2007, 4. Auflage): *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen Fahrzeuge*, Expert Verlag
- [14] **Contract (No. DE-AC09-96SR18500)**: *Compressed hydrogen storage for vehicle applications*
- [15] www.magnasteyr.com, Magna Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG
- [16] www.innovationsreport.de, Artikel: *Der Weg zum Wasserstofftank*
- [17] **A. Chambers** (1998): *Hydrogenstorage in graphitnanofibers*, University of Michigan, Department of Chemical Engineering
- [18] **M. Hirscher, M. Becher** (2003, Vol. 3): *Hydrogenstorage in carbon nanotubes*, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, American Scientific Publishers
- [19] www.1eere.energy.org, EERE
- [20] www.wikipedia.de, Stichwort: *Types of nanotubes*
- [21] www.energieportal24.de, Stichwort: *Metallhydrid*
- [22] **F. Schlotter** (2007): *Innovativer Wasserstoffspeicher*, TLB
- [23] www.hycar.de, Stichwort: Graphitnanophaser Speicherung (GNF)
- [24] **Bührke, Wegemayr, Wiley** (2007): *Erneuerbare Energie*, VCH Verlag
- [25] www.deutschebp.de, Stichwort: *Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle*
- [26] **M. Morcos** (2007): *Auslegung eines HT-PEFC Stacks der 5 kW Klasse*, Diplomarbeit, Technische Universität Graz

7. Quellen

- [27] **Wilay** (1996): *Fuel Cells and their Applications*, VCH Verlag
- [28] **Karamunolis** (2003): *Brennstoffzelle*, Vogel Verlag
- [29] **Trueb, Lucien F., Rüetschi, Paul** (1998): *Batterie und Akkumulatoren*, Springer Verlag
- [30] **Tübke** (2006): *Elektrische Speicher – Stand und Perspektiven der Technik*
- [31] **D. Heinemann** (2007): *Strukturen von Batterie und Energiemanagementsystemen*, Dissertation, Technische Universität Berlin
- [32] **D. Klauke** (2009): *Batterie- Elektrofahrzeuge*, Verlag Dr. Müller
- [33] **Evonik** (2009): *Der Wissenschaftliche Durchbruch: Separion®*, Informationsbroschüre
- [34] **H. Schäfer** (2009): *Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*, Expert Verlag
- [35] www.zum.de, Stichwort: *Drehstromgenerator*
- [36] **C. Bragrock, M. Bolze** (2006): *Funktions- und Kostenoptimierung von Außenzahnradölpumpen für Kfz- Verbrennungsmotoren*, Diplomarbeit, Technische Fachhochschule Wildau
- [37] www.neumuenster.de, Stichwort: *Treibhauseffekt*
- [38] www.zw-jena.de
- [39] **Kordes, Wiley** (1996): *Fuel Cells and their Applications*, VCH Verlag
- [40] **E. Rummich** (2009): *Energiepuffer, Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen*; Expert Verlag
- [41] www.elektronikpraxis.de, Stichwort: *Doppelschichtkondensatoren/Supercap*
- [42] www.hybrid-autos.info, Stichwort: *PMSM/Wirkungsgrad*
- [43] www.funkcom.ch, Stichwort: *Akkuinfos*
- [44] **von Helholt** (2007): *Fuel cell vehicles*, Journal of Power Sources
- [45] **P. Fairley**, www.heise.de, Stichwort: *Silizium für mehr Kapazität*
- [46] **Altair**: *Nanosafe Battery Datasheet*, Gebrauchsanweisung
- [47] **J. Tübke** (2006): *Lithium Akkumulatoren*, Foliensatz
- [48] **C. Staub** (2005): *Alternative Antriebe für Automotive*
- [49] www.bio-wasserstoffe.de
- [50] **Max Planck Forschung** (2009): Artikel: *Ideen, das Kapital von Morgen*
- [51] www.hybrid-autos.info, Stichwort: *Fahrzyklen*
- [52] www.conrad.de, Stichwort: *Modellbau, Automodelle, 1:10 Straßenmodelle, EP Touringcar Audi S3 4WD RTR*
- [53] www.linde-gase.de, Produkte: *ecocyl, Wasserstoff 5.0*

7. Quellen

- [54] **Wallentowitz (2004):** *Längsdynamik von Kraftfahrzeugen*, fka Verlag
- [55] **W. Kleinschmidt (2006):** *Verbrennungskraftmaschinen*, Uni Siegen
- [56] <http://home.acor.de/kabaza/pemfcde.gif>
- [57] www.zw-jena.de, Stichwort: *Wasserstoffatom*
- [58] www.aktuelle-wochenschau.de, Stichwort: *Superkondensatoren*
- [59] www.physorg.de, Stichwort: *Why hydrogen economy does not make sense*, 2006
- [60] www.h2o-emobile.de
- [61] www.motorlexikon.de
- [62] www.energieportal24.de, Stichwort: *50 % Platineinsparungen*
- [63] www.cav.de, Stichwort: *Platinfreie Brennstoffzelle*
- [64] www.spiegel.de, Stichwort: *Lithium mangel bedroht die Auto-Revolution*
- [65] **Börse Online (2009, Ausgabe 48):** *Lithium Milliardengeschäft mit seltenen Rohstoffen*, Börse Online Verlag
- [66] www.kfzmarkt.de, Stichwort: *Fahrzeugneuzulassungen im November 2009*
- [67] www.newsgroup.de, Stichwort: *Solarkraftwerke, Speicherung von Energie*
- [68] www.grs-batterien.de, Stichwort: *Die Welt der Batterien*, 2007
- [69] www.spiegel.de, Stichwort: *Motoren in Elektroautos, Die großen Unbekannten*
- [70] **Reely Road (2007):** *1:10 EP Tourenwagen 4WD RtR*, Bedienungsanleitung
- [71] **Horizone (2008):** *H-12 Fuel Cell Stack*, Bedienungsanleitung, V1.2, 11.09.2008
- [72] **Conrad (2008):** *Li-Po-Akkus*, Sicherheitshinweise, Version 06/08
- [73] www.voelkner.de, Stichwort: *540er Tuning-Elektromotor 17t*
- [74] **Götze (2008 SS):** *Antriebstechnik I*, Vorlesungsskript, Fachhochschule Brandenburg
- [75] **Edel (2001 WS):** *Technische Mechanik, Kinematik und Kinetik*, Vorlesungsskript, Fachhochschule Brandenburg
- [76] **T. Kern (2008 SS):** *Kinematik und Kinetik*, Vorlesungsskript, Fachhochschule Brandenburg
- [77] **C. Schlieder (2006):** *Kinematik*, e.studying
- [78] **C. Schlieder (2006):** *Dynamik*, e-Studying,

