

# CO<sub>2</sub>-Reduktion für schwere Güterkraftfahrzeuge im Fernverkehr

Eine systematische Analyse von Optionen für Kraftstoffauswahl und  
Antriebsstrang

vorgelegt von

Dipl.-Ing.

Torsten Dunger

geb. in Berlin

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme

der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Roland Baar

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Volker Schindler

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralph Pütz

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 04.10.2017

Berlin 2018

## Zusammenfassung

Aus klimapolitischer Sicht müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des schweren Langstreckengüterkraftverkehrs deutlich reduziert werden. Maßnahmen aus dem Pkw-Bereich oder dem Verteilerverkehr lassen sich aufgrund abweichender Randbedingungen nur schlecht übertragen. In dieser Arbeit werden die Randbedingungen spezifiziert und darauf basierend systematisch Konzepte für einen CO<sub>2</sub>-freien Fernverkehrsantrieb entwickelt. Der Fokus liegt auf Masse und Bauraum. Es kommen verschiedene Ansätze zum Einsatz. Zunächst findet ein Technologiescreening statt und vielversprechende Technologien werden in Konzepten konkretisiert. Als Resultat werden die alternativen Kraftstoffe Ammoniak und Wasserstoff sowohl mit konventionellen Otto- und Dieselmotoren als auch mit Brennstoffzellen und Freikolbenlineargeneratoren kombiniert. Als Wasserstoffspeichertechnologien werden neben Kompositttanks die Wasserstofffreisetzungen aus Amminboran und Natriumborhydrid diskutiert. Die Wasserstofferzeugung aus der Reaktion von Silizium mit Wasser wird ebenso untersucht wie die direkte Verbrennung von Silizium in Verbindung mit einer geschlossenen Dampfturbine. Als Retrofit-Konzept wird ein konventioneller Dieseltriebstrang mit einer Abgaswäsche und CO<sub>2</sub>-Speicherung an Bord berechnet. Bei geforderten Reichweiten von 800 km bzw. 1100 km fallen alle untersuchten Konzepte schwerer aus als ein konventioneller Dieseltriebstrang. Zudem reagieren die Konzepte basierend auf alternativen Energieträgern deutlich stärker auf Änderungen der geforderten Reichweite. Dies liegt vor allem an den geringeren gravimetrischen Energiedichten der Kraftstoff-Speicher-Systeme. Am besten schneidet die Verbrennung von Ammoniak in einem Freikolbenlineargenerator in Verbindung mit einem elektrifizierten Antriebsstrang ab.

## Abstract

According to the climate change policy carbon dioxide emissions of long-haul trucks have to be reduced. Measures suitable for passenger cars or distributor traffic are usually not applicable for long-haul trucks due to differing boundary conditions. In this work, the corresponding boundary conditions are specified and, based on these, new concepts for a zero emission powertrain are developed. The focus of the examination is the impact on weight and package space. Different approaches are taken into account. The concepts presented here are based on the most promising outputs of a technology screening. As a result the alternative fuels ammonia and hydrogen are combined both with conventional gasoline and diesel engines as well as with fuel cells and free-piston linear generators. Hydrogen can be stored in composite vessels or on-board generated by using ammonia borane, sodium borohydride or silicon. Hydrogen generation from chemical reaction with water is investigated, as well as direct silicon combustion to generate heat to feed a steam turbine. An option for retrofitting a conventional diesel powertrain is to equip the truck with a flue gas scrubbing system and carbon dioxide storage vessels. When constructing the concepts for operational ranges of 800 km as well as 1100 km respectively, the weights of all concepts exceed the mass of a conventional diesel powertrain. Additionally, due to the lower gravimetric energy densities of the fuel-storage-systems the alternative concepts are more sensitive to changes in operational range than a diesel powertrain. The best performance for a zero emission powertrain in this study was achieved by the combustion of ammonia in a free-piston linear generator combined with an electrified powertrain.

## Inhalt

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | Einleitung, Motivation und Aufbau der Arbeit.....                  | 1  |
| 2       | Anforderungsliste .....  | 5  |
| 2.1     | Leistung und Drehmoment .....                                      | 6  |
| 2.2     | Reichweite .....   | 7  |
| 2.3     | Energie- und Leistungsbedarf im realen Fahrzeugeinsatz .....       | 8  |
| 2.4     | Reduktion der CO <sub>2</sub> -Emissionen .....                    | 9  |
| 2.5     | Masse und Volumen der Antriebseinheit.....                         | 10 |
| 2.6     | Sensitivitätsbetrachtung für die Referenz-Antriebseinheit .....    | 11 |
| 2.7     | Resultierende Anforderungsliste.....                               | 13 |
| 3       | Methodik .....   | 15 |
| 4       | Strukturen und Funktionen .....                                    | 18 |
| 5       | Wirkprinzipien .....   | 22 |
| 5.1     | Mechanische Energie .....  | 22 |
| 5.1.1   | Speicher für mechanische Energie .....                             | 22 |
| 5.1.2   | Online-Versorgung für mechanische Energie.....                     | 23 |
| 5.1.3   | Wandler zur Bereitstellung mechanischer Energie .....              | 23 |
| 5.2     | Elektrische Energie .....  | 24 |
| 5.2.1   | Speicher für elektrische Energie.....                              | 25 |
| 5.2.2   | Online-Versorgung für elektrische Energie .....                    | 25 |
| 5.2.3   | Wandler zur Bereitstellung elektrischer Energie.....               | 26 |
| 5.3     | Thermische Energie .....   | 28 |
| 5.3.1   | Speicher für thermische Energie .....                              | 29 |
| 5.3.2   | Online-Versorgung für thermische Energie.....                      | 29 |
| 5.3.3   | Wandler zur Bereitstellung und Verwertung thermischer Energie..... | 29 |
| 5.4     | Chemische Energie .....  | 31 |
| 5.4.1   | Kraftstoff.....  | 31 |
| 5.5     | Kohlenstoffdioxidabscheidung .....                                 | 33 |
| 5.5.1   | Kohlenstoffdioxidabscheidung aus dem Gasstrom .....                | 34 |
| 5.5.1.1 | Physisorption .....  | 34 |
| 5.5.1.2 | Chemisorption .....  | 35 |
| 5.5.1.3 | Adsorption .....   | 36 |
| 5.5.1.4 | Membran .....  | 37 |
| 5.5.1.5 | Vergleich der Abscheideverfahren .....                             | 38 |

---

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 5.5.2   | Kohlenstoffbeseitigung aus dem Edukt.....   | 42 |
| 5.5.2.1 | Dampfreformierung .....   | 42 |
| 5.5.2.2 | Partielle Oxidation.....  | 43 |
| 5.5.2.3 | Wassergas-Shift-Reaktion.....   | 43 |
| 5.6     | Stoffumwandlung.....  | 43 |
| 5.6.1   | Wasserstoff aus Ammoniak.....   | 43 |
| 5.6.2   | Wasserstoff aus Amminboran .....  | 44 |
| 5.6.3   | Wasserstoff aus Natriumborhydrid und Wasser.....  | 46 |
| 5.6.4   | Wasserstoff aus Zink und Wasser .....   | 46 |
| 5.6.5   | Wasserstoff aus Silizium und Wasser.....  | 47 |
| 5.6.6   | Wasserstoff aus Aluminium und Wasser .....  | 48 |
| 5.6.7   | Vergleich der Wasserstoffquellen .....  | 48 |
| 5.7     | CO <sub>2</sub> -Speicherung.....   | 50 |
| 6       | Konzepterstellung.....  | 52 |
| 6.1     | Konzepterstellung mittels Energiedichtegüte .....   | 52 |
| 6.2     | Konzepterstellung basierend auf kohlenstofffreien Energieträgern.....   | 56 |
| 6.2.1   | Halb-/Metalle in Verbrennungskraftmaschinen .....   | 57 |
| 6.2.2   | Kohlenstofffreie Energieträger zur Wasserstoffbereitstellung .....  | 58 |
| 6.3     | Konzepterstellung unter Nutzung von Abscheideverfahren.....   | 59 |
| 6.3.1   | Abgaswäsche mit Waschmittelregeneration .....   | 61 |
| 6.3.2   | Abgaswäsche ohne Waschmittelregeneration.....   | 61 |
| 6.3.3   | Dampfreformierung mit nachgeschalteter CO <sub>2</sub> -Abscheidung aus dem Anodenabgas einer Brennstoffzelle ..... | 63 |
| 6.3.4   | Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft mit anschließender Abgaswäsche .....                                    | 65 |
| 7       | Konzeptkonkretisierung .....  | 66 |
| 7.1     | Rekuperation der Bremsenergie .....   | 66 |
| 7.2     | Ammoniak als Kraftstoff.....  | 69 |
| 7.2.1   | Ammoniak im Dieselmotor.....  | 70 |
| 7.2.2   | Ammoniak im Ottomotor .....   | 72 |
| 7.2.3   | Ammoniak im Freikolbenlineargenerator .....   | 74 |
| 7.2.4   | Ammoniak in der Festoxid-Brennstoffzelle .....  | 76 |
| 7.2.5   | Ammoniak – Übersicht .....  | 79 |
| 7.2.6   | Sensitivität - Ammoniak im Freikolbenlineargenerator .....  | 80 |
| 7.3     | Wasserstoff.....  | 80 |
| 7.3.1   | Wasserstoff im Ottomotor .....  | 82 |

---

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 7.3.2 | Wasserstoff im Freikolbenlineargenerator .....   | 84  |
| 7.3.3 | Wasserstoff in der Festoxidbrennstoffzelle .....   | 85  |
| 7.3.4 | Wasserstoff in der Polymerelektrolytbrennstoffzelle .....  | 87  |
| 7.3.5 | Wasserstoff – Übersicht .....  | 88  |
| 7.3.6 | Sensitivität - Wasserstoff im Freikolbenlineargenerator .....  | 89  |
| 7.4   | Dampfturbinenantriebseinheit .....   | 90  |
| 7.4.1 | Dampfturbinenantriebseinheit aus ortsfest ausgelegten Komponenten .....                              | 92  |
| 7.4.2 | Dampfturbinenantriebseinheit aus Komponenten für den Automobilbereich .....                          | 96  |
| 7.4.3 | Dampfturbinenantriebseinheit – Übersicht .....   | 99  |
| 7.4.4 | Sensitivität – Silizium in einer Dampfturbine mit automotive-Komponenten.....                        | 100 |
| 7.5   | Wasserstoffquellen mit geeigneten Energiewandlern.....   | 100 |
| 7.5.1 | Wasserstoffquellsystem basierend auf solvolytischer Amminboranzersetzung .....                       | 102 |
| 7.5.2 | Wasserstoffquellsystem basierend auf saurer Hydrolyse von Natriumborhydrid.....                      | 105 |
| 7.5.3 | Wasserstoffquellsystem basierend auf Silizium .....  | 110 |
| 7.5.4 | Wasserstoffquellsysteme – Übersicht.....   | 116 |
| 7.5.5 | Sensitivität – Wasserstoffquellsystem auf Basis Amminborans mit einem Freikolbenlineargenerator..... | 117 |
| 7.6   | Gaswäschekonzepte.....   | 118 |
| 7.6.1 | Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche und Waschmittelregeneration .....                               | 118 |
| 7.6.2 | Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche ohne Waschmittelregeneration .....                              | 122 |
| 7.6.3 | Gaswäschekonzepte – Übersicht.....   | 125 |
| 7.6.4 | Sensitivität – Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche und Waschmittelregeneration                      | 125 |
| 8     | Bewertung der Konzepte.....  | 127 |
| 9     | Neue Konzepte für elektrisch angetriebene Lkw .....  | 129 |
| 9.1   | Tesla Semi.....  | 129 |
| 9.2   | Nikola One .....   | 131 |
| 9.3   | Vergleich.....   | 133 |
| 10    | Zusammenfassung und Ausblick .....   | 135 |
| 11    | Abkürzungsverzeichnis .....  | 136 |
| 12    | Symbolverzeichnis .....  | 138 |
| 13    | Abbildungsverzeichnis .....  | 139 |
| 14    | Tabellenverzeichnis .....  | 143 |
| 15    | Literatur.....   | 145 |
| 16    | Anhang.....  | 158 |
| 16.1  | Massen und Volumina der Elemente .....   | 158 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 16.2   | Dimensionierung der Tanks und Reaktoren .....    | 163 |
| 16.2.1 | Katalytische Amminboranzersetzung für FKLG ..... | 163 |
| 16.2.2 | Saure Natriumborhydridzersetzung(flüssig) .....  | 163 |
| 16.2.3 | Saure Natriumborhydridzersetzung(fest) .....     | 164 |
| 16.2.4 | Wasserstofferzeugung mittels Silizium .....      | 164 |

# 1 Einleitung, Motivation und Aufbau der Arbeit

Im Rahmen des Kyoto-Protokolls legte die Bundesrepublik Deutschland ihre Reduktionsziele für Treibhausgasemissionen in Bezug auf den Ausstoß im Jahr 1990 fest. Für den Durchschnitt des Zeitraums 2008 bis 2012 sollten die Emissionen um 21% sinken. Für das Jahr 2020 wird eine Senkung von 40% angestrebt. [HEND14]

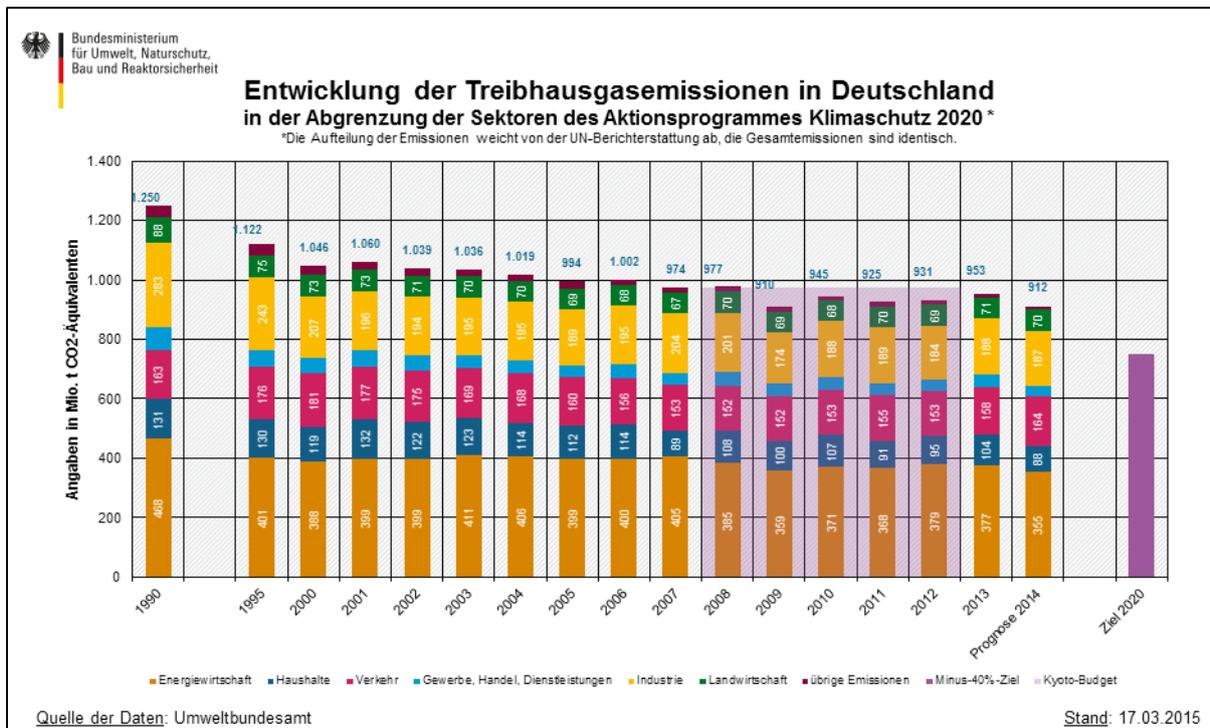


Abbildung 1-1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren [BUND15]

Deutschland konnte das gesteckte Ziel mit einer Reduktion von 23,6% übertreffen. Allerdings fällt auf, dass sich die Dynamik in den letzten Jahren deutlich abschwächt und in den Jahren 2012 sowie 2013 mehr Treibhausgase emittiert wurden als im jeweiligen Vorjahr. Die Wirtschaftskrise von 2009 ließ die Industrieemissionen um 12,6% zurückgehen und begünstigte somit das Erreichen des Kyoto-Ziels. Dem gegenüber steht der Kernkraftausstieg, der zu einem erhöhten Einsatz von Braun- und Steinkohle in der Energiewirtschaft führt. Die Emissionen aus dem Verkehr stagnieren seit 2006. Betrachtet man den Transportsektor differenziert, so ergeben sich für das Jahr 2004 Treibhausgasemissionen in Höhe von 182 Mt CO<sub>2</sub>e, wovon 51 Mt CO<sub>2</sub>e bzw. 28% auf Lkw entfallen. Der relative Anteil der Lkw wird im Jahr 2030 auf 33% wachsen, die absoluten Emissionen der Lkw erreichen 69 Mt CO<sub>2</sub>e (vgl. Abbildung 1-2).

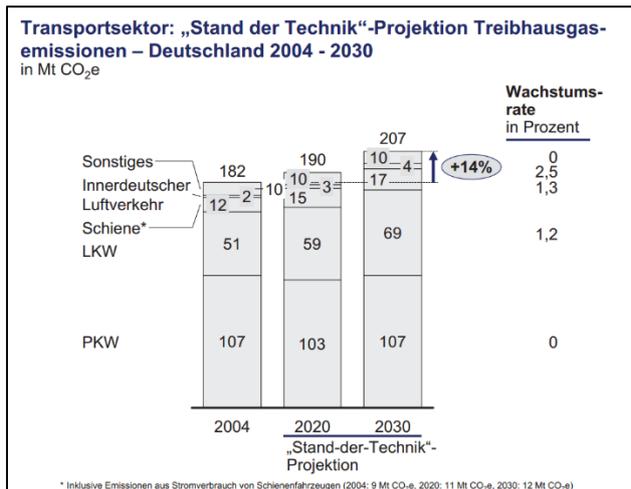


Abbildung 1-2: Treibhausgasemissionen im Transportsektor [MCKI07]

Dieses Szenario basiert auf der Annahme, dass eine allmähliche Bestandserneuerung der Fahrzeugflotte mit Fahrzeugen auf dem Stand der Technik (im Jahr 2006) stattfindet. Technologischer Fortschritt wird dabei nicht berücksichtigt.

Der positive Effekt der eingeführten technischen Maßnahmen zur Emissionssenkung wurde in der Vergangenheit und wird wohl auch in Zukunft durch das Wachstum der Güterverkehrsleistung aufgehoben. Die absoluten Treibhausgasemissionen der Lkw steigen bis zum Jahr 2020 um 15,7% und bis zum Jahr 2030 um 35,3% jeweils bezogen auf das Jahr 2004, denn der Straßengüterverkehr wird bis 2030 um 1,1% pro Jahr wachsen, danach bis 2050 um 0,5% pro Jahr (vgl. Abbildung 1-3).

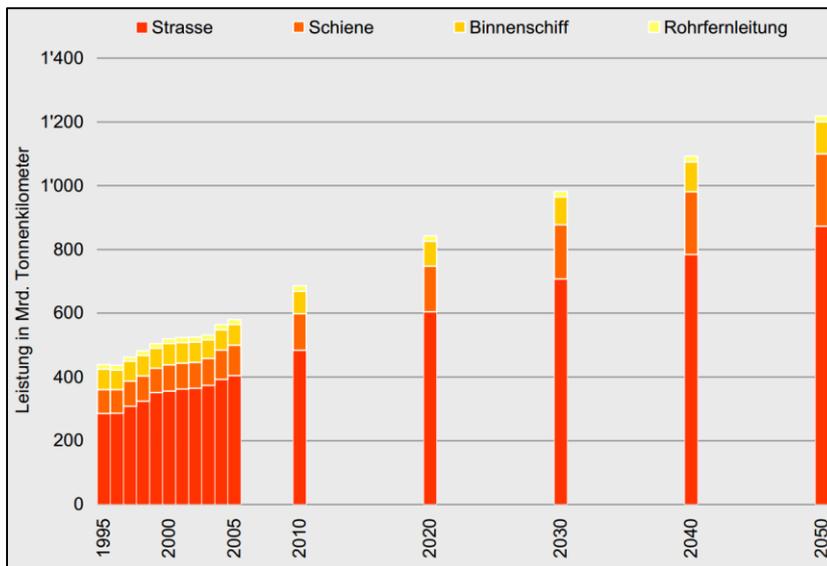


Abbildung 1-3: Entwicklung der Güterverkehrsleistung [ICKE07]

Zur Lösung des Konflikts aus geringeren Emissionen und steigendem Verkehrsaufkommen werden diverse Ansätze verfolgt. Neben der Reduktion der Fahrwiderstände bezogen auf die beförderte Gütermenge durch Kolonnenfahrten vernetzter Lkw, den Einsatz von EuroCombi oder die Verbesserung der Aerodynamikeigenschaften werden neue Konzepte für den Antriebsstrang entwickelt. Daimler stellt einen vollelektrischen 26t-Lkw für den leichten Verteilerverkehr vor [DAIM16] und Siemens testet die elektrische Versorgung von Hybrid-Lkws durch Oberleitungen in Schweden [SIEM16]. Ob diese Antriebsstrangkonzepete auch für den schweren Fernverkehr geeignet sind, bleibt fraglich.

Der renommierte Wissenschaftler Prof. Lenz formuliert dazu Folgendes:

„Wer weit fährt wird immer einen Dieselmotor haben. Und es ist auch nicht vorstellbar einen 40 Tonnen Lastzug anders anzutreiben als mit dem Diesel.“ [LENZ10]

Ziel dieser Arbeit ist es, die These zu bestätigen oder ein Antriebsstrangkonzzept vorzustellen, welches die These widerlegen kann, denn mit den bisher entwickelten Maßnahmen ist der schwere Langstreckengüterkraftverkehr nicht in der Lage, einen relevanten Beitrag zur Erreichung der Klimaziele zu erbringen. Die derzeit vorherrschenden Entwicklungsziele adressieren – soweit sie öffentlich bekannt sind - kurzfristige Erfolge. Dabei werden die aktuell eingesetzten Technologien schrittweise weiterentwickelt und optimiert. [DEN13] Der Mangel an effizienten Maßnahmen zur Emissionsreduktion lässt sich anhand der Vermeidungskosten verdeutlichen. Diese sind für den Transportsektor am höchsten. Bisher hat die Bundesregierung die Reduktionsvorgaben für die einzelnen Sektoren in Anlehnung an die Vermeidungskosten unterschiedlich gestaltet [KNOP13]. In Abbildung 1-4 sind einzelne Maßnahmen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen im Transportsektor dargestellt. Setzt man alle Maßnahmen um, die in diesem Szenario auch Kosteneinsparungen generieren, so lassen sich ca. 14 Mt CO<sub>2</sub>e einsparen. Im Vergleich dazu lassen sich im Gebäudesektor ca. 63 Mt CO<sub>2</sub>e durch Maßnahmen mit finanziellen Einsparungen vermeiden (vgl. Abbildung 1-5). Des Weiteren fällt auf, dass die meisten Maßnahmen im PKW-Bereich zu finden sind. Schwere Lkw lassen sich nur in ihrer Aerodynamik effizient verbessern. Weitere Maßnahmen sind zum Teil mit erheblichen Zusatzkosten verbunden.

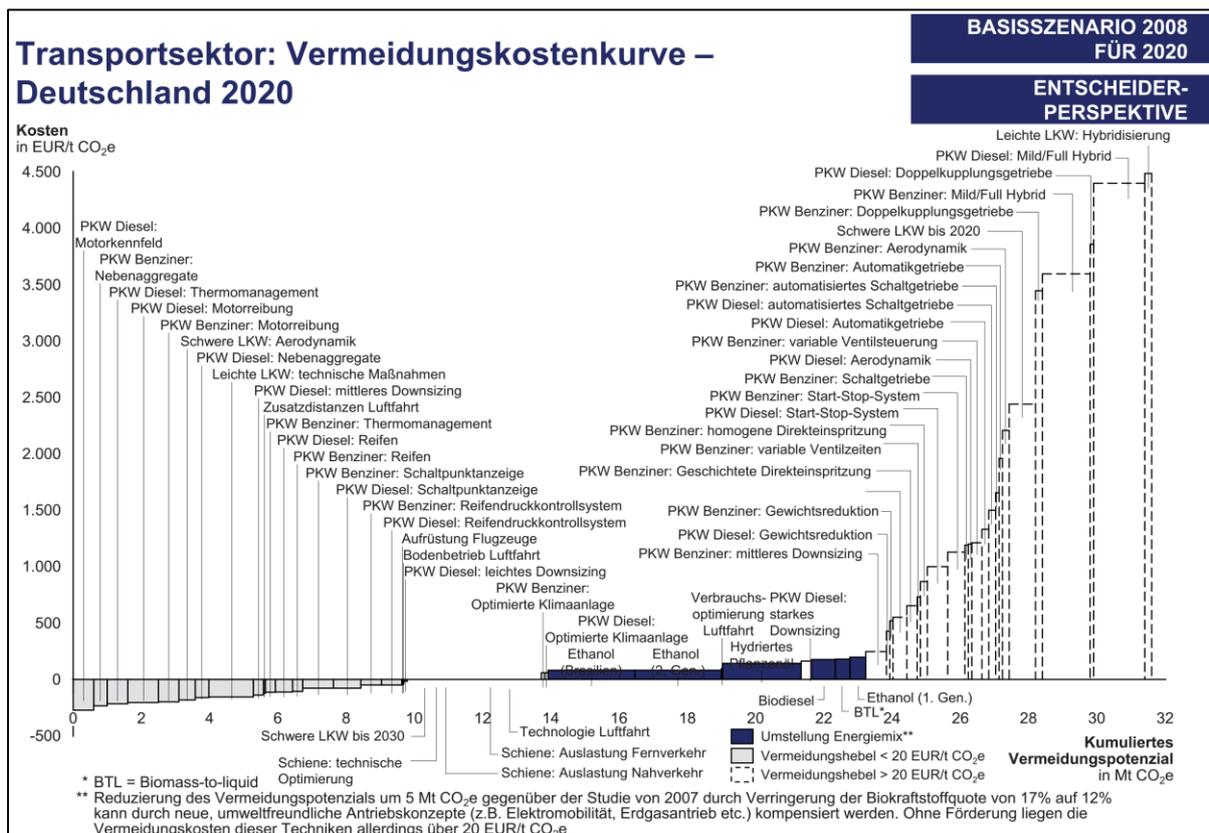


Abbildung 1-4: Vermeidungskostenkurve Transport [MCKI09]

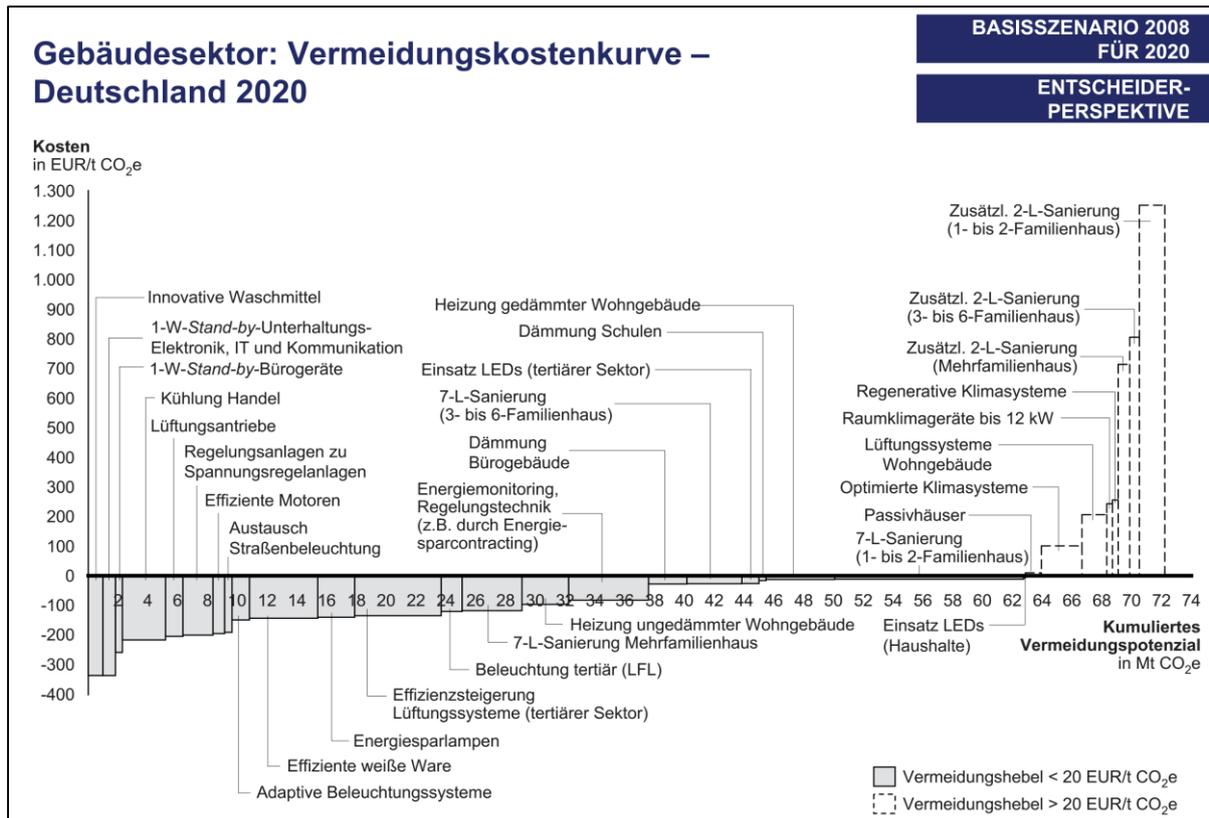


Abbildung 1-5: Vermeidungskostenkurve Gebäude [MCKI09]

Auf Dauer werden unterschiedliche Reduktionsvorgaben für die verschiedenen Sektoren nicht tragbar sein. Das langfristige Ziel der Klimapolitik muss die Klimagerechtigkeit sein. Am Ende stehen gleiche Emissionsrechte pro Kopf in allen Ländern. Der wissenschaftliche Beirat für Verkehr empfiehlt die direkte Besteuerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen fossiler Rohstoffe. So soll sektorübergreifend die höchste Effizienz erreicht werden. [WISS08]

Die folgende Untersuchung konzentriert sich auf die längerfristigen Emissionsziele. Daher werden auch Technologien für einen CO<sub>2</sub>-reduzierten bzw. CO<sub>2</sub>-freien Lkw-Antriebstrang analysiert, die derzeit noch nicht im automobilen Bereich anzutreffen sind, ja die aus heutiger Sicht als abgelegen, gar abseitig einzustufen sind.

Das Vorgehen respektive der Aufbau der Arbeit orientieren sich an dem Konstruktionsprozess gemäß VDI-Richtlinie 2221. Dieser wird in Kapitel 3 detailliert beschrieben. In Kapitel 2 wird die Anforderungsliste vorgestellt. In ihr wird der aktuelle Stand der Technik abgebildet. Der Vorgriff gegenüber Kapitel 3 dient dem Leser als Einstieg in die Thematik des schweren Fernverkehrs. In Kapitel 4 werden die Strukturen und Funktionen des Lkws ermittelt, so dass auf abstrakter Ebene in Kapitel 5 die passenden Wirkprinzipien vorgestellt werden können. Die Konzepterstellung und -konkretisierung erfolgt in den Kapiteln 6 und 7 parallel für die einzelnen Lösungswege. Diese Anordnung erleichtert den Vergleich der Konzepte untereinander auf den jeweiligen Detaillierungsebenen. In Kapitel 8 werden die Konzepte abschließend bewertet und in Kapitel 9 erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse, sowie ein Ausblick.

## 2 Anforderungsliste

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik im Güterkraftverkehr vorgestellt und daraus die Anforderungsliste abgeleitet.

Die Hauptaufgabe des Güterkraftverkehrs besteht darin, Güter möglichst schnell und effizient von A nach B zu befördern. Dabei können sich einzelne Forderungen jedoch negativ auf andere Merkmale auswirken. So kann die schnelle Lieferung dazu führen, dass das Fahrzeug nicht vollständig ausgelastet ist und somit die Effizienz sinkt. Umgekehrt verzögert das Zusammenfassen von Lieferungen die Auslieferung bei erhöhter Effizienz.

Die dominierende Antriebsart im Langstreckenverkehr ist der Dieselantrieb. Er überzeugt durch sein hohes Drehmoment bei gutem Wirkungsgrad und hoher Reichweite. Damit die maximale Leistung des Dieselmotors möglichst bei jeder Geschwindigkeit zur Verfügung steht, ist ein Getriebe mit üblicherweise 9 bis 16 Gängen nachgeschaltet. Für das Anfahren wird darüber hinaus ein Momentwandler benötigt. Das Antriebsmoment wird über die Wellen bzw. Achsen und etwaige Verteilergetriebe an die Räder geleitet.

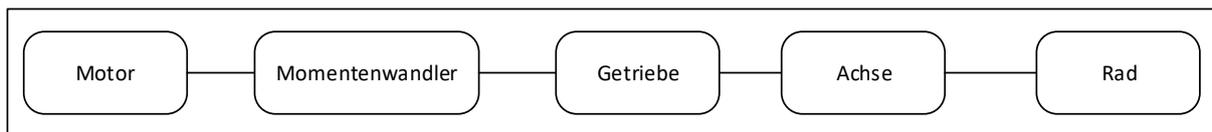


Abbildung 2-1: schematischer Antriebsstrang (eigene Darstellung)

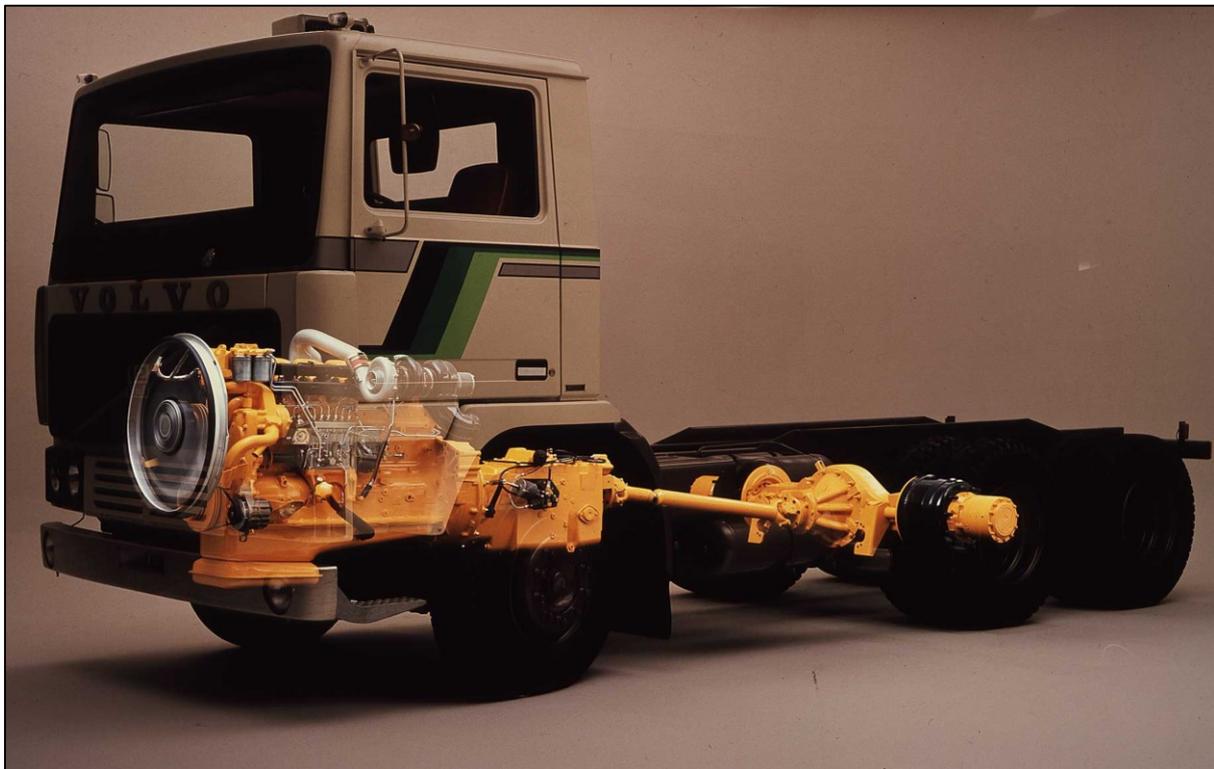


Abbildung 2-2: exemplarischer Antriebsstrang - Dreiachsige Sattelzugmaschine mit einer angetriebenen Achse [HOLL10]

Wird der Dieselmotor durch andere Energiewandler ersetzt, können unter Umständen Komponenten hinzukommen oder entfallen. In den nachfolgenden Betrachtungen werden im Antriebsstrang zusätzliche Aggregate berücksichtigt, jedoch die Achsen und Räder vernachlässigt. Der Begriff der Antriebseinheit umfasst hier den Antriebsstrang, den Kraftstoffspeicher und den Kraftstoff.