7. Quellen

- [79] **R. A. Zahnoransky (2002):** *Energietechnik*
- [80] **J. Specovius (2008):** *Grundkurs Leistungselektronik*
- [81] **E. Fiala (2006):** *Mensch und Fahrzeug*, Vieweg Verlag
- [82] **Hecht, Keilig, Kleemann, Polach, Seiffert (2003):** *Fahrzeugtechnik*
- [83] **E.on AG (2009):** *Energie 2030*, Publikation
- [84] www.spiegel.de, Artikel, *Öko Republik Deutschland*, 12/2009
- [85] www.uni-muenchen.de, Stichwort: *Physik, Elektroauto*
- [86] www.idw-online.de, Artikel, *Internationale Experimente und Experten für Brennstoffzellen Treffen sich in Düsseldorf*, 2008
- [87] **EMPA (2009):** *Brennstoffzellen – effiziente und nachhaltige Stromquellen*
- [88] www.kfz-steuer.de, Stichwort: *Personenkraftwagen*
- [89] www.adac-autokosten.de
- [90] www.huk-24.de, Stichwort: *PKW Versicherungen*
- [91] www.mercedes-benz.de, Stichwort: *B-Klasse*
- [92] www.spiegel.de, Stichwort: *Soweit kommen sie mit 100€, 10/2009*
- [93] **Th. Dreier (2000):** *Ganzheitliche Systemanalyse und Potentiale biogener Kraftstoffe*, Dissertation, TU München
- [94] **R. Igelspacher (2003):** *Ganzheitliche Systemanalyse zur Erzeugung und Anwendung von Bioethanol in Verkehrssektor*, Projekt Arbeit, TU München
- [95] www.bgr.bund.de
- [96] www.spiegel.de; Stichwort Bundesumweltministerium
- [97] www.kernenergie.de
- [98] **Wallentowitz H., Freialdenhoven A., Oleschewski (2010, 1. Auflage):** *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges, Technologien, Märkte und Implikationen*; Vieweg +Teubner
- [99] **Robert Bosch GmbH (2008, 1. Auflage):** *Hybridantriebe, Brennstoffzellen und alternative Kraftstoffe*; BOSCH

8. Anlagen

8.1 Akkumulator Auslegen

Ausgehend von einem Fahrzeuggesamtgewicht von 2,116 kg (inklusive Akkumulator, Brennstoffzelle und Tank) und einer Motorleistung von 65 W ist mit einer Betriebsdauer von 2 Stunden zu rechnen. Bei der Voraussetzung, dass der Betrieb im Stadtverkehr mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 30 km/h erfolgt.

Massen:		
m_{H^2-Tank}	0,09	[kg]
$m_{LiPo-Akku}$	0,195	[kg]
m_{S_3}	0,986	[kg]
$m_{Karosserie}$	0,06	[kg]
m_{BZ}	0,225	[kg]
$m_{Steuerung}$	0,34	[kg]
$m_{Verbindungen}$	0,22	[kg]
m_{gesamt}	2,116	[kg]

Berechnungen

$$F_{r\ BZ\ Akku\ Tank} = 2,116\ kg \times 9,81\ \frac{m}{s^2} \times \cos 0 \times 0,02 = 0,415\ N$$

$$F_{r\ Akku} = 1,257\ kg \times 9,81\ \frac{m}{s^2} \times \cos 0 \times 0,02 = 0,246\ N$$

$$F_s = 0\ N$$

$$F_L = \frac{1}{2} \times 0,15 \times 1,2041\ \frac{kg}{m^3} \times 0,02264\ m^2 \times 8,33^2\ \frac{m^2}{s^2} = 0,142\ N$$

$$F_B = 0\ N$$

$$F_{Motor\ BZ\ Akku\ Tank} = 0,415\ N + 0,142\ N = 0,557\ N$$

$$F_{Motor\ Akku} = 0,388\ N$$

$$P_{Motor\ BZ\ Akku\ Tank} = \frac{1}{0,55} \times 0,557\ N \times 8,33\ \frac{m}{s^2} = 8,43\ W$$

$$P_{Motor\ Akku} = \frac{1}{0,55} \times 0,388\ N \times 8,33\ \frac{m}{s^2} = 5,876\ W$$

8. Anlagen

Bei 2 Stunden: $E_{ben\ddot{ot}igt} = 2 h \times P_{Motor} = (BZ\ Akku\ Tank) 16,86\ Wh; (Akku) 11,752\ Wh$

Hinzukommen Beschleunigungsverbräuche, die mit 50% angenommen werden. Somit ist die benötigte Akkuleistung circa 25 W.

Akkumulator:	LiPO-Akku
Spannung (U_{LiPo}):	7,4 [V]
Ladestrom max. (I_{LiPo}):	3,3 [A]
Entladestrom max. (I_{LiPo}):	66 [A]
Akkukapazität (C_{LiPo}):	3,3 [Ah]
Betriebstemp. min ($t_{LiPo\ min}$):	293 [K]
Betriebstemp. max ($t_{LiPo\ max}$):	313 [K]
Temperaturgrenze ($t_{LiPo\ grenze}$):	333 [K]
Dauerstrom max. ($I_{LiPo\ dauer\ max}$):	33 [A]
Zellspannung max. ($U_{zelle\ max}$):	4,2 [V]
Zellspannung min. ($U_{zelle\ min}$):	2,5 [V]
Akkugewicht ($m_{LiPo\ Akku}$):	0,195 [kg]
Quelle: Sicherheitshinweise LiPo Akku [72]	
Leistung (P_{LiPo}):	24,42 [W]

8.2 Auslegung Brennstoffzelle

Berücksichtigung finden müssen Akkumulatordaten, wie zum Beispiel maximal Spannung (2 Zellen=8,4 V), etc.

Fahrzeug:	Tourenwagen 4WD RtR Audi S3
Maßstab:	01:10
Betriebsspannung (U_{S3}):	7,2 [V]
Antrieb:	El. Motor Typ 540
Länge (l_{S3}):	375 [mm]
Breite (b_{S3}):	187 [mm]
Spurbreite ($b_{Spur S3}$):	160 [mm]
Radstand ($l_{Rad S3}$):	255 [mm]
Masse (m_{S3}):	0,99 [kg]
Quelle: Betriebsanleitung [70]	

Leistung der Brennstoffzelle gleich dem Energiebedarf des Elektromotors (8,43 W), zuzüglich Beschleunigungsverbräuche.

Berechnung

$$I_{Motorbedarf} = \frac{P_{Motor\ Bz\ Akku\ Tank}}{U_{S3}} = 1,17\ A$$

Bei Versuchsmessungen kamen gleichwertig Ergebnisse zu Tage. Spitzen von mehr als 10 A sind bei Beschleunigungsvorgängen zu erwarten und müssen über den Akkumulator kompensiert werden. Es ist zu empfehlen eine direkte Verbindung von Brennstoffzelle und Elektromotor zu vermeiden.

Verbrauch beim Beschleunigen wird mit 50% angenommen.

$$P_{BZ} = 8,43\ W \times 1,5 = 12,645\ W$$

Brennstoffzelle:	H-12 Fuel Cell Stack
Type of Fuel Cell:	PEM
Numbers of cells:	11

8. Anlagen

Rate power ($P_{BZ \text{ rate}}$):	12 [W]
Peak power ($P_{BZ \text{ peak}}$):	13 [W]
DC voltage ($I_{BZ \text{ DC}}$):	6,6 [V]
Blower voltage ($I_{BZ \text{ blower}}$):	5 [V]
Reactans:	Hydrogen and Air
External temp. min ($t_{BZ \text{ ex min}}$):	283 [K]
External temp. max ($t_{BZ \text{ ex max}}$):	303 [K]
Stack operation temp. ($t_{BZ \text{ Stack min}}$):	318 [K]
Stack max. temp. ($t_{BZ \text{ Stack max}}$):	328 [K]
Composition [dry H2]:	99,909 [%]
H2 Pressure min ($p_{BZ \text{ min}}$):	0,200 [bar]
H2 Pressure max ($p_{BZ \text{ max}}$):	0,276 [bar]
Humidification:	Self-Humidified
Cooling (integrated cooling fan):	Air
Weight (casing+fan) (m_{bz}):	0,225 [kg]
Länge (l_{Bz}):	76 [mm]
Breite (b_{Bz}):	56 [mm]
Höhe (h_{Bz}):	47 [mm]
Flow rat at ax output ($v_{BZ \text{ strom}}$):	0,00018 [m ³ /min]
Start up time:	immediate
Efficiency of stack, at full power:	0,45
Quelle: Betriebsanleitung "H-12 Fuel Cell Stack" [71]	

8.3 Wasserstofftank



	Linde MINICAN®	Linde ECOCYL®	MH 10 Udomi
Volumen [l]	1	1	0,15
Tankinhalt [NI]	12	150	10
Leergewicht [kg]	0,54	2,4	0,11
Energieinhalt [W]	34,52	431,52	28,77
Aufladezeit [h]	Einweg	ca. 0,15	ca. 0,5
Anschaffungskosten	57,00 €	350,00 €	85,00 €
Betriebsdauer [min]	66,67	833,33	55,56
res. Leistung [W]	13,33	166,67	11,11
Verlängerung [%]	54,60	682,50	45,50

Formeln:

$$E_{Tank} = V_{Tankinhalt} \times \rho_{Wasserstoff} \times Energieinhalt_{Wasserstoff}$$

$$t_{Betrieb} = V_{Tankinhalt} \div \Delta V_{Flu\beta rate}$$

$$P_{resultierend} = \frac{P_{BZ \max.}}{t_{Betriebe}}$$

$$Verlängerung = \frac{P_{LiPO}}{P_{resultierend}}$$

Berechnung:

Ausgehend davon, dass ein Akkumulator für eine Reichweite von 60 km ausgelegt ist, um 80% der Tagesfahrten abzudecken, muss ein Wasserstofftank das 7,33 fache an Energiespeichern, als der Akkumulator, um eine Gesamtreichweite von 500 km zu gewährleisten.

$$P_{Akkumulator} = 7,4 V \times 3,3 A = 24,42 W (\cong 60 \text{ km Reichweite})$$

$$440 \text{ km} / 60 \text{ km} = 7,33$$

8. Anlagen

$$P_{\text{resultierend soll}} = P_{\text{Akkumulator}} * 7,33 = 178,99 \text{ W}$$

$$E_{\text{Tank soll}} = \frac{P_{\text{resultierend}}}{\eta_{\text{BZ}}} = 395,55 \text{ W}$$

Der Unterschied Tabelle und Berechnung kommt zustande, das in der Berechnung über den Wirkungsgrad und in der Tabelle über den Volumenstrom gerechnet wurde.

8. Anlagen

8.4 Kostenaufstellung

Maximaler Kostenrahmen 1.200€.

Position	Bezeichnung	Kosten
1	1:10 EP Touring Car Audi S3 4WD RTR	83,99 €
2	Carbon LiPo Racing Pack 7,4 V 3300 mAh 20C (2 Stück)	83,94 €
3	LiPo Balancer 1-6 Zellen	12,56 €
4	MH10 Metallhydridspeicher	85,00 €
5	PR Einstufiges Miniaturdruckregelventil mit Ausgangsdruck 0,3 bar	75,00 €
6	Ladeadapter MH10	5,00 €
7	Goldstecker 4mm (2 Stück)	2,90 €
8	Kokam Balancingkabel	4,95 €
9	LiPo Discharge Protection	28,30 €
10	Eneloop AA Sanyo 2000 mAh (8 Stück)	31,60 €
11	Ultramat 14 Akkuladegerät	69,95 €
12	H-12	393,07 €
13	DC/DC Spannungswandler	14,90 €
14	LiPo Ladegerät Bausatz	28,95 €
15	Schaltungsbaurelais und Sockel	84,90€
Summe:		1004,91 €

Hinzukommt ein 10 Liter Gasdruckflasche (H₂ 200 bar befüllt), die die Tankfunktion übernimmt (ca. 150 €). Es wurden ebenso ein Akku-Ladegerät (69,95 €) und eine Messgerät angeschafft, die zur Überwachung und Prüfung des Fahrzeugs dienen. Somit wird der Kostenrahmen eingehalten.

8.5 Wasserstoffbetankung

Bei der Wasserstoffbetankung des MH 10 ist darauf zu achten, dass der MH 10 in einem Wassergefäß mit mindestens einem Liter Wasser steht. Um die entstehende Wärme abzuführen und ein Überhitzen zu verhindern. Als Tanklager dient eine 10 Liter Druckgasflasche mit 5.0 Wasserstoff (200 bar Fülldruck). Der Beladedruck ist 10 bar und füllt den MH 10 innerhalb von 5 Minuten auf 80% und in weiteren 10 Minuten auf 100%.

8.6 Fahrzustände

Ablauf der Fahrt mit Range Extender im Modell

1. Beide Akkus geladen, Wasserstofftank voll
>LiPo I ist am Motorangeschlossen und liefert die Fahrenergie
2. LiPo I ist leer, Fahrzeug schaltet durch Endladeschutz selbstständig ab.
Es muss umgeschaltet werden.
3. LiPo II ist leer gefahren und kann mit nachgeladenem LiPo I getauscht werden.

Es kann lediglich ein Fahrbetrieb gewährleistet werden. Folgende Fahrzustände sind durch Programmierung eines Microcontrollers zu bewerkstelligen.

1. Stillstand, unpartitionierter Akkumulator wird nachgeladen
2. partitionierter Akkumulator wird während der Fahrt nachgeladen
3. direkte Stromversorgung aus der Brennstoffzelle
4. Boost, zusammenschalten aller Komponenten, um maximale Leistung zu erreichen

8. Anlagen

8.7 PKW Auslegung

Beispiel Berechnung zur Ermittlung von Realwerten. Die angenommenen Beschleunigungswerte entsprechen einem gut Motorisierten Mittelklassewagen.

Leistungsbedarf des Elektromotors

$$P = \frac{1}{\eta} \times F \times v$$

$$F = F_R + F_L + F_S + F_B$$

Fahrzeug mit Rang Extender System

$$F_{R\ BZ} = 1500\ kg \times 9,81\ \frac{kg}{s^2} \times 0,02 = 294,3\ N$$

$f_R = 0,02$ (Reifen auf Asphalt trocken) [7]

$$F_{L\ BZ} = \frac{1}{2} \times 0,15 \times 1,2041\ \frac{kg}{m^3} \times 10\ m^2 \times 41,66^2\ \frac{m^2}{s^2} = 1567,33\ N$$

$c_w = 0,15$ (Rennwagen) [7]; $v = 35\ km/h$ [70]; $A = 5\ m \times 2\ m = 10\ m^2$ [70]

$$F_{S\ BZ} = 0\ N$$

Das Fahrzeug wird in einer horizontalen Ebene betrachtet, somit ist α gleich Null.

$$F_{B\ BZ} = 1500\ kg \times 2,77\ \frac{m}{s^2} = 4155\ N$$

$m_{red} = 0$, da auf Gesamtsystem bezogen zu vernachlässigende Masse; $a = 2,77\ m/s^2$, ausgehend von der Höchstgeschwindigkeit $150\ km/h$ [70] soll diese in 15 Sekunden erreicht werden.

$$F_{Motor\ BZ\ Beschleunigt} = 294,3\ N + 1567,33\ N + 4155\ N = 6016,63\ N$$

$$P_{Motor\ BZ\ Beschleunigt} = \frac{1}{0,85} \times 6016,63\ N \times 41,66\ \frac{m}{s} = 294,854\ kW$$

Der enorm hohe Leistungsbedarf resultiert aus der Annahme, dass permanent beschleunigt wird und eine Anströmungsgeschwindigkeit der Luft von $150\ km/h$ vorherrscht.

$$F_{Motor\ BZ} = 294,3\ N + 1567,33\ N = 1861,63\ N$$

$$P_{Motor\ BZ} = \frac{1}{0,85} \times 1861,63\ N \times 41,66\ \frac{m}{s} = 91,241\ kW$$

Der theoretisch reale Leistungsbedarf bei $150\ km/h$ liegt deutlich unter dem zuvor genannten.