In den folgenden Unterkapiteln werden die wichtigsten Anforderungen an die Antriebseinheit für einen Langstrecken-Lkw detailliert beschrieben. Darüber hinaus gibt es noch implizite allgemeingültige Anforderungen, deren Erfüllung vom Hersteller bzw. Kunden meistens stillschweigend vorausgesetzt wird. Dazu zählen die folgenden Eigenschaften: geringe Herstell- und Betriebskosten, hoher Wirkungsgrad, geringe Schadstoffemissionen, hohe Lebensdauer, hohe Zuverlässigkeit, geringes Geräusch, fertigungsgerecht, montagegerecht, prüfgerecht, wartungsarm und recyclinggerecht. [KOLL85], Verzicht auf Materialien oder Betriebsstoffe, die tatsächlichen oder befürchteten Einschränkungen unterliegen (z.B. wegen Schädlichkeit, geringer Ressourcen). Aus dem Fahrzeugeinsatz leiten sich zusätzliche Anforderungen ab, die jedoch nur qualitativ beschrieben werden, wie Elastizität, Kaltstartverhalten und Verträglichkeit für Mensch und Umwelt, hohe Verfügbarkeit, keine Einschränkungen im Betrieb (z.B. durch Wasserschutzrücksichten), keine zu großen zusätzlichen Anforderungen an Betreiber, Fahrer, Servicepersonal.

## 2.1 Leistung und Drehmoment

„Bei Lastkraftwagen sowie Kraftomnibussen einschließlich Gepäckanhänger, bei Sattelkraftfahrzeugen und Lastkraftwagenzügen muss eine Motorleistung von mindestens 5,0 kW, bei Zugmaschinen und Zugmaschinenzügen – ausgenommen für land- oder forstwirtschaftliche Zwecke – von mindestens 2,2 kW je Tonne des zulässigen Gesamtgewichts des Kraftfahrzeugs und der jeweiligen Anhängelast vorhanden sein; dies gilt nicht für die mit elektrischer Energie angetriebenen Fahrzeuge sowie für Kraftfahrzeuge – auch mit Anhänger – mit einer durch die Bauart bestimmten Höchstgeschwindigkeit von nicht mehr als 25 km/h.“ [StVZO]

Daraus ergeben sich Mindestmotorleistungen von 200 kW bzw. 220 kW im kombinierten Verkehr, sofern keine Sonderregelungen wie z.B. für elektrisch angetriebene Fahrzeuge angenommen werden. Diese Leistungen werden von den Neuzulassungen jedoch deutlich übertroffen. So lagen im Jahr 2012 die durchschnittlichen Motorleistungen für neu zugelassene Sattelzugmaschinen bei 336 kW (vgl. Tabelle 2-1). In neueren Veröffentlichungen des Kraftfahrt-Bundesamtes wird die durchschnittliche Motorleistung nicht mehr einzeln ausgewiesen. Die Verteilung der Klassen in den Jahren 2013 und 2014 lässt auf steigende durchschnittliche Motorleistungen schließen.

Tabelle 2-1: Anzahl neuzugelassener Sattelzugmaschinen nach Motorisierung [KRAF15; KRAF13]

| Jahr | bis 200 kW | 201 bis 300 kW | 301 und mehr kW | Insgesamt | durchschnittliche Motorleistung |
|------|------------|----------------|-----------------|-----------|---------------------------------|
| 2012 | 166        | 3747           | 27321           | 31234     | 336                             |
| 2013 | 208        | 2810           | 27051           | 30069     | keine Angabe                    |
| 2014 | 177        | 2382           | 31771           | 34330     | keine Angabe                    |

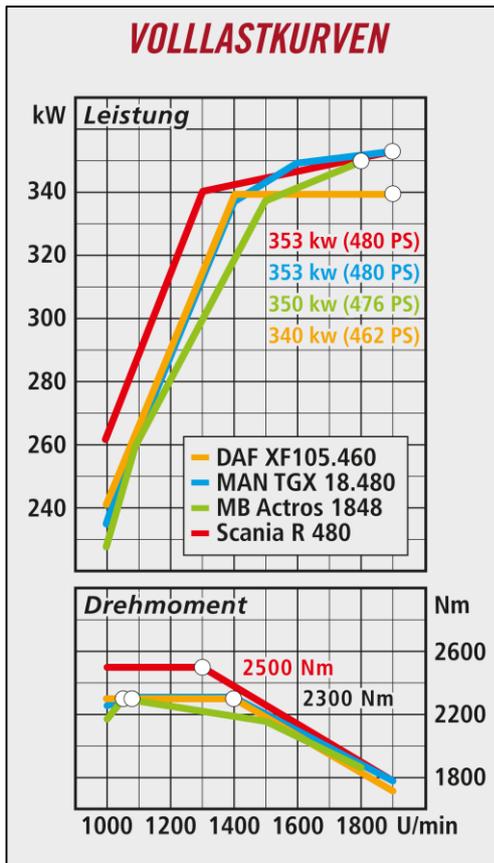


Abbildung 2-3: Volllastkurven aktueller Dieselmotoren im gewählten Leistungsbereich [ZEIT10]

Auf dem Markt befindliche Fahrzeuge mit Leistungen zwischen 340 kW und 350 kW (vgl. Abbildung 2-3) liefern ein maximales Drehmoment um 2300 Nm. Dieser Wert dient zur Orientierung, um etwaige Zusatzgetriebe für alternative Antriebsstränge abschätzen zu können.

## 2.2 Reichweite

Die benötigte Reichweite des Lkw bestimmt in Verbindung mit dem Gesamtwirkungsgrad die Größe des Energiespeichers. Durch das Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) wird die Freimenge an Kraftstoff auf 1500 l festgelegt. Darüber hinaus muss der Transport als Gefahrgut gekennzeichnet und besonders gesichert werden. [BUND13] Legt man für einen an der Gewichtsgrenze betriebenen Sattelzug einen typischen Verbrauch von 35 l Dieselkraftstoff auf 100 km zugrunde, so lässt sich eine Reichweite von knapp 4300 km realisieren. Wird der Lkw mit leichten voluminösen Gütern voll- oder nur teilbeladen, sinkt der Verbrauch und eine noch größere Reichweite wird möglich. Dieser Wert ist jedoch vorwiegend der hohen Energiedichte des Dieselkraftstoffs und den günstigen und leichten Tanks geschuldet. Eine praktische Notwendigkeit für 4300 oder mehr km Reichweite besteht nicht oder nur in Ausnahmefällen.

Um an praxisnahe Daten zu gelangen, wurden Speditionen hinsichtlich der Tankgrößen ihres Fuhrparks, sowie zum Tankverhalten befragt. Die Fahrzeuge der untersuchten Unternehmen verfügen durchschnittlich über 800 l bis 1000 l große Tanks. Die Betankung erfolgt nach Bedarf und liegt im Durchschnitt bei 400 l. [BOGD13] Daraus wird für alternative Antriebseinheiten ein Richtwert für die Reichweite von 1100 km abgeleitet. Legt man jedoch die zulässigen Lenkzeiten zugrunde, erscheinen auch 800 km Reichweite als ausreichend. Dabei wird unterstellt, dass bei Betriebsschluss eine Parkmöglichkeit mit Kraftstoffinfrastruktur aufgesucht und genutzt wird.

## 2.3 Energie- und Leistungsbedarf im realen Fahrzeugeinsatz

Ein Verbrauch von 35 l Dieselkraftstoff auf 100 km mit einem unteren Heizwert von 35,7 MJ/l [SCHM13] für Dieselkraftstoff mit Biodieselanteil entspricht einem Energieeinsatz von 1250 MJ/100km. Davon wird nur ein Teil zum Überwinden der Fahrwiderstände genutzt, der Rest speist Nebenverbraucher oder geht in Form von Abwärme verloren. Da es für Lkw keinen genormten Fahrzyklus gibt, können daraus simulativ keine Werte für die Fahrwiderstände ermittelt werden. Sinnvolle Vergleiche sind nur auf echten Strecken unter standardisierten Bedingungen möglich. Starke Vereinfachungen des Fahrprofils verursachen unzulässig große Abweichungen vom Realbetrieb, wie die folgende Betrachtung zeigt. Wählt man eine Konstantfahrt in der Ebene, bleibt der Einfluss von Beschleunigungs- und Steigungswiderstand unberücksichtigt und es kommt zu einem großen Fehler in der Energiebedarfsberechnung. Analog dazu können Verbrauchsergebnisse auf einer Teststrecke stark von real erzielbaren Verbräuchen abweichen. So erreichte ein vollbeladener Mercedes-Benz Actros auf der Teststrecke in Nardo einen Verbrauch von 19,44 l/100km. In Abbildung 2-4 sind die Parameter mit ihrem Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch dargestellt.

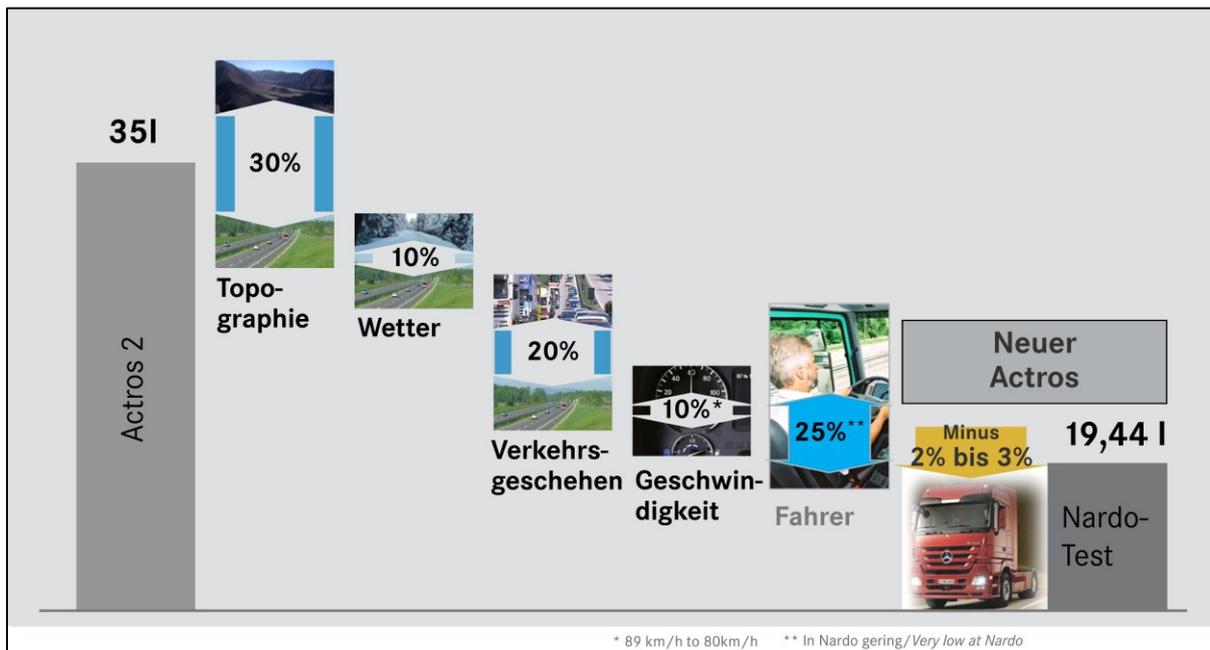


Abbildung 2-4: Unterschiede zwischen realem und idealem Verbrauch [HOLL08]

Stattdessen wird auf eine reale Strecke zurückgegriffen. Die Strecke Stuttgart-Hamburg-Stuttgart verläuft durch die deutschen Mittelgebirge und das Norddeutsche Tiefland und bildet die durchschnittliche Topographie Deutschlands hinreichend genau ab. Als Messfahrzeug kam ein Mercedes-Benz Actros zum Einsatz, der mit 320 kW und 2100 Nm maximalem Drehmoment im geforderten Leistungsbereich liegt. Die 320 kW Spitzenleistung werden als Zielwert für die alternativen Antriebsstränge gewählt. Das Fahrzeug verbrauchte vollbeladen durchschnittlich 35,1 l Dieselkraftstoff auf 100 km, liegt damit im erwarteten Verbrauchsbereich und kann zur Ermittlung des Energiebedarfs am Rad unter realen Einsatzbedingungen herangezogen werden.

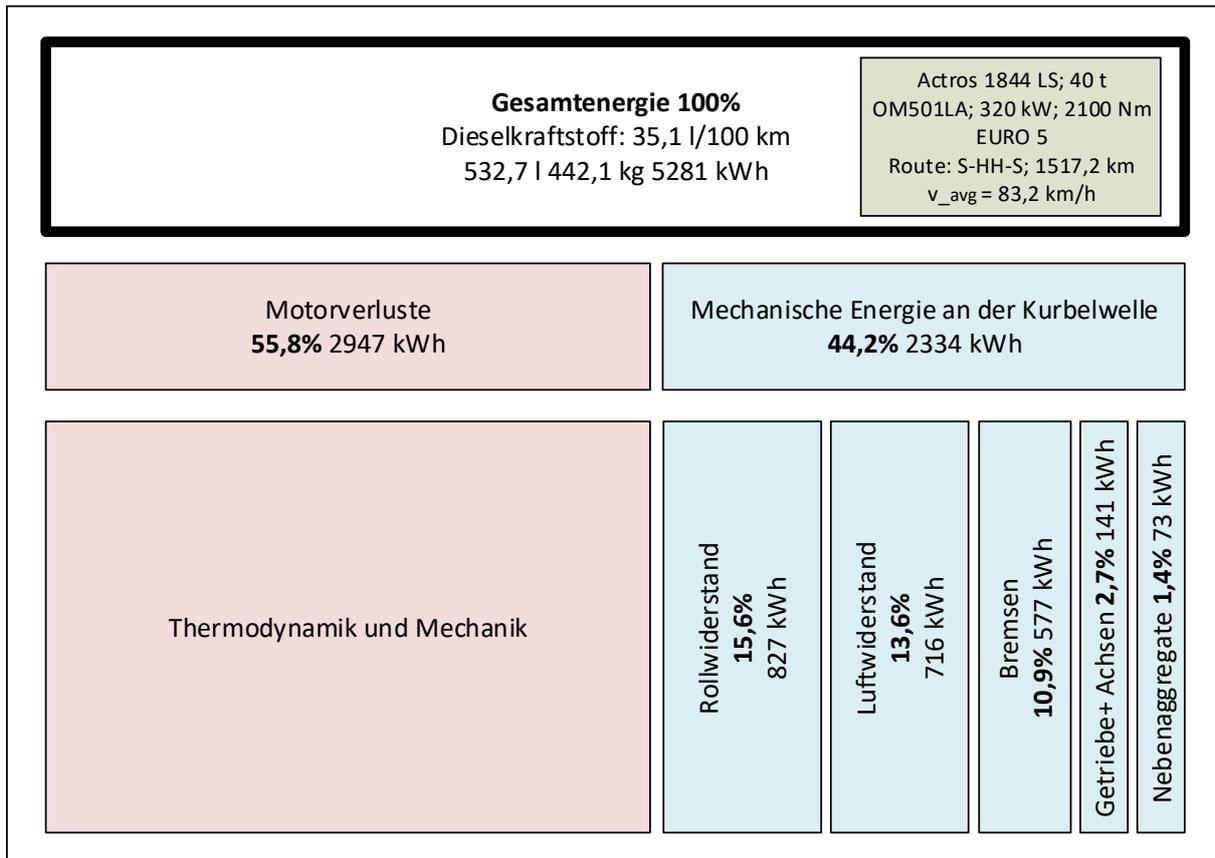


Abbildung 2-5: Energiesenken im Lkw [nach HOLL08]

Abbildung 2-5 stellt die Energieflüsse des Messfahrzeugs mit 40 t Gesamtgewicht auf der 1517 km langen Strecke Stuttgart-Hamburg-Stuttgart dar. Insgesamt benötigte das Überwinden des Rollwiderstands und des Luftwiderstands 827 kWh bzw. 716 kWh. Hinzu kommen noch 577 kWh kinetischer Energie, die in den Bremsen abgebaut wurde. Diese 577 kWh könnten theoretisch durch Bremsenergieerückgewinnung eingespart werden. Somit liegt der Energiebedarf am Rad bei 2120 kWh bzw. 139,7 kWh/100km für einen Lkw ohne Bremsenergieerückgewinnung. Für Antriebsstränge mit Bremsenergieerückgewinnung liegt der Energiebedarf für 100 km je nach Rekuperationsgrad zwischen 101,7 kWh und 139,7 kWh. Der Rekuperationsgrad ist von den Wirkungsgraden der beteiligten Maschinen, sowie von deren Leistungsgrenzen abhängig. Liegt die angeforderte Bremsleistung beispielsweise über der Maximalleistung der verwendeten Maschinen, kann selbst bei Wirkungsgraden von 100% nicht vollständig rekuperiert werden. Eine detaillierte Betrachtung erfolgt in Kapitel 7.1.

## 2.4 Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Wünschenswert sind Fahrzeuge, die keine umweltschädlichen Emissionen ausstoßen. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Fahrzeuge gar keine Emissionen aufweisen oder nur harmlose Abgase wie Wasser oder Stickstoff, die ohnehin in der Atmosphäre vorhanden sind, emittieren. Unter Umständen können die nötigen Maßnahmen sehr aufwändig sein, so dass unter Berücksichtigung des Kosten/Nutzen-Verhältnisses Konzepte mit geringen Restemissionen von Treibhausgasen zu bevorzugen wären. Da jedes Konzept sein Optimum des Kosten/Nutzen-Verhältnisses bei unterschiedlichen Restemissionen besitzt und in dieser Arbeit die Kosten ohnehin nicht berücksichtigt werden, wird auf die Festlegung der maximal zulässigen CO<sub>2</sub>-Emissionen verzichtet. Alle Antriebseinheiten werden als Zero Emission Vehicle (ZEV) konzeptioniert.

## 2.5 Masse und Volumen der Antriebseinheit

Zu den impliziten allgemeingültigen Anforderungen gehören auch ein möglichst geringes Eigengewicht und ein kleiner Bauraum. [KOLL85] Diese beiden Größen spielen eine besondere Rolle, da sie unmittelbar mit dem Hauptzweck eines Lkws, dem Transport von Gütern, konkurrieren. Durch die Beschränkung des zulässigen Gesamtgewichts und der Abmaße des Lkws kostet jede zusätzliche Masse und jedes zusätzliche Volumen der alternativen Antriebseinheit Transportkapazität. Vergleichswerte liefert die konventionelle Antriebseinheit des Mercedes-Benz Actros 1844LS, mit dem auch der Energiebedarf ermittelt wurde. Die Werte wurden den technischen Daten entnommen bzw. das Volumen durch Vergleichskörper mit den entsprechenden Abmaßen bestimmt. Der Motor OM 501 LA wiegt 945 kg und benötigt ca. 1440 l Bauraum. Das Getriebe wiegt ca. 240 kg und nimmt ungefähr 200 l Platz ein. Hinzu kommt die Abgasanlage inklusive AdBlue-Tank, die mit 150 kg und 400 l veranschlagt wird. Für die Reichweite von 1100 km ist ein Dieseldieseltank mit 390 l Fassungsvermögen nötig, wenn der durchschnittliche Verbrauch gemäß Kapitel 2.3 bei 35 l/100km liegt. Der Tank aus Aluminium hat ein Eigengewicht von 24 kg und ein Volumen von 455 l. [DAIM13] Die 390 l Dieseldieseltank wiegen 328 kg. Der Kraftstoff wird mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft verbrannt und die Verbrennungsprodukte werden an die Umgebung abgegeben, so dass nach dem Zurücklegen der Reichweite das Fahrzeug um die verbrauchte Masse Kraftstoff leichter geworden ist. Somit ist der Zustand bei Fahrtantritt ausschlaggebend für das Einhalten des zulässigen Gesamtgewichts. Motor- und Ladeluftkühler werden in der Betrachtung vernachlässigt. Es wird angenommen, dass dieselben Achsen auch im alternativen Antriebstrang zum Einsatz kommen und deshalb nicht berücksichtigt werden müssen. Daraus ergibt sich für die konventionelle Dieselantriebseinheit ein Gewicht von 1690 kg bei einem Bauraumbedarf von ungefähr 2500 l.

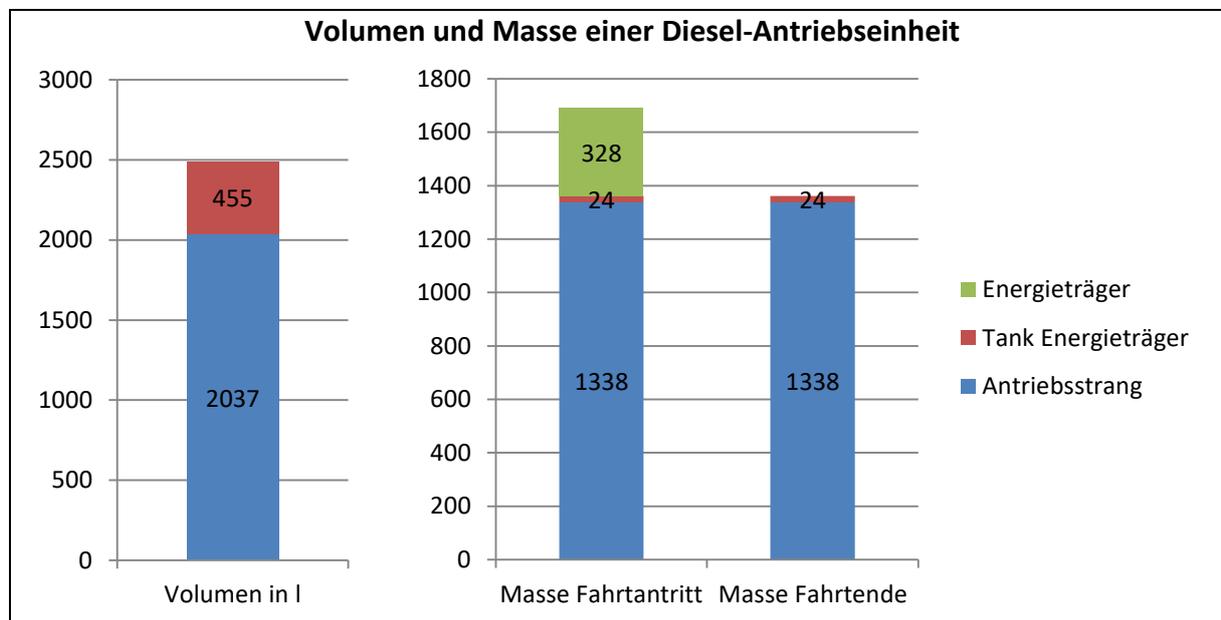


Abbildung 2-6: Masse und Volumen der konventionellen Diesel-Antriebseinheit

Abbildung 2-6 zeigt die Masse und das Volumen einer Dieselantriebseinheit, wie sie heute auf dem Markt erhältlich ist. Die Dieselmotoren werden permanent weiterentwickelt und es befinden sich Technologien z.B. aus dem Leichtbau auf dem Weg zur Serienreife.

Durch leichtere Pleuel und Kolben, gebaute Nockenwellen, den Einsatz von Kunststoffen für Ölwannen oder Zylinderkopfhauben können Gewichtseinsparungen von bis zu 40% für die einzelnen Bauteile erreicht werden [THYS13]; [LIEB14, S. 124]. Das Gewichtsreduktionspotenzial durch Leichtbau wird für den gesamten Motor und das Getriebe auf 10% festgelegt. Formleichtbau kann den benötigten Bau- raum verringern, während Stoffleichtbau unter Umständen den Platzbedarf vergrößert. Es wird angenommen, dass sich diese Effekte gegenseitig aufheben und Leichtbau demnach keinen Einfluss auf das Volumen hat (eigene Festlegung). Die Eigenschaften der Tanks und des Kraftstoffs werden durch Leichtbau nicht verändert. Als Referenzobjekt für die alternativen Antriebseinheiten dient die gewichtsreduzierte Variante mit den in Abbildung 2-7 dargestellten Massen und Volumen.

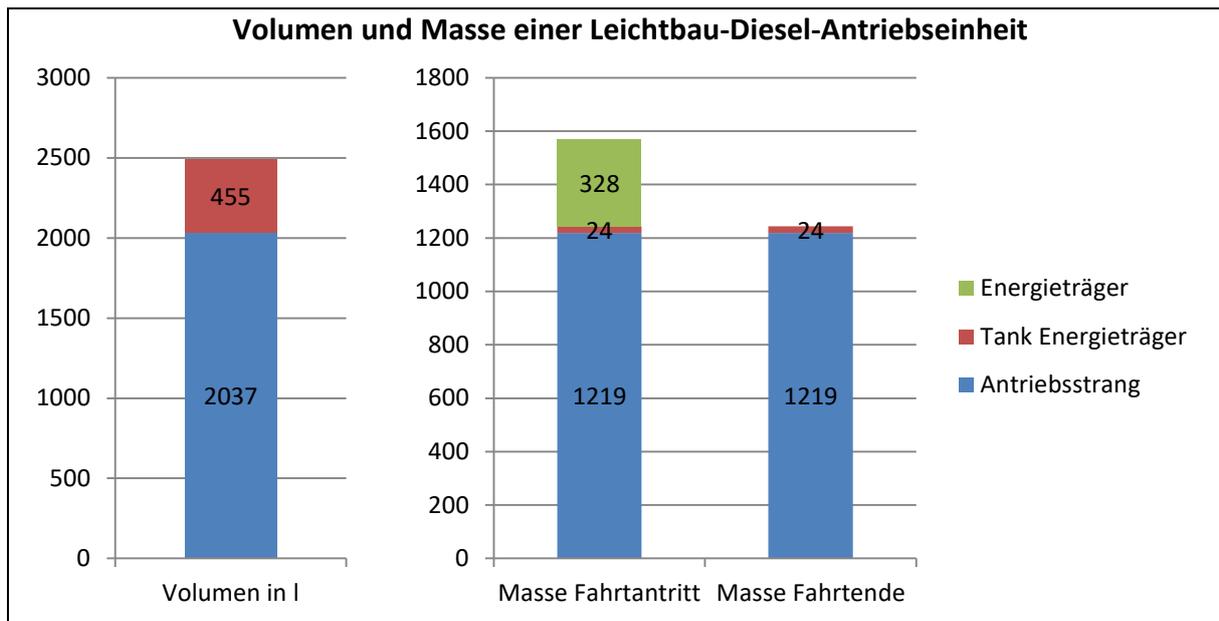


Abbildung 2-7: Masse und Volumen der Leichtbau-Diesel-Antriebseinheit

## 2.6 Sensitivitätsbetrachtung für die Referenz-Antriebseinheit

Die Berechnungen für die Massen und Volumina basieren auf getroffenen Annahmen. Diese Annahmen sind mit Unsicherheiten behaftet. Es gilt zu klären, wie stark Abweichungen gegenüber den Annahmen das Gesamtergebnis beeinflussen. Die Abweichungen können durch Fehler aber auch durch zukünftige Entwicklungen hervorgerufen werden. Das allgemeingültige Vorgehen wird anhand der Diesel-Referenzeinheit beschrieben.

Zunächst werden die drei einflussreichsten Parameter einer Antriebseinheit identifiziert. Für die Diesel-Referenzeinheit sind das die Leistungsdichte des Dieselmotors, die Potenziale durch Leichtbau an Motor und Getriebe, sowie der Energiebedarf am Rad, der in diesem speziellen Fall gleichbedeutend mit den Fahrwiderständen, dem Motorwirkungsgrad oder der Reichweite ist. Die Parameter werden jeweils um +/- 5% und +/- 10% variiert und die resultierenden Massen und Volumina der Antriebseinheiten errechnet.

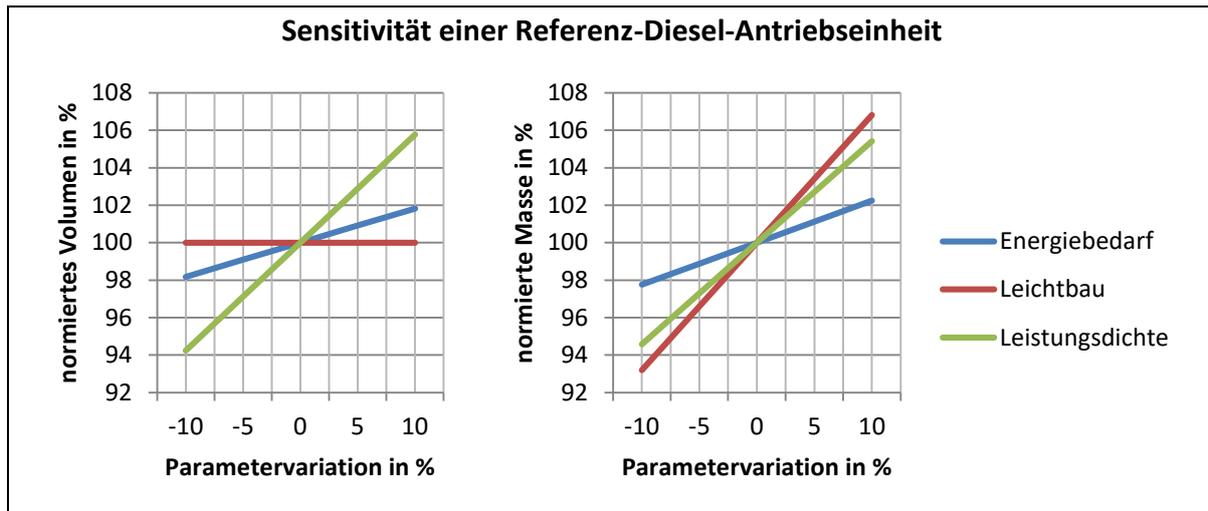


Abbildung 2-8: Einflüsse der Parameter Leichtbau, Leistungsdichte des Motors und Energiebedarf am Rad auf die Masse und das Volumen der Referenz-Diesel-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration

Es resultiert eine Linienschar, die durch den Auslegungspunkt verläuft. Zur besseren Vergleichbarkeit werden alle Linien mit einem positiven Anstieg dargestellt, d.h. eine positive Parametervariation bedeutet eine Verschlechterung, eine negative Parametervariation entsprechend eine Verbesserung. Den größten Einfluss auf die Masse hat gemäß Abbildung 2-8 der Leichtbau. Eine Gewichtseinsparung von 10% an Motor und Getriebe durch Leichtbau verringert die Masse der Antriebseinheit um fast 7%. Auf das Volumen hat Leichtbau entsprechend der Definition aus Kapitel 2.5 keinen Einfluss. Eine Erhöhung der Leistungsdichte des Motors (durch Aufladung, Drehzahlsteigerung etc.) um 10% verringert die Masse der Antriebseinheit um ca. 5,4% und das Volumen um 5,8%. Der Energiebedarf am Rad (z.B. veränderte Fahrwiderstände) hat den geringsten Einfluss.

Für eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Antriebseinheiten wird eigens in dieser Arbeit die Sensitivität in einen Fehlerindikator FI überführt, der für die Masse wie folgt definiert ist:

$$FI := \frac{\overline{\Delta m}[\%]}{\Delta P[\%]} \quad (1)$$

$$\text{mit } \overline{\Delta m} := \frac{\sum \Delta m[\%]}{3} \quad (2)$$

Die durchschnittliche Betragsänderung der Masse bzw. des Volumens bei der Variation der drei einflussreichsten Parameter (Gleichung 2) wird mit der zugrunde liegenden Änderung der Parameter  $\Delta P$  in ein Verhältnis gesetzt (Gleichung 1). Bei einer Parameteränderung von 10% ändert sich die Masse der Referenz-Diesel-Antriebseinheit um durchschnittlich 4,8%. Gemäß Gleichung 1 beträgt der Fehlerindikator für die Masse 0,48. Für das Volumen liegt der Fehlerindikator bei 0,25. Im Durchschnitt reagiert die Masse folglich doppelt so empfindlich wie das Volumen auf Abweichungen der Parameter gegenüber dem Auslegungspunkt.

## 2.7 Resultierende Anforderungsliste

Alle ermittelten Kriterien werden in die Anforderungsliste übernommen und gemäß ihrer Wichtigkeit als Forderung oder Wunsch eingestuft. Sie müssen dabei so formuliert werden, dass der Lösungsraum nicht zu stark eingeschränkt wird. Feste Forderungen für die Reichweite und das Gewicht der alternativen Antriebseinheit auf dem Niveau der konventionellen Antriebseinheit würden nahezu jedes alternative Konzept ausschließen. Unter Umständen führt das Verletzen einer Forderung auch zum besseren Abschneiden in anderen Bereichen, so dass die Forderungen gegeneinander abgewogen werden müssen. Andererseits dürfen die Anforderungen auch nicht zu weich formuliert sein, da sonst keine Vorauswahl der Konzepte anhand der Kriterien möglich ist und der Aufwand unüberschaubar wird.

Tabelle 2-2: Anforderungsliste

| <b>Anforderungsliste für Langstrecken-Lkw-Antriebseinheit</b> |   |                                      |
|---|---|--------------------------------------|
| <b>Forderung / Wunsch</b>                                     | <b>Anforderungen</b>                      | <b>in Konzeptphase beeinflussbar</b> |
| F   | Leistung: mindestens 220 kW               | +                                    |
| W   | Leistung: 320 kW                          | +                                    |
| W   | Drehmoment: 2300 Nm                       | +                                    |
| F   | Reichweite: mindestens 800 km             | +                                    |
| W   | Reichweite: mindestens 1100 km            | +                                    |
| W   | ZEV                                       | +                                    |
| W   | Antriebseinheitengewicht: maximal 1600 kg | +                                    |
| W   | Antriebseinheitenbauraum: maximal 2500 l  | +                                    |
| F   | ausreichend Elastizität                   | +                                    |
| F   | kaltstartfähig                            | +                                    |
| F   | verträglich für Mensch und Umwelt         | +                                    |
| W   | geringe Kosten                            | +                                    |
| F   | hohe Laufleistung                         | +                                    |
| F   | hohe Zuverlässigkeit                      | +                                    |
| F   | hoher Gesamtwirkungsgrad                  | +                                    |
| F   | geräuscharm                               | +                                    |
| W   | wartungsarm / servicefreundlich           | 0                                    |
| W   | fertigungsgerecht                         | -                                    |
| W   | montagegerecht                            | -                                    |
| W   | prüfgerecht                               | -                                    |
| W   | recyclinggerecht                          | 0                                    |

Im weiteren Verlauf der Arbeit erfolgt die Bewertung der Konzepte anhand der Masse und des Baubedarfs. Üblicherweise sind die Kosten ein maßgebliches Kriterium zum Bewerten von Konzepten. Da die Kostenreduktionspotenziale durch beispielsweise Stückzahleffekte nicht beziffert werden können, wird eine Kostenbetrachtung in dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Aus den Forderungen und Wünschen werden eine Standardkonfiguration mit einem höheren Forderungslevel sowie eine weniger anspruchsvolle Minimalkonfiguration abgeleitet.

Tabelle 2-3: Anforderungen der Standard- u. Minimalkonfiguration

| Konfiguration | Leistung | Reichweite |
|---------------|----------|------------|
| Standard      | 320 kW   | 1100 km    |
| Minimal       | 220 kW   | 800 km     |

Für die konventionelle Dieselantriebseinheit wird in der Minimalkonfiguration der OM 501 LA durch einen Motor mit 220 kW ersetzt. Auf der Mercedes-Benz Konfigurationsseite im Internet wird in einem Actros mit 220 kW Nennleistung der OM 936 angeboten. Dieser Motor liefert nur 1200 Nm maximales Drehmoment und wird eher selten im schweren Fernverkehr eingesetzt. Er wird in der Minimalkonfiguration verwendet, da Masse und Bauraum des auf 220 kW skalierten OM 501 LA stark von den Eigenschaften real verfügbarer 220 kW Motoren abweichen. Es wird der zukünftige Einsatz von Leichtbaumaßnahmen unterstellt, so dass sich die Massen des Motors und des Getriebes um 10% verringern. Tankvolumen und –masse werden anhand der geringeren Reichweite skaliert. Alle weiteren Bestandteile der Antriebseinheit sind identisch.

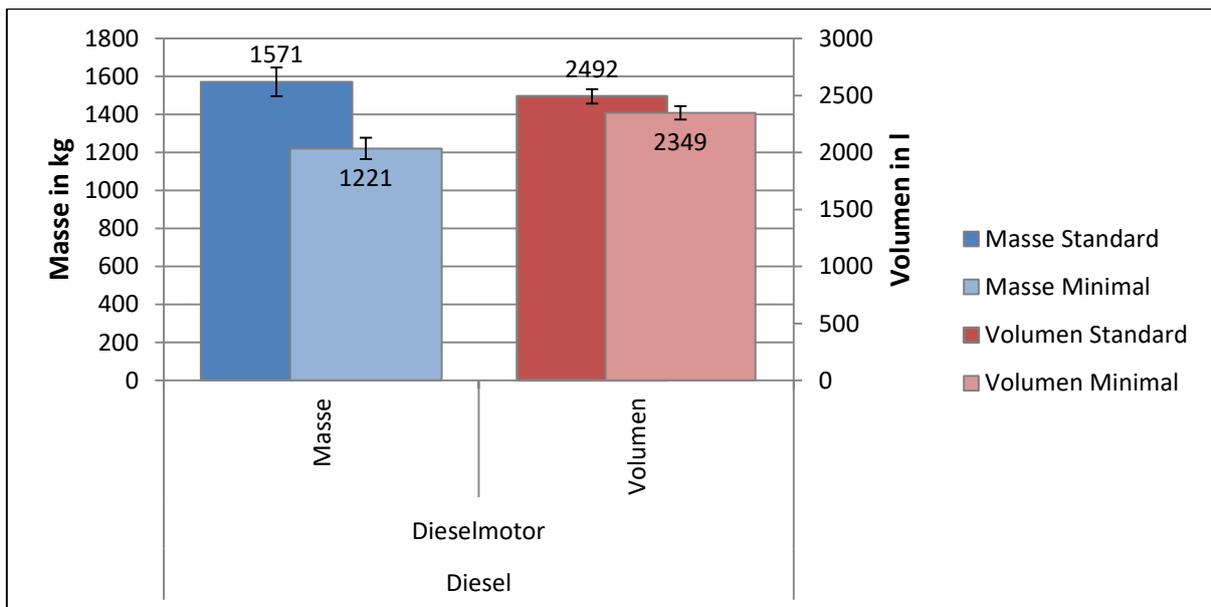


Abbildung 2-9: Vergleich der Massen und Volumina zwischen Standard- und Minimalkonfiguration für die Dieselantriebseinheit (eigene Berechnung)

Ergänzt werden die Balken in Abbildung 2-9 durch die Ungenauigkeiten, welche durch die dazugehörigen Fehlerindikatoren beschrieben werden. Die Fehlerindikatoren beziehen sich auf eine Parameterabweichung von 10%. Gemäß der Gleichungen 1 und 2 beträgt der Fehlerindikator für die Masse 0,48, was 75,4 kg entspricht, in der Standardkonfiguration und 0,46 respektive 56,2 kg in der Minimalkonfiguration. Für das Volumen liegen die Fehlerindikatoren jeweils bei 0,25. Dies bedeutet eine Abweichung von 62,3 l in der Standardkonfiguration und eine Abweichung von 58,7 l in der Minimalkonfiguration.

### 3 Methodik

Für das Erstellen neuer Konzepte wird ein klassischer Konstruktionsprozess durchlaufen. Die VDI-Richtlinie 2221 unterteilt den Konstruktionsprozess in die vier Phasen: Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten. Ziel dieser Dissertation ist das Erarbeiten und Bewerten von Konzepten für einen CO<sub>2</sub>-freien Langstreckengüterkraftverkehr, deshalb werden nur die Phasen Planen und Konzipieren durchlaufen. In der Planungsphase wird die Aufgabenstellung geklärt, es werden Informationen beschafft und eine Anforderungsliste erstellt (vgl. Kapitel 2). [CONR13]

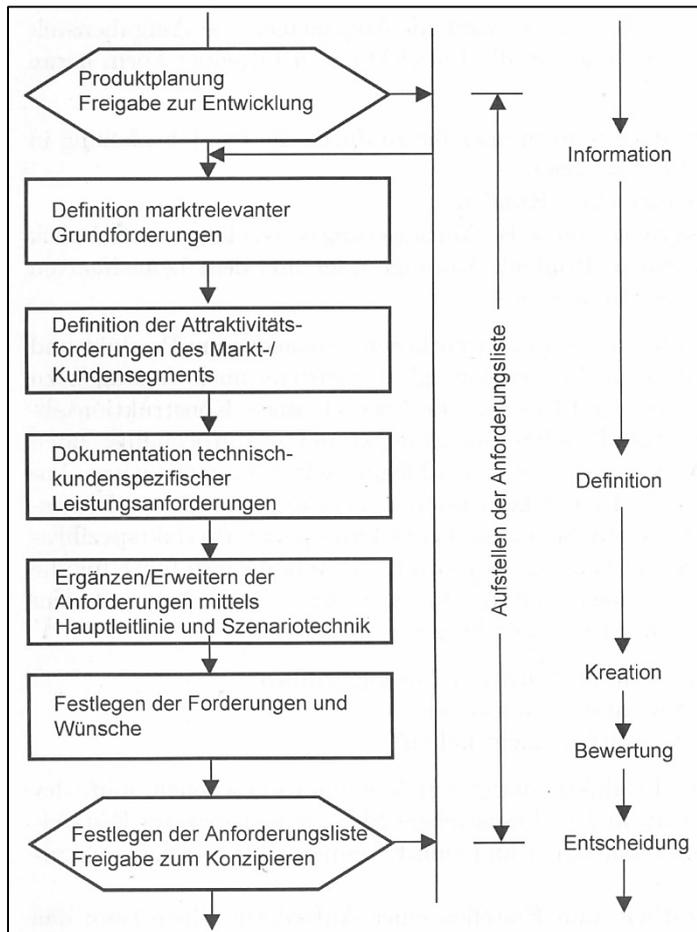


Abbildung 3-1: Hauptarbeitsschritte zum Erstellen der Anforderungsliste [PAHL06]

Dem schließt sich die Konzeptphase an. Abbildung 3-2 stellt die einzelnen Arbeitsschritte der Konzeptphase dar.

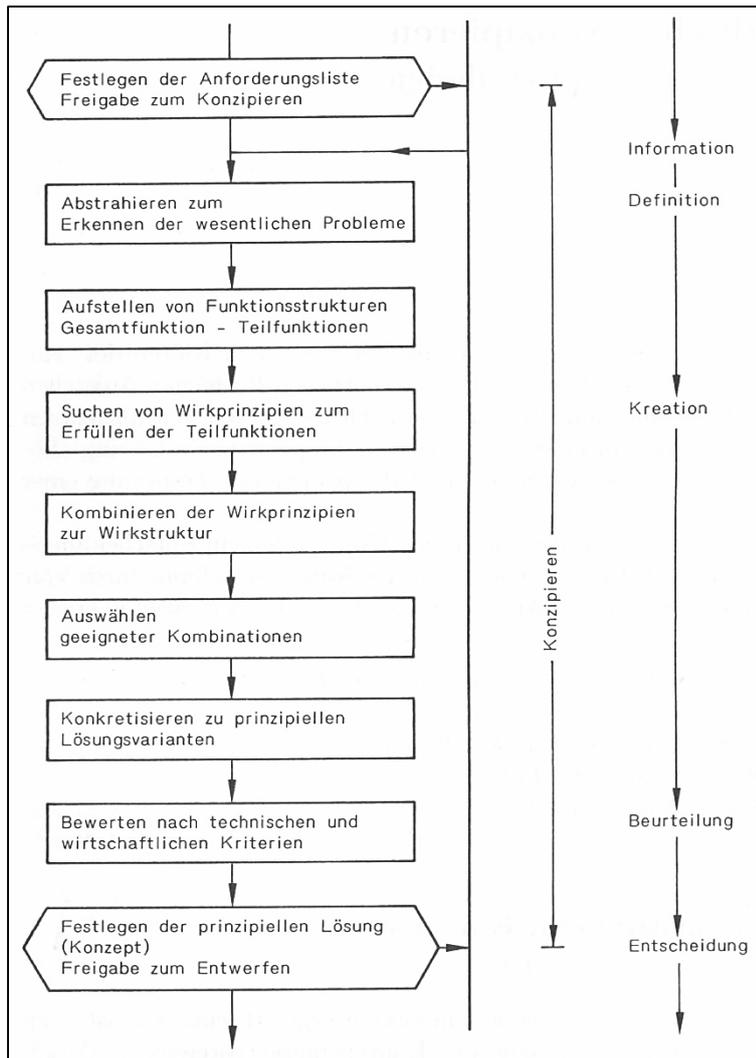


Abbildung 3-2: Arbeitsschritte beim Konzipieren [BEIT01]

Je nach Problemtyp und Disziplin werden in der Konstruktionswissenschaft verschiedene Herangehensweisen und Methoden empfohlen. Die Wahl der jeweiligen Methode richtet sich auch nach den persönlichen Fähigkeiten und Vorlieben des Konstrukteurs. Es wird darauf hingewiesen, die Methoden nicht zum reinen Selbstzweck zu betreiben, sondern dass der Aufwand immer im angemessenen Verhältnis zum Ergebnis stehen muss [PAHL06]. Die VDI-Richtlinie 2221 beschreibt Methoden zur Konstruktion technischer Systeme und empfiehlt, zunächst das Gesamtproblem über Teilprobleme in Einzelprobleme zu zerlegen. Anschließend werden für die Einzelprobleme Einzellösungen gesucht, die dann zu Teillösungen und letztendlich wieder zu einer Gesamtlösung zusammengesetzt werden. Dabei muss sichergestellt werden, dass die Einzel- und Teillösungen untereinander verträglich sind. [VDI93]

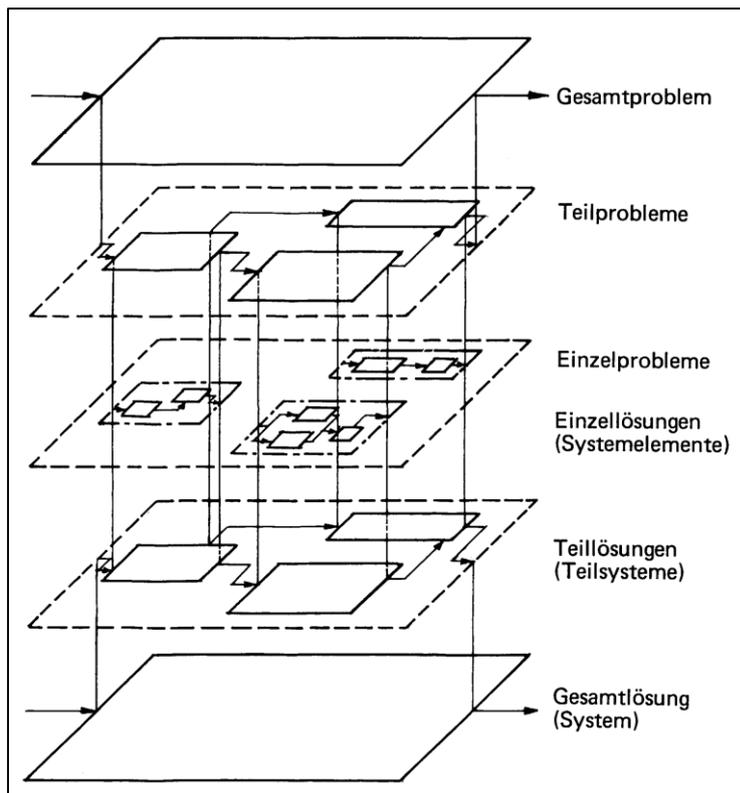


Abbildung 3-3: Methode der Aufgliederung und Verknüpfung zur Problem- und Systemstrukturierung [VDI93]

Für die Suche nach Wirkprinzipien bzw. Einzellösungen wird eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt. Diese wird durch den Einsatz von Ordnungsschemata unterstützt und sowohl durch kreative als auch durch analytische Methoden ergänzt. In morphologischen Kästen werden die Einzellösungen kombiniert, so dass Teil- und Gesamtlösungen entstehen.

Dabei entsteht eine Vielzahl an Lösungen, die nicht alle detailliert untersucht werden können. Daher ist das frühe Reduzieren zwingend erforderlich. Der Prozess des Ausscheidens und Bevorzugens wird dokumentiert, um Entscheidungen zu einem späteren Zeitpunkt besser nachvollziehen zu können. Die verbleibenden Lösungen werden konkretisiert und abschließend bewertet. [PAHL06]

Die Lösungen können sich in ihrem Reifegrad unterscheiden. Lösungen, die bereits in der Automobilbranche eingesetzt werden, können direkt hinsichtlich ihrer Eignung bewertet werden. Lösungen aus anderen Bereichen müssen zuvor auf das System Nutzfahrzeug angepasst bzw. skaliert werden, da sie in ihren Leistungsdaten zu stark abweichen. Diese Anpassungen sind mit Unsicherheiten behaftet. Besonders der Transfer von stationären Anwendungen hin zum mobilen Einsatz birgt Risiken, da Masse und Volumen im ursprünglichen Auslegungsfall nur eine untergeordnete Rolle spielen, während diese Parameter für die Eignung im Fahrzeug ausschlaggebend sind. Wieder andere Lösungen wurden bisher nur unter Laborbedingungen getestet, so dass die Eigenschaften des Gesamtsystems für den Fahrzeugeinsatz nur grob geschätzt werden können. An den betreffenden Stellen wird auf die Aussagequalität entsprechend hingewiesen. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den fahrzeugtechnischen Problemstellungen. Mögliche Anforderungen an die Infrastruktur, Produktionsprozesse etc. werden nur am Rande erwähnt und müssen gegebenenfalls in Folgearbeiten untersucht werden.

## 4 Strukturen und Funktionen

Die Hauptfunktion eines Lkw ist der Transport von Gütern. Der Vorteil gegenüber anderen Verkehrsträgern wie Schiff und Bahn ist die hohe Flexibilität. Er kann vergleichsweise kleine Gütermengen wirtschaftlich befördern und direkt an der Laderampe bzw. Haustür abliefern. Für schwere Transporte bis zu 40 t bzw. 44 t werden meist Sattelzugmaschinen mit einem Auflieger verwendet. Der Auflieger nimmt die Ladung auf, während die Sattelzugmaschine für Vortrieb sorgt. Die Antriebseinheit stellt die für den Vortrieb benötigte Leistung bereit. In einem konventionellen Dieseltriebstrang wird anhand der Gaspedalstellung mitgeführter Kraftstoff mit Umgebungsluft in den Brennräumen des Motors verbrannt. Dabei wird am Kolben Arbeit verrichtet, die letztlich an den Rädern für Vortrieb sorgt. Das entstandene Abgas wird an die Umgebung abgegeben. Die relevanten Massen-, Energie- und Signalströme sind schematisch in Abbildung 4-1 dargestellt.

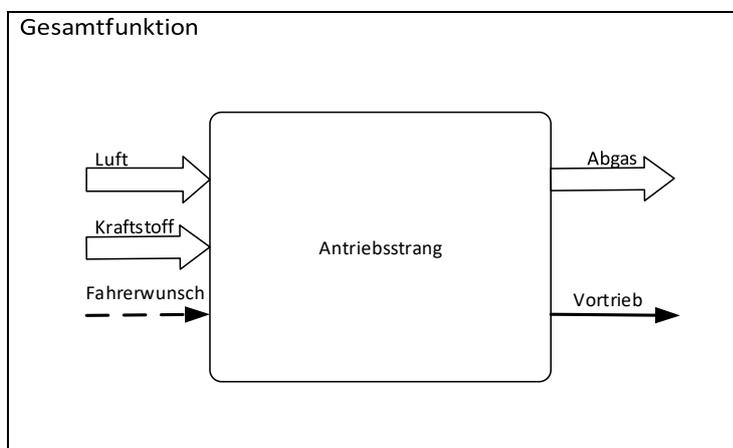


Abbildung 4-1: Gesamtfunktion des Dieselantriebsstrangs

Der Fahrer fungiert als Regler des Systems. Ist die Geschwindigkeit zu niedrig, tritt der Fahrer auf das Gaspedal und erhöht dadurch das Motormoment. Ist die Wunschgeschwindigkeit erreicht, wird die Gaspedalstellung beibehalten bzw. um den Beschleunigungsanteil zurückgenommen. Die Luft-, Kraftstoff- und Abgasmassenströme gehören zur Ausprägung als Dieselantriebsstrang. Sie wären bei einer anderen Wahl des Energiewandlers u.U. nicht erforderlich und sind im Falle des CO<sub>2</sub>-haltigen Abgases sogar unerwünscht. Das in dieser Arbeit verfolgte Ziel bei der Auswahl des alternativen Antriebsstrangs ist die Vermeidung von Treibhausgasemissionen unter Einhaltung der oben bereits angedeuteten Randbedingungen. Andere Ziele wie die Verringerung des Endenergieverbrauchs oder die Unabhängigkeit von Rohstoffimporten sind denkbar, werden aber in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Aus Abbildung 4-1 lassen sich diverse Möglichkeiten zur Darstellung eines CO<sub>2</sub>-freien Abgases ableiten. Der eingesetzte Kraftstoff kann kohlenstofffrei bzw. regenerativ erzeugt sein, fossiler Kohlenstoff kann vor der Energiefreisetzung aus dem Kraftstoff entfernt und gespeichert werden oder nach der Energiefreisetzung kann das Abgas vom fossilen Kohlenstoff befreit und dieser wiederum gespeichert werden. Auch der Einsatz von Energiespeichern, die ohne Massenströme auskommen ist denkbar. Diese Art der Analyse ist vorwärtsorientiert, sie beginnt bei einem möglichen Energieträger und endet bei dem Bereitstellen der mechanischen Energie am Rad ohne dabei Treibhausgase zu emittieren. Die einzelnen Pfade sind in Abbildung 4-2 dargestellt.

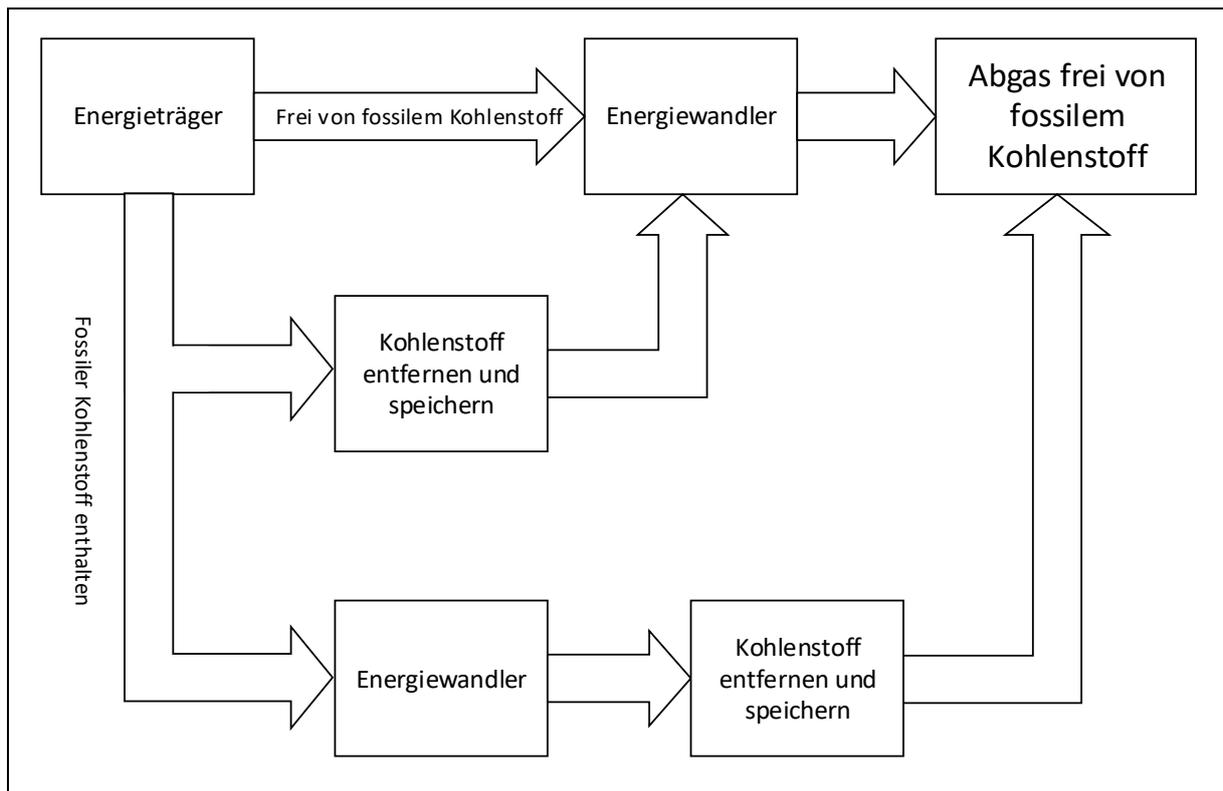


Abbildung 4-2: Funktionsstruktur ausgehend vom Energieträger

Die Fokussierung auf den fossilen Kohlenstoff ist eine Folge der Gesetzgebung bzw. der politischen Debatten. Technologisch spielt es keine Rolle ob der Kohlenstoff fossilen oder regenerativen Ursprungs ist.

Natürlich sind für eine ganzheitliche Betrachtung auch die Herkunft der Energieträger, Umweltauswirkungen bei der Gewinnung, sowie der Energiebedarf vorgelagerter Prozessschritte zu berücksichtigen. Dies ist aber nicht Bestandteil dieser Arbeit. So soll die Gültigkeit der Ergebnisse gewahrt werden, auch wenn sich durch neue Technologien Preis und Verfügbarkeit der Energieträger verändern.

Die rückwärts gerichtete Herangehensweise beginnt bei der mechanischen Energie am Rad und sucht nach Lösungen, wie diese bereitgestellt werden kann. Abbildung 4-3 zeigt neben der mechanischen Energie weitere Energieformen, die in einander umgewandelt werden können.

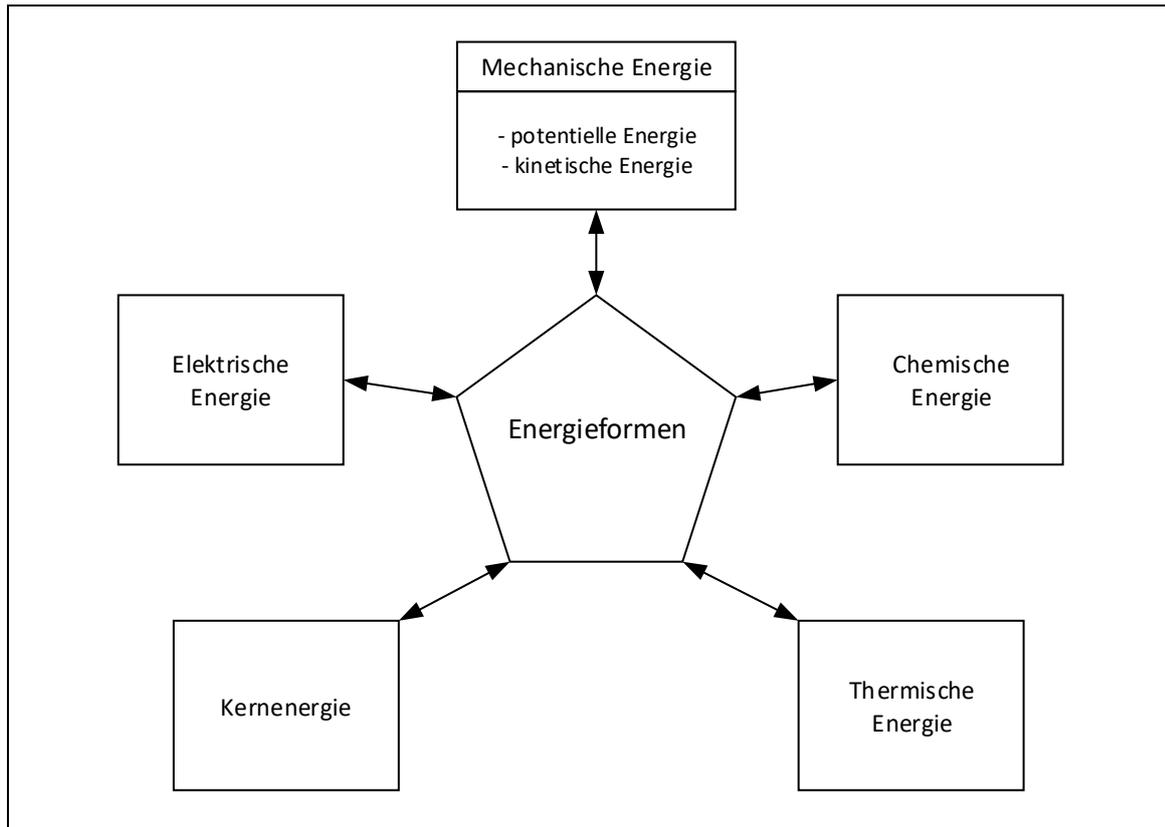


Abbildung 4-3: Energieformen (eigene Darstellung)

Für die Funktionen des Umwandeln, Speicherns oder Zuführens der Energie müssen Teillösungen gefunden werden. In

Abbildung 4-4 ist eine sehr allgemeine Funktionsstruktur für das Bereitstellen mechanischer Energie am Rad dargestellt. Die untersuchten Konzepte nutzen die Räder zur Vortriebskraftübertragung auf die Straße. Antriebe basierend auf dem Rückstoßprinzip werden nicht weiterverfolgt, da es bei dem derzeitigen Verkehrsaufkommen zu unerwünschten Wechselwirkungen zwischen den Verkehrsteilnehmern kommen würde.

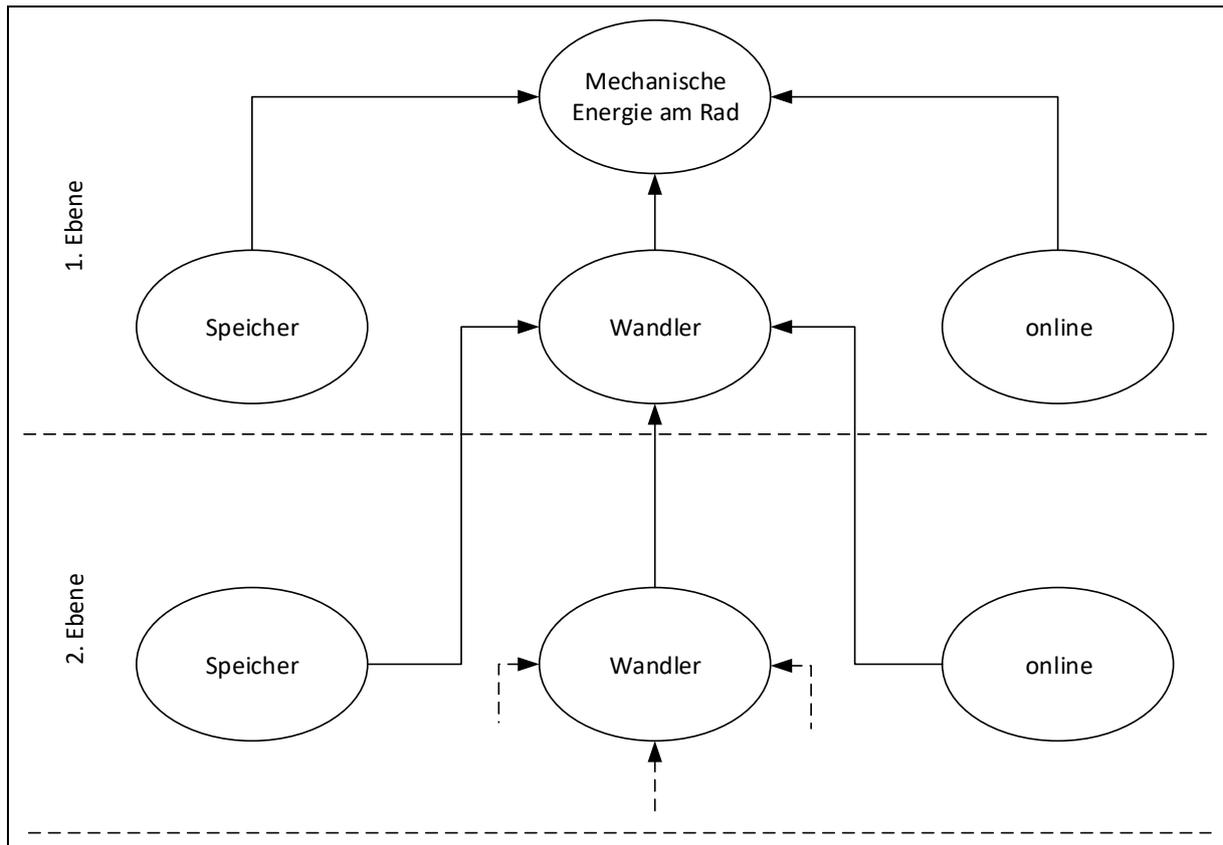


Abbildung 4-4: Funktionsstruktur ausgehend vom Rad

Die benötigte mechanische Energie kann entweder an Bord des Fahrzeugs gespeichert oder während des Betriebs von außen zugeführt werden. Sind beide Optionen nicht zufriedenstellend darstellbar, kann auch eine beliebige andere Energieform in benötigte mechanische Energie gewandelt werden. Für diese Energieform muss dann wiederum die Frage der Bereitstellung geklärt werden. Je mehr Energieformen in einander gewandelt werden müssen, desto mehr Ebenen bekommt das System. Jede Funktion, also die Speicherung, Wandlung oder Zufuhr von außen, besitzt einen Wirkungsgrad. Ein komplexes System mit mehreren Wandlungsebenen kann sinnvoll sein, wenn der Gesamtwirkungsgrad des komplexen Systems besser als der des einfachen Systems ist oder das einfache System die Anforderungen nicht erfüllt. Schneiden komplexe und einfache Systeme bei der Bewertung gleich ab, sind die einfachen Systeme bei der Auswahl zu bevorzugen.

## 5 Wirkprinzipien

Für die einzelnen Funktionen müssen geeignete Wirkprinzipien gefunden werden. Daraus wird ein Lösungsfeld generiert, auf dessen Basis anschließend eine Auswahl getroffen wird. Es erscheint sinnvoll auf der ersten Ebene mit den Prinzipien für die Speicherung, Wandlung und Übertragung von mechanischer Energie zu beginnen, gefolgt von möglichen Wirkprinzipien auf den weiteren Ebenen. Anschließend werden Wirkprinzipien für die Funktionsstruktur ausgehend vom Energieträger vorgestellt. Es muss beachtet werden, dass sich Wirkungsgrade und Leistungsdichten gegenseitig beeinflussen können. Sämtliche Bestwerte sind unter Umständen nicht in einer einzelnen Lösung darstellbar.

### 5.1 Mechanische Energie

Die Wirkprinzipien für mechanische Lösungen werden in Tabelle 5-1 vorgestellt und anschließend in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

Tabelle 5-1: Lösungen für Teilfunktionen mit mechanischer Energie

| mechanische Energie (potentiell und kinetisch) |                    |              |                    |                |                |                         |
|--|--------------------|--------------|--------------------|----------------|----------------|-------------------------|
| Teilfunktion                                   |                    | Lösung       |                    |                |                |                         |
|  |                    | 1            | 2                  | 3              | 4              | 5                       |
| 1  | Energiespeicher    | Gravitation  | Feder              | Schwungrad     | Druckspeicher  |                         |
| 2  | Online-Übertragung | Zugkabel     | Segel / Drachen    | Wurfparabel    | Druckleitung   |                         |
| 3  | Wandler            | Elektromotor | Wärmekraftmaschine | Druckluftmotor | Hydraulikmotor | Formgedächtnislegierung |

#### 5.1.1 Speicher für mechanische Energie

Die Speicherung mechanischer Energie kann in Form von kinetischer oder potentieller Energie erfolgen. Speicher potentieller Energie nutzen die Lageenergie von Massen im Erdgravitationsfeld und deren Vermögen Arbeit zu verrichten oder die Formänderungsenergie von Federn, die im elastischen Bereich zuvor verformt wurden. Allerdings sind die Energiedichten dieser Systeme viel zu gering. So werden 122 t mit einem nutzbaren Höhenunterschied von 3 m benötigt, um 1 kWh zu speichern. Druckspeicher speichern potentielle Energie, indem ein Gas stark komprimiert und unter hohem Druck gespeichert wird. Entweder dient das komprimierte Gas selbst als Arbeitsmedium oder es setzt ein hydraulisches Fluid unter Druck, welches in einem Hydraulikmotor Arbeit verrichtet.

Schwungräder aus Kohlefaser mit magnetischer Lagerung als Speicher kinetischer Energie haben eine hohe Selbstentladungsrate. Es lassen sich damit 55 - 100 Wh/kg bzw. 60 - 80 kWh/m<sup>3</sup> speichern. [RZEP10; BRAE12] Um die geforderte Reichweite von 1100 km sicherzustellen, müsste das System mindestens 11,2 t wiegen und es benötigt ca. 14 m<sup>3</sup> Bauraum. Die Selbstentladung wurde dabei nicht berücksichtigt. Ebenso wird die Wirkung des Kreiselmoments auf die Fahrzeugdynamik hier vernachlässigt. Das System erscheint für den Langstreckenverkehr ungeeignet. Für Fahrzeuge mit geringer Tageskilometerleistung und hohem Start/Stopp-Anteil könnten Schwungräder eine Option darstellen. Sie werden in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet.

Tabelle 5-2: Eigenschaften mechanischer Energiespeicher

| <b>mechanische Speicher</b> |  |                      |  |
|-----------------------------|--|----------------------|--|
|                             | <b>max. Zykluswirkungsgrad<br/>(Entladen)</b>  | <b>Energiedichte</b> | <b>Quelle</b>                          |
|                             | %  | Wh/kg                |  |
| Schwungrad                  | 95 (97,5)                                      | 50 - 100             | [STAT12; BRAE12]                       |
| Druckluft                   | 55 (74)  | 20                   | [GUZZ13; STAT12]                       |
| Feder                       | >99  | 0,14                 | berechnet aus Datenblatt<br>Federstahl |
| Formgedächtnis-<br>lierung  | abhängig von Temperatur-<br>hub und Haltedauer | 0,1 - 0,45           | [LANG13]                               |

### 5.1.2 Online-Versorgung für mechanische Energie

Will man die Onboard-Speicherung mechanischer Energie vermeiden, kann die benötigte mechanische Energie auch von außen zugeführt werden. Dazu muss das Fahrzeug an eine Zugvorrichtung angekoppelt werden. Diese könnte als Zugseil in der Fahrbahn realisiert sein, wie beispielsweise bei den Cable Cars in San Francisco, oder in Form von großen Segeln bzw. Drachen, die das Fahrzeug mit Windkraft antreiben. Beide Prinzipien scheitern unter anderem an der (nicht-) vorhandenen Infrastruktur. Eine flächendeckende Versorgung mit Zugseilen in der Straße ist sehr teuer. Brücken und überirdische Stromleitungen stellen für eine Drachenlösung große Hindernisse dar. Die Versorgung über eine Druckleitung, wie sie in Wasser Jet Packs eingesetzt wird, ließe sich mit Hydraulik- oder Druckluftmotoren kombinieren. Allerdings ist der Aktionsradius auf die Leitungslänge begrenzt und damit sind Druckleitungen für den Fernverkehr ungeeignet.

### 5.1.3 Wandler zur Bereitstellung mechanischer Energie

Alternativ können andere Energieformen in mechanische Energie gewandelt werden. Der Dieselmotor in einem konventionellen Antriebsstrang ist ein Beispiel dafür. Er wandelt zunächst die chemische Energie des Kraftstoffs in thermische Energie und diese dann über Kolben und Kurbelwelle in mechanische Energie um. Der Dieselmotor gehört zu den Wärmekraftmaschinen. Weitere Energiewandler mit mechanischem Antrieb sind Elektromotoren, Hydraulikmotoren und Druckluftmotoren. In Tabelle 5-3 sind die Wirkungsgrade und Leistungsdichten dieser Wandler aufgeführt.