8. Anlagen

Somit müssten vier Motoren je 73,5 kW stark am Fahrzeug montiert werden.

Akkumulator:

$$\text{Bei 2 Stunden: } E_{\text{benötigt}} = 2 \text{ h} \times P_{\text{Motor}} = 294,854 \text{ kW} = 589,708 \text{ kWh (bei 150 km/h, 300 km)}$$

Aus Rückgewinnung der Bremsenergie wird zumindest im Stadtverkehr ein Teil der der Energie eingespart.

$$\frac{E_{\text{benötigt}}}{2 \text{ h}} = 58,9 \text{ kWh}$$

Der Akkumulator müsste ein Energiespeichervermögen von circa 58,9 kWh haben.

Vergleicht man die Berechnung mit den Werten eines aktuellen Sportwagens erhält man ähnliche Werte.

	Berechnung	Porsche 918 Spyder
Fahrzeuggewicht	1500 kg	1490 kg
Leistung	294 kW	366 kW
Energiespeicher	58,9 kWh	5,1 kWh
Akkugewicht	1100 kg	100 kg
Energiebedarf auf 100 km	196,33 kWh	20,4 kWh
Reichweite	30 km	25 km

Quelle: Spiegel.de, „Porsche präsentiert drei Liter Sportwagen“

Dabei muss beachtet werden, dass in der Berechnung davon ausgegangen wird, dass permanent beschleunigt wird und keine Energie zurückgewonnen wird. Um nun mit realen Werten zu rechnen werden die Daten des Porsche 918 Spyder verwendet.

Brennstoffzelle:

$$P_{BZ} = 20,4 \text{ kW}$$

Wasserstofftank:

$$P_{\text{Akkumulator}} = 12,24 \text{ kW (60 km Reichweite)}$$

$$440 \text{ km} / 60 \text{ km} = 7,33$$

$$P_{\text{resultierend soll}} = P_{\text{Akkumulator}} * 7,33 = 89,72 \text{ kW}$$

8. Anlagen

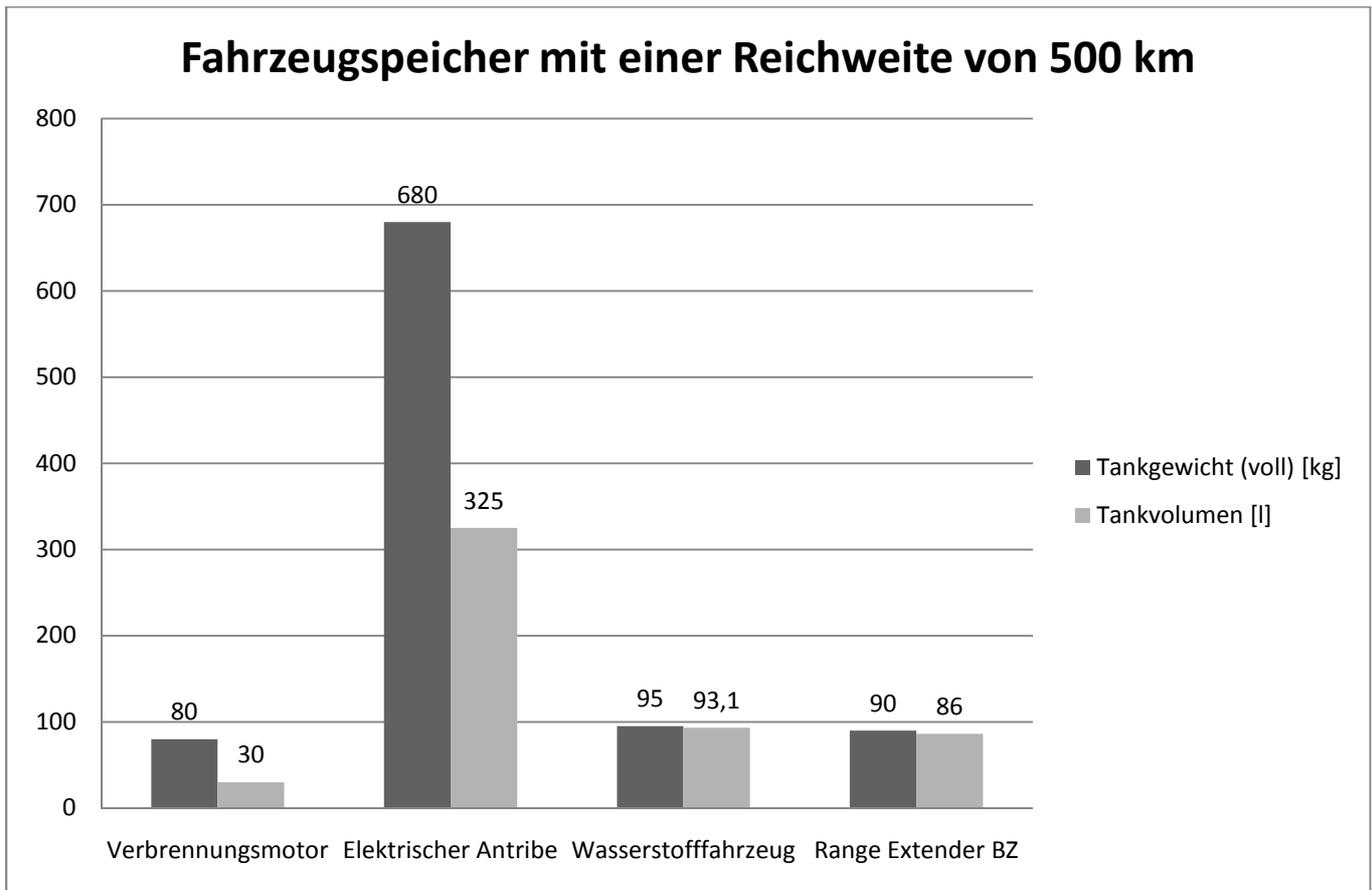
$$E_{\text{Tank soll}} = \frac{P_{\text{resultierend}}}{\eta_{BZ}} = \frac{89,72 \text{ kW}}{0,45} = 199,38 \text{ kW}$$

$$V_{\text{Wasserstofftank}} = V_{\text{Tankinhalt}} \times \rho_{\text{Wasserstoff}} \times \text{Energieinhalt}_{\text{Wasserstoff}} = 57,35 \text{ m}^3$$

$$V_{700 \text{ bar}} = \frac{V_{\text{Wasserstofftank}}}{p_1} = 0,082 \text{ m}^3$$

Somit hat ein Wasserstofftank mit 700 bar Fülldruck ein Volumen von circa 81,9 Liter. Dies entspricht dem knapp 1,5 -fachen gängiger fossiler Kraftstofftanks.

8.8 Grafische Zusammenfassung



Akkumulatoren: 150 Wh/kg, 313 Wh/l

Wasserstofftanks: 700 bar.

Range Extender BZ: 60 km rein Elektrisch, zzgl. Brennstoffzellensystem

8. Anlagen

8.9 Fahrzeugkostenberechnung

Gesamtübersicht

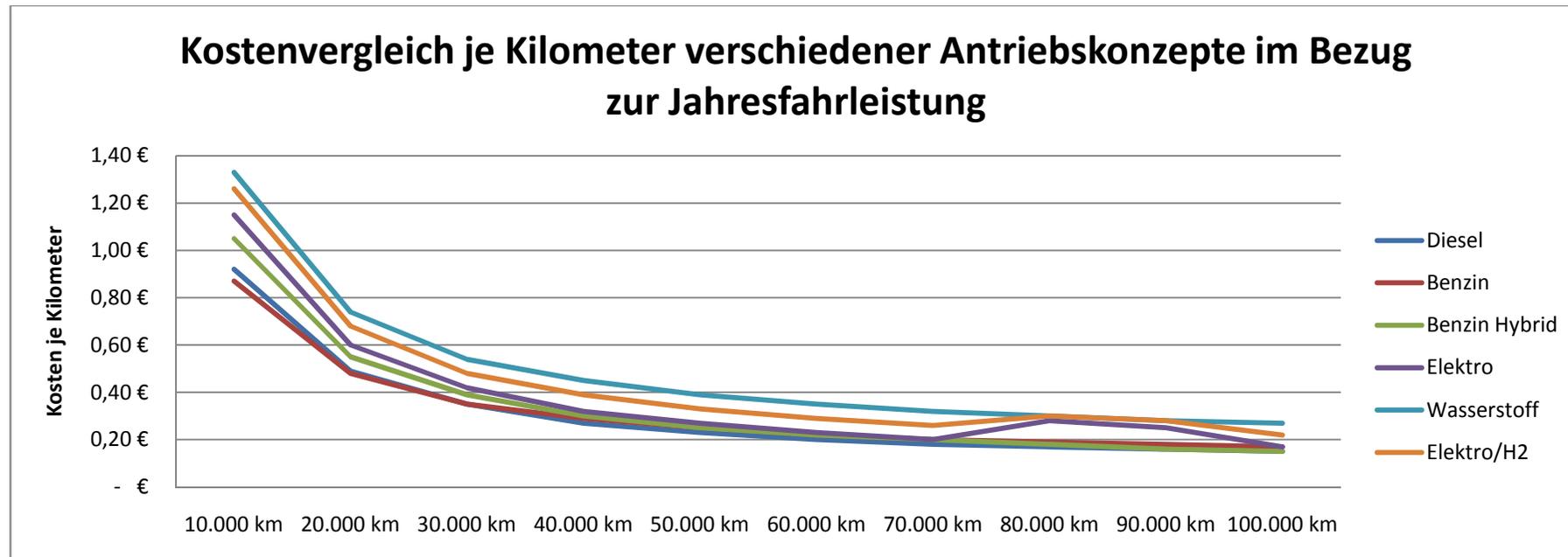
Am Beispiel Mercedes B-Klasse Sports Touer

	Diesel	Benzin	Benin Hybrid	Elektro	Wasserstoff	Elektro/H2	
Wertverlust pro Jahr	4.983,13 €	4.399,82 €	6.666,40 €	7.973,01 €	7.973,01 €	7.973,01 €	
Fixkosten pro Jahr	1.463,31 €	1.182,45 €	1.170,45 €	1.150,45 €	1.750,45 €	1.750,45 €	
Betriebskosten pro Jahr	2.649,40 €	4.008,50 €	2.354,00 €	2.090,00 €	6.090,00 €	3.946,00 €	
Werkstatt und Reifenkosten pro Jahr	1.900,00 €	1.850,00 €	1.900,00 €	1.700,00 €	1.750,00 €	1.750,00 €	
Gesamtkosten pro Jahr	10.995,84 €	11.440,77 €	12.090,85 €	12.913,46 €	17.563,46 €	15.419,46 €	Fahrleistung
Kosten je Kilometer	0,27 €	0,29 €	0,30 €	0,32 €	0,44 €	0,39 €	40.000 km
Akku Erneuerung alle 75.000 km				22.500,00 €	€	10.000,00 €	
Brennstoffzelle erneuern alle 200.000 km				€	37.500,00 €	15.000,00 €	
Gesamtkosten in sechs Jahren	65.975,06 €	68.644,64 €	72.545,10 €	99.980,79 €	105.380,79 €	117.516,79 €	240000 km
Kosten je Kilometer mit Akku-Erneuerung	0,27 €	0,29 €	0,30 €	0,42 €	0,60 €	0,49 €	

8. Anlagen

Jahresfahrleistung

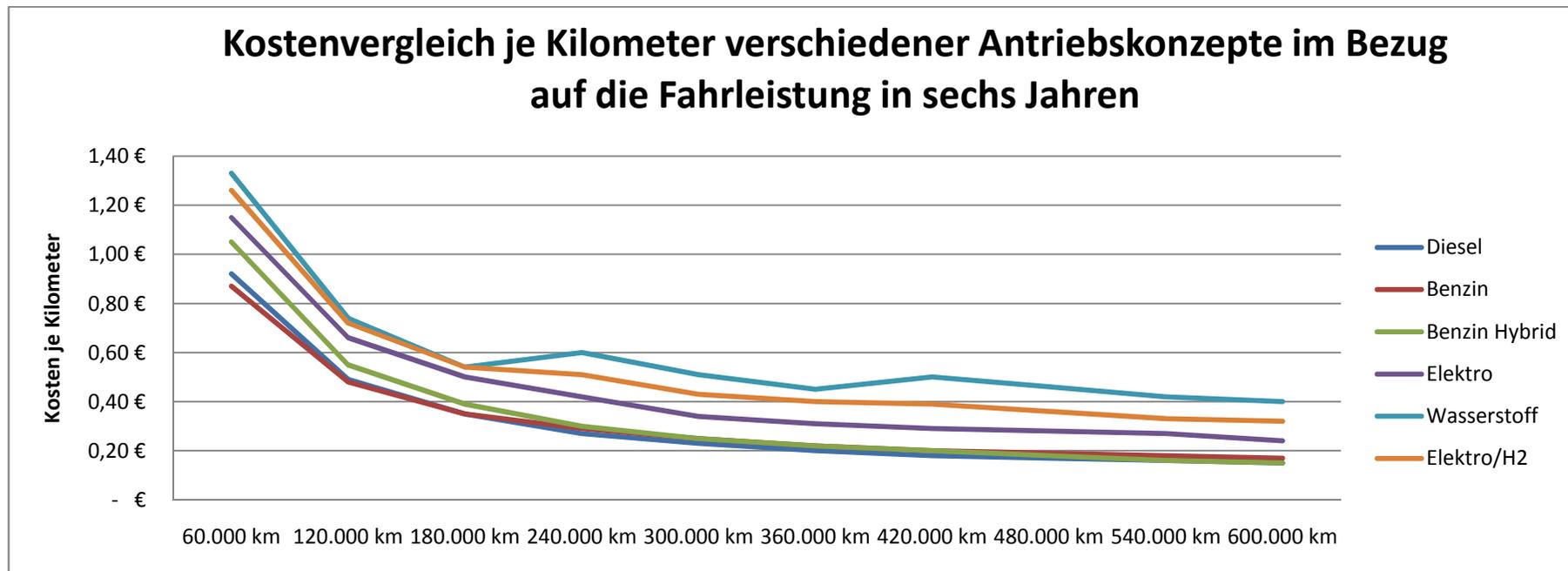
Diesel	Benzin	Benzin Hybrid	Elektro	Wasserstoff	Elektro/H2	Fahrleistung
0,92 €	0,87 €	1,05 €	1,15 €	1,33 €	1,26 €	10.000 km
0,49 €	0,48 €	0,55 €	0,60 €	0,74 €	0,68 €	20.000 km
0,35 €	0,35 €	0,39 €	0,42 €	0,54 €	0,48 €	30.000 km
0,27 €	0,29 €	0,30 €	0,32 €	0,45 €	0,39 €	40.000 km
0,23 €	0,25 €	0,25 €	0,27 €	0,39 €	0,33 €	50.000 km
0,20 €	0,22 €	0,22 €	0,23 €	0,35 €	0,29 €	60.000 km
0,18 €	0,20 €	0,20 €	0,20 €	0,32 €	0,26 €	70.000 km
0,17 €	0,19 €	0,18 €	0,28 €	0,30 €	0,30 €	80.000 km
0,16 €	0,18 €	0,16 €	0,25 €	0,28 €	0,28 €	90.000 km
0,15 €	0,17 €	0,15 €	0,17 €	0,27 €	0,22 €	100.000 km