Tabelle 5-3: Eigenschaften mechanischer Wandler

| mechanische Wandler |       |                   |                       |                      |                          |
|---------------------|-------|-------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|
|                     |       | max. Wirkungsgrad | grav. Leistungsdichte | vol. Leistungsdichte | Quelle                   |
|                     |       | %                 | kW/kg                 | kW/l                 |                          |
| Elektromotor        | peak  | 95                | 3,2                   | 11                   | [BRUS 13b; BRUS 13a]     |
|                     | cont. |                   | 1,2                   | 4,1                  |                          |
| Dieselmotor         |       | 54                | 0,37                  | 0,24                 | [DEN13; HOLL10; HOLL10]  |
| Druckluftmotor      |       | 85                | 0,3                   | 1,2                  | [HINS16; BART02; SCHE13] |
| Hydraulikmotor      |       | 85                | 0,8                   | 2                    | [HATA00]; [SCHE13]       |

Der Dieselmotor als Wärmekraftmaschine kann maximal den Carnotwirkungsgrad für die entsprechenden Temperaturniveaus erreichen und ist damit in der Effizienz den anderen Wandlern unterlegen. Elektromotoren besitzen die höchsten Wirkungsgrade und Leistungsdichten. Druckluft- und Hydraulikmotoren folgen mit Wirkungsgraden von bis zu 85%. Diese 85% setzen sich aus dem mechanischen und volumetrischen Wirkungsgrad zusammen. Verluste infolge der Wandwärmeübergänge bei der Kompression werden dem Wirkungsgrad des Druckspeichers zugeordnet. Dieselmotoren und Wärmekraftmaschinen im Allgemeinen können im Gegensatz zu Elektro-, Druckluft- und Hydraulikmotoren keine Bremsenergie zurückgewinnen.

Mögliche alternative Antriebsstränge werden auf einer der in Tabelle 5-1 vorgestellten Lösungen aufbauen. Die vorgestellten Energiewandler stellen Klassen bzw. Vertreter von Klassen dar. Innerhalb der Klassen gibt es unterschiedliche Ausprägungen, die sich nach bestimmten Merkmalen ordnen lassen. Mit diesen Merkmalen sind wiederum Eigenschaften verknüpft, welche die Anforderungen aus der Anforderungsliste mehr oder weniger gut erfüllen.

Auf der zweiten Ebene der Funktionsstruktur werden Lösungsprinzipien für die Speicherung, äußere Versorgung oder Onboard-Wandlung der Eingangsenergien der Wandler gesucht, welche in Tabelle 5-3 aufgeführt sind.

## 5.2 Elektrische Energie

Elektromotoren werden durch elektrische Energie gespeist. Sie können in Gleich- oder Wechselstrommotoren eingeteilt werden. Auch eine Einteilung in elektrisch erregt und permanent erregt ist denkbar. Der Einsatz von Seltenen Erden in Permanentmagneten machte Stand 2012 bis zu 35% der Gesamtkosten des Motors aus [TERR12]. Auch wenn in Zukunft das Angebot an Seltenen Erden zunimmt und die Preise fallen, sorgt die geringe Anzahl an Lagerstätten für eine starke Abhängigkeit von den wenigen Förderländern.

### 5.2.1 Speicher für elektrische Energie

Als Speicher elektrischer Energie kommen Kondensatoren, Spulen und Batterien in Frage. Die Spulen werden aus supraleitenden metallischen Werkstoffen gefertigt und unter ihrer Übergangstemperatur betrieben. Die aufwendige Kühlung macht sie momentan für den Fahrzeugeinsatz ungeeignet [SCHW02; MCKE11]. Derzeit suchen Forscher nach Materialien mit höheren Übergangstemperaturen. Je näher die Übergangstemperatur an der Umgebungstemperatur liegt, desto geringer wird der Kühlungsbedarf. Kondensatoren und Supercaps weisen hohe Leistungsdichten auf, können jedoch nur geringe Mengen Energie speichern. Die Grenzen zwischen Speicherung und Wandlung elektrischer Energie verwischen bei der Betrachtung von Batteriesystemen. Sie wandeln chemische Energie in elektrische Energie. Bei Sekundärbatterien (Akkumulatoren) wie Blei-, Nickel-Cadmium und Lithiumionenbatterien wird jedoch nur Energie über die Systemgrenzen übertragen, so dass sie zu den Speichern gerechnet werden können. Energie- und Leistungsdichte sind über die Dimensionierung der Batteriekomponenten gekoppelt. Metall-Luft-Batterien benötigen zwar von außen zugeführten Sauerstoff, werden aber dennoch zu den Speichern gezählt, da von einem Wiederaufladen durch elektrischen Strom aus dem stationären Netz ausgegangen wird. Alternativ ist auch ein Austauschen kompletter Batterien oder verbrauchter Elemente in den Batterien gegen frische möglich (Primärbatterie); ein Beispiel ist die Zink-Luft-Batterie.

Tabelle 5-4: Übersicht elektrische Energiespeicher

| elektrische Speicher |                                    |                 |               |                                  |
|----------------------|------------------------------------|-----------------|---------------|----------------------------------|
|                      | max. Zykluswirkungsgrad (Entladen) | Leistungsdichte | Energiedichte | Quelle                           |
|                      | %                                  | kW/kg           | Wh/kg         |                                  |
| supraleitende Spule  | 95 (97,5)                          | 1               | 3             | [MAUC09; RZEP10]                 |
| SuperCap             | 95 (97,5)                          | 5               | 5-7           | [RZEP10; HEIß11]                 |
| Bleisäurebatterie    | 85 (92)                            | 0,3             | 35 - 50       | [RZEP10; HEIß11; BRET12; BRAE12] |
| NiMH                 | 70 (84)                            | 0,3             | 75-90         | [RZEP10; HEIß11; BRAE12]         |
| NaS                  | 90 (95)                            | 0,18            | 110 - 170     | [RZEP10; BRET12; METZ13]         |
| Lithium-Ion          | 92 (96)                            | 0,6             | 120 - 160     | [RZEP10; HEIß11; BRAE12]         |
| LithiumPolymer       | 90 (95)                            | 0,3             | 140           | [WOSN13; GUET06]                 |
| ZnO                  | 60 (77)                            | 0,1             | 200-220       | [HEIß11; BRAE12; LILI14; GOLD99] |

### 5.2.2 Online-Versorgung für elektrische Energie

Die Übertragung elektrischer Energie kann kabelgebunden bzw. konduktiv oder berührungslos via Induktion stattfinden. Konduktive Systeme werden z.B. in Form von Oberleitungen bei Straßenbahnen

oder als Stromschienen bei S-Bahnen eingesetzt. Mit dem eHighway-Projekt testet Siemens den Einsatz von Oberleitungen zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs.

Induktives Laden wird oft in Nassbereichen verwendet, da im Gegensatz zum konduktiven Laden keine Stromschlaggefahr besteht. Eine Primärspule wird mit einem veränderlichen Strom beaufschlagt und baut ein Magnetfeld auf. Befindet sich die Sekundärspule in diesem Magnetfeld, wird in ihr ein Strom induziert. Die übertragbare Leistung und der Wirkungsgrad hängen stark von der Position der beiden Spulen zu einander ab. Größere Luftspalte zwischen den Spulen von mehr als 10 cm, wie sie bei Fahrzeug-Fahrbahn-Kombinationen auftreten, benötigen Übertragungsfrequenzen von 20 bis 150 kHz. Auch der laterale Versatz verschlechtert die Energieübertragung. Daraus resultieren hohe Anforderungen an die Fahrzeugpositionierung insbesondere beim dynamischen Laden während der Fahrt. Momentan liegen die maximalen Wirkungsgrade für das induktive Laden bei 80%, konduktives Laden erreicht bis zu 95%. [SCHR11] Die hohen Kosten für den Aufbau einer Infrastruktur sprechen gegen den flächendeckenden Einsatz einer Online-Versorgung mit elektrischer Energie.

### 5.2.3 Wandler zur Bereitstellung elektrischer Energie

Die Onboard-Wandlung anderer Energieformen zur Bereitstellung elektrischer Energie ist mit Generatoren, Brennstoffzellen, Redox-Flow-Batterien, thermoelektrischen Generatoren oder Solarzellen möglich. Die Leistungsdichteangabe für Brennstoffzellen und Redox-Flow-Batterien bezieht sich auf das gesamte System inklusive der Hilfsaggregate jedoch exklusive des Brennstoffs.

Tabelle 5-5: Übersicht Wandler für elektrische Energie

| Wandler für elektrische Energie |       |                   |                     |                                  |
|---------------------------------|-------|-------------------|---------------------|----------------------------------|
|                                 |       | max. Wirkungsgrad | Leistungsdichte     | Quelle                           |
|                                 |       | %                 | kW/kg               |                                  |
| Generator                       | peak  | 95                | 3,2                 | [BRUS 13a; BRUS 13b]             |
|                                 | cont. |                   | 1,2                 |                                  |
| Brennstoffzelle                 |       | 60                | 0,37 (gesamtes BSZ) | [BALL11; BALL12; GRUB06; GRUB13] |
| Redox-Flow (Vanadium)           |       | 75                | 0,166               | [RZEP10; BARO08]                 |
| thermoelektrischer Generator    |       | 10 (max. Carnot)  | <0,05               | [VÖLK06]                         |
| Solarzelle                      |       | 44,7              | 0,011               | [YING14; DIMR13]                 |

Generatoren weisen die höchsten Wirkungsgrade und Leistungsdichten von allen Wandlern für elektrische Energie auf. Als Eingangsenergie nutzen sie mechanische Energie und eignen sich deshalb bestens zur Bremsenergierückgewinnung. Die Kombination mit einem Wandler für mechanische Energie ist nur sinnvoll, wenn dessen Effizienzgewinn durch eine verbesserte Betriebsstrategie die Verluste durch die Wandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie und wieder zurück in mechanische Energie übertrifft.

Brennstoffzellen erzeugen direkt durch die Oxidation eines Brennstoffs elektrische Energie. Sie sind dabei nicht an den Carnotwirkungsgrad gebunden und erreichen deshalb auch bei niedrigen Betriebstemperaturen unter 100 °C gute Wirkungsgrade. Ihre Effizienz im Teillastbereich ist hoch, allerdings

reagieren sie auf Laständerungen träge und weisen ein schlechtes Kaltstartverhalten auf. Ihre Eigenschaften variieren stark über die verschiedenen Bauarten. In Tabelle 5-6 sind die verschiedenen Brennstoffzellentypen und ihre Eigenschaften dargestellt.

Tabelle 5-6: Brennstoffzellentypen [EICH08; PEIG10]

| <b>Brennstoffzellentypen</b> |                           |                             |                     |                                       |
|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------------------------|
| <b>Typ</b>                   | <b>Betriebstemperatur</b> | <b>max. Leistungsdichte</b> | <b>Brennstoff</b>   | <b>max. elektrischer Wirkungsgrad</b> |
| AFC                          | 60 °C bis 80 °C           | 200 mW/cm <sup>2</sup>      | H <sub>2</sub>      | Zelle: 70%; System: 60%               |
| DMFC                         | ca. 80 °C                 | k.A.                        | CH <sub>3</sub> OH  | Zelle: 30%                            |
| NT-PEMFC                     | 60 °C bis 120 °C          | 350 mW/cm <sup>2</sup>      | H <sub>2</sub>      | Zelle: 70%; System: 50%               |
| HT-PEMFC                     | 120 °C bis 200 °C         | 350 mW/cm <sup>2</sup>      | H <sub>2</sub>      | Zelle: 70%; System: 50%               |
| PAFC                         | 160 °C bis 200 °C         | 200 mW/cm <sup>2</sup>      | H <sub>2</sub>      | Zelle: 55%; System: 40%               |
| MCFC                         | ca. 650 °C                | 100 mW/cm <sup>2</sup>      | H <sub>2</sub> , CO | Zelle: 55%; System: 50%               |
| SOFC                         | ca. 1000 °C               | 240 mW/cm <sup>2</sup>      | H <sub>2</sub> , CO | Zelle: 65%; System: 60%               |

Die alkalische Brennstoffzelle (AFC) scheidet als Lösung aus, da sie auf reinen Sauerstoff angewiesen ist. Andernfalls bildet das in der Luft enthaltene Kohlendioxid mit der Kalilauge Kaliumkarbonat, so dass die Brennstoffzelle verstopft und letztendlich zerstört wird [LEDJ01]. Die Direktmethanolbrennstoffzelle (DMFC) wird für Leistungen bis 1 kW eingesetzt. Ihr Wirkungsgrad ist dem anderer Brennstoffzellentypen deutlich unterlegen und sie emittiert CO<sub>2</sub>. Ihr Vorteil besteht in den guten Speichereigenschaften des Methanols. Polymerelektrolytmembranbrennstoffzellen (PEMFC) weisen die höchsten Leistungsdichten bei vergleichsweise geringen Kosten auf. Sie sind daher besonders gut für mobile Anwendungen geeignet. Ihr durchschnittlicher Wirkungsgrad wird dabei in Kauf genommen. Durch das Anheben der Betriebstemperatur kann die Beständigkeit gegenüber Katalysatorgiften wie Kohlenmonoxid verbessert werden, was zur Entwicklung der Hochtemperatur-PEMFC führte. Die Phosphorsäurebrennstoffzelle (PAFC) ist sehr teuer, erreicht nur einen mäßigen Systemwirkungsgrad von 40% und kann durch irreversibles Auskristallisieren der Phosphorsäure bei Temperaturen unter 42 °C zerstört werden [BREE14]. Für einen Einsatz im Langstreckengüterkraftverkehr ist sie daher nicht geeignet. Die Karbonatschmelzenbrennstoffzelle (MCFC) erreicht einen durchschnittlichen Systemwirkungsgrad und ist durch ihre hohe Betriebstemperatur in der Lage Kohlenwasserstoffe intern zu reformieren. Allerdings disqualifiziert sie ihre geringe Leistungsdichte für einen Einsatz in mobilen Anwendungen. Die Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) bietet einen hohen Systemwirkungsgrad bei einer mittleren Leistungsdichte. Die hohe Betriebstemperatur bietet sowohl Vor- als auch Nachteile. Zum einen ermöglicht sie den Einsatz verschiedener Kraftstoffe, die intern reformiert werden. Zum anderen führen die Aufheiz- u. Abkühlvorgänge zu thermischen Spannungen, welche die Lebensdauer verkürzen. Um Festoxidbrennstoffzellen im Langstreckengüterkraftverkehr einsetzen zu können, muss eine ausreichende Lebensdauer gewährleistet sein. Diese kann durch ein Absenken der Betriebstemperatur zum Verringern des Temperaturhubes, durch den Einsatz beständigerer Materialien oder durch eine Betriebsstrategie, welche die Anzahl der Temperaturzyklen verringert, verbessert werden. Für die Konzepterstellung kommen PEMFC und SOFC als Vertreter der Brennstoffzellen in Frage.

Redox-Flow-Systeme ähneln in ihrem Aufbau den Brennstoffzellen. Die Leistung des Systems wird durch die Größe des Stacks bestimmt. Die speicherbare Energiemenge wird durch die Tankgröße vorgegeben [DOET14].

Im Labor erreichen Mehrfachsolarzellen, welche aus mehreren Schichten bestehen, um das gesamte Spektrum des Sonnenlichts nutzen zu können, Wirkungsgrade bis zu 44,7%. Der Wirkungsgrad von auf dem Markt befindlichen monokristallinen Solarzellen liegt bei 15,7%. Aus den Vorschriften zu den Fahrzeugabmaßen ergibt sich eine maximale Fläche für Solarzellen von knapp 48 m<sup>2</sup>. Damit sind selbst unter Idealbedingungen bei 800 W/m<sup>2</sup> Sonneneinstrahlung und dem Laborwirkungsgrad maximal 17 kW elektrische Leistung erreichbar. Die Bereitstellung elektrischer Energie durch Solarzellen kann auch deshalb nur unterstützenden Charakter haben, da deren Ausbeute stark wetterabhängig und zu leistungsschwach ist.

### 5.3 Thermische Energie

Wärme­kraft­ma­schinen wandeln thermische Energie in mechanische Energie um. Einem Arbeitsmedium wird Wärme zugeführt. Das Medium dehnt sich aus und verrichtet Arbeit an einem Kolben oder einer Turbinenschaufel.

Im Falle des Freikolbenlineargenerators (FKLG) findet zusätzlich die Wandlung von mechanischer zu elektrischer Energie statt. Der Kolben ist mit Magneten bestückt und bewegt sich in einem Zylinder, welcher mit Spulen versehen ist. Durch das bewegte Magnetfeld wird in den Spulen ein Strom induziert. Dabei wird die lineare Bewegung des Kolbens direkt in elektrische Energie gewandelt. Auf Bauteile, die die Bewegung des Kolbens geometrisch begrenzen, wird verzichtet. Deshalb ist eine aufwändige Steuerung nötig, da sie sicherstellen muss, dass der Kolben nicht mit dem Zylinderkopf kollidiert.

Bei Systemen mit innerer Wärmezufuhr wird die Wärme aus der Verbrennung eines flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffs erzeugt, was genau genommen einer zweiten Wandlung von chemischer zu thermischer Energie entspricht. Die äußere Wärmezufuhr eignet sich darüber hinaus auch für die Nutzung fester Kraftstoffe und anderer Wärmequellen wie z.B. Wärmespeichern, benötigt jedoch einen zusätzlichen Wärmetauscher, der das Gewicht und den Bauraumbedarf erhöht. Außerdem sinkt durch den zusätzlichen Wärmeübergang die Prozessspitzentemperatur und damit der Carnot-Wirkungsgrad.

In Tabelle 5-7 werden Wärme­kraft­ma­schinen nach der Art der Wärmezufuhr geordnet. In der langen Entwicklungsgeschichte sind viele weitere Varianten erdnen und teils auch dargestellt worden, die hier nicht weiter betrachtet werden (z.B. Gasturbine mit Trennung von Brenngas und Arbeitsmedium, kontrolliert zersetzbarer Kraftstoff mit Wärmefreisetzung wie H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

Tabelle 5-7: Ordnungsschema für Wärme­kraft­ma­schinen

| Wärme­kraft­ma­schine |                     |               |               |              |                            |
|-----------------------|---------------------|---------------|---------------|--------------|----------------------------|
| Ordnungsmerkmal       |                     | Lösung        |               |              |                            |
|                       |                     | 1             | 2             | 3            | 4                          |
| 1                     | interne Wärmezufuhr | Dieselmotor   | Ottomotor     | Gasturbine   | Freikolbenlinear-generator |
| 2                     | externe Wärmezufuhr | Stirlingmotor | Dampfmaschine | Dampfturbine |                            |

### 5.3.1 Speicher für thermische Energie

Als thermische Energiespeicher kommen Stoffe mit hohen Wärmekapazitäten wie Wasser, Latentwärmespeicher oder Ad-/Absorptionsspeicher in Frage [WAGN12]. Ist in den Wärmekraftmaschinen eine Wandlung von chemischer Energie vorgesehen, eignen sich Kraftstoffe mit einem hohen Brennwert und leichter Tankkonstruktion besonders gut.

Tabelle 5-8: Übersicht thermische Energiespeicher

| thermische Speicher |                |               |                   |                          |
|---------------------|----------------|---------------|-------------------|--------------------------|
| Medium              | Speicherart    | Energiedichte | Arbeitstemperatur | Quelle                   |
|                     |                | Wh/l          | °C                |                          |
| Wasser              | sensibel       | 60            | <100              | Eigene Berechnung        |
| Salzhydrate         | latent         | 120           | 30-80             | [WAGN12; EBER06; DÖTS06] |
| Paraffine           | latent         | 120           | 10-60             | [WAGN12; EBER06; DÖTS06] |
| Metallhydride       | thermochemisch | 200-500       | 280-500           | [WAGN12; SCHM06]         |
| Silikagele          | thermochemisch | 200-500       | 40-100            | [WAGN12; SCHM06]         |
| Zeolithe            | thermochemisch | 200-500       | 100-300           | [WAGN12; SCHM06]         |

### 5.3.2 Online-Versorgung für thermische Energie

Wärmezufuhr aus der Infrastruktur über eine Leitung oder berührungslos mittels Wärmestrahlung erscheint nicht sinnvoll und wird daher nicht weiter betrachtet.

### 5.3.3 Wandler zur Bereitstellung und Verwertung thermischer Energie

Für Wärmekraftmaschinen mit äußerer Wärmezufuhr können zusätzliche Wandler von Nöten sein, um die benötigte Wärme bereitzustellen. In der Regel werden dazu Brenner genutzt, die einen Brennstoff verbrennen und dabei dessen im Heizwert gespeicherte chemische Energie in Wärme umwandeln. Grundsätzlich sind alle Maschinen, in deren Prozessen Abwärme zum Beispiel durch Reibung entsteht, auch Wandler für thermische Energie. Oftmals ist der Einsatz dieser Maschinen, mit dem Hauptziel thermische Energie zu erzeugen, aus exergetischer Sicht nicht sinnvoll. Ist die Wärmeerzeugung jedoch eine Begleiterscheinung, so kann die Gesamteffizienz des Systems durch Nutzung dieser Abwärme gesteigert werden. In Tabelle 5-9 sind verschiedene Wärmekraftmaschinen mit ihren maximal erreichbaren Wirkungsgraden und üblichen Leistungsdichten dargestellt. Idealerweise wird mit den Kennzahlen das Potenzial der Technologie für den Einsatz im Lkw aufgezeigt. Am Beispiel des Ottomotors wird deutlich, dass die Bewertung des Potenzials schwierig ist. Im Pkw-Bereich weisen benzinbetriebene Ottomotoren hohe Leistungsdichten auf. Im Nutzfahrzeugsektor kommen derzeit gasbetriebene Ottomotoren zum Einsatz, deren Leistungsdichten geringer sind. Ob die Unterschiede aus der Anpassung für den Lkw-Einsatz, den konventionellen Auslegungszielen wie z.B. geringen Kraftstoffkosten oder den Kraftstoffeigenschaften resultieren, lässt sich auf dieser Betrachtungsebene nicht klar sagen. Für die Vorauswahl werden die Kennzahlen aus dem Pkw-Bereich herangezogen.

Tabelle 5-9: Spitzen- und Teillastwirkungsgrade sowie Leistungsdichten der Wärmekraftmaschinen

| <b>Wärmekraftmaschine</b>      |                          |                            |                           |   |
|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|---|
|                                | Wirkungsgrad             | grav. Leistungs-<br>dichte | vol. Leistungs-<br>dichte | Quelle                                      |
|                                | %                        | kW/kg                      | kW/l                      |   |
| Dieselmotor                    | 44,2 real<br>54 ideal    | 0,41                       | 0,24                      | [HOLL08; DEN13;<br>MERC11]                  |
| Ottomotor                      | 38                       | 1,37                       | 0,40                      | [HUPP15;<br>SCHÜ13] M276<br>vermessen       |
| Gasturbine                     | bis 40, TL < 15          | 0,5                        | 0,4                       | [NORE16]                                    |
| Freikolbenlinearge-<br>nerator | bis 60; real 50          | 0,8                        | 0,8                       | [VAN00; HYIC07]                             |
| Stirlingmotor                  | bis 40, TL 30            | 0,5                        | 0,5                       | [NORE16]                                    |
| Dampfmaschine                  | bis 40, TL 30            | 0,5                        | >0,5                      | [BRAE12]                                    |
| Dampfturbine                   | 21 real<br>58,8 isentrop | 0,86                       | 0,95                      | [E.ON10;<br>KRÄM05; SIEM13;<br>Tabelle 7-4] |

Die Daten für die Otto- und Dieselmotoren stammen aus der Literatur oder wurden durch Vermessen aktueller Serienmotoren ermittelt. Der Ottomotor liegt in der gewünschten Leistungsklasse, stammt jedoch aus dem Pkw-Segment und wird mit Benzin betrieben. Dort sind die geforderten Drehmomente niedriger und die Zylinderspitzen drücke dementsprechend geringer. Kolben und Pleuel sind weniger massiv ausgeführt und deshalb leichter. Geringere oszillierende Massen erlauben höhere Drehzahlen, was wiederum zur Leistungssteigerung genutzt wird. Unter Berücksichtigung des geforderten Anfahr-drehmoments sind Leistungsdichten aus dem Pkw-Bereich sowohl für Otto- als auch für Dieselmotoren nur schlecht auf den Nfz-Bereich übertragbar. Um Fortschritte in der Entwicklung von Nutzfahrzeug-dieselmotoren abzudecken, wird eine Gewichtseinsparung durch Leichtbau von 10% (vgl. Kapitel 2.5) unterstellt und für die gravimetrische Leistungsdichte des Dieselmotors in Tabelle 5-9 berücksichtigt. Für die Gasturbinen, Stirlingmotoren und Dampfmaschinen sind die Angaben in der Literatur zu finden. Die Werte für den Freikolbenlineargenerator entstammen einem einzelnen Forschungsprojekt und wurden dort durch numerische Simulationen und das Vermessen eines Prototyps ermittelt. Die Angaben zur Dampfturbine sind im Sinne der Begriffsdefinition nach DIN 4304, d.h. ohne Wärmetauscher und Pumpen, zu verstehen. Demnach wandelt eine Dampfturbine ein Enthalpiegefälle in mechanische Arbeit um. Wirkungsgradangaben aus der Literatur beziehen sich meist auf den isentropen Wirkungsgrad. Dieser beschreibt das Verhältnis aus real gewonnener Arbeit und Arbeitsgewinn bei isentroper Entspannung in der Turbine und liegt für große Turbinen bei ca. 80%. Dampfturbinen mit kleiner Leistung haben einen schlechteren isentropen Wirkungsgrad als Dampfturbinen mit großer Leistung, denn mit geringerer Leistung nimmt die Turbinenschaufellänge ab und dadurch steigen die Anteile der Spalt-verluste [KRÄM05]. Der Wirkungsgrad der Dampfturbine von 58,8% gilt für eine einstufige Kleindampfturbine. Wird der Energiebedarf der Pumpen und anderer Nebenverbraucher des Kraftwerks einbezogen, sinkt der Wirkungsgrad auf 47%. Die gravimetrische Leistungsdichte wurde anhand der Leistungs- und Gewichtsangaben eines bestehenden Kraftwerks bestimmt. Angaben zum benötigten Bauraum bzw. zur volumetrischen Leistungsdichte wurden anhand von Packmaßen und Ersatzkörpern abgeschätzt. Gemäß DIN 4304 sind Massen und Volumina der Dampferzeuger und Kondensatoren nicht enthalten.

## 5.4 Chemische Energie

Beim Übergang von einer chemischen Bindungsform zu einer anderen, kann Energie aufgenommen bzw. abgegeben werden [LAUT05]. Bei exothermen Reaktionen überwiegen die Übergänge mit Energieabgabe. Der Heizwert eines Stoffes beschreibt die freiwerdende Energie bei dessen vollständiger Oxidation.

### 5.4.1 Kraftstoff

Kriterien für die Wahl als Kraftstoff sind die gravimetrischen und volumetrischen Heizwerte, Aggregatzustände, Umweltverträglichkeit, Treibhauspotenzial des Stoffes und seiner Produkte, die Eignung für die gewünschte Art der Energiefreisetzung, Verfügbarkeit und Kosten.

Explizit gilt für die Kraftstoffkonzepte die Forderung nach keinem oder nur einem sehr geringen CO<sub>2</sub>-Anteil im Abgas. Außerdem dürfen nur Stoffe an die Umgebung abgegeben werden, die ohnehin in der Atmosphäre vorkommen und harmlos sind. Damit werden die geduldeten Bestandteile des Abgases auf Wasser, Stickstoff und Sauerstoff beschränkt. Ausgehend vom konventionellen Dieselantriebsstrang muss das Kohlendioxid aus dem Abgas ausgewaschen und im Fahrzeug gespeichert werden. Wird die Abgaswäsche als zusätzliche Komponente im Abgasstrang realisiert, sind nur geringe Änderungen an der Antriebseinheit nötig und es kann auf die vorhandene Tankstelleninfrastruktur zurückgegriffen werden. Die technischen Verfahren werden in Kapitel 5.5 vorgestellt und in Kapitel 6.3 die Konzepte generiert.

Als kohlenstofffreier Kraftstoff für den mobilen Einsatz ist Wasserstoff aus diversen Pilotprojekten bekannt. Im Leuchtturmprojekt „Clean Energy Partnership“ wird Wasserstoff in Brennstoffzellen verstromt [CEP]. Im Projekt HyFLEET:CUTE wurden einige Stadtbusse mit Verbrennungsmotoren im Wasserstoffbetrieb ausgestattet [GLOB09]. Bei vollständiger Wasserstoffumsetzung emittieren Brennstoffzellen lediglich Wasser. Wasserstoffbetriebene Verbrennungsmotoren können darüber hinaus Stickoxide freisetzen. Die Beschränkung auf natürlich vorkommende und harmlose Luftbestandteile als Abgas engt die Auswahl jedoch nicht nur auf Wasserstoff ein. Prinzipiell sind alle Verbindungen aus Stickstoff, Wasserstoff und/oder Sauerstoff denkbar. Ein Vertreter, der diese Vorgaben erfüllt, ist das aus der Raumfahrt bekannte Hydrazin. Ammoniak genügt ebenfalls diesen Forderungen.

Sollen andere Kraftstoffe oder Energieträger eingesetzt werden, deren Abgase bzw. Reaktionsprodukte die oben genannten Forderungen nicht erfüllen, müssen diese an Bord zurückgehalten werden. Dies ist bei den meisten elektrochemischen Energiespeichern ohnehin der Fall. Mit NiCd-, Bleisäure- oder Li-Ion-Batterien sind einige Vertreter dieser Gattung bereits heutzutage in Fahrzeugen anzutreffen. Wird auf elektrochemische Energiespeicher verzichtet und kommen stattdessen Verbrennungskraftmaschinen zum Einsatz, müssen die Verbrennungsprodukte der eingesetzten Kraftstoffe zum Zwecke einer effizienten Speicherung in fester Form vorliegen. Metalle und Halbmetalle kommen dafür in Frage. Der feste Aggregatzustand stellt dabei besondere Anforderungen an die Verbrennungskraftmaschine.

Tabelle 5-10: Eigenschaften möglicher Energieträger unter Normalbedingungen (20 °C, 1013 mbar)

| <b>Brennstoffe / Energieträger</b> |                                 |                                |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
|                                    | gravimetrische<br>Energiedichte | volumetrische<br>Energiedichte |
|                                    | kWh/kg                          | kWh/l                          |
| Dieselmkraftstoff                  | 12,6                            | 10,5                           |
| DME                                | 7,9                             | 0,017                          |
| Ethanol                            | 6,3                             | 5                              |
| Methanol                           | 5,5                             | 4,3                            |
| Wasserstoff                        | 33,3                            | 0,003                          |
| Hydrazin                           | 5,5                             | 5,6                            |
| Ammoniak                           | 4,8                             | 0,003                          |
| Amminboran                         | 4,3                             | 3,4                            |
| Bor                                | 15                              | 36,9                           |
| Silizium                           | 9,1                             | 21,2                           |
| Aluminium                          | 8,1                             | 22                             |
| Phosphor                           | 7                               | 12,8                           |
| Vanadium-Elektrolyt                | 0,0075                          | 0,004                          |

| Aggregatzustand<br>des Produkts |
|---------------------------------|
| fest                            |
| flüssig                         |
| gasförmig                       |

In Tabelle 5-10 sind mögliche Brennstoffe und Energieträger mit ihren Energiedichten bezogen auf den Normzustand dargestellt. Dieselmkraftstoff weist hinter Wasserstoff die höchste gravimetrische Energiedichte auf. Die gasförmigen Brennstoffe besitzen sehr geringe volumetrische Energiedichten. Idealerweise wird deren Dichte durch Verflüssigung erhöht. Wasserstoff hat den großen Nachteil, dass zur Dichtesteigerung ein hoher Aufwand nötig ist. Wasserstoff benötigt deshalb ein großes Speichervolumen oder eben aufwendige Speicherstrukturen, welche die Masse des Systems Speicher-Brennstoff bei gleichem Energiegehalt erhöhen. Dies verringert wiederum die gravimetrische Energiedichte des Brennstoffspeichersystems. Dimethylether (DME) ist ein gasförmiger Brennstoff und als Substitut für Dieselmkraftstoffe in Erprobung. Die Zündeigenschaften ähneln denen von Dieselmkraftstoffen. Durch sein größeres Wasserstoff-zu-Kohlenstoffverhältnis werden bei gleicher Effizienz die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert. DME lässt sich leicht unter Druck verflüssigen, so dass volumetrische Energiedichten bis zu 16,2 kWh/l erreicht werden, ohne die gravimetrische Energiedichte des Brennstoffspeichersystems stark zu verschlechtern. Ethanol und Methanol sind flüssige Ottokraftstoffe. Ihre Energiedichten liegen unter 50% im Vergleich zum Dieselmkraftstoff. Methanol kann auch in Brennstoffzellen eingesetzt werden. Hydrazin und Ammoniak sind kohlenstofffreie Brennstoffe. Hydrazin wird als Raketentreibstoff eingesetzt und ist stark umweltgefährdend, sowie im Tierversuch krebserregend. Ammoniak ist ebenfalls umweltgefährdend und giftig, jedoch existieren durch die starke Nutzung in der chemischen Industrie über viele Jahre hinweg geeignete Mechanismen, um Ammoniak sicher in flüssiger Form transportieren und nutzen zu können. Durch den hohen Wasserstoffanteil ist Ammoniak grundsätzlich auch für den Einsatz in Brennstoffzellen geeignet. Versuche an PEM-Brennstoffzellen zeigten jedoch Schäden an der Membran, die durch Ammoniak verursacht wurden [REPG03]. Daher ist es nötig, das Ammoniak zuvor in einem Reformier in Stickstoff und Wasserstoff zu spalten oder es in einem ammoniakbeständigen Brennstoffzellensystem wie Festoxidbrennstoffzellen einzusetzen. Amminboran ist ein Feststoff und wird genutzt um Wasserstoff chemisch gebunden im Fahrzeug zu speichern. Es setzt beim Erhitzen den Wasserstoff frei.

Als Feststoff ist es für Verbrennungskraftmaschinen mit interner Verbrennung ungeeignet. Eine vollständige Verbrennung von Amminboran ist denkbar, jedoch nicht empfehlenswert, da die Vorzüge dieser Verbindung im Be- und Entladen mit Wasserstoffatomen liegen und sie nicht durch einen besonders hohen Heizwert gekennzeichnet ist. Vorteil gegenüber Ammoniak als Wasserstoffspeicher ist die Umweltverträglichkeit. Bor ist ein Feststoff und besitzt eine sehr hohe volumetrische Energiedichte. Auch die gravimetrische Energiedichte liegt über der des Dieselmotorkraftstoffs. Allerdings ist Bor nur für die externe Verbrennung geeignet und kommt zudem recht selten vor. Silizium, Aluminium und Phosphor kommen deutlich häufiger in der Erdhülle vor, haben jedoch geringere Energiedichten. Werden Verbrennungsprodukte an Bord gespeichert, verliert die Energiedichte des Brennstoffs ihre Aussagekraft. Stattdessen muss die freigesetzte Energie auf die Eigenschaften der Verbrennungsprodukte bezogen werden.

## 5.5 Kohlenstoffdioxidabscheidung

Der Verbrennungsprozess bietet drei Eingriffsmöglichkeiten, um die Kohlenstoffdioxidabscheidung durchzuführen. Nach diesen Eingriffsmöglichkeiten werden die Hauptverfahren in Pre-Combustion Capture, Post Combustion Capture und Oxyfuel eingeteilt [METZ05]. Sie sind mit deutscher Bezeichnung in Abbildung 5-1 schematisch dargestellt.

Das Post Combustion Capture setzt nach der Verbrennung an und scheidet aus dem Rauchgas  $\text{CO}_2$  ab. Bei einer vollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen entstehen Kohlenstoffdioxid und Wasser. Unter Vernachlässigung der Kraftstoffmasse beträgt ihr Anteil am Rauchgas maximal 21%, wenn mit gewöhnlicher Umgebungsluft bei einem Stickstoffgehalt von 79% gefahren wird. Je nach Kohlenstoffanteil im Kraftstoff und in Abhängigkeit vom Verbrennungsluftverhältnis liegt der  $\text{CO}_2$ -Anteil im Rauchgas zwischen 5% und 15%, üblicherweise für Nutzfahrzeugdieselmotoren bei Vollast unter 11%. Durch die geringe  $\text{CO}_2$ -Konzentration sind große Reaktoren zur Abscheidung nötig. Bestehende Kraftwerke lassen sich mit dieser Technologie nachrüsten.

Das Ziel des Oxyfuel-Verfahrens ist die stöchiometrische Verbrennung von Kohlenwasserstoffen in reiner Sauerstoffatmosphäre. Dabei entstehen lediglich  $\text{CO}_2$  und Wasserdampf. Der Wasserdampf wird auskondensiert und der reine  $\text{CO}_2$ -Gasstrom kann gespeichert werden. Ist eine nahezu hundertprozentige Sauerstoffanreicherung nicht möglich, kann das Oxyfuel-Verfahren auch mit dem Post Combustion Capture kombiniert werden. Eine Sauerstoffanreicherung in der Verbrennungsluft erhöht die  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Abgas und erleichtert dadurch dessen Abscheidung bzw. ermöglicht den Einsatz anderer Abscheideverfahren.

Wird beim Pre Combustion Capture die partielle Oxidation (vgl. Kapitel 5.5.2.2) eingesetzt, kann auch hier eine Sauerstoffanreicherung zu höheren  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen im Produktgas führen.