8. Anlagen

Sechsjahresfahrleistung

Diesel	Benzin	Benzin Hybrid	Elektro	Wasserstoff	Elektro/H2	Fahrleistung
0,92 €	0,87 €	1,05 €	1,15 €	1,33 €	1,26 €	60.000 km
0,49 €	0,48 €	0,55 €	0,66 €	0,74 €	0,72 €	120.000 km
0,35 €	0,35 €	0,39 €	0,50 €	0,54 €	0,54 €	180.000 km
0,27 €	0,29 €	0,30 €	0,42 €	0,60 €	0,51 €	240.000 km
0,23 €	0,25 €	0,25 €	0,34 €	0,51 €	0,43 €	300.000 km
0,20 €	0,22 €	0,22 €	0,31 €	0,45 €	0,40 €	360.000 km
0,18 €	0,20 €	0,20 €	0,29 €	0,50 €	0,39 €	420.000 km
0,17 €	0,19 €	0,18 €	0,28 €	0,46 €	0,36 €	480.000 km
0,16 €	0,18 €	0,16 €	0,27 €	0,42 €	0,33 €	540.000 km
0,15 €	0,17 €	0,15 €	0,24 €	0,40 €	0,32 €	600.000 km



8. Anlagen

Wertverluste

	Diesel	Benzin	Benzin Hybrid	Elektro	Wasserstoff	Elektro/H2
Grundpreis	29.900,00 €	26.400,00 €	40.000,00 €	47.840,00 €	47.840,00 €	47.840,00 €
Überführungskosten	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €
Zulassung / Kennzeichen	50,00 €	50,00 €	50,00 €	50,00 €	50,00 €	50,00 €
Abschreibung pro Jahr vom Grundpreis	16,67%	16,67%	16,67%	16,67%	16,67%	16,67%
Wertverlust nach einem Jahr	5.133,13 €	4.549,82 €	6.816,40 €	8.123,01 €	8.123,01 €	8.123,01 €
Wertverlust nach sechs Jahr	29.898,80 €	26.398,94 €	39.998,40 €	47.838,09 €	47.838,09 €	47.838,09 €
Kosten pro Jahr	4.983,13 €	4.399,82 €	6.666,40 €	7.973,01 €	7.973,01 €	7.973,01 €

Fixkosten

	Diesel	Benzin	Benzin Hybrid	Elektro	Wasserstoff	Elektro/H2
Kfz Steuer	171,00 €	32,00 €	20,00 €	- €	- €	- €
Haftpflicht	516,78 €	439,32 €	439,32 €	439,32 €	439,32 €	439,32 €
Vollkasko	715,53 €	651,13 €	651,13 €	651,13 €	651,13 €	651,13 €
Stellplatzmiete	60,00 €	60,00 €	60,00 €	60,00 €	60,00 €	60,00 €
Sonstige Kosten	- €	- €	- €	- €	600,00 €	600,00 €
Gesamt Fixkosten	1.463,31 €	1.182,45 €	1.170,45 €	1.150,45 €	1.750,45 €	1.750,45 €

8. Anlagen

Betriebskosten

Kraftstoffart	Diesel	Benzin	Benin Hybrid	Elektro	Wasserstoff	Elektro/H2
Kraftstoffpreis €/l ; €/kWh	1,12 €	1,32 €	0,99 €	0,23 €	0,73 €	0,46 €
Verbrauch l/100 km	5,3	7	5,25	20	20	20
Kraftstoffkosten je 100 km	5,94 €	9,24 €	5,20 €	4,60 €	14,60 €	9,24 €
Fahrtkosten 30.000km	2.374,40 €	3.696,00 €	2.079,00 €	1.840,00 €	5.840,00 €	3.696,00 €
Ölnachfüllkosten bei 30 tkm	25,000 €	62,500 €	25,000 €	- €	- €	- €
Fahrzeugwäsche und Pflege	250,00 €	250,00 €	250,00 €	250,00 €	250,00 €	250,00 €
Gesamt Betriebskosten	2.649,40 €	4.008,50 €	2.354,00 €	2.090,00 €	6.090,00 €	3.946,00 €