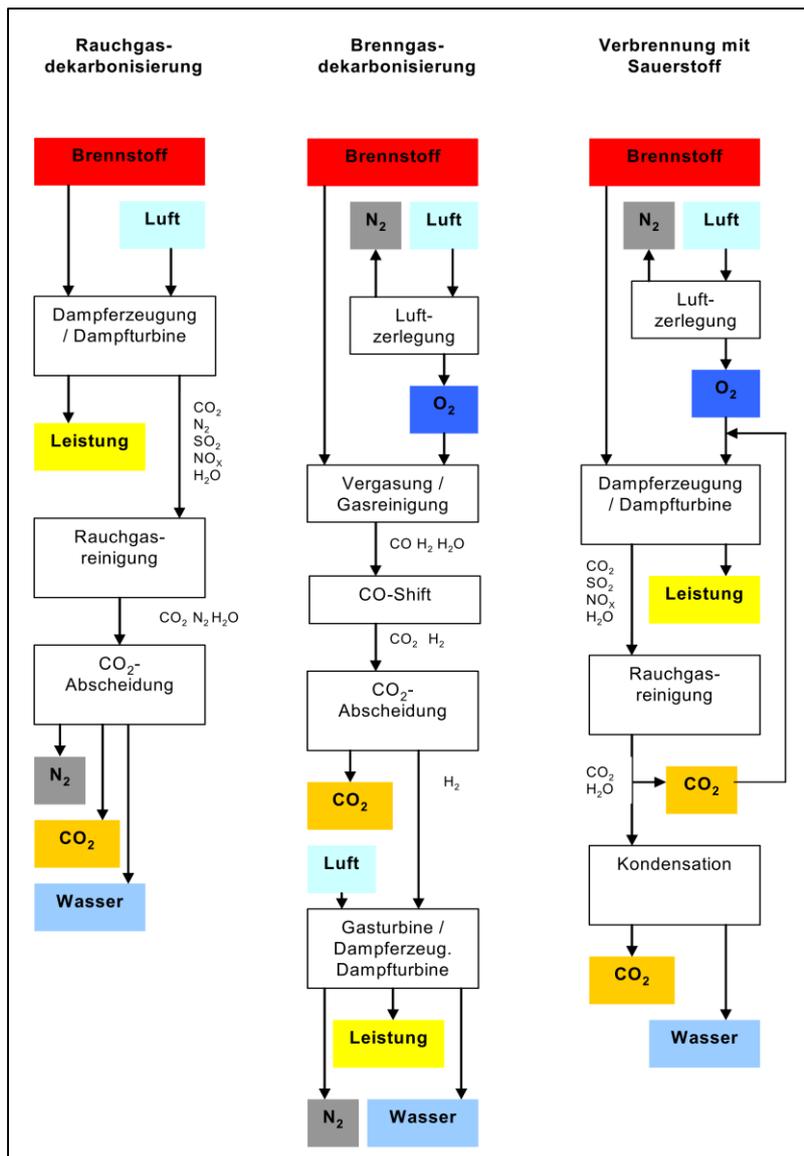


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der drei Hauptverfahren zur Kohlenstoffdioxidabscheidung in stationärer Anwendung [RADG06]

## 5.5.1 Kohlenstoffdioxidabscheidung aus dem Gasstrom

### 5.5.1.1 Physisorption

Bei der physikalischen Absorption löst sich das Gas in einer Flüssigkeit, ohne dass eine chemische Reaktion abläuft. Dieser Vorgang ist exotherm und die freiwerdende Energiemenge entspricht ungefähr der Kondensationswärme des Gases [OHLE09]. Zwischen den Gas- und Flüssigkeitsmolekülen bestehen nur schwache Wechselwirkungen wie van-der-Waals- und Coloumb-Kräfte [FRIE98]. Der Energiebedarf für die Desorption ist entsprechend gering. Die Absorptionsgeschwindigkeit hängt vom Stofftransport in der Grenzschicht ab [KEMP12]. Dieser wird vom Fick'schen Gesetz beschrieben und ist proportional zum Konzentrationsgradienten. Daraus folgt der starke Einfluss des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks auf die Beladung des Absorbens und somit auf die Abscheiderate. Wird das Kohlendioxid unter erhöhtem Druck vom Lösungsmittel absorbiert, erfolgt die Abscheidung des Kohlendioxids anschließend einfach durch Druckminderung [FISCO7; AUSF08].

### 5.5.1.2 Chemisorption

Im Gegensatz zur Physisorption wird bei der Chemisorption das Lösen des Gases in der Flüssigkeit von einer chemischen Reaktion begleitet. Dabei wird die Reaktionsenthalpie, die ein Vielfaches der Kondensationswärme beträgt [OHLE09], freigesetzt und es entstehen kovalente Bindungen [FRIE98]. Die Regeneration chemischer Waschmittel benötigt entsprechend mehr Energie als die Desorption physikalischer Waschmittel, da die kovalenten Bindungen erst gelöst werden müssen. Der chemischen Reaktion geht das Lösen des Gases in der Flüssigkeit voraus. Der Stofftransport wird begünstigt, indem die chemische Reaktion das Absorbat aus der Grenzschicht entfernt und somit permanent ein großes Konzentrationsgefälle vorliegt. Die Absorptionsgeschwindigkeit hängt sowohl vom Stofftransport als auch von der Geschwindigkeit der chemischen Reaktion ab.

Die größte technische Reife zur Abscheidung von Kohlendioxid aus dem Rauchgas besitzen Waschverfahren mit flüssigen Absorptionsmitteln wie z.B. die Aminwäsche. Das Kohlendioxid aus dem Rauchgas geht mit dem Lösungsmittel eine Verbindung ein. Die angereicherte Lösung wird in einem zweiten Behälter mit Wasserdampf erhitzt und das Kohlendioxid wieder ausgetrieben. Im Kraftwerksbetrieb sind damit Abscheideraten bis zu 90% erreichbar [AUSF08; FISC07]. Mit diesen Verfahren kann auch bei niedrigen CO<sub>2</sub>-Partialdrücken gut abgeschieden werden [OHLE09].

In Abbildung 5-2 sind die maximalen Beladungen sowohl physikalischer Waschmittel (z.B. Selexol) als auch chemischer Waschmittel (z.B. MEA) in Abhängigkeit vom Partialdruck dargestellt.

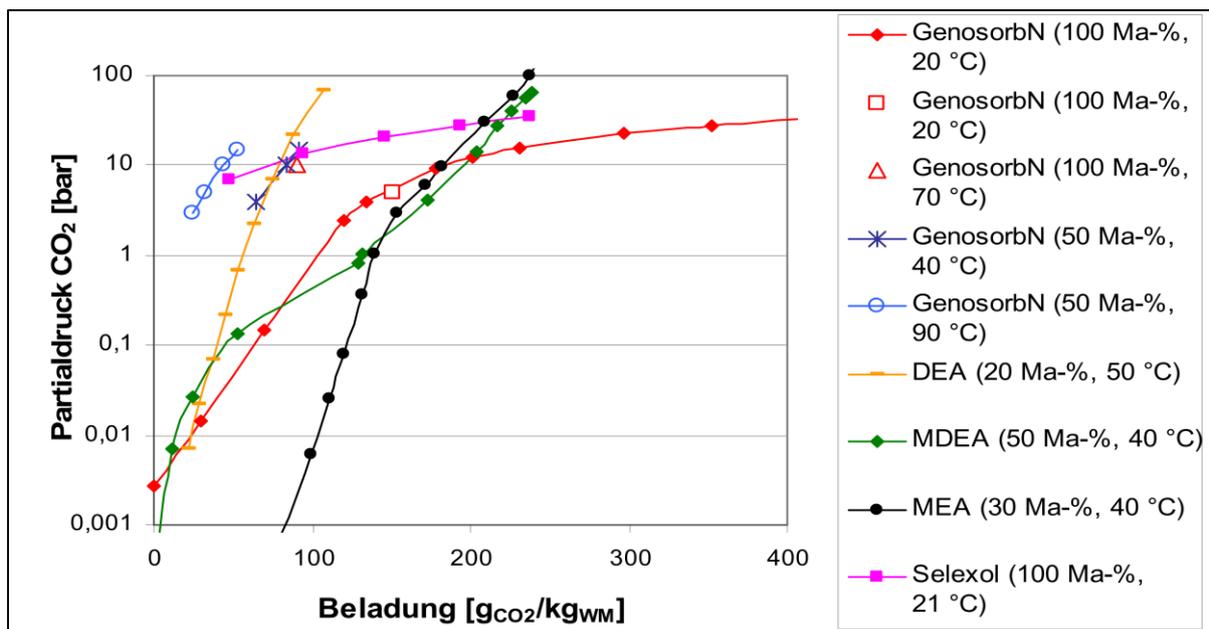


Abbildung 5-2: Zusammenhang zwischen dem CO<sub>2</sub>-Partialdruck und der Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in ausgewählten Waschmitteln [OHLE09]

Neben der maximalen Beladung spielen auch die Absorptionsraten und der darstellbare Beladungshub eine Rolle. Bei einem frischen unbeladenen Waschmittel ist die Absorptionsrate am höchsten. Mit zunehmender Beladung des Waschmittels verringert sich die Absorptionsrate. Soll das Waschmittel an Bord regeneriert werden ist neben dem Energiebedarf auch die Regenerationsgeschwindigkeit von Interesse. Je nach Konzept weist das regenerierte Waschmittel noch eine Restbeladung an CO<sub>2</sub> auf. In Abbildung 5-3 sind exemplarisch die Absorptionsraten über der Beladung für ein Diamin (EDA), für ein Alkanolamin (MEA) und für ein sterisch gehindert Alkanolamin (AMP) aufgetragen.

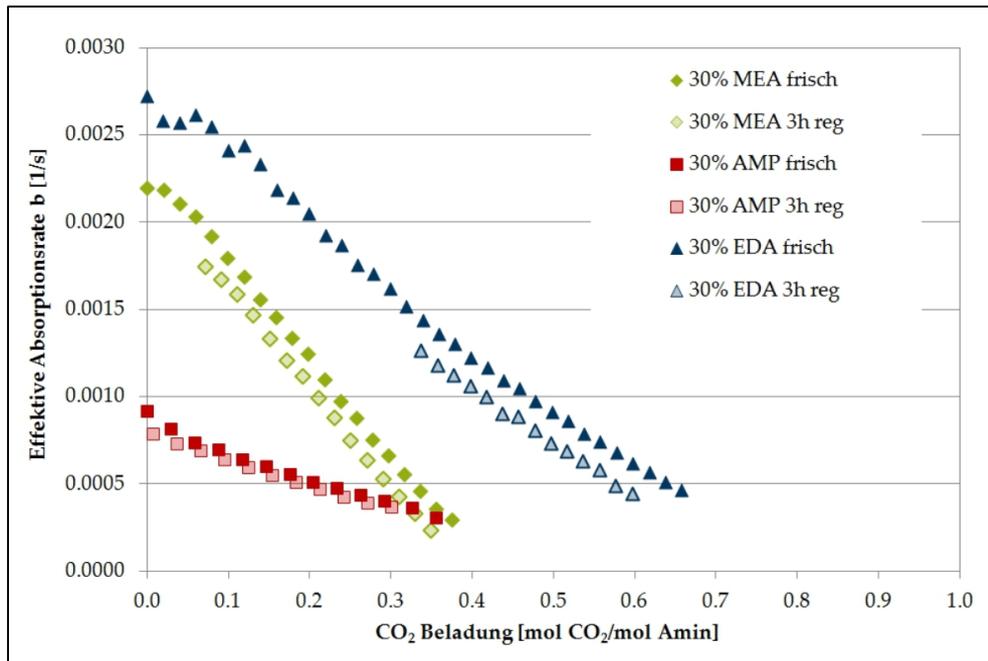


Abbildung 5-3: Absorptionsraten in Abhängigkeit von Der CO<sub>2</sub>-Beladung bei 40 °C und 100% CO<sub>2</sub> [KEMP12]

Der unterschiedliche Aufbau der Amine führt zu unterschiedlichen Eigenschaften. Die Bezeichnung primär bedeutet, dass ein Wasserstoffatom des Ammoniaks durch einen Alkylrest ersetzt wurde. Sekundäre Amine besitzen zwei Alkylreste und nur ein Wasserstoffatom am Stickstoffatom, tertiäre Amine entsprechend drei Alkylreste und kein Wasserstoffatom am Stickstoffatom. In Tabelle 5-11 sind einige Vertreter verschiedener Gruppen von Waschmitteln mit ihren Eigenschaften dargestellt.

Tabelle 5-11: Kategorisierte Eigenschaften der Amine [KEMP12]

| Eigenschaft              | primär | sekundär | tertiär | Diamin<br>primär | sterisch gehindert<br>primär |
|--------------------------|--------|----------|---------|------------------|------------------------------|
| Beispiel                 | MEA    | DEA      | MDEA    | EDA              | AMP                          |
| Reaktionsgeschwindigkeit | +      | o        | -       | +                | o                            |
| Reaktionsenthalpie       | -      | o        | +       | -                | +                            |
| Verdampfungsenthalpie    | -      | o        | +       | -                | +                            |
| Kapazität                | -      | o        | +       | +                | +                            |
| Basizität reines Amin    | +      | o        | -       | +                | +                            |
| Basizität wässr. Lösung  | o      | +        | -       | +                | +                            |
| Korrosion                | -      | o        | -       | +                | +                            |
| Degradation              | -      | o        | +       | -                | +                            |

Ein „+“ bedeutet eine gute Eignung für den Waschprozess.

### 5.5.1.3 Adsorption

Zeolithe und Aktivkohle sind in der Lage Kohlendioxid an ihrer Oberfläche zu adsorbieren. Die Regeneration erfolgt je nach gewähltem Adsorbens mittels Druckreduktion (Pressure Swing Adsorption – PSA), durch Temperaturerhöhung (Temperature Swing Adsorption – TSA) oder durch das Anlegen einer elektrischen Spannung (Electric Swing Adsorption – ESA). [AUSF08; FISC07] Durch die Nutzung von Feststoffen ist ein Umpumpen des Adsorbens zur Adsorption und Regeneration erschwert.

Daher muss das System entweder intermittierend oder als Zwei-Kammer-System betrieben werden, so dass in der einen Kammer regeneriert werden kann, während in der anderen Kammer die Adsorption stattfindet. Ist das Adsorbens vollständig beladen bzw. regeneriert erfolgt das Umschalten zwischen den beiden Kammern. [MAIE12]

#### 5.5.1.4 Membran

Membranen können sowohl zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung als auch zur Sauerstoffanreicherung verwendet werden.

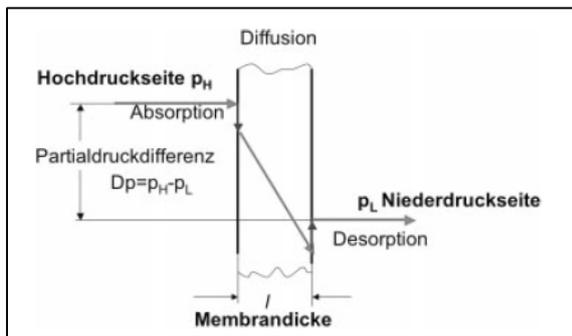


Abbildung 5-4: Modellvorstellung zum Gastransport durch eine Membran [OHLR06]

Der Stofftransport durch die Membran wird in drei Teilprozesse gegliedert: Absorption, Diffusion und Desorption. Treibende Kraft ist das Partialdruckgefälle. Ab- und Desorption sowie Diffusion hängen von dem Membranmaterial und den beteiligten Gasen ab. Das Produkt aus Diffusions- und Löslichkeitskoeffizient eines Gases für eine Membran wird als Permeabilität bezeichnet. Der Quotient aus den Permeabilitäten zweier Gase beschreibt die Selektivität der Membran. Unterschiedliche Permeabilitäten führen zu unterschiedlichen Passiergeschwindigkeiten und ermöglichen so eine Trennung der Gasphasen [OHLR06]. Die derzeit erzielbare CO<sub>2</sub>-Abscheiderate spricht gegen einen Einsatz im Fahrzeug [FISC07; AUSF08]. Bleibt der Einsatz von Membranen zur Sauerstoffanreicherung. Für die Sauerstoffanreicherung aus Luft ist in Abbildung 5-5 die Sauerstoffkonzentration im Permeat für verschiedene Selektivitäten und Druckverhältnisse dargestellt.

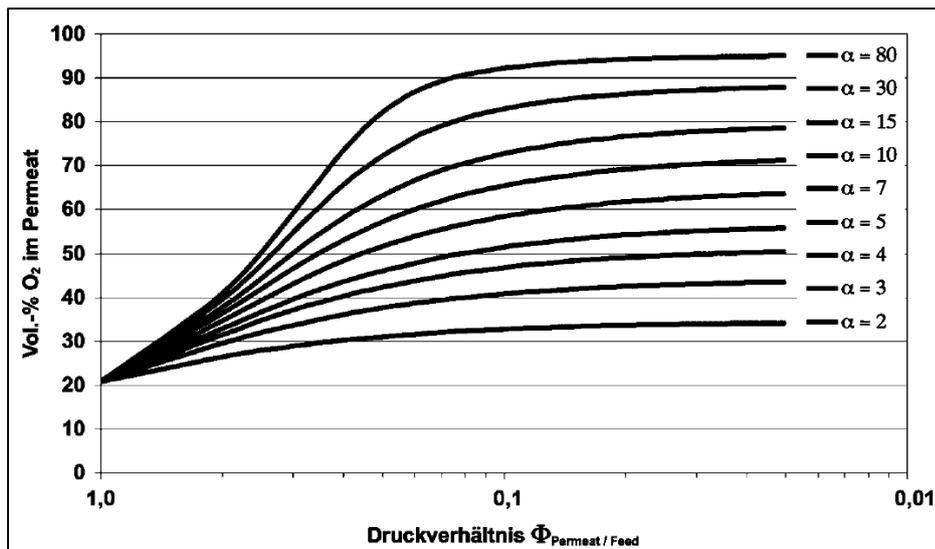


Abbildung 5-5: maximal erreichbare Sauerstoffanreicherung in Abhängigkeit von der Membranselektivität ( $\text{N}_2/\text{O}_2$ ) und dem Druckverhältnis [OHLR06]

In einem technischen Prozess mit einer Selektivität von 7 sind derzeit Sauerstoffkonzentrationen von ca. 50% wirtschaftlich darstellbar [OHLR06].

#### 5.5.1.5 Vergleich der Abscheideverfahren

Eine allgemeingültige Aussage, welches Abscheideverfahren nun das Beste sei, lässt sich nicht treffen. Die Eignung hängt immer vom jeweiligen Einsatzgebiet ab, wie Tabelle 5-12 zeigt.

Tabelle 5-12: Übersicht der Abscheideverfahren

| Verfahren     | charakteristische Eigenschaften                           | Einsatzgebiet          |
|---------------|---|------------------------|
| Chemisorption | starke Bindung, hoher Energiebedarf zur Regeneration      | niedrige Partialdrücke |
| Physisorption | schwache Bindung, geringer Energiebedarf zur Regeneration | hohe Partialdrücke     |
| Membran       | einfacher Aufbau, mittlerer bis hoher Energiebedarf       | An/Abreichern          |

Ein Aspekt, der in dieser Arbeit nur kurz erwähnt wird, aber dennoch für die endgültige Auswahl des Abscheideverfahrens bzw. des Waschmittels eine entscheidende Rolle spielt, ist die Degradation bzw. Haltbarkeit. Sie hängt von den Prozesstemperaturen und vorliegenden Substanzen ab. Beispielsweise wird MEA bis auf 30% mit Wasser verdünnt, da es im beladenen Zustand korrosiv wirkt. In anderen Fällen geht das Waschmittel selbst Verbindungen mit Sauerstoff oder Schwefel aus dem Gasstrom ein, die sich nicht mehr unter den üblichen Prozessbedingungen regenerieren lassen. Dies führt dann zu einer Abnahme der Beladungskapazität und geringeren Absorptionsraten.

Gewicht und Bauraum spielen im Fahrzeugeinsatz eine entscheidende Rolle, werden aber bei der Rauchgaswäsche in Kraftwerken nur am Rande betrachtet. Übliche Prozessparameter können daher nicht ohne weiteres auf den mobilen Einsatz übertragen werden. Eine Analyse der Zusammenhänge unterstützt die optimale Wahl der Prozessparameter während der Konzepterstellung. Neben der Waschmittelwahl und dessen Konzentration beeinflussen alle Parameter, die die Reaktionen steuern können, den Gaswäscheprozess und dessen konstruktive Umsetzung. Die wichtigsten Parameter sind das Verhältnis aus Waschmittelmengestrom ( $\dot{L}$ ) und Gasmengestrom ( $\dot{G}$ ), die Druckniveaus, die Temperaturen im Ab- und Desorber, der geforderte Abscheidegrad, die Konzentration des Waschmittels in

der wässrigen Lösung und der gewählte Beladungshub des Waschmittels. Ein größeres Verhältnis aus Waschmittelmenge und Gasmenge führt bei konstanter Gasmenge zu einem größeren Waschmittelmengenstrom. Die Beladung nimmt ab, aber die benötigte Heizleistung zum Desorbieren nimmt zu. Außerdem kann bei größerem Waschmittelmengenstrom die Anzahl der nötigen Trennstufen im Absorber reduziert (vgl. Abbildung 5-6) und damit die Bauhöhe des Absorbers verringert werden.

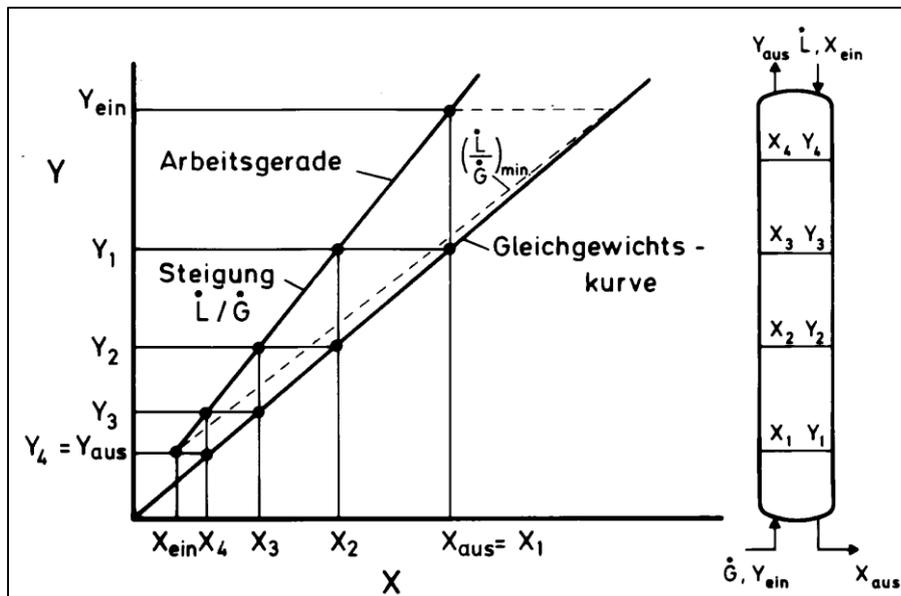


Abbildung 5-6: Beladungsdiagramm für die Absorption [GMEH08]

Das Gas strömt von unten mit der  $\text{CO}_2$ -Eingangskonzentration ( $Y_{\text{ein}}$ ) in den Absorber. Am Absorberkopf verlässt das Gas den Absorber mit der gewünschten Ausgangskonzentration ( $Y_{\text{aus}}$ ). Der Abscheidegrad ist definiert als Quotient aus Konzentrationsänderung und Eingangskonzentration. Das abgeschiedene  $\text{CO}_2$  wird vom Waschmittelstrom aufgenommen und erhöht die Waschmittelbeladung von  $X_{\text{ein}}$  auf  $X_{\text{aus}}$ . Je größer der Unterschied zwischen der Arbeitsgeraden und der Gleichgewichtskurve, desto größer wird die Reaktionsgeschwindigkeit an den jeweiligen Punkten im Absorber. Für eine definierte Abscheideleistung sind weniger Stufen nötig und der Absorber kann kleiner ausgeführt werden. Im Desorber bzw. Stripper wird die Waschmittelbeladung wieder auf  $X_{\text{ein}}$  reduziert. Dieser Prozessschritt ist in Abbildung 5-6 nicht dargestellt.

Ein erhöhter Gesamtdruck führt zu einem höheren  $\text{CO}_2$ -Partialdruck. Damit steigt auch die Waschmittelbeladung im Gleichgewichtspunkt an. Den gleichen Effekt hat eine Temperaturabsenkung. In Abbildung 5-7 sind die Beladungskapazitäten für das physikalische Waschmittel Methanol und für das chemische Waschmittel MEA in Abhängigkeit von  $\text{CO}_2$ -Partialdruck und Temperatur aufgetragen.

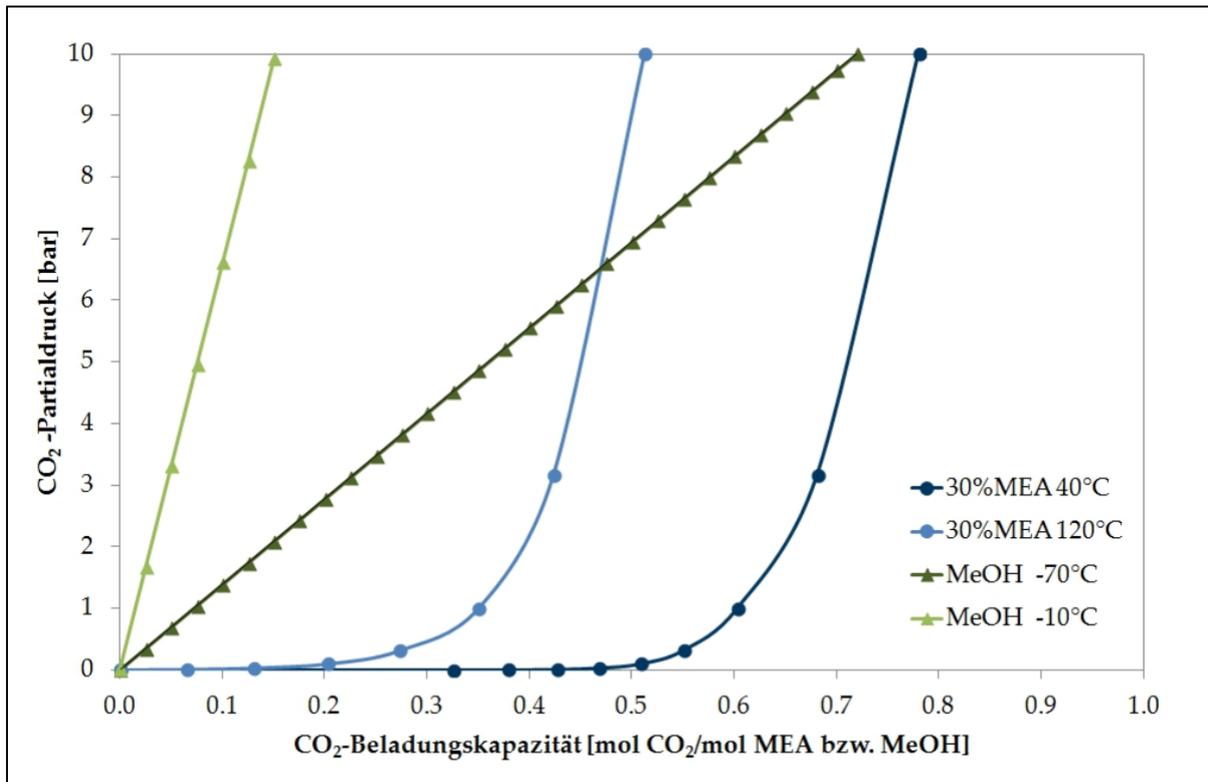


Abbildung 5-7: Gleichgewichtspunkte für MEA und Methanol in Abhängigkeit von Temperatur und CO<sub>2</sub>-Partialdruck [KEMP12]

Ein höherer Abscheidegrad verlangt einen größeren Waschmittelmengenstrom oder alternativ zusätzliche Trennstufen. Die Größe des Beladungshubes bestimmt den Aufwand zur Regeneration. Die Lage des Beladungshubes beeinflusst die Reaktionsgeschwindigkeiten im Ab- und Desorber gegenläufig (vgl. Tabelle 5-13 und Abbildung 5-3). Ist die Verweildauer der Waschmittel im Absorber sehr groß, erreichen sie fast die Beladungen, die dem Gleichgewichtszustand unter diesen Bedingungen entsprechen. Im Desorber herrschen Bedingungen unter denen die Waschmittel das gebundene CO<sub>2</sub> wieder abgeben und somit regeneriert werden. Zu Beginn der Regeneration ist die Reaktionsgeschwindigkeit, bedingt durch den großen Unterschied zwischen aktueller Beladung und der Gleichgewichtsbeladung unter Desorberbedingungen, vergleichsweise hoch. Mit fortschreitender Regeneration nimmt die aktuelle Beladung des Waschmittels ab. Der Unterschied zur Gleichgewichtsbeladung verringert sich und die Reaktionsgeschwindigkeit sinkt entsprechend. Den gleichen negativen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit hat eine geringere Eingangsbeladung des Waschmittels beim Eintritt in den Desorber. Bei einer Eingangsbeladung des Waschmittels MEA von 0,4 molCO<sub>2</sub>/molAmin können im Desorber innerhalb von 30 Minuten ca. 0,2 molCO<sub>2</sub>/molAmin aus dem Waschmittel ausgetrieben werden. Läge die Eingangskonzentration jedoch nur bei 0,2 molCO<sub>2</sub>/molAmin, könnten nach 30 Minuten lediglich 0,1 molCO<sub>2</sub>/molAmin ausgetrieben werden. Andere Waschmittel weisen ähnliche Zusammenhänge auf.

Tabelle 5-13: CO<sub>2</sub>-Beladungen in Abhängigkeit von der Regenerationsdauer [KEMP12]

|         | <b>Regenerationsdauer</b><br>[h] | <b>CO<sub>2</sub>-Beladung</b><br>[molCO <sub>2</sub> /molAmin] | <b>Regenerationsgrad</b><br>[%] |
|---------|----------------------------------|---|---------------------------------|
| 30% MEA | 0                                | 0.40624   | -                               |
|         | 0.5                              | 0.20850   | 48.68                           |
|         | 1                                | 0.10753   | 73.53                           |
|         | 2                                | 0.09467   | 76.70                           |
|         | 3                                | 0.07150   | 82.40                           |
| 30% EDA | 0                                | 0.66529   | -                               |
|         | 0.5                              | 0.45014   | 32.34                           |
|         | 1                                | 0.41481   | 37.65                           |
|         | 2                                | 0.38652   | 41.90                           |
|         | 3                                | 0.33716   | 49.32                           |
| 30% AMP | 0                                | 0.40111   | -                               |
|         | 0.5                              | 0.05176   | 87.10                           |
|         | 3                                | 0.00719   | 98.21                           |

Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Drücke im Abgasstrang eines konventionellen Dieselantriebsstrangs sind abhängig vom Auflade- und Emissionskonzept, sowie der Motorlast. Für einen konventionellen Dieselmotor mit zweistufiger Aufladung im WHTC liegen die maximalen CO<sub>2</sub>-Partialdrücke vor der Hochdruckturbinen bei 0,51 bar, vor der Niederdruckturbinen bei 0,25 bar und nach der Niederdruckturbinen bei 0,11 bar. Die über den Fahrzyklus gemittelten Durchschnittswerte liegen bei 0,1 bar, 0,06 bar und 0,05 bar.<sup>1</sup> Eine CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor den Abgasturboladern hätte große Einflüsse auf die Strömungsverhältnisse in den Turbinen und damit auf die Dynamik des Motors. Für die Auswahl der Abscheideverfahren werden deshalb die Partialdrücke nach der Niederdruckturbinen herangezogen. Demnach sind Chemische Waschmittel für das Abscheiden im Abgasstrang zu bevorzugen, da sie auch bei niedrigen Partialdrücken gute Abscheideraten erzielen.

Werden die charakteristischen Eigenschaften und die bevorzugten Einsatzgebiete den Abscheideprozessen zugeordnet, ergibt sich folgende Matrix.

<sup>1</sup> Quelle: eigene Messungen am Prüfstand im Rahmen der Tätigkeit als studentische Hilfskraft

Tabelle 5-14: Zuordnung von Abscheideprozessen und Abscheideverfahren [FISC15]

| Verfahrens-Prinzip               | Pre-Combustion Capture | Oxy-Combustion Capture | Post-Combustion Capture |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| Chemische Absorption             |                        |                        |                         |
| Physikalische Absorption         |                        |                        |                         |
| Adsorption                       |                        |                        |                         |
| Kryogen                          |                        |                        |                         |
| Membran                          |                        |                        |                         |
| Natürliche Einbindung            |                        |                        |                         |
| Kondensation anderer Komponenten |                        |                        |                         |

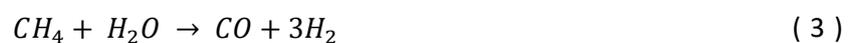
|                |  |   |
|----------------|--|---|
| <b>Legende</b> |  | Verfahren der Wahl                            |
|                |  | Verfahren möglich, aber eher unwirtschaftlich |
|                |  | Verfahren in der Entwicklung                  |
|                |  | Verfahren nicht relevant                      |

Wird der Kraftstoff mittels Dampfreformierung (vgl. Kapitel 5.5.2.1) aufbereitet, so liegen Konzentrationen und Partialdrücke vor, die den Einsatz physikalischer Waschmittel erlauben. Membranen sind derzeit für das Abscheiden von CO<sub>2</sub> nicht geeignet. Sie können aber zur Sauerstoffanreicherung in der Verbrennungsluft genutzt werden.

## 5.5.2 Kohlenstoffbeseitigung aus dem Edukt

### 5.5.2.1 Dampfreformierung

Bei der Dampfreformierung wird aus Kohlenwasserstoffen wie z.B. Methan und Wasserdampf in einer endothermen Reaktion Kohlenmonoxid und Wasserstoff erzeugt.



### 5.5.2.2 Partielle Oxidation

Ein zweites Verfahren zur Wasserstoffherstellung ist die partielle Oxidation. Dabei werden Kohlenwasserstoffe unter Sauerstoffmangel verbrannt. Es entstehen Kohlenmonoxid und Wasserstoff gemäß Gleichung 4.



Die exotherme partielle Oxidation kann in geeignetem Maß mit der Dampfreformierung kombiniert werden, so dass der Gesamtprozess autotherm ablaufen kann.

### 5.5.2.3 Wassergas-Shift-Reaktion

In der Wassergas-Shift-Reaktion reagiert das Kohlenmonoxid aus der Dampfreformierung oder der partiellen Oxidation mit Wasserdampf zu Kohlendioxid und Wasserstoff. Diese Reaktion verläuft leicht exotherm.



Der Wasserstoff kann vom Kohlendioxid separiert werden und steht anschließend den Energiewandlern zur Verfügung. Für die Separation des Kohlendioxids kommen die gleichen Verfahren wie bei der Abscheidung aus dem Abgas in Frage, allerdings liegen andere Drücke, Temperaturen und Konzentrationen vor.

## 5.6 Stoffumwandlung

Nicht jeder chemische Energiewandler ist für jeden Kraftstoff geeignet. Dennoch kann es Vorteile bringen, den benötigten Kraftstoff erst an Bord zu erzeugen. Diese Stoffumwandlung spielt vor allem bei der Wasserstoffnutzung eine Rolle. Betrachtete Verfahren zur Wasserstofferzeugung sind die Zersetzung von Ammoniak, Amminboran oder Natriumborhydrid, das Metalloxidverfahren sowie die Reformierung, die in Verbindung mit Kohlenwasserstoffen auch zur Kohlenstoffbeseitigung im Edukt genutzt werden kann (vgl. Kapitel 5.5.2).

### 5.6.1 Wasserstoff aus Ammoniak

Die Ammoniakspaltung ist ein endothermer Vorgang und in Gleichung 6 dargestellt.