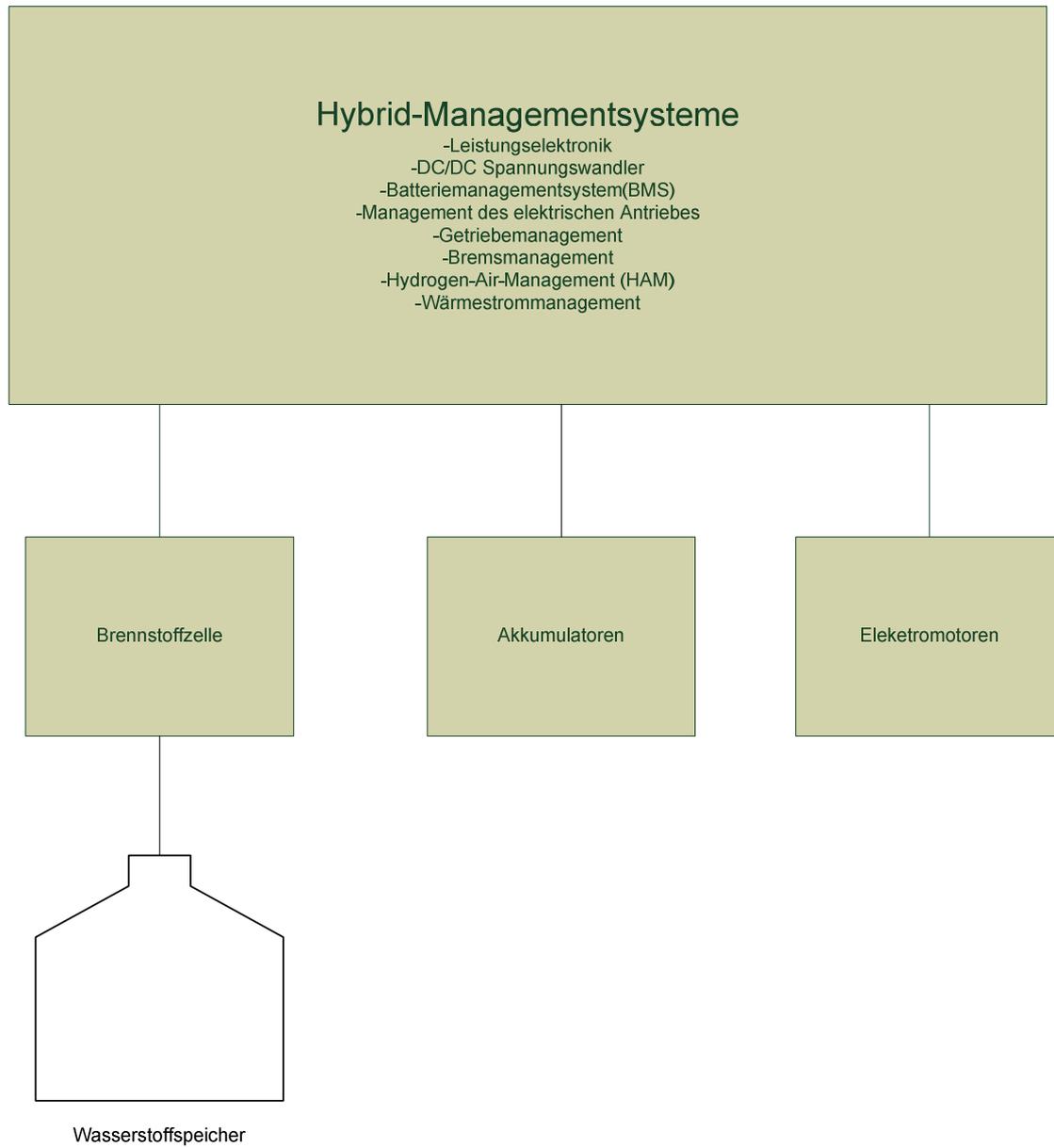
Werkstattkosten

	Diesel	Benzin	Benin Hybrid	Elektro	Wasserstoff	Elektro/H2
Laufleistung pro Jahr	25000	25000	25000	25000	25000	25000
Preis pro Reifen	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €
Gesamt Reifenkosten	1.600,00 €	1.600,00 €	1.600,00 €	1.600,00 €	1.600,00 €	1.600,00 €
Geschätzte Werkstattkosten	300,00 €	250,00 €	300,00 €	100,00 €	150,00 €	150,00 €
Gesamt Werkstatt und Reifenkosten	1.900,00 €	1.850,00 €	1.900,00 €	1.700,00 €	1.750,00 €	1.750,00 €

8. Anlagen

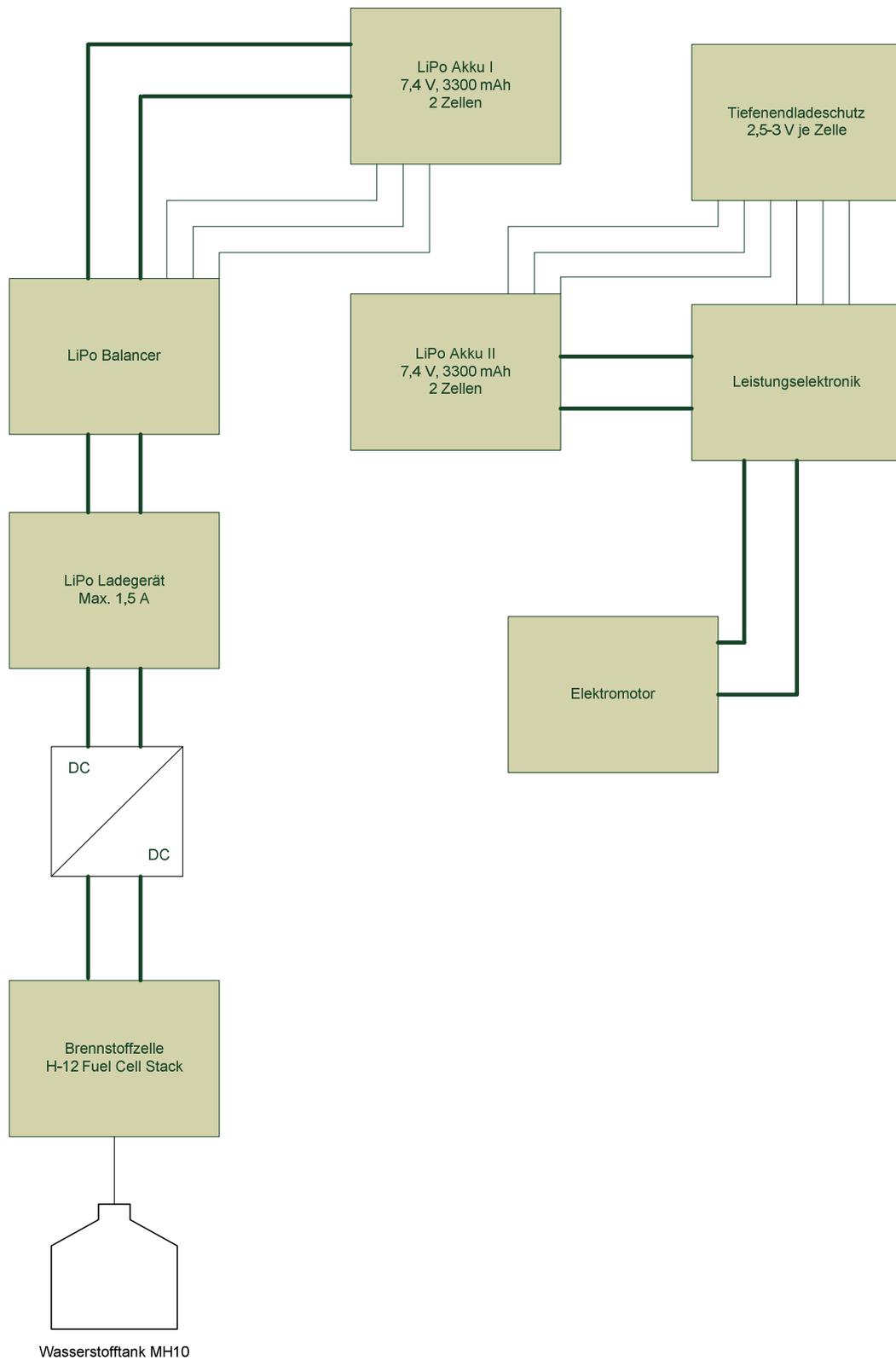
8.10 Blockschaltbilder

- Vereinfachtes Blockschaltbild eines Elektrofahrzeuges mit Brennstoffzelle als Range Extender