Die aus einem mol Ammoniak entstehende Wasserstoffmenge liefert eine Energie von 360 kJ. Nach Abzug der Reaktionsenthalpie sind noch 314,1 kJ/mol nutzbar. Der theoretische Wirkungsgrad bezogen auf den Brennwert des freigesetzten Wasserstoffs liegt somit bei 87%. Die thermische Zersetzung von Ammoniak unter Einsatz konventioneller Eisenkatalysatoren läuft ab Temperaturen von 550 °C mit einer zufriedenstellenden Ausbeute ab [SOER07]. Die hohe Prozesstemperatur führt zu großen Wärmeverlusten, die gemeinsam mit der Reaktionsenthalpie wieder zugeführt werden müssen. Elektrische Heizelemente können zum Beheizen des Spaltungsreaktors genutzt werden. Deren Stromverbrauch ist

jedoch größer, als die nutzbare Energie aus dem Wasserstoff [LUED14]. Idealerweise wird die benötigte thermische Energie aus Abwärme bereitgestellt. Für den Einsatz in Lkw kommen jedoch nur wenige Prozesse in Frage, die Abwärme auf diesem hohen Temperaturniveau bereitstellen können. Verbrennungskraftmaschinen oder Festoxidbrennstoffzellen erreichen das nötige Temperaturniveau. Diese Energiewandler sind aber in der Lage, Ammoniak direkt zu nutzen, so dass eine Wasserstoffbereitstellung aus Ammoniak in diesen Konzepten nicht sinnvoll ist.

Eine weitere Möglichkeit zur Wasserstoffgewinnung ist, Ammoniak elektrolytisch zu spalten. In Versuchen wurde jedoch mehr elektrische Energie zur Elektrolyse des Ammoniaks aufgewendet, als anschließend in einer Brennstoffzelle aus dem Wasserstoff gewonnen werden konnte. [REPG03]

### 5.6.2 Wasserstoff aus Amminboran

Amminboran wird auch Borazan genannt und enthält 19,6 Massenprozent Wasserstoff [MARD07]. Unter Normbedingungen ist Amminboran ein weißer Feststoff. In der Literatur gibt es widersprüchliche Aussagen zur Stabilität und Wasserstoffabgabe bei Raumtemperatur [BAUM03]. Zur Wasserstofffreisetzung stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Die thermische Amminboranzersetzung ist ein mehrstufiger Prozess der auf unterschiedlichen Temperaturniveaus abläuft und in Abbildung 5-8 dargestellt ist.

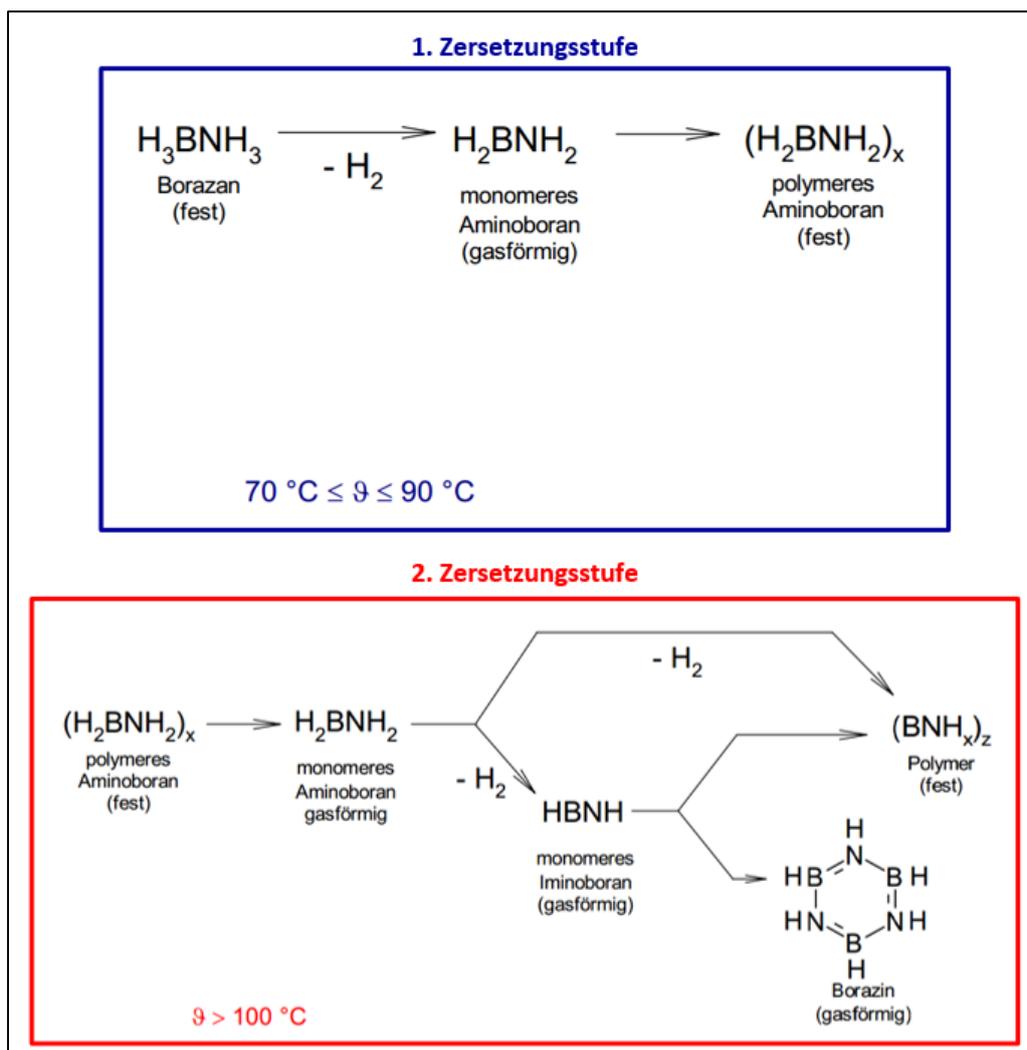
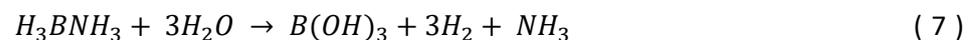


Abbildung 5-8: thermische Zersetzung von Amminboran [nach BAUM03]

Zunächst bilden sich bei ca. 80 °C lineare B-N-Polymere. Bei höheren Temperaturen vernetzen sich die Polymere immer mehr und geben dabei weiteren Wasserstoff ab. Nach der Abspaltung des gesamten Wasserstoffs bleibt Bornitrid zurück. Da für den letzten Schritt jedoch sehr hohe Temperaturen über 800 °C nötig sind, wird dieser in den meisten Prozessen nicht umgesetzt, da die Wasserstoffausbeute den erhöhten apparativen und energetischen Aufwand nicht rechtfertigt. Bei Temperaturen bis zu 200 °C können ca. 2,2 mol H<sub>2</sub> aus einem mol Amminboran freigesetzt werden. Die Bildung des gasförmigen Nebenprodukts Borazin muss durch technische Maßnahmen unterbunden werden, z.B. durch eine geringere Heizrate, da sonst nachgeschaltete Brennstoffzellen Schaden nehmen können. [HÜGL11; BAUM03]

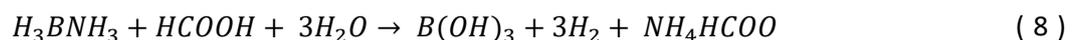
Wird die Reaktionstemperatur auf 100°C begrenzt, kann nur durch die Zugabe von Säuren oder Lösungsmitteln die Wasserstoffabgabegeschwindigkeit auf einem befriedigenden Niveau gehalten werden. Diese zusätzlichen Stoffe reduzieren jedoch die gravimetrische Energiedichte des Gesamtsystems so stark, dass der Einsatz von Amminboran als Wasserstoffspeicher nicht mehr sinnvoll ist [KOST12]. Alternativ kann man sich die hohe Löslichkeit von Amminboran in Wasser (336 g/l) zu Nutze machen [HÜGL11]. Im Vergleich zur Schüttdichte von festem Amminboran erhöht sich der Platzbedarf für die Lösung nur wenig, wo hingegen Effizienz und Komplexität des Wasserstoffquellsystems verbessert werden können und das Wasser ohnehin mitgeführt wird.

Baumann beschreibt die Möglichkeit der Zersetzung von gelöstem Amminboran unter Anwesenheit von Katalysatoren gemäß folgender Bruttoreaktionsgleichung:



Praktische Anwendungen werden jedoch durch Löslichkeitsprobleme und Ammoniakaustrag erschwert [RIED12]. Werden ausreichende Reaktionsgeschwindigkeiten darstellbar, so kann durch einen Wasserkreislauf zwischen der Brennstoffzelle und dem Amminboranzersetzungsreaktor die gravimetrische Speicherdichte erhöht werden, da nicht das gesamte, für die Bruttoreaktion nötige, Wasser mitgeführt werden muss. Aufgrund der Ammoniakspuren im Wasserstoffgas sind ammoniakresistente Wandler wie SOFCs zur Nutzung des Wasserstoffs nötig. Kann der Wandler Ammoniak umsetzen, so erhöht sich die Wasserstoffausbeute virtuell auf 4,5 mol H<sub>2</sub> bezogen auf ein mol Amminboran, da neben den 3 mol reinen Wasserstoffs zusätzliche 1,5 mol H<sub>2</sub> im Ammoniak gebunden zur Verfügung stehen.

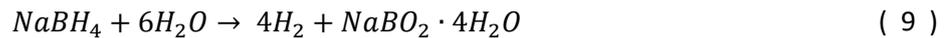
Statt in Anwesenheit eines Katalysators kann die Hydrolyse von gelöstem Amminboran auch unter sauren Bedingungen zügig ablaufen. Ameisensäure ist dafür gut geeignet. [KOST12]



Die zusätzliche Säure sowie die entstehenden Feststoffe Borsäure und Ammoniumformiat erhöhen die Masse des Gesamtsystems. Wenn kein Ammoniak als Nebenprodukt entsteht, kann das Produktgas auch in Polymerelektrolytbrennstoffzellen eingesetzt werden.

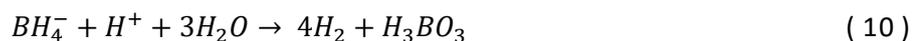
### 5.6.3 Wasserstoff aus Natriumborhydrid und Wasser

Die Eignung als Wasserstoffquelle hängt nicht nur von dem gravimetrischen Wasserstoffanteil der gewählten Verbindung ab, sondern auch von den Prozessbedingungen, die für eine Freisetzung des Wasserstoffs erforderlich sind, sowie einer sicheren Transportmöglichkeit. Als Alternative zu Amminboran bietet sich Natriumborhydrid an. Dieser Feststoff ist an feuchter Luft bis 300 °C stabil und besteht zu 10,8 Massenprozent aus Wasserstoff. Der Hydrolysevorgang hängt von den Prozessbedingungen ab. In Anwesenheit von Katalysatoren läuft die Reaktion nach Gleichung 9 ab. [KOST12]



Idealerweise wird das Kristallwasser aus dem Natriummetaborat durch Nutzung von Abwärme angetrieben und der Reaktion wieder zugeführt. Der andere Teil des nötigen Wassers stammt aus der nachgeschalteten Oxidation des Wasserstoffs. Der darin enthaltene Luftsauerstoff wird im Natriummetaborat gebunden und führt zu einem schweren Produkt, so dass die Energiedichten auf dessen Masse und Volumen bezogen werden müssen.

Alternativ kann Natriumborhydrid unter sauren Bedingungen hydrolysiert werden. Die Reaktion ist in Gleichung 10 dargestellt.



Kostka hat ein Konzept auf Natriumborhydrid-Basis für ein 100 W-Brennstoffzellensystem erstellt. Die Hydrolyse findet in Gegenwart von konzentrierter Ameisensäure statt. Zur leichteren Förderbarkeit wird das Natriumborhydrid in Wasser gelöst und mit der starken Base Natronlauge als Stabilisator versetzt, um eine unkontrollierte Hydrolyse zu verhindern. Auf ein mol Natriumborhydrid kommen 4 mol Wasser und 0,14 mol Natronlauge. Ein mol Ameisensäure wird der Lösung im Reaktor zugeführt. Die zusätzlichen Massen und Volumina der wässrigen Lösung mit Natronlauge, sowie der Ameisensäure verringern zwar auf den ersten Blick die Energiedichte der Wasserstoffquelle, verbessern jedoch die Lagerfähigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit des Systems und auf den zweiten Blick wird deutlich, dass festes Natriumborhydrid mit einer Schüttdichte von 0,5 kg/l mehr Volumen einnimmt als die wässrige Lösung mit einer Löslichkeit von 0,55 kg/l. [GEST16]

Für eine homogene Katalyse sind teure Katalysatoren auf Rutheniumbasis notwendig. Heterogene Katalysatoren lassen derzeit noch eine ausreichende Zyklenbeständigkeit vermissen [KOST12]. Das Austreiben des Kristallwassers erhöht den verfahrenstechnischen Aufwand. Die katalytische Hydrolyse wurde bereits im Jahr 2002 von der DaimlerChrysler AG im Forschungsfahrzeug „Natrium“ vorgestellt [DAIM02]. Die weitere Entwicklung wurde jedoch eingestellt. Aus den genannten Gründen wird die katalytische Hydrolyse nicht weiterverfolgt. Die saure Hydrolyse des Natriumborhydrids wird in Kapitel 7.5.2 konkretisiert.

### 5.6.4 Wasserstoff aus Zink und Wasser

An der ETH Zürich und am PSI wurde das Zinkoxid-Redox-Prinzip technisch umgesetzt. Das Prinzip gehört zu der Gruppe der Metalloxidverfahren. Dabei wird ein Metalloxid bei hohen Temperaturen

reduziert. Im Fall des patentierten Verfahrens zur Zinkoxid-Reduktion wird konzentrierte Solarstrahlung genutzt, um in einem Reaktor das Zinkoxid bei fast 2000 °C zu reduzieren. Anschließend kann das Zink in Zink-Luft-Batterien zum Einsatz kommen oder es reagiert bei ca. 600 °C mit Wasserdampf. In dieser exothermen Reaktion entsteht Wasserstoff und das Zink wird wieder oxidiert.

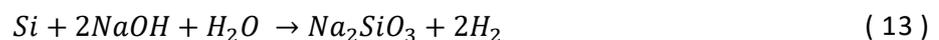


### 5.6.5 Wasserstoff aus Silizium und Wasser

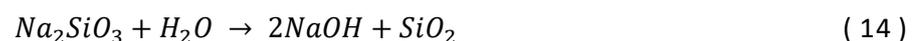
Neben Zink sind Aluminium und Silizium die einzigen ungiftigen Elemente, die an der Luft stabil sind und theoretisch nach dem gleichen Redox-Prinzip Wasserstoff erzeugen können [EROG13]. Das Halbmetall Silizium ist mit einem Anteil von 27,2% Anteil an der Erdkruste das zweithäufigste Element [RIED07]. Die Verfügbarkeit ist daher nahezu unbegrenzt. Analog zum Zinkoxid-Redox-Prinzip ist für Siliziumdioxid ein ähnlicher Prozess unter Nutzung solarer Energie zur Reduktion denkbar. Das reine Silizium kann an Bord mitgeführt werden und setzt in einer exothermen Reaktion mit Wasserdampf Wasserstoff frei.



Silizium kann in metallischer Form oder amorph vorliegen. Metallisches Silizium oxidiert an der Luft erst ab Temperaturen von 1200 °C, ist sehr beständig und deshalb gut für den Transport geeignet. Pulverförmiges Silizium kann schon bei Raumtemperatur spontan reagieren und stellt daher besondere Anforderungen an den Transport. Die Transportsicherheit steht in Konkurrenz zur erwünschten hohen Reaktivität mit Wasser und stellt somit einen Zielkonflikt dar [MENZ04]. Darüber hinaus führt die begrenzte Schüttdichte von Pulvern zu einer verringerten Dichte, so dass mehr Tankvolumen benötigt wird. Um metallisches Silizium bei niedrigen Temperaturen zu oxidieren, können Alkalilaugen eingesetzt werden. Die entsprechende Lauge muss jedoch anschließend regeneriert werden. [HERB03] stellt ein solches Verfahren vor und schätzt die Masse und das Volumen der benötigten Apparatur ab. Zum Einsatz kommt Natronlauge und die Reaktion wird durch Gleichung 13 beschrieben.



Aus dem entstandenen Natriumsilikat muss in einer weiteren Reaktion die Natronlauge zurückgewonnen werden, dabei fällt Siliziumdioxid aus.

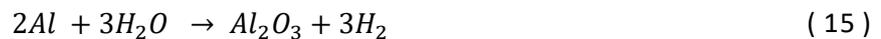


Der Wasserbedarf kann theoretisch durch das entstehende Wasser aus der Oxidation des gewonnenen Wasserstoffs gedeckt werden. Aus der nötigen Menge Natronlauge und den Abmaßen der einzelnen Apparaturen ergeben sich gravimetrische und volumetrische Leistungsdichten, wobei statt der Leistung der Wasserstoffmassenstrom verwendet wird. Die abgeschätzten Werte liegen bei 0,0083 g<sub>H<sub>2</sub></sub>/s für ein Kilogramm bzw. 0,019 g<sub>H<sub>2</sub></sub>/s für einen Liter Silizium [HERB03]. Hinzu kommen noch Tanks bzw.

Speicher für das Silizium und diverse Leitungen. Deren Massen sind jedoch unabhängig von der Leistung und richten sich nach der Reichweite und baulichen Gegebenheiten im Fahrzeug.

### 5.6.6 Wasserstoff aus Aluminium und Wasser

Aluminium ist mit 8,3% Vorkommen in der Erdkruste das dritthäufigste Element. Es bildet an Luft eine passivierende Oxidschicht, die eine weitere Oxidation verhindert. Um dennoch eine Reaktion mit Wasser herbeizuführen, muss man fein gemahlene Pulver verwenden oder man gibt beispielsweise Quecksilber hinzu, welches die Bildung der Passivschicht verhindert. Auch ein Verfahren mit Natronlauge zur Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit ist denkbar. Die angestrebte Bruttoreaktion ist in Gleichung 15 dargestellt.



Allerdings bildet Aluminium mit Wasser bevorzugt Aluminiumhydroxid, was zu einem erhöhten Wasserbedarf, der nicht mehr allein durch die Oxidation des erzeugten Wasserstoffs gedeckt werden kann und zu schweren Reaktionsprodukten führt.



Soll aus einer wässrigen Lösung Aluminiumoxid (Korund) ausgeschieden werden, muss die Temperatur auf 350 °C erhöht werden. Damit die Lösung nicht verdampft, muss parallel der Druck auf über 165 bar gesteigert werden. Diese Forderungen führen zu sehr schweren Apparaturen und schließen den Einsatz von Aluminium als Wasserstoffvektor in mobilen Anwendungen aus. [HERB03]

### 5.6.7 Vergleich der Wasserstoffquellen

Für einen Vergleich der Wasserstoffquellen wird die Masse des nutzbaren Wasserstoffs mit dem Heizwert multipliziert und sowohl auf die Masse und das Volumen der mitzuführenden Edukte als auch auf die Masse und das Volumen der zu speichernden Produkte bezogen. Für Ammoniak wird die Speicherung in Gasflaschen berücksichtigt. Für das Volumen der Feststoffe werden deren Dichten angenommen. Die Berücksichtigung von Schüttdichten oder Lösungsvermögen findet erst in der Konzepterstellung statt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-15 dargestellt.

Tabelle 5-15: nutzbare Energiedichten der Wasserstoffquellen

| Verfahren                   | Energiedichte bezogen auf mitgeführte |          |           |          |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------|-----------|----------|
|                             | Edukte                                |          | Produkte  |          |
|                             | in kWh/kg                             | in kWh/l | in kWh/kg | in kWh/l |
| Dekomposition Ammoniak      | 3,46                                  | 2,36     | -         | -        |
| thermische Zersetzung AB    | 4,53                                  | 3,53     | 4,96      | 4,12     |
| solvolytische Zersetzung AB | 9,71                                  | 7,57     | 4,85      | 6,98     |
| theoretische Zersetzung NBH | 7,05                                  | 7,54     | 4,05      | 9,98     |
| saure Hydrolyse NBH         | 1,65                                  | 2,70     | 1,74      | k.A.     |
| Metalloxidverfahren Zn      | 1,02                                  | 7,27     | 0,82      | 4,59     |
| Metalloxidverfahren Si      | 4,74                                  | 11,10    | 2,22      | 5,39     |
| Metalloxidverfahren Al      | 3,70                                  | 10,00    | 1,96      | 7,72     |

Als Vergleichskriterium sind die kleinsten Werte der Verfahren zu betrachten, da sowohl zu Fahrtbeginn (Edukte), als auch bei Fahrtende (zurückgehaltene Produkte) die Gewichts- u. Bauraumgrenzen eingehalten werden müssen.

Neben Wasserstoff entsteht bei der Ammoniakdekomposition lediglich Stickstoff, der einfach in die Umgebung entlassen werden kann. Zur Bewertung spielen daher nur die Energiedichten des Ammoniaks eine Rolle. Die Prozesse zur Wasserstofffreisetzung aus Ammoniak sind jedoch derzeit mit großen Verlusten behaftet, so dass der direkte Einsatz von Ammoniak in geeigneten Energiewandlern der Bereitstellung von Wasserstoff vorzuziehen ist.

Die thermische Zersetzung von Amminboran ist durch eine Wasserstoffabscheidung ohne zusätzliche Reaktionspartner gekennzeichnet. Dementsprechend wird das Produkt um die Masse des abgeschiedenen Wasserstoffs leichter. Die produktbezogenen Energiedichten sind dadurch höher, so dass zur Bewertung die Energiedichten des Edukts Amminboran auf Basis des freigesetzten Wasserstoffs herangezogen werden müssen.

Für die solvolytische Zersetzung werden als Edukt lediglich Amminboran und als Produkt Borsäure berücksichtigt. Das Wasser soll aus dem nachgeschalteten Oxidationsprozess zurückgeführt werden. Das Ammonium zerfällt in ein Proton und Ammoniak. Das Ammoniak wird anschließend dekomponiert und das Proton der solvolytischen Reaktion zugesetzt. Zwar wird der Stickstoff des Amminborans letztlich an die Umgebung abgegeben, gleichzeitig wird jedoch Sauerstoff aus der Atmosphäre über den Zwischenschritt der Wasserstoffoxidation an die Borverbindung angelagert. Das Produkt wird schwerer und die hohe Masse der Borsäure ist der limitierende Faktor für die gravimetrische Energiedichte des solvolytischen Zerfalls. Gegenüber der thermischen Zersetzung kann jedoch eine doppelt so hohe volumetrische Energiedichte erzielt werden. Da dieses Verfahren rein theoretisch ist, bestehen Unsicherheiten bezüglich der real darstellbaren Energiedichten. Sollte das Ammonium nicht weiterverwendet werden können oder ist zusätzliches Wasser erforderlich, führt dies zu einer deutlich reduzierten Energiedichte. Die erreichbaren Energiedichten für die konzipierten Amminboranprozesse werden zwischen den Werten der thermischen und der solvolytischen Zersetzung liegen.

Gleiches gilt für die realisierbaren Energiedichten der Natriumborhydridprozesse. Diese liegen zwischen den Werten der sauren Hydrolyse und der theoretisch optimalen Natriumborhydridzersetzung.

Die volumetrische Energiedichte der sauren Hydrolyse bezogen auf die Produkte lässt sich nicht angeben, da die Produkte in einer Suspension vorliegen und mitunter Nebenprodukte mit anderen Dichten gebildet werden.

Zink ist das schwerste der betrachteten Metalle bzw. Halbmetalle. Die hohe Masse führt zu geringen gravimetrischen Energiedichten. Darüber hinaus wird ebenfalls Luftsauerstoff aus der Wasserstoffoxidation an das Zink gebunden und als schweres Zinkoxid an Bord gespeichert.

Silizium ist weniger als halb so schwer wie Zink und ist durch seine Oxidationsstufe +IV in der Lage zwei Wassermoleküle zu spalten. Dadurch sind die Energiedichten des Edukts im Vergleich zu Zink sehr hoch. Entscheidend sind bei diesem Verfahren jedoch die Energiedichten bezogen auf das Produkt Siliziumdioxid, da analog zum Zink Luftsauerstoff im Oxid gespeichert wird und es somit schwerer wird.

Aluminium ist etwas leichter als Silizium, kann aber aufgrund der maximalen Oxidationsstufe +III weniger Wasser spalten und erreicht deshalb nicht die gravimetrische Energiedichte des Siliziums. Auch hier ist das gebildete Aluminiumoxid entscheidend für den Vergleich der Wasserstoffquellen.

Die bestgeeigneten Wasserstoffquellen sind entsprechend Tabelle 5-15 Amminboran, Natriumborhydrid und Silizium.

## 5.7 CO<sub>2</sub>-Speicherung

Die Eigenschaften von Kohlendioxid sind in Tabelle 5-16 dargestellt. Zum Speichern bietet sich die Verflüssigung von Kohlendioxid an. Da im Fahrzeug Temperaturen über 31 °C ohne aufwändige Kühlung oder Isolation nicht ausgeschlossen werden können, ist bei der Speicherauslegung mit der überkritischen Dichte und Drücken über 74 bar zu rechnen. Dazu müssen Druckbehälter und ein System zur Druckerzeugung im Fahrzeug mitgeführt werden.

Tabelle 5-16: Kohlendioxid-Eigenschaften [FISC07]

|   |         |                   |
|---|---------|-------------------|
| Molmasse                                      | 44,01   | kg/kmol           |
| Relative Dichte gasförmig (Luft = 1)          | 1,53    | -                 |
| Dichte gasförmig (15°C/ 1 bar)                | 1,85    | kg/m <sup>3</sup> |
| Dichte flüssig <sup>*)</sup> (-50°C/6,84 bar) | 1156    | kg/m <sup>3</sup> |
| (0°C / 34,86 bar)                             | 928,8   | kg/m <sup>3</sup> |
| (15°C / 50,85 bar)                            | 823,8   | kg/m <sup>3</sup> |
| (31,06°C /73,84 bar)                          | 463,7   | kg/m <sup>3</sup> |
| Dichte fest                                   | ≈ 1.550 | kg/m <sup>3</sup> |
| Siede- / Gefrierpunkt (bei 1 bar)             | -78,5   | °C                |
| Tripelpunkt                                   | 5,81    | bar               |
|   | -56,6   | °C                |
| Kritischer Punkt                              | 73,84   | bar               |
|   | 31,06   | °C                |

In den meisten infrage kommenden Energiewandlungsprozessen kommt Kohlendioxid nicht in Reinform vor, sondern ist Bestandteil eines Gasgemischs mit spezifischer Konzentration. Eine Speicherung des gesamten Gasstroms ist nicht praktikabel, so dass mittels Waschmitteln das Kohlendioxid aus dem Gasstrom entfernt wird. Anschließend gibt das Waschmittel das Kohlendioxid in Reinform ab und es kann gemäß Tabelle 5-16 in Druckbehältern gespeichert werden. Die Regeneration des Waschmittels ist jedoch aufwändig, so dass zu prüfen ist, ob das Speichern des voll beladenen Waschmittels in Tanks bzw. Behältern eine sinnvolle Alternative ist. Dadurch würde die Prozessstufe der Regeneration des Waschmittels entfallen, es müsste allerdings dafür eine Menge Waschmittel mitgeführt werden, die in der Lage ist, die über die gesamte Reichweite emittierte Kohlendioxidmenge aufzunehmen.

## 6 Konzepterstellung

Aus Kombination der vorgestellten Wirkprinzipien werden die Konzepte erstellt. Die besten Gesamtkonzepte werden unter Berücksichtigung der Verträglichkeit aus den besten einzelnen Wirkprinzipien aufgebaut. Zur Konzepterstellung werden verschiedene Methoden eingesetzt.

### 6.1 Konzepterstellung mittels Energiedichtegüte

Basierend auf der rückwärtsgerichteten Herangehensweise wird eine Kennzahl definiert, die eine Vorauswahl erleichtern soll. Die gravimetrische Energiedichtegüte (EDG) multipliziert die Wirkungsgrade der im Fahrzeug anfallenden Umwandlungen bis zum Rad mit der gravimetrischen Energiedichte des Energieträgers. Da das Laden der Speicher vor Fahrtantritt bzw. außerhalb des Fahrzeugs stattfindet, wird der Ladewirkungsgrad nicht berücksichtigt. Die Masse des Systems wird als Hauptauslegungskriterium verwendet. Die ausgewählten Konzepte werden anschließend auf Basis der volumetrischen Energiedichtegüte bewertet.

Tabelle 6-1: Morphologischer Kasten für hohe Energiedichtegüte

| Lösung          |                                | Kenngrößen       |                       | Konzept |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|--------------------------------|------------------|-----------------------|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
|                 |                                | Wirkungsgrad [%] | Energiedichte [Wh/kg] | 1       | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Energiewandler  | Elektromotor                   | 95               | -                     | x       | x | x | x | x | x | x | x | x | x  | x  |    |    |    |    |    |
|                 | Dieselmotor                    | 54               | -                     |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | x  |    |    |    |    |
|                 | Ottomotor                      | 38               | -                     |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | x  | x  |    |    |
|                 | Freikolbenlinear-generator     | 50               | -                     |         |   |   |   |   |   |   | x | x |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Gasturbine                     | 40               | -                     |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Dampfturbine                   | 53               | -                     |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Dampfmaschine                  | 40               | -                     |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Stirlingmotor                  | 40               | -                     |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Druckluftmotor                 | 85               | -                     |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | x  |
|                 | Hydraulikmotor                 | 85               | -                     |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | PEMFC                          | 50               | -                     |         |   |   |   |   |   |   | x |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | SOFC                           | 55               | -                     |         |   |   |   | x | x |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Redox-Flow                     | 87               | -                     | x       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | thermoelekt. Generator         | 10               | -                     |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Energiespeicher | Schwungrad                     | 97,5             | 100                   |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | x  |
|                 | Druckluft                      | 74               | 20                    |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | x  |    |
|                 | SuperCap                       | 97,5             | 7                     |         |   |   |   |   |   |   |   |   | x  |    |    |    |    |    |    |
|                 | Bleisäurebatterie              | 92               | 50                    |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | NiMH                           | 84               | 90                    |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | NaS                            | 95               | 170                   |         |   | x |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Lithium-Ion                    | 96               | 160                   |         |   |   | x |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Lithium-Polymer                | 95               | 140                   |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | ZnO                            | 77               | 220                   |         | x |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Wasserstoff (700 bar Komposit) | -                | 1600                  |         |   |   |   | x |   | x | x |   |    |    |    |    | x  |    |    |
|                 | Ammoniak inkl. Tank            | -                | 2800                  |         |   |   |   |   | x |   |   | x |    |    | x  |    |    | x  |    |
|                 | Silizium                       | -                | 9100                  |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Aluminium                      | -                | 8100                  |         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Vanadium-Elektrolyt inkl. Tank | -                | 7,5                   | x       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |

|                       |        |           |              |
|-----------------------|--------|-----------|--------------|
| Wirkungsgrad [%]      | 0 - 29 | 30 - 59   | 60 - 100     |
| Farbskala             |        |           |              |
| Energiedichte [Wh/kg] | 0 - 99 | 100 - 999 | 1000 - 10000 |

Die Energiedichtegüte berücksichtigt keine Massen der Apparaturen und eignet sich deshalb primär für den Vergleich von Systemen mit geringem apparativem Aufwand bei hohen geforderten Reichweiten.

Turbinen und Wärmekraftmaschinen mit externer Verbrennung weisen eine zu schlechte Dynamik auf oder fallen stark in ihrem Wirkungsgrad, wenn der Betriebspunkt nicht im Auslegungspunkt liegt. Um diese Nachteile zu umgehen, müssen Puffer oder ähnliche Systeme eingebaut werden, was den apparativen Aufwand erhöht. Aus diesem Grund werden Turbinen und Wärmekraftmaschinen mit externer Verbrennung für die Konzeptauswahl mittels Energiedichtegüte nicht berücksichtigt, sondern separat in Kapitel 6.2.1 untersucht. Gleiches gilt für die Reformier- und Waschverfahren. Deren apparativer Aufwand kann durch die Energiedichtegüte nicht erfasst werden, so dass deren Konzepte separat in den Kapiteln 6.2.2 und 6.3 erstellt werden.

Exemplarisch wird in den Gleichungen 17 und 18 mit den Werten aus Tabelle 6-1 die Energiedichtegüte für das Konzept 2 berechnet. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass für die Reichweite der Entladewirkungsgrad (vgl. Tabelle 6-1) und nicht der Zykluswirkungsgrad (vgl. Tabelle 5-4) relevant ist. Bei Gasen wird für die Energiedichte auch das Speichergewicht und -volumen berücksichtigt.

$$\mu_{EM} * \mu_{ZnO} * w_{ZnO} = EDG \quad (17)$$

$$0,95 * 0,77 * 220 \frac{Wh}{kg} = 161 \frac{Wh}{kg} \quad (18)$$

Tabelle 6-2: gravimetrische Energiedichtegüte ausgewählter Kombinationen

| Nummer | Konzept   | EDG in Wh/kg |
|--------|---|--------------|
| -      | Dieselmotor + Dieselkraftstoff                              | 5569         |
| 6      | Elektromotor + BSZ(SOFC) + NH <sub>3</sub>                  | 1463         |
| 9      | Elektromotor + FKLK + NH <sub>3</sub>                       | 1330         |
| 12     | Dieselmotor + NH <sub>3</sub>                               | 1238         |
| 14     | Ottomotor + NH <sub>3</sub>                                 | 1064         |
| 5      | Elektromotor + BSZ(SOFC) + H <sub>2</sub> (composit 700bar) | 836          |
| 7      | Elektromotor + BSZ(PEM) + H <sub>2</sub> (composit 700bar)  | 760          |
| 8      | Elektromotor + FKLK + H <sub>2</sub> (composit 700bar)      | 760          |
| 13     | Ottomotor + H <sub>2</sub> (composit 700bar)                | 608          |
| 2      | Elektromotor + ZnO  | 161          |
| 3      | Elektromotor + NaS  | 153          |
| 4      | Elektromotor + Li-Ion                                       | 146          |
| 16     | Schwungrad  | 98           |
| 15     | Druckluftmotor + Druckluft                                  | 13           |
| 11     | Elektromotor + SuperCap                                     | 6            |
| 1      | Elektromotor + Redox-Flow                                   | 6            |

Der Dieselmotor in Verbindung mit Dieselkraftstoff dient als Referenz und erreicht mit Abstand die größte Energiedichtegüte. Wird die geforderte Reichweite erhöht, fällt bei dieser Kombination die Gewichtszunahme durch den zusätzlichen Kraftstoff am geringsten aus. Dahinter folgen die Ammoniak-Konzepte. Bei diesen Konzepten ist die Gewichtszunahme durch eine erhöhte geforderte Reichweite mehr als dreimal so groß wie beim Referenzkonzept. Die Verbrennung von Ammoniak in einem Ottomotor weist unter den Ammoniak-Konzepten den schlechtesten Wirkungsgrad auf. Ihre Energiedichtegüte liegt dennoch über den Wasserstoff-Konzepten. Die Energiedichtegüte der Verbrennung von Wasserstoff im Ottomotor ist weniger als halb so groß wie die Energiedichtegüte des Ammoniak-Brennstoffzellenkonzepts, aber mehr als dreimal so groß wie die Energiedichtegüten der Batterie-Konzepte. Sie wird deshalb als Untergrenze für die Vorauswahl gewählt. Die Konzepte basierend auf Akkumulatoren, SuperCaps, Redox-Flow-Systemen, Druckluftspeichern oder Schwungrädern sind alle nicht geeignet um die geforderten Reichweiten bei akzeptablen Massen darzustellen. Unter Umständen können diese Technologien jedoch als Unterstützung anderer Konzepte z.B. für das Puffern von Leistungsspitzen eingesetzt werden.

Für die vorausgewählten Konzepte sind die volumetrischen Energiedichtegüten in Tabelle 6-3 dargestellt.

Tabelle 6-3: volumetrische Energiedichtegüte ausgewählter Kombinationen

| Nummer | Konzept   | EDG in Wh/kg | EDG in Wh/l |
|--------|---|--------------|-------------|
| -      | Dieselmotor + Dieselkraftstoff                              | 5569         | 4641        |
| 6      | Elektromotor + BSZ(SOFC) + NH <sub>3</sub>                  | 1463         | 993         |
| 9      | Elektromotor + FKLG + NH <sub>3</sub>                       | 1330         | 903         |
| 12     | Dieselmotor + NH <sub>3</sub>                               | 1238         | 840         |
| 14     | Ottomotor + NH <sub>3</sub>                                 | 1064         | 722         |
| 5      | Elektromotor + BSZ(SOFC) + H <sub>2</sub> (composit 700bar) | 836          | 401         |
| 7      | Elektromotor + BSZ(PEM) + H <sub>2</sub> (composit 700bar)  | 760          | 364         |
| 8      | Elektromotor + FKLG + H <sub>2</sub> (composit 700bar)      | 730          | 350         |
| 13     | Ottomotor + H <sub>2</sub> (composit 700bar)                | 608          | 291         |

Die Referenz aus Dieselmotor und Dieselkraftstoff erzielt eine 4-fach größere volumetrische Energiedichtegüte als das beste alternative Konzept. Das bedeutet, mit jeder Reichweitenvergrößerung wird das vierfache Zusatztankvolumen im Vergleich zur Referenz benötigt, wie folgende Beispielrechnung zeigt. Vereinfacht wird angenommen, dass alle Konzepte für 100 km Reichweite eine Energie von 140 kWh am Rad benötigen. Allgemein gilt der Zusammenhang in Gleichung 19.

$$V = \frac{\text{Energiebedarf}}{\text{volumetrische EDG}} \quad (19)$$

$$V_{\text{Diesel}} = \frac{140 \text{ kWh}}{4,64 \text{ kWh/l}} = 30,2 \text{ l} \quad (20)$$

$$V_{\text{Konzept 6}} = \frac{140 \text{ kWh}}{0,99 \text{ kWh/l}} = 141 \text{ l} \quad (21)$$

$$V_{\text{Konzept 5}} = \frac{140 \text{ kWh}}{0,4 \text{ kWh/l}} = 350 \text{ l} \quad (22)$$

Hier wird auch die größte Schwäche des Wasserstoffs (Konzept 5), seine geringe Dichte, deutlich. Der gespeicherte Ammoniak weist eine um 148% höhere volumetrische Energiedichte auf. Dabei wird angenommen, dass Ammoniak in handelsüblichen Stahlflaschen transportiert wird. Wasserstoff dagegen wird in fortschrittlichen Kompositbehältern mitgeführt. Eine Verbesserung der Ammoniakspeichertechnologie ist denkbar, wenn Ammoniak als Kraftstoff für mobile Anwendungen zum Einsatz kommt und die Nachfrage nach gewichts- und volumensparenden Speichern steigt. Erste alternative Ansätze zur Ammoniakspeicherung liefert die Firma Amminex. Ammoniak wird dabei an Strontiumchlorid gebunden und ist so als Feststoff transportabel. Das so genannte AdAmmine erreicht mit 2147 Wh/l sogar höhere volumetrische Speicherdichten und ist weniger gefährlich als reines Ammoniak. Die Ammoniakfreisetzung benötigt allerdings Energie, die gravimetrische Speicherdichte ist mit 1301 Wh/kg schlechter als die der Speicherung in Stahlflaschen und hinzu kommt noch das Gewicht und das Volumen der Kartuschen. [AMMI15]

## 6.2 Konzepterstellung basierend auf kohlenstofffreien Energieträgern

Analog zur Konzepterstellung mittels Energiedichtegüte werden auch in diesem Kapitel Konzepte erstellt, die nach Möglichkeit die effizientesten Wandler mit den energiedichtesten kohlenstofffreien Kraftstoffen verbinden. Darüber hinaus werden auch Kombinationen zugelassen, die zusätzliche Prozessschritte bzw. einen hohen apparativen Aufwand erfordern. Im Unterschied zu Kapitel 6.1 kann die Auswahl der Konzeptbestandteile nicht anhand einer einzelnen Kennzahl erfolgen. Je nach Konzeptaufbau verlieren Kennzahlen ihre Aussagekraft. So bezieht sich die Energiedichte des Aluminiums von 8100 Wh/kg auf den Heizwert eines feinen Pulvers. Wird das Oxidationsprodukt an Bord eines Fahrzeugs gespeichert, muss die freiwerdende Energie auf die Masse des Produkts bezogen werden. Dies ist auch ein Grund, warum elektrochemische Speicher wie die Aluminium-Luft-Batterie deutlich geringere Energiedichten aufweisen, als es der Heizwert des reinen Aluminiums vermuten ließe.

Die Synthese der Konzepte und die Wahl der einzelnen Bestandteile erfolgt in diesem Kapitel, wie auch in Kapitel 6.3, größtenteils intuitiv in Kombination mit der Methode des Voranschreitens. Teillösungen werden anhand problemspezifischer Kennzahlen bewertet und ausgewählt. Der Erfolg eines Konzepts kann jedoch erst nach der Konkretisierung abschließend bewertet werden.

Ausgangspunkt für die intuitive Lösungssuche sind die kohlenstofffreien Energieträger mit den höchsten Energiedichten sowie die effizientesten Energiewandler. Die optimale Lösung ist demnach der Einsatz von Metallen bzw. Halbmetallen zur Versorgung eines Elektromotors. Die direkte Versorgung des Elektromotors erfolgt über die elektrochemische Oxidation des Metalls. Zink-Luft-Batterien erreichen jedoch nur eine Energiedichte von 220 Wh/kg und liegen damit deutlich unter den 8100 Wh/kg des Aluminiums bzw. unter den 9100 Wh/kg des Siliziums. Selbst Aluminium-Luft-Batterien erreichen nur eine Energiedichte von 1300 Wh/kg bei hohen Selbstentladungsraten [YANG02]. Damit scheidet die direkte Versorgung durch elektrochemische Oxidation aus. Stattdessen wird der Elektromotor über einen Zwischenschritt mit Strom versorgt. Brennstoffzellen liefern am effizientesten elektrischen Strom, können jedoch keine Metalle verwerten. Zuvor muss mit Hilfe der Metalle Wasserstoff erzeugt

werden. Diese Idee wird in Kapitel 6.2.2 verfolgt. Alternativ wird der Elektromotor durch einen Generator versorgt, welcher seinerseits durch eine Verbrennungskraftmaschine angetrieben wird. Die Verbrennungskraftmaschine kann mit der erzeugten mechanischen Energie wahlweise die Räder auch direkt antreiben.

### 6.2.1 Halb-/Metalle in Verbrennungskraftmaschinen

Hier wird der Grundgedanke verfolgt, Metalle oder Halbmetalle mittels Luft zu einem Oxid zu verbrennen und aus der dabei freiwerdenden thermischen Energie in einer Kraftmaschine mechanische Arbeit zu gewinnen. Als Feststoffe sind sie auf Energiewandler mit externer Verbrennung angewiesen, da alle bisherigen Versuche einer internen Verbrennung nicht zufriedenstellend abliefen. Aus zwei Gründen wird bei der Konzeption auf einen Direktantrieb der Räder verzichtet. Stattdessen werden diese Konzepte mit Elektromotoren und einer Pufferbatterie ausgestattet. Erstens hat sich die Möglichkeit zur Rekuperation als probates Mittel zur Effizienzsteigerung erwiesen (vgl. Kapitel 2.3) und die dadurch erzielbaren Gewichtseinsparungen im Kraftstofftanksystem übertreffen das Zusatzgewicht (vgl. Kapitel 7.1). Zweitens entschärft die Entkopplung der Radantriebsleistung von der Energiewandlerleistung die Anforderungen an die Energiewandler bezüglich Anfahrmoment, Fahrbarkeit und dynamischem Verhalten. Da die möglichen Lösungen bisher oft nur im stationären Fall betrieben wurden und für den automotiven Einsatz nicht vorgesehen sind, liegen Informationen zum dynamischen Betrieb ohnehin nur begrenzt vor. Gemäß Tabelle 5-9 ist die Dampfturbine dem Stirlingmotor und der Dampfmaschine in Sachen Wirkungsgrad und Leistungsdichte überlegen und wird daher in diesem Konzept verwendet.

Für die effiziente Verbrennung von Feststoffen ist eine Oberflächenvergrößerung von Nöten. Dazu wird der Feststoff in Pulverform verbrannt. Das Pulver weist typischerweise eine Porosität von 40% auf [SCHU09]. Dadurch sinkt die volumetrische Energiedichte des Kraftstoffs um 40%. Dieser Nachteil wird durch das bedarfsgerechte Mahlen an Bord des Fahrzeugs vermindert, allerdings fällt dann der energetische Aufwand für die Zerkleinerung des Brennstoffs im Fahrzeug an und mindert den für den Antrieb zur Verfügung stehenden Anteil. Zudem muss Bauraum vorgehalten und das Apparategewicht zusätzlich transportiert werden. Der pulverförmig zerkleinerte Kraftstoff wird danach im Dampferzeuger verbrannt. Der überhitzte Dampf gelangt in die Turbine und wird anschließend kondensiert und flüssig zum Dampferzeuger zurückgepumpt. Die Asche des verbrannten Kraftstoffs wird in einem zweiten Behälter gespeichert. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 6-1 dargestellt.

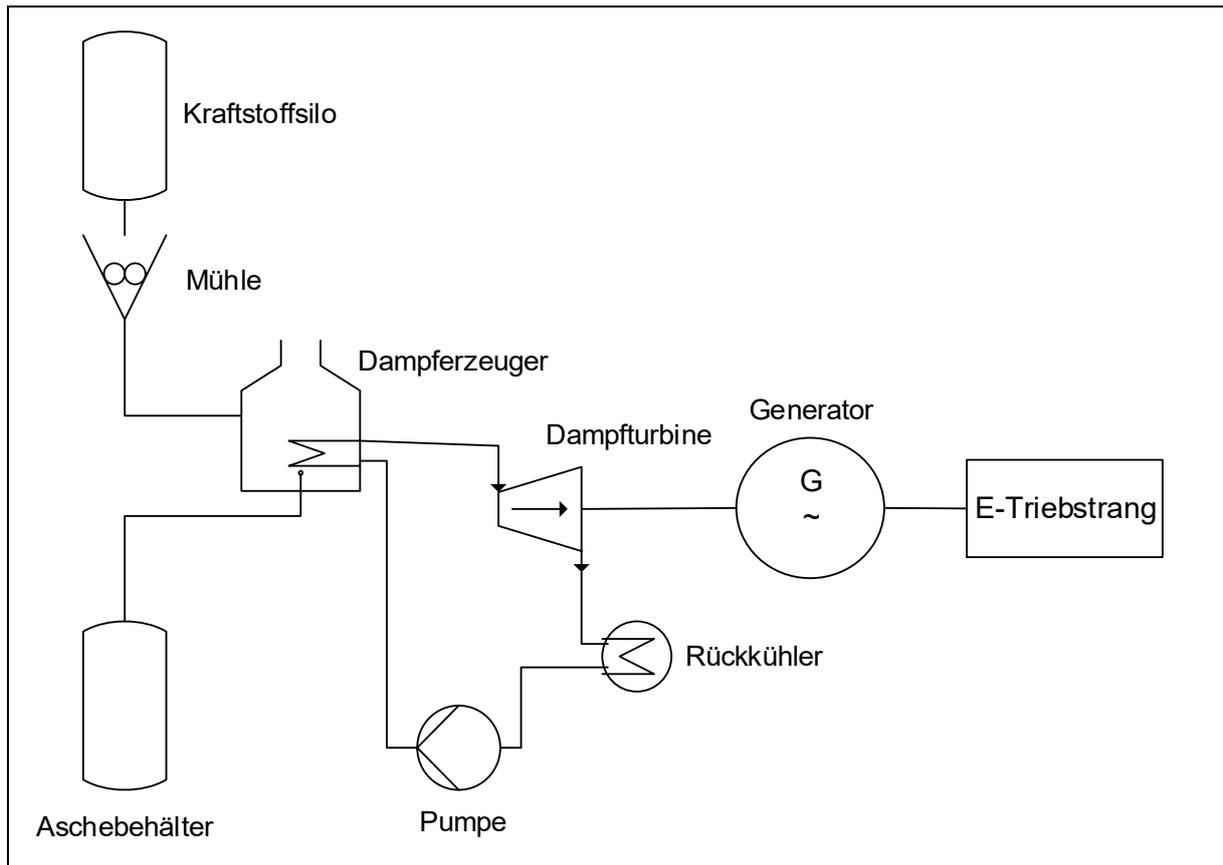


Abbildung 6-1: Schematischer Aufbau des Dampfturbinenantriebstrangs

Die Dimensionierungen der Mühle, des Dampferzeugers, der Dampfturbine, des Rückkühlers, der Pumpe und des Generators richten sich nach der geforderten Leistung und den Wirkungsgradverlusten innerhalb der Antriebseinheit. Der restliche E-Triebstrang wird analog zu den anderen Konzepten aufgebaut und in Kapitel 7.2.3 näher erläutert. Das Kraftstoffsilo und der Aschebehälter werden anhand der geforderten Reichweite ausgelegt. Die Konzeptkonkretisierung mit Wirkungsgradangaben und Leistungsdichten der einzelnen Komponenten erfolgt in Kapitel 7.4.

## 6.2.2 Kohlenstofffreie Energieträger zur Wasserstoffbereitstellung

Ausgehend von den Ergebnissen aus Kapitel 5.6.7 kommen für die Wasserstoffbereitstellung Amminboran, Natriumborhydrid und Silizium in Frage. Diese Stoffe setzen in einem Wasserstoffquellsystem (WQS) den Wasserstoff frei. Zur effizienten Nutzung gemäß Kapitel 6.1 wird der Wasserstoff anschließend in einem Freikolbenlineargenerator oder in einer Brennstoffzelle verstromt. Der Strom wird je nach Bedarf zwischengespeichert oder steht dem E-Triebstrang unmittelbar zur Verfügung. Die jeweiligen Verfahrenstechniken, die auch durch die Reaktionskinetiken bestimmt werden, begrenzen die Leistungen der einzelnen Wasserstoffquellsysteme. Unter Umständen sind zusätzliche Katalysatoren, Lösungsmittel und Prozessschritte nötig, um die geforderte Leistung darstellen zu können.

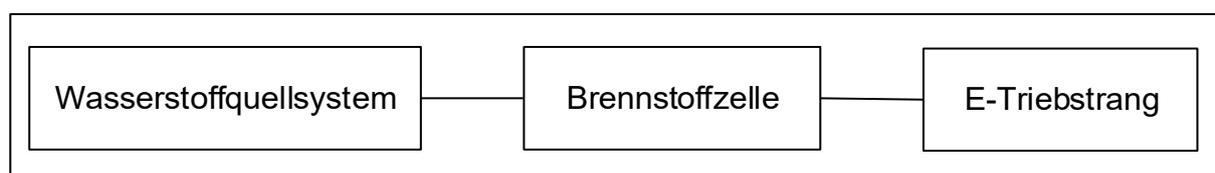


Abbildung 6-2: Schematische Antriebseinheit mit Wasserstoffquellsystem

Die Auswahl des Energiewandlers und die Auslegung des energieträgerspezifischen Wasserstoffquellsystems erfolgt in Kapitel 7.5.

### 6.3 Konzepterstellung unter Nutzung von Abscheideverfahren

Für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus dem Abgasstrom eines konventionellen Dieseltriebstrangs sind gemäß Kapitel 5.5.1 Waschkolonnen mit flüssigen Waschmitteln am besten geeignet. Die beiden größten Apparate in einer Rauchgaswäsche sind der Absorptionsturm und der Desorptionsturm. Für die Konzepterstellung sind sie demnach von besonderem Interesse. Die geometrische Auslegung des Absorptionsturmes wird durch die Abscheiderate und den Rauchgasvolumenstrom bestimmt. Der Absorptionsturm wird von unten vom Rauchgas durchströmt, während von oben das Waschmittel herabrieselt. Bei zu hohen Gasgeschwindigkeiten staut sich das Waschmittel auf oder es werden Waschmitteltropfen mitgerissen und aus dem Absorber ausgetragen, es kommt zum sogenannten Fluten. Der Absorber arbeitet nicht mehr effizient. Um dies zu verhindern, wird die Gasgeschwindigkeit unter einem kritischen Wert gehalten, indem bei einem gegebenen Gasvolumenstrom der Durchmesser des Absorbers entsprechend groß gewählt wird. Der konkrete Zusammenhang wird in Gleichung 23 beschrieben:

$$F = v_G * \sqrt{\rho_G} \quad (23)$$

[KARL06] gibt für den F-Faktor ausgedrückt in der Einheit  $\sqrt{Pa}$  üblich Werte zwischen 1 und 3 an. Bei höheren Werten kann ein Fluten nicht mehr ausgeschlossen werden. Die Gasgeschwindigkeit  $v_G$  ist der Quotient aus Volumenstrom und Querschnittsfläche des Absorbers,  $\rho_G$  ist die Gasdichte im Absorber. Für einen maximalen F-Faktor von  $3\sqrt{Pa}$  unter typischen Dieseltriebstrangbedingungen beträgt der Mindestdurchmesser des Absorbers 36 cm. Er ist folglich unabhängig vom gewählten Waschmittel.

Die Abscheiderate respektive der Stoffmengenstrom ist von der Stoffmengenstromdichte  $J$  und von der Phasengrenzfläche  $A$  zwischen Rauchgasstrom und Waschmittel abhängig.

$$\dot{n} = J * A \quad (24)$$

Zur Vergrößerung der Phasengrenzfläche werden strukturierte Packungen eingesetzt, die im Betrieb vom Waschmittel benetzt werden. Abbildung 6-3 zeigt eine strukturierte Packung der Firma Sulzer.



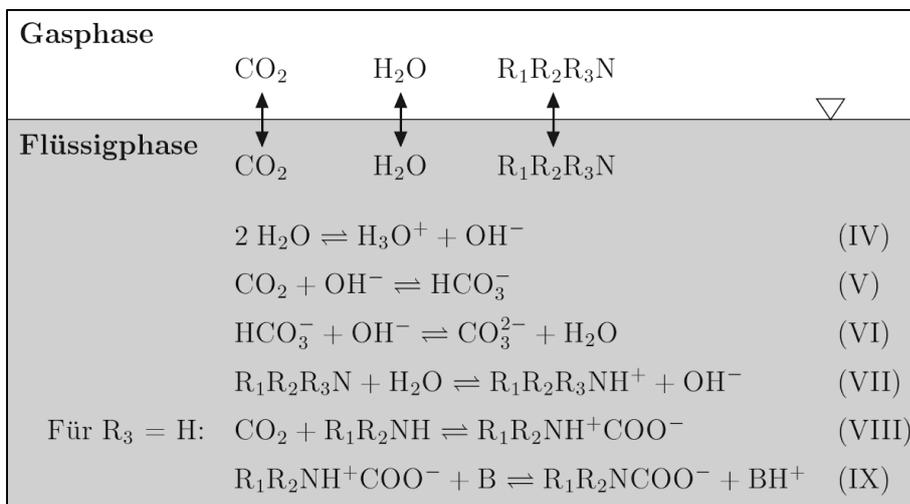
Abbildung 6-3: strukturierte Packung Sulzer MellaPak

Die Stoffmengenstromdichte  $J_{\text{CO}_2}$  ist definiert als Änderung der  $\text{CO}_2$ -Stoffmenge pro Zeit und Fläche und fasst dabei die Stoffströme aus den parallel ablaufenden Absorptions- und Desorptionsreaktionen zusammen. Im Gleichgewichtszustand sind die Stoffströme aus Absorption und Desorption gleich groß und  $J_{\text{CO}_2}$  ist demzufolge Null. In Gleichung 25 sind die Zusammenhänge dargestellt.

$$J_{\text{Abs}} = \frac{p_{\text{CO}_2}}{H_e} * \sqrt{k_{ov} * D} \quad (25)$$

Der Term  $\frac{p_{\text{CO}_2}}{H_e}$  steht für das Henry-Gesetz und ist ein Maß für das Verhältnis der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Flüssigphase und dem  $\text{CO}_2$ -Partialdruck in der Gasphase.  $k_{ov}$  beschreibt die Reaktionskinetik, während der Diffusionskoeffizient  $D$  den Stofftransport abbildet.

Treibende Kraft für den Absorptionsvorgang ist der  $\text{CO}_2$ -Partialdruck in der Gasphase [MAUN13]. Reagiert das gelöste  $\text{CO}_2$  in der Flüssigkeit, verringert sich die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Flüssigphase und es sinkt gemäß dem Henry-Gesetz der  $\text{CO}_2$ -Partialdruck in der Gasphase. Zum Verständnis der Reaktionskinetik und der darauf aufbauenden Konzepterstellung, sind Kenntnisse über die beteiligten Gleichgewichtsreaktionen unabdingbar. Die maßgeblichen Reaktionen sind in Abbildung 6-4 dargestellt.

Abbildung 6-4: Phasengleichgewicht und Reaktionsschema in der Flüssigphase für das System  $\text{H}_2\text{O}-\text{R}_1\text{R}_2\text{R}_3\text{N}-\text{CO}_2$  [NOTZ09]

Die Gleichgewichtslagen und Reaktionsgeschwindigkeiten sind für jede Reaktion charakteristisch. Sie können aber durch Temperatur- oder Konzentrationsänderungen verändert werden. Die Zugabe einer Base zur Lösung erhöht beispielsweise die  $\text{OH}^-$ -Konzentration und beeinflusst direkt Reaktion (V).

Lediglich die Auslegung des Durchmessers der Absorptionskolonne wird direkt vom Abgasmassenstrom und somit vom Antriebsstrang beeinflusst. Alle anderen Größen wie die Höhen der Absorptions- u. Desorptionskolonnen oder der Waschmittelmassenstrom werden von der Prozessführung bestimmt. Dabei beeinflussen sich die Größen gegenseitig, was unter Umständen zu Zielkonflikten führt.

### 6.3.1 Abgaswäsche mit Waschmittelregeneration

Ausgehend vom konventionellen Dieselantriebsstrang ist die gedankliche Erweiterung des Systems um eine Waschkolonne mit anschließender Regeneration des chemischen Waschmittels naheliegend. Während der Regeneration wird das  $\text{CO}_2$  ausgetrieben und anschließend verdichtet und in Drucktanks flüssig bzw. überkritisch gespeichert. Das regenerierte Waschmittel wird der Waschkolonne zugeführt. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 6-5 dargestellt.

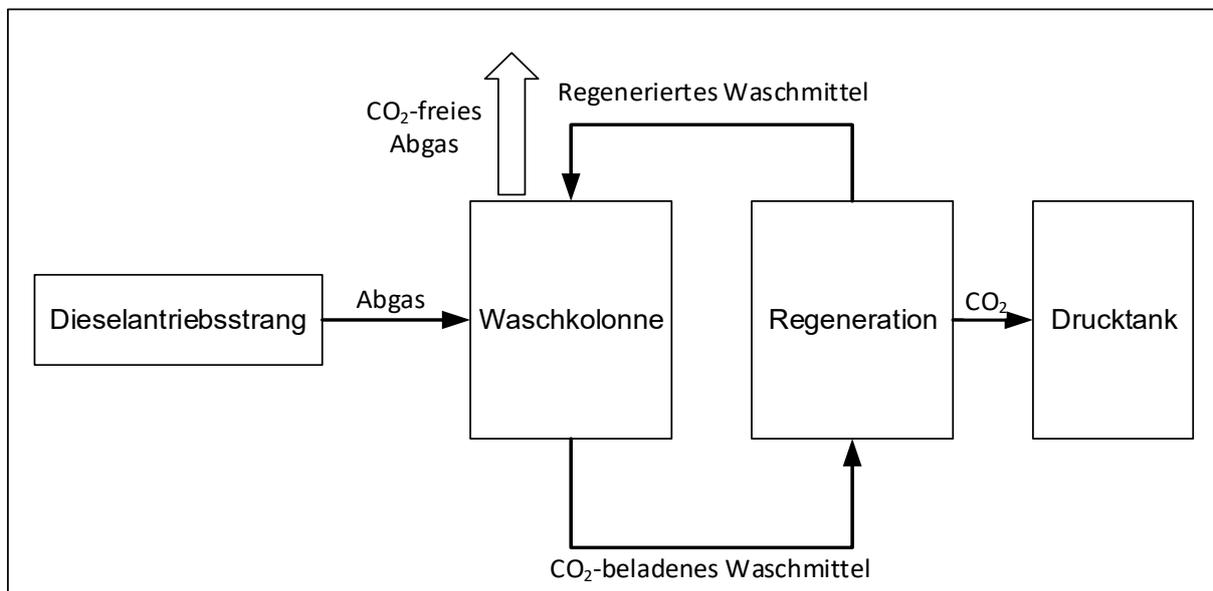


Abbildung 6-5: Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche und Regeneration

### 6.3.2 Abgaswäsche ohne Waschmittelregeneration

Da die Regeneration von chemischen Waschmitteln viel Energie benötigt und einen gewissen apparativen Aufwand bedeutet, wird in diesem Konzept auf die Regeneration verzichtet und stattdessen eine Waschmittelmenge mitgeführt, die in der Lage ist, das über die gesamte Reichweite anfallende  $\text{CO}_2$  zu binden. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 6-6 dargestellt.

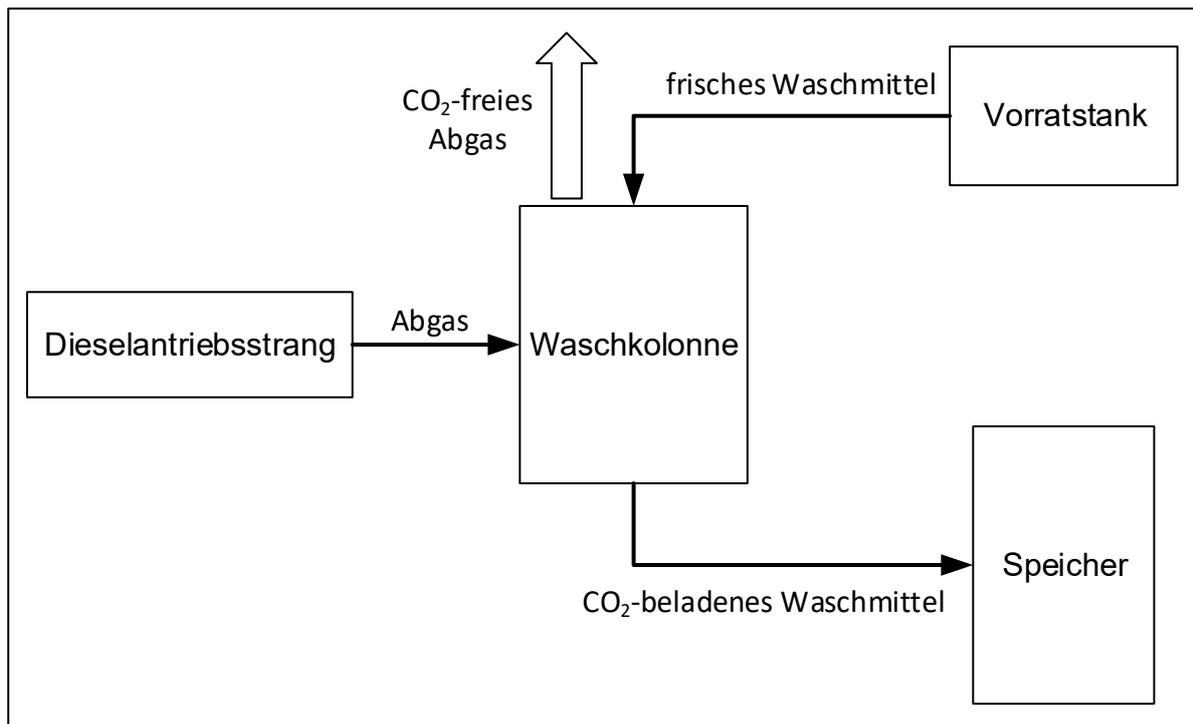


Abbildung 6-6: Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche ohne Regeneration

Der Erfolg dieses Konzepts hängt hauptsächlich von der Wahl des Waschmittels ab. Das Vorgehen zur Auswahl unterscheidet sich stark von der üblichen Herangehensweise bei der Waschmittelauswahl für Kraftwerksprozesse. Das Kriterium der energetisch günstigen Waschmittelregeneration entfällt, stattdessen rücken die gewichtsbezogene Beladungskapazität und eine ausreichend hohe Absorptionsgeschwindigkeit auch bei hohen Beladungen in den Vordergrund. Idealerweise sollte das Waschmittel in wenig verdünnter Form verwendet werden können, um die gravimetrische Aufnahmekapazität der Waschlösung zu maximieren. Die Mindestverdünnung wird durch Korrosionsprozesse vorgegeben. Diese Aspekte werden in den meisten Untersuchungen zu Waschmitteln jedoch nicht detailliert betrachtet. Deshalb werden hier allgemeine Erkenntnisse aus veröffentlichten Untersuchungen auf die zur Wahl stehenden Waschmittel unter angestrebten Einsatzbedingungen übertragen. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird in der Literatur oftmals die Stoffstromdichte auf den vorherrschenden Partialdruck normiert und als Massentransferrate  $r$  angegeben.

$$r = \frac{J}{p_i} \quad (26)$$

Die Massentransferrate eignet sich demnach zum Vergleich der Waschmittel bei gleicher Temperatur und gleicher Verdünnung. Eine hohe Massentransferrate beschreibt eine schnell ablaufende Reaktion. Dadurch kann die Verweilzeit in der Waschkolonne reduziert werden, was wiederum eine geringere Bauhöhe des Reaktors ermöglicht.

Tabelle 6-4: Massentransferraten und maximale Beladungen bei 30 °C, 1 mol Amin/l Waschmittel und pCO<sub>2</sub>=0,14 bar [eigene Darstellung nach MAUN13]

| Stoff  | MEA    | DGA    | DEA    | MMEA   | EMEA   | Meg    | DA     | EDA    | DETA   | CA     | Py     | Pip    | Pz     | MI     |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Massentransferrate unbeladen in mol CO <sub>2</sub> /(s*bar*m <sup>2</sup> ) | 0,105  | 0,105  | 0,067  | 0,181  | 0,143  | 0,124  | 0,210  | 0,176  | 0,167  | 0,133  | 0,286  | 0,252  | 0,233  | 0,148  |
| max. Beladung in mol CO <sub>2</sub> pro g                                   | 0,014  | 0,009  | 0,008  | 0,013  | 0,011  | 0,004  | 0,014  | 0,020  | 0,017  | 0,010  | 0,012  | 0,013  | 0,012  | 0,009  |
| Bewertungskennzahl   | 0,0014 | 0,0009 | 0,0006 | 0,0023 | 0,0015 | 0,0005 | 0,0029 | 0,0035 | 0,0028 | 0,0014 | 0,0036 | 0,0032 | 0,0028 | 0,0013 |

In Tabelle 6-4 sind verschiedene Waschmittel mit ihren Massentransferraten im unbeladenen Zustand und die Gleichgewichtslage für einen definierten Betriebszustand bezogen auf die Masse des Waschmittels dargestellt. Zur besseren Bewertbarkeit wird eine Kennzahl als Produkt aus den beiden zuvor genannten Größen eingeführt. Je größer diese Bewertungszahl ist, desto besser schneidet das Amin ab. Pyrrolidin (Py) erreicht die höchste Massentransferrate im unbeladenen Zustand und liegt bei der gravimetrischen Beladungskapazität im Mittelfeld. Begünstigt durch die geringe molare Masse erreicht Ethylendiamin (EDA) die höchste gravimetrische Beladungskapazität. Gemäß der eingeführten Kennzahl sind Pyrrolidin (Py), Ethylendiamin (EDA) und Piperidin (Pip) die geeignetsten Kandidaten für eine CO<sub>2</sub>-Abgaswäsche ohne Waschmittelregeneration. Für die gewählten Amine sind in Tabelle 6-5 die Waschlösungsmengen (WL) bezogen auf ein Kilogramm CO<sub>2</sub> bzw. einen Kilometer Reichweite des konventionellen Dieselantriebs dargestellt. Je nach Verdünnung der Lösung bzw. der Waschmittelkonzentration variiert die mitzuführende Waschlösungsmasse. Im Einzelfall muss für die verschiedenen Amine die Grenzkonzentration bestimmt werden, bei der durch korrosive Eigenschaften der Lösung die Prozessführung gefährdet wird.

Tabelle 6-5: nötige Waschlösungsmasse beim Einsatz von EDA, Py und Pip bei Beladung bis zum Gleichgewichtszustand

| Verdünnung | EDA                      |          | Py                       |          | Pip                      |          |
|------------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|
|            | kg WL/kg CO <sub>2</sub> | kg WL/km | kg WL/kg CO <sub>2</sub> | kg WL/km | kg WL/kg CO <sub>2</sub> | kg WL/km |
| 1 mol/l    | 18,8                     | 16,4     | 25,7                     | 22,4     | 21,2                     | 18,5     |
| 5 mol/l    | 3,8                      | 3,3      | 5,1                      | 4,5      | 4,2                      | 3,7      |
| 30 Ma-%    | 3,8                      | 3,3      | 6,1                      | 5,3      | 6,0                      | 5,3      |

Nahe dem Gleichgewichtszustand sinkt die Reaktionsgeschwindigkeit auf fast null, so dass die Beladung der Waschlösung im Fahrzeugeinsatz nie den Gleichgewichtszustand erreichen wird, wenn die zur Verfügung stehende Zeit und Oberfläche begrenzt ist. Außerdem verschiebt sich der Gleichgewichtszustand zu niedrigeren Beladungen mit steigender Waschmittelkonzentration. Dementsprechend sind die Angaben in Tabelle 6-5 Mindestwerte, die im Fahrzeugeinsatz mehr oder weniger stark überschritten werden. Eine genauere Betrachtung erfolgt im Kapitel 7.6.

### 6.3.3 Dampfreformierung mit nachgeschalteter CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus dem Anodenabgas einer Brennstoffzelle

Für eine Abscheidung liegt das CO<sub>2</sub> am Ende des Energiewandlungsprozesses idealerweise hochkonzentriert bzw. in leicht anzureichernder Form vor. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn als Produkte lediglich Wasser und CO<sub>2</sub> entstehen und die Oxidation des Kohlenstoffs in Abwesenheit von Stickstoff oder anderen verdünnenden Gasen erfolgt. In Abbildung 6-7 ist ein selbst erstelltes Konzept gezeigt,

welches nach diesen Gesichtspunkten generiert wurde. In einem Dampfreformer werden Kohlenwasserstoffe und Wasserdampf zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgesetzt. Auf eine partielle Oxidation wird an dieser Stelle verzichtet, um den Gasstrom nicht unnötig mit Stickstoff aus der Luft zu verdünnen. Anschließend wird im Wassergas-Shift-Reaktor das Kohlenmonoxid mit Wasserdampf zu  $\text{CO}_2$  umgesetzt. Um für die PEMFC schädliche Spuren von Kohlenmonoxid zu beseitigen, wird eine selektive Oxidation durchgeführt. Der nötige Sauerstoff wird mit der Umgebungsluft zugeführt. Der benötigte Massenstrom ist aber so gering, dass nur wenig Stickstoff in den Gesamtgasstrom eingetragen wird. Das Gasmisch wird der Brennstoffzelle auf der Anodenseite zugeführt. Es wird vorausgesetzt, dass das  $\text{CO}_2$  die PEMFC nicht schädigt. Der Umsetzungsgrad der Brennstoffzelle liegt unter 100%, so dass im Anodenabgas neben Stickstoff und  $\text{CO}_2$  auch noch Wasserstoff enthalten ist. Das Anodenabgas wird nicht mit dem Kathodenabgas zusammengeführt, sondern in einem Nachbrenner mit Umgebungsluft verbrannt. Das enthaltene Wasser wird auskondensiert und das Stickstoff- $\text{CO}_2$ -Gemisch komprimiert und gespeichert. Mit der Wärme aus dem Nachbrenner wird der Dampfreformer gespeist. Das Produktwasser wird aufgefangen und den Reaktoren zugeführt.