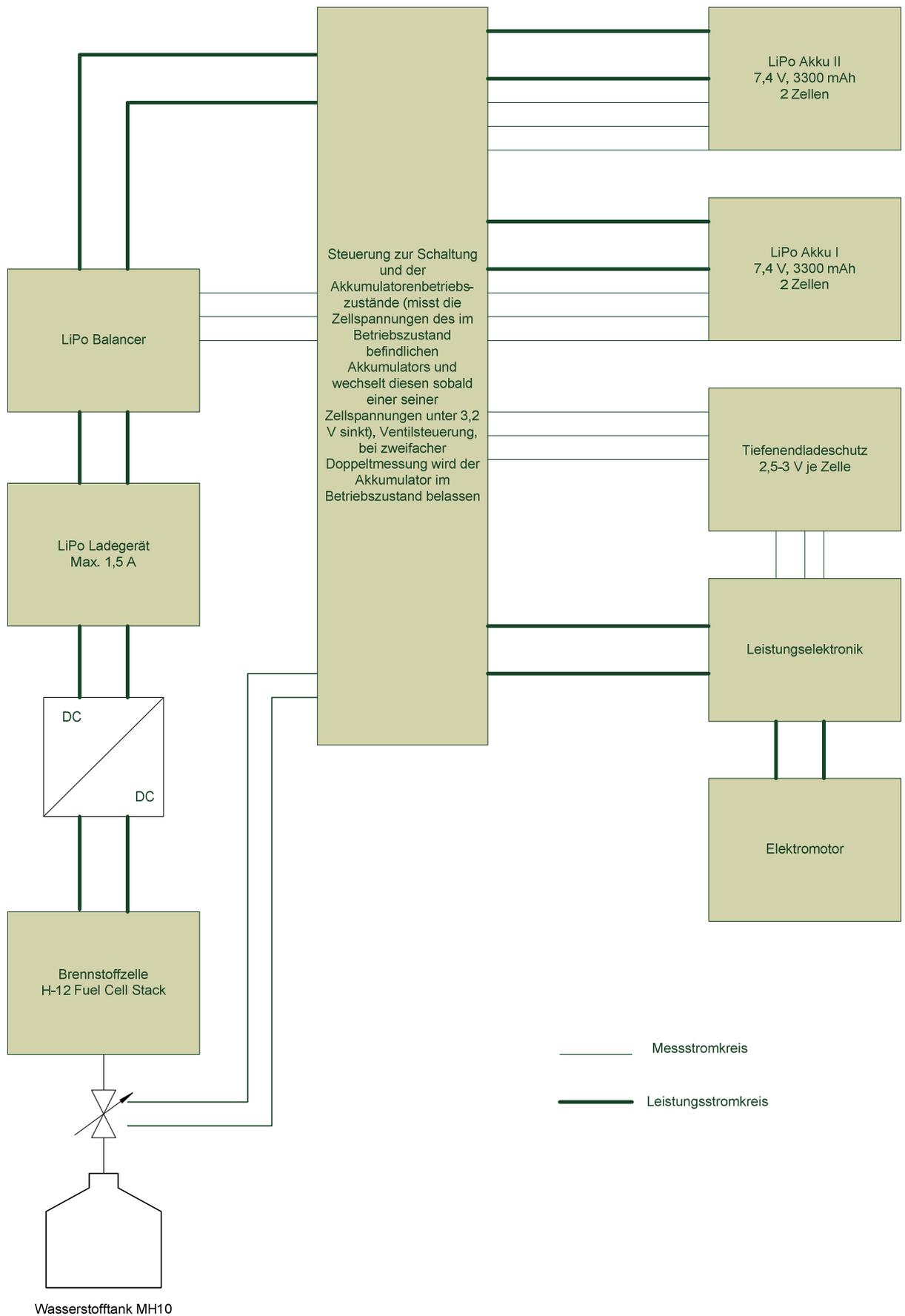
8. Anlagen

- Modellfahrzeug mit Brennstoffzelle als Range Extender mit zwei Lithium-Polymer-Akkumulatoren zum manuellen umstecken, nachladen (hier LiPo I im Ladezustand und LiPo II im Entladebetrieb).



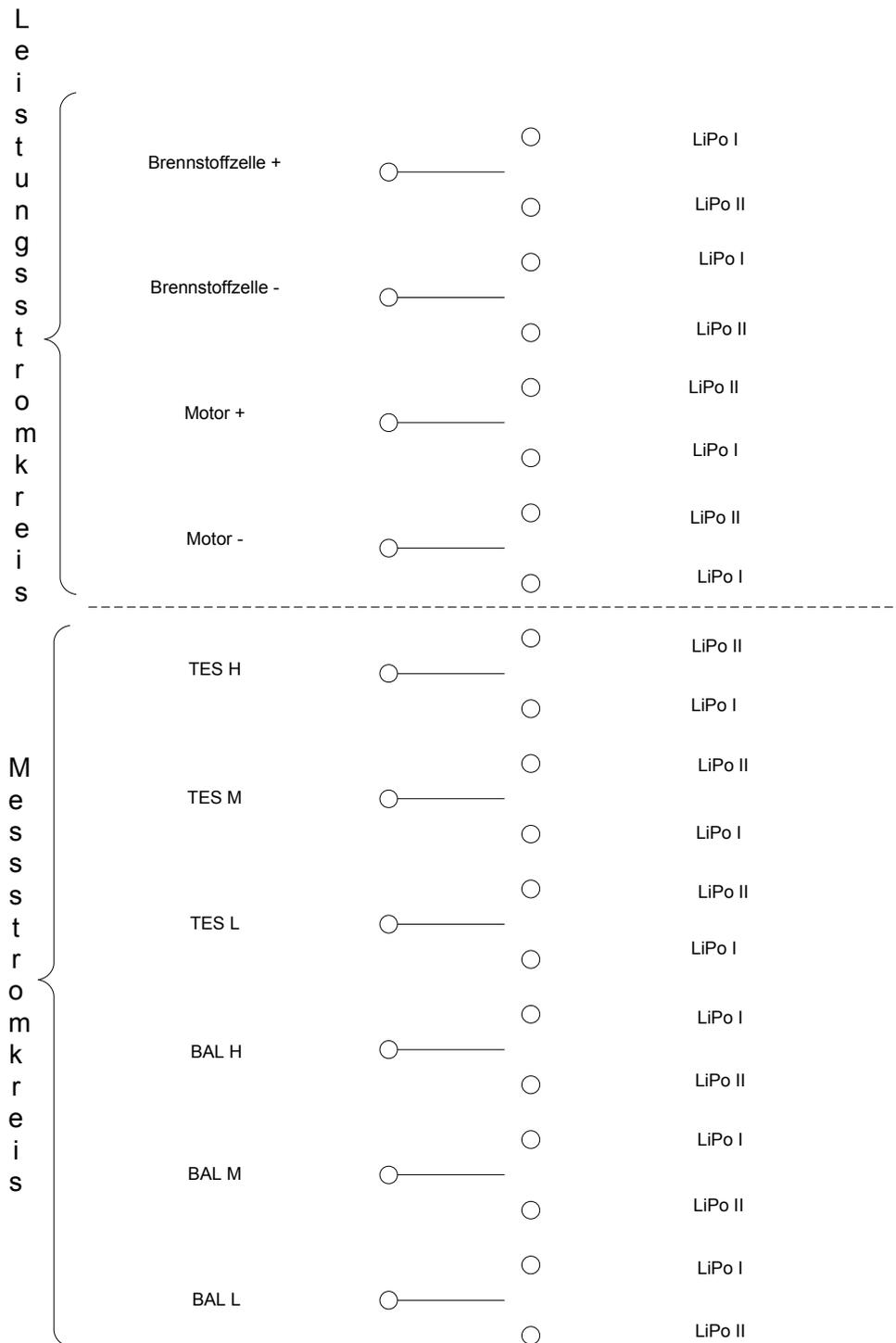
8. Anlagen

- Modellfahrzeug mit geschalteter Nachlademöglichkeit (dem Original sehr ähnlich)



8. Anlagen

- Schalter zum Wechsle der Akkumulatoren



LiPo = Lithium Polymer Akkumulator
 BAL = Balancer
 TES = Tiefenentladeschutz
 H = high
 M = mittel
 L = low

8. Anlagen

- Real möglicher Blockschatplan mit Brennstoffzelle als Range Extender