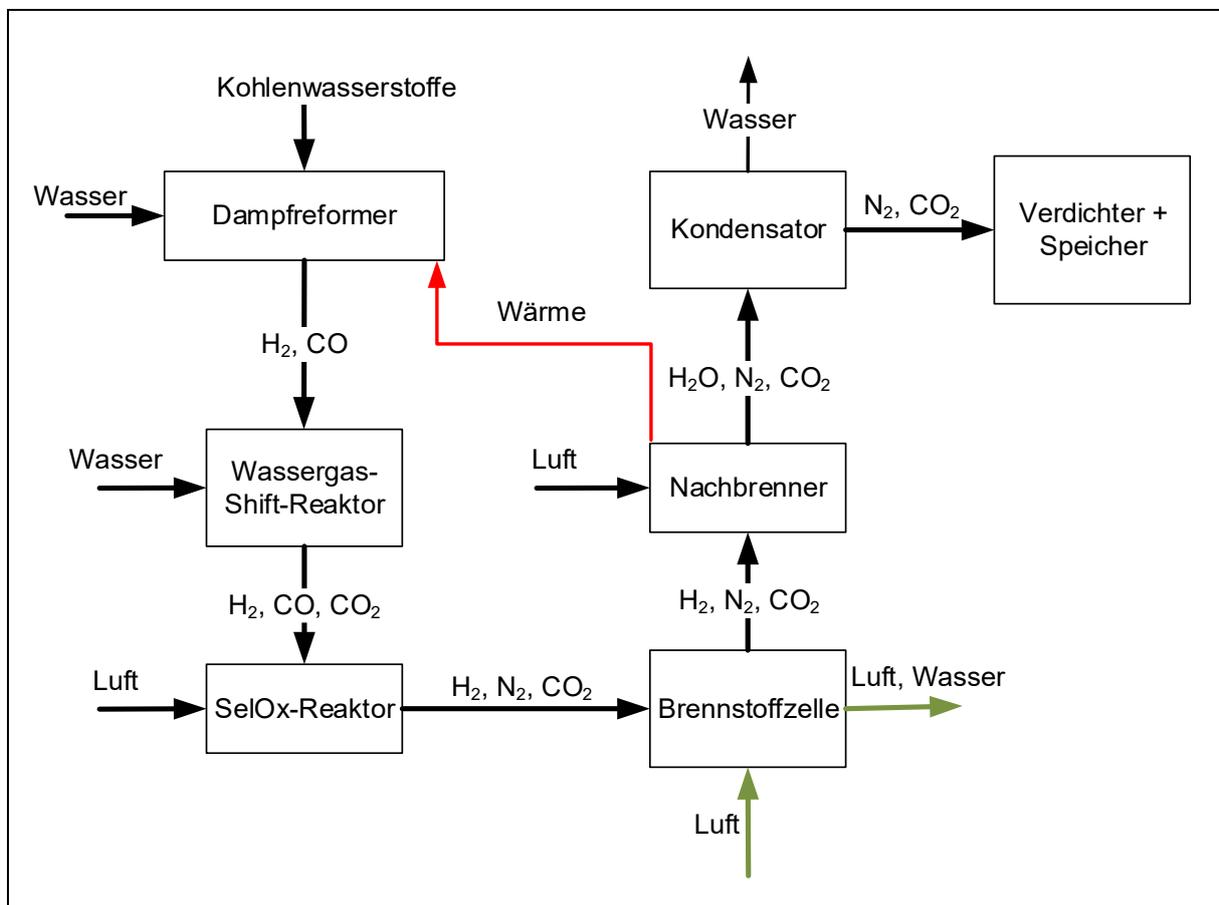


Abbildung 6-7: Fließschema für einen Dampfreformer mit Brennstoffzelle und  $\text{CO}_2$ -Speicherung

Für den Einsatz in einem Fahrzeug stellen die hohen Temperaturen von bis zu  $900\text{ }^\circ\text{C}$  bei 30 bar im Dampfreformer ein großes Problem dar [BRAN06]. Neben ausreichend Festigkeit müssen die Reformer zudem über eine sehr gute thermische Isolation verfügen, da sämtliche Wandwärmeverluste über den Nachbrenner auszugleichen sind und somit den Wirkungsgrad beeinflussen. Der Bauraumbedarf durch die Isolation wird so groß, dass die Eignung für den Fahrzeugeinsatz in Frage gestellt und daher auf eine Konkretisierung des Konzepts verzichtet wird.

### 6.3.4 Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft mit anschließender Abgaswäsche

Gemäß Kapitel 5.5.1.4 ist eine Sauerstoffanreicherung auf 50% im Permeat einer Membran wirtschaftlich darstellbar [OHLR06]. Die Betriebsstrategie des Motors wird auf eine stöchiometrische Verbrennung ausgelegt, so dass kein Restsauerstoff im Abgas vorhanden ist und somit die  $\text{CO}_2$ -Konzentration maximal wird. Unter Annahme eines H/C-Verhältnisses von 1,95 im Dieselmotorkraftstoff ergeben sich Konzentrationswerte von 28,2% für Wasser und 28,9% für  $\text{CO}_2$ . Durch Auskondensieren des Wassers erhöht sich die  $\text{CO}_2$ -Konzentration auf 40,2%. Gleichzeitig verringert sich durch die Sauerstoffanreicherung der Mindestluftbedarf von ca. 15 auf 6,4 kg Luft pro kg Kraftstoff. Es sinkt der Abgasvolumenstrom, so dass der Durchmesser der Absorptionskolonne kleiner ausgeführt werden kann.

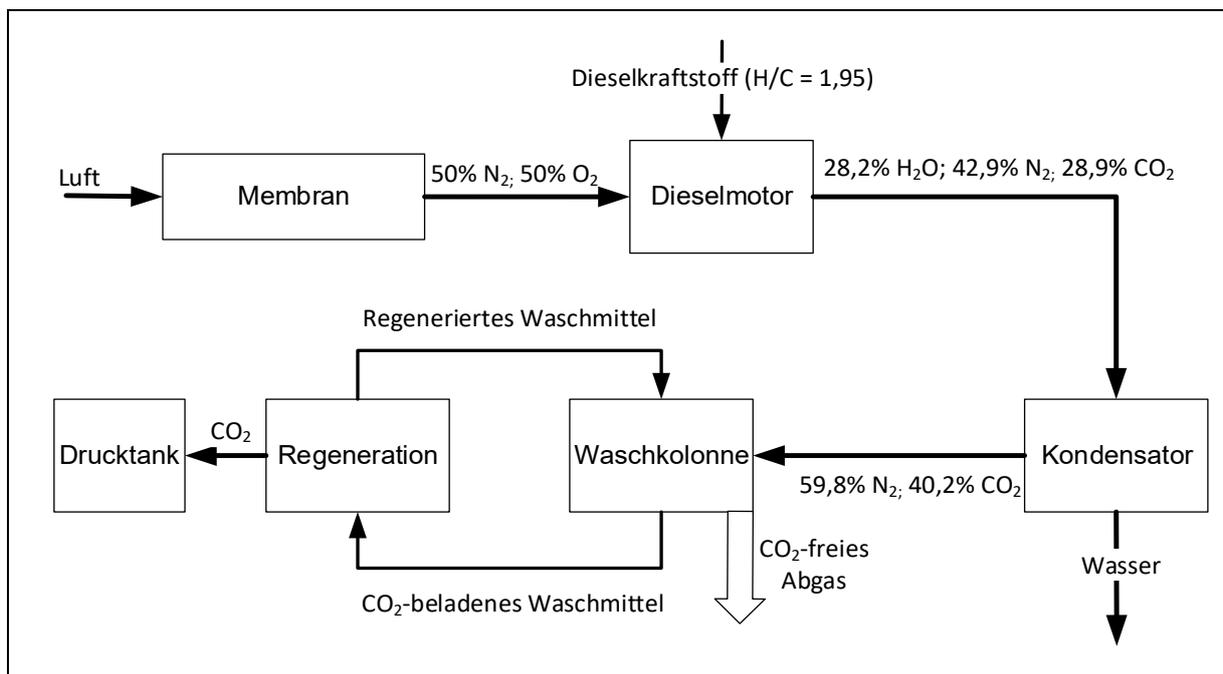


Abbildung 6-8: Fließschema für eine Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft mit anschließender Abgaswäsche

Die Komplexität einer Antriebseinheit mit Dieseltriebstrang und anschließender Abgaswäsche mit Regeneration wird in diesem Konzept durch die vorgeschaltete Luftzerlegung weiter erhöht. Neben fehlenden Daten für die Luftzerlegung und für die Abgaswäsche unter den vorherrschenden Bedingungen liegt auch der stöchiometrische Betrieb des Dieselmotors außerhalb der üblichen Spezifikationen. Ohne Anpassung des Brennverfahrens wird der Dieselmotor aufgrund der diffusionsgesteuerten Verbrennung in erheblichem Maß rußen. Aus diesem Grund wird von einer Konkretisierung des Konzepts abgesehen.

## 7 Konzeptkonkretisierung

Um eine Bewertung vornehmen zu können, wird die Antriebseinheit entsprechend der Anforderungsliste in einer Standard- und in einer Minimalkonfiguration aufgebaut. Eine umfassende Recherche ermöglicht Aussagen über die Masse, den Bauraum und etwaige Treibhausgasemissionen der Konzepte. Die Kosten werden bewusst vernachlässigt, da künftige Stückzahleffekte, Rohstoffkosten und steuerliche Aspekte nicht benannt werden können bzw. deren Recherche und Betrachtung den Umfang dieser Arbeit sprengen würden.

### 7.1 Rekuperation der Bremsenergie

Basis für die Dimensionierung der Antriebseinheit ist der Energie- bzw. Leistungsbedarf am Rad. Erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf hat dabei die Rekuperationsfähigkeit des Systems. Gemäß Kapitel 2.3 beträgt der Unterschied im Energiebedarf zwischen vollständiger und keiner Rekuperation der Bremsenergie ca. 37%. Vollständige Rekuperation ist jedoch nur möglich, wenn die Wirkungsgrade der beteiligten Komponenten 100% betragen und die geforderte Bremsleistung zu jeder Zeit unter deren Leistungsgrenzen liegt. Darüber hinaus muss der Energiepuffer ausreichend Leistung und freie Kapazität aufweisen, um die rekuperierte Energie speichern zu können. Daraus lässt sich folgender Zusammenhang formulieren:

$$\eta_{\text{Rekuperation}} = \eta_{\text{physikalisch}} * \eta_{\text{Leistung}} * \eta_{\text{Kapazität}} \quad (27)$$

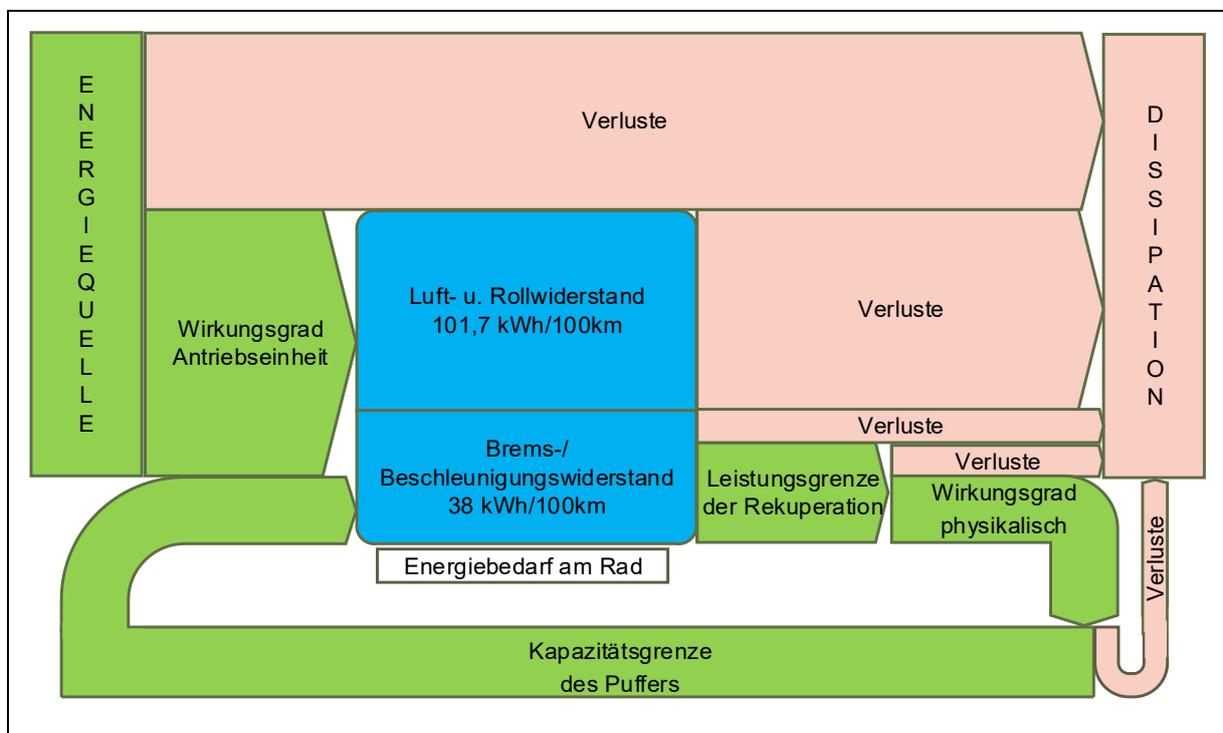


Abbildung 7-1: Schema der Energieflüsse zur Bestimmung des Energiebedarfs (vgl. Kapitel 2.3)

Die Wirkungsgrade  $\eta_{Leistung}$  und  $\eta_{Kapazität}$  sind keine Wirkungsgrade im eigentlichen Sinn, sondern beschreiben die Anteile an Bremsenergie, die durch Leistungs- bzw. Kapazitätsbeschränkungen nicht rekuperiert werden können. Der physikalische Wirkungsgrad basiert auf den Wirkungsgraden der eingesetzten Technologien und ist mit der Festlegung des Antriebsstrangs definiert. Der Leistungs- und der Kapazitätswirkungsgrad werden ebenfalls durch die Festlegung des Antriebsstrangs beeinflusst. Der endgültige Wert kann jedoch nur in Verbindung mit einem Brems- bzw. Fahrprofil ermittelt werden.

Die Leistung des Energiepuffers wird mit der maximalen Antriebsleistung bei kurzzeitiger Überlastung der Elektromotoren bzw. Generatoren gleichgesetzt und anhand der Leistungsdichte werden Masse und Volumen bestimmt. Für die Berechnung der rekuperierbaren Bremsenergiemenge wird die Leistungsgrenze auf die maximale Antriebsleistung des Generators ohne kurzzeitige Überlastungsfähigkeit beschränkt. Diese Annahmen führen zu konservativen Ergebnissen.

Der Beanspruchungsraum für das Rekuperationssystem wird durch zwei Zustände aufgespannt. Ein moderner Lkw bremst von 80 km/h innerhalb von 5,5 s bis zum Stillstand. Dies entspricht einer Bremsleistung von 1800 kW und einer Energiemenge von 2,75 kWh. [WABC10] Diese Bremsleistung kann jedoch nur teilweise rekuperiert werden, da die Leistung der Elektromotoren begrenzt ist. Werden die Elektromotoren auf eine Dauerleistung von 320 kW ausgelegt, können sie kurzzeitig bis zu 850 kW Bremsleistung rekuperieren [BRUS 13b]. Für die Bremsdauer von 5,5 s entspricht das 1,3 kWh. Der zweite Zustand ergibt sich aus §41 der StVZO. Demnach muss ein Fahrzeug in der Lage sein, vollbeladen auf einer Strecke von 6 km bei einem Gefälle von 7% eine Geschwindigkeit von 30 km/h zu halten. Für ein Gesamtgewicht von 40 t entspricht das einer Dauerbremsleistung von 228 kW und einer Energiemenge von 45,6 kWh. Zwischen den geforderten Pufferkapazitäten der zwei Zustände liegt der Faktor 38. Ein System, was diesen Anforderungen gerecht wird, ist für den Großteil der Einsatzzeit überdimensioniert und verschwendet Bauraum und Transportkapazität. Um den optimalen Kompromiss zwischen der Abdeckung aller Betriebszustände und der Forderung nach geringer Masse und Volumen zu finden, wird das Fahrprofil des Messfahrzeugs aus Kapitel 2.3 ausgewertet. Die Überschreitungshäufigkeit der Leistungsgrenze bzw.  $\eta_{Leistung}$  wird mit folgendem Vorgehen bestimmt. Aus dem 1-Hz Geschwindigkeitsverlauf des 40 t-Lkws auf der Referenzstrecke wird der Bremsleistungsverlauf errechnet. Luft-, Roll- und Steigungswiderstände werden vernachlässigt. Im Standardfall beträgt die Leistungsgrenze der Elektromotoren und demzufolge der Rekuperationsbremsanlage 320 kW, für die Minimalkonfiguration sind es 220 kW. Die nicht verwertbare Bremsenergie wird mit der gesamten Bremsenergie ins Verhältnis gesetzt. Demnach können ca. 94% der Bremsenergie mit einer Standardkonfiguration und 88,8% mit der Minimalkonfiguration für die Rekuperation genutzt werden. Bremsungen im Gefälle, bei denen die Fahrzeuggeschwindigkeit nicht abnimmt, werden nicht erfasst, hätten aber eher einen steigernden Einfluss auf den leistungsbeschränkten Rekuperationsgrad  $\eta_{Leistung}$ , da die dort auftretenden maximalen Bremsleistungen bei ca. 230 kW liegen, vgl. Anforderungen an Dauerbremsen §41 der StVZO.

Die optimale Kapazität des Energiepuffers wird mit einem vereinfachten Modell bestimmt. Zunächst werden eine Kapazität und ein Anfangsladezustand festgelegt. Die positive Motorleistung wird solange dem Energiepuffer entnommen bis er leer ist. Wird die Motorleistung des konventionellen Fahrzeugs negativ, kann Bremsenergie rekuperiert werden. Da aber in diesem Betriebspunkt nicht klar ist, ob weitere Dauer- oder Betriebsbremsen im Einsatz sind, wird die Bremsleistung basierend auf dem Geschwindigkeitsverlauf zusätzlich betrachtet. Der betragsmäßig größere Wert aus Motorleistung und

Bremsleistung wird dem Energiepuffer zugeführt. Ist dessen Kapazität überschritten, ist die Bremsenergie nicht mehr rekuperierbar und muss verworfen werden. Aus dem Verhältnis aus verworfener und gesamter Bremsenergie über die Fahrstrecke wird  $\eta_{Kapazität}$  bestimmt. Die Kapazität wird solange variiert bis der gewünschte Wert für  $\eta_{Kapazität}$  erreicht wird.

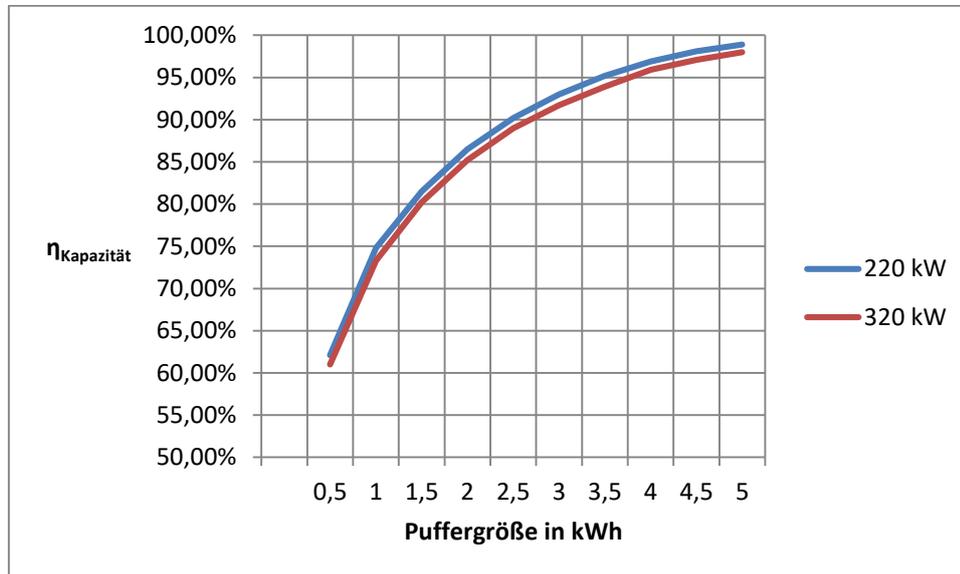


Abbildung 7-2:  $\eta_{Kapazität}$  in Abhängigkeit von der Puffergröße

Der in Abbildung 7-2 erkennbare Unterschied zwischen dem Verlauf für die Standardkonfiguration mit 320 kW Antriebs- respektive Bremsleistung und dem Verlauf für die Minimalkonfiguration mit 220 kW Antriebs- bzw. Bremsleistung ist auf den Einfluss von  $\eta_{Leistung}$  zurückzuführen.  $\eta_{Leistung}$  ist für die Minimalkonfiguration geringer, die am Puffer ankommende rekuperierte Bremsenergiemenge ist kleiner und folglich wird die Kapazitätsgrenze des Puffers seltener überschritten. Dadurch ist bei gleicher Puffergröße  $\eta_{Kapazität}$  für die Minimalkonfiguration größer. Die Energiepuffer werden auf 2,5 kWh für die Minimalkonfiguration und 3 kWh für die Standardkonfiguration ausgelegt. Der Kapazitätswirkungsgrad beträgt gemäß Abbildung 7-2 in der Minimalkonfiguration 90,2% und 91,7% in der Standardkonfiguration.

Tabelle 7-1: Auslegung des Energiepuffers

|                    |                   | Minimal | Standard |
|--------------------|-------------------|---------|----------|
| <b>Anforderung</b> | Kapazität in kWh  | 2,5     | 3,0      |
|                    | Leistung in kW    | 585,0   | 850,0    |
| <b>Supercap</b>    | Kapazität in kWh  | 2,5     | 3,0      |
|                    | Leistung in kW    | 1785,7  | 2142,9   |
|                    | Masse in kg       | 357,1   | 428,6    |
|                    | Wirkungsgrad in % | 95,0    | 95,0     |
| <b>Li-Ion</b>      | Kapazität in kWh  | 156,0   | 226,7    |
|                    | Leistung in kW    | 585,0   | 850,0    |
|                    | Masse in kg       | 975,0   | 1416,7   |
|                    | Wirkungsgrad in % | 92,0    | 92,0     |

In Tabelle 7-1 sind die Anforderungen an den Energiepuffer zusammengefasst und die Umsetzung zum einen als Supercap und zum anderen als Li-Ionen-Akku aufgeführt. Die Darstellung der Kapazität ist der

gewichtsbestimmende Schritt für einen Supercap. Der Li-Ionen-Akku wird aufgrund seiner geringen Leistungsdichte deutlich schwerer und wird als Lösung verworfen. Die Supercaplösung kommt in den Konzepten mit einem Energiepuffer zum Einsatz. Mit einer volumetrischen Speicherdichte von 10 Wh/l benötigen die Supercaps 300 l bzw. 250 l Bauraum [RZEP10].

Für Konzepte mit Bremsenergierekuperation wird die mitzuführende Energiemenge unter diesen Annahmen berechnet. In der Standardkonfiguration benötigt eine rekuperationsfähige Antriebseinheit am Rad 1,136 kWh/km. Für die rekuperationsfähigen Minimalkonfigurationen beträgt der Energiebedarf am Rad 1,154 kWh/km. Im Vergleich dazu benötigen Antriebseinheiten ohne Rekuperation sowohl in der Standard- als auch in der Minimalkonfiguration 1,4 kWh/km.

## 7.2 Ammoniak als Kraftstoff

Die Idee Ammoniak als Energieträger für mobile Anwendungen einzusetzen ist nicht neu. Die ersten Patente auf Ammoniak als Motorenkraftstoff datieren auf das Jahr 1905. Der erste Einsatz von Ammoniak in Bussen mit Hubkolbenmotoren fand während des Zweiten Weltkriegs in Belgien statt. Durch den kriegsbedingten Dieselkraftstoffmangel mussten in Belgien Buslinien auf Ammoniak umgestellt werden. Als Zündhilfe wurde Kohlegas eingesetzt. [KROC45]

Tabelle 7-2: Eigenschaften von Ammoniak im Vergleich zu Benzin und Dieselkraftstoff [MAY190; ZACH13; KRAM10; NIST15; JÜRG90; BEIL10]

|                                      | Einheit           | Ammoniak                | Benzin                         | Diesel                          |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| <b>Formel</b>                        |                   | NH <sub>3</sub>         | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> | C <sub>12</sub> H <sub>23</sub> |
| <b>unterer Heizwert</b>              | MJ/kg             | 17,18                   | 42,7                           | 41,8                            |
| <b>Zündgrenzen</b>                   | Vol.%             | 15,5 - 28               | 1,4 - 7,6                      | 0,6 - 5,5                       |
| <b>laminare Flammgeschwindigkeit</b> | m/s               | 0,15                    | 0,58                           | k.A.                            |
| <b>Selbstzündungstemperatur</b>      | °C                | 651                     | 300                            | 230                             |
| <b>Speichermethode</b>               |                   | unter Druck verflüssigt | flüssig                        | flüssig                         |
| <b>Speichertemperatur</b>            | °C                | 25                      | 25                             | 25                              |
| <b>Speicherdruck</b>                 | bar               | 10                      | 1                              | 1                               |
| <b>Oktanzahl</b>                     |                   | 110                     | 90-98                          | k.A.                            |
| <b>Dichte</b>                        | kg/m <sup>3</sup> | 602,8                   | 698,3                          | 838,8                           |
| <b>Volumetrischer Heizwert</b>       | MJ/l              | 10,36                   | 29,8                           | 35,1                            |
| <b>Verdampfungsenthalpie</b>         | kJ/kg             | 1137,3                  | 304,6                          | 351,3                           |

In Tabelle 7-2 werden die relevanten Eigenschaften von Ammoniak, Diesel und Benzin aufgeführt. Es ist zu beachten, dass sowohl Benzin als auch Diesel Stoffgemische sind, so dass Stoffwerte nur mit einer gewissen Unschärfe bzw. als Bereich angegeben werden können. So sind auch die leicht abweichenden Werte für Diesel im Vergleich zu Tabelle 5-10 erklärbar. Im unterschiedlichen Kontext werden verschiedene Quellen genutzt. Für die Verdampfungsenthalpie werden die Werte der 1-Komponenten-Ersatzstoffe iso-Oktan und n-Heptan verwendet. Ammoniak kann bei 25 °C ab Drücken von 10 bar verflüssigt werden. Die dadurch erreichbare Dichte beträgt 602,8 kg/m<sup>3</sup>, nicht zu verwechseln mit der Dichte am Siedepunkt bei -33 °C und 1 bar von 682 kg/m<sup>3</sup>, und liegt damit unter der Dichte des Benzins. Die volumetrische Energiedichte des verflüssigten Ammoniaks ist um knapp 2/3 geringer als die des Dieselkraftstoffs. Weit verbreitet ist der Transport von Ammoniak in Stahlflaschen. In Abbildung 7-3 sind mögliche Lieferarten dargestellt.

| Lieferarten: <b>Stahlflasche</b> |                     |                           |                                     |                          |                          |
|----------------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Rauminhalt, [Liter]              | Füllmenge, ca. [kg] | Dampfdruck bei 20°C [bar] | Gesamtgewicht, mit Füllung ca. [kg] | Aussen-Ø, ca.[mm]        | Länge mit Kappe ca. [mm] |
| 2                                | 1                   | 8,59                      | 6,3                                 | 100                      | 490                      |
| 10                               | 5,3                 | 8,59                      | 21,3                                | 140                      | 970                      |
| 50                               | 26,5                | 8,59                      | 93,5                                | 229                      | 1640                     |
| 79                               | 41,8                | 8,59                      | 76,8                                | 320                      | 1290                     |
| 126                              | 66                  | 8,59                      | 113                                 | 380                      | 1460                     |
| <b>Stahlfass</b>                 |                     |                           |                                     |                          |                          |
| Rauminhalt, [Liter]              | Füllmenge, ca. [kg] | Dampfdruck bei 20°C [bar] | Gesamtgewicht, mit Füllung ca. [kg] | Maße ca. (H x L x B)[mm] |                          |
| 950                              | 475                 | 8,59                      | 1075                                | 1100x2450x1000           |                          |

Abbildung 7-3: Auszug Produktdatenblatt Ammoniak 3.8 von Linde

Die gewichtseffizienteste Lieferart in einer Stahlflasche speichert ca. 66 kg Ammoniak bei einem Gesamtgewicht von ca. 113 kg. Das Volumen der Stahlflasche wird durch einen Zylinder mit gleicher Länge und Durchmesser approximiert. Daraus ergeben sich bezogen auf den Kraftstoff inklusive Stahlflasche Energiedichten von 2,8 kWh/kg bzw. 1,9 kWh/l.

### 7.2.1 Ammoniak im Dieselmotor

Diese Variante verspricht zunächst nur geringe Änderungen an der konventionellen Antriebseinheit, da lediglich Kraftstoffspeicher und -zufuhr auf den Ammoniakbetrieb umgerüstet werden müssen. Tests ergaben jedoch, dass Modifikationen an einem herkömmlichen Dieselmotor nötig sind, um Ammoniak dieselmotorisch zu verbrennen. Für das Erreichen der Selbstzündungstemperatur von 651 °C muss entweder das Kompressionsverhältnis des Motors auf 30:1 erhöht oder die Ansaugluft auf 60 °C bis 90 °C vorgewärmt werden [GROS12]. Mit der höheren Ansaugtemperatur nimmt jedoch die Luftdichte ab, so dass weniger Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht und die Leistungsdichte des Motors sinkt. Ist eine Direkteinspritzung des flüssigen Ammoniaks vorgesehen, muss das Verdichtungsverhältnis auf über 40:1 gesteigert werden, da sonst das Verdampfen des Ammoniaks die Brennraumtemperatur so weit reduziert, dass die Selbstzündungstemperatur unterschritten wird. Das ungünstige Verhältnis zwischen Verdampfungsenthalpie und unterem Heizwert führt bei einer Direkteinspritzung flüssigen Ammoniaks zu einem schlechteren Wirkungsgrad [ZAMF09; VAN00]. Eine Saugrohreinspritzung vermeidet die Wärmeverluste infolge der Verdampfung im Zylinder. Dafür verdrängt das gasförmige Ammoniak Luft aus dem Ansaugtrakt, so dass weniger Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht und die Leistungsdichte des Motors sinkt [ZACH13; TANN45]. Eine höhere Aufladung kann die Leistungsdichte verbessern. Ein weiteres Problem für die dieselmotorische Verbrennung von Ammoniak stellen die engen Zündgrenzen dar. Im Teillastbereich magert das Gemisch ab und zündet nicht mehr. Theoretisch ist eine Ladedrucksteuerung denkbar, die im Teillastbereich den Druck so einstellt, dass immer ein zündfähiges Ammoniak-Luft-Gemisch vorliegt. Darüber hinaus kann die Verdampfungsenthalpie des Ammoniaks als Nutzkälte im Fahrzeug verwendet werden. Mögliche Verbraucher sind die Fahrerhausklimatisierung, die Anhängerklimatisierung, der Motorkühlwasserkreis und die Ladeluftkühlung.

Für die Berechnung der Massen und Volumina dieses Konzepts wird von einer Saugrohreinspritzung mit erhöhter Aufladung ausgegangen. Es wird angenommen, dass der Wegfall des Diesel-Common-Rail-Systems das Zusatzgewicht durch eine höhere Aufladung kompensiert. Daher kann mit der Leistungsdichte eines konventionellen Dieselmotors gerechnet werden. Da mit diesem Konzept keine Bremsenergieerückgewinnung darstellbar ist, wird mit einem Energiebedarf von 1,4 kWh/km kalkuliert. Als Wirkungsgrad des Dieselmotors werden 44,2% angesetzt. Dies entspricht dem Wirkungsgrad, der mit dem Referenzfahrzeug auf der Strecke Stuttgart-Hamburg-Stuttgart erreicht wurde. Damit ist die Vergleichbarkeit zum konventionellen Dieselmotor gegeben.

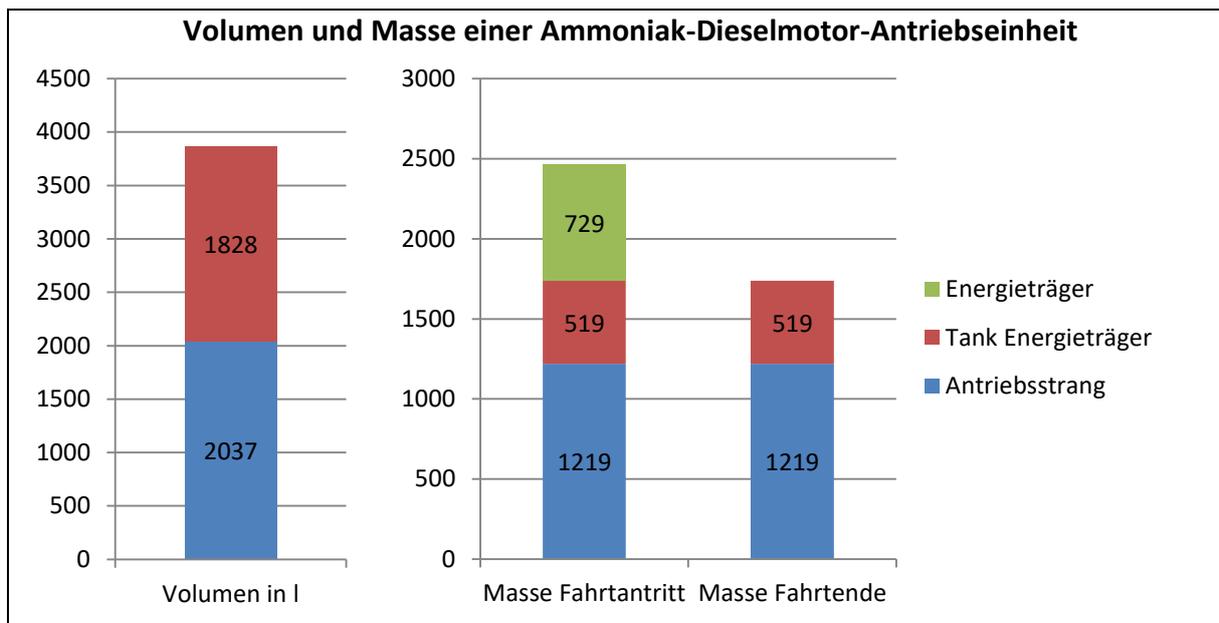


Abbildung 7-4: Volumen und Masse einer Ammoniak-Dieselmotor-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration

Für die Minimalkonfiguration im Ammoniakbetrieb werden die gleichen Änderungen wie bei der konventionellen Diesel-Antriebseinheit durchgeführt. Der OM 501 LA wird durch einen OM 936 mit 220 kW ersetzt. Tankvolumen und -masse werden entsprechend der geringeren Reichweite skaliert. Abbildung 7-5 ist zu entnehmen, dass die Masse und das Volumen des Ammoniak-Diesel-Konzepts in der Standardkonfiguration 896 kg bzw. 1373 l über den Werten des Referenzkonzepts liegen. Die geringeren Anforderungen in der Minimalkonfiguration erzeugen beim Ammoniak-Diesel-Konzept, sowohl absolut als auch relativ, größere Einsparungen im Vergleich zur Konfigurationsvariation beim Referenzkonzept im Dieselmotorbetrieb.

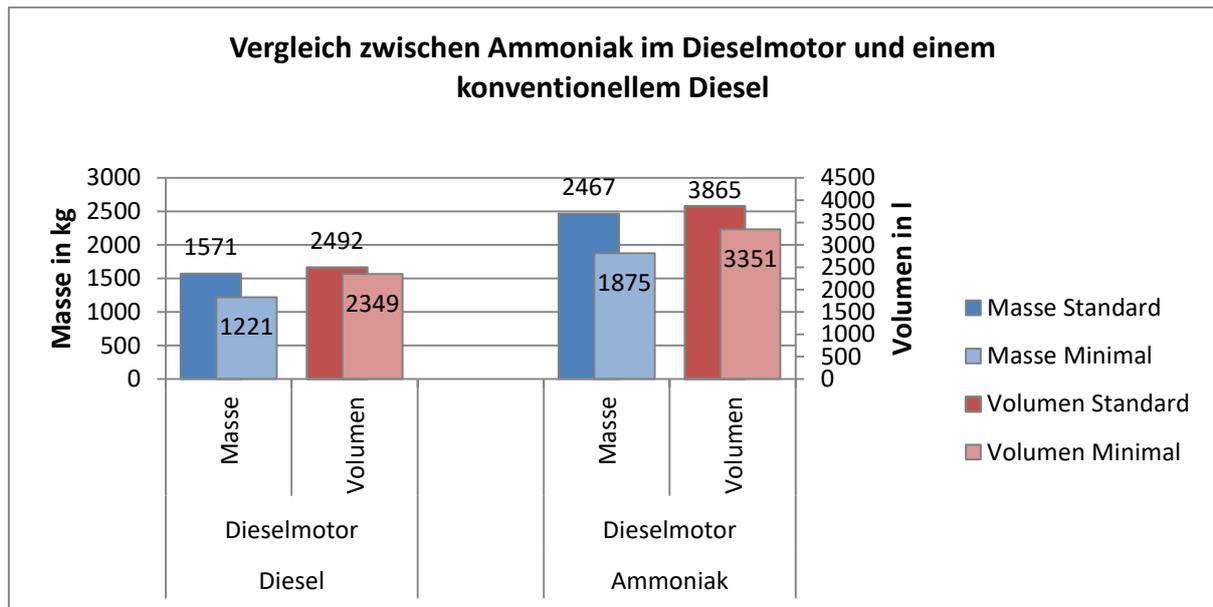


Abbildung 7-5: Vergleich der Massen und Volumina zwischen konventionellem Diesel- und Ammoniakbetrieb eines Dieselmotors

### 7.2.2 Ammoniak im Ottomotor

Durch die hohe Oktanzahl von 110, welche eine hohe Klopfestigkeit verspricht, scheint Ammoniak für den ottomotorischen Betrieb geeignet. Dagegen spricht jedoch die geringe laminare Flammgeschwindigkeit. Bewegt sich die Flammenfront nur langsam durch den Brennraum, können nicht erfasste Bereiche ihre Selbstzündungstemperatur erreichen und es kommt zum Klopfen. Darüber hinaus kann bei höheren Drehzahlen die Expansion zu weit voranschreiten und das Auslassventil bereits öffnen, obwohl die Verbrennung noch nicht abgeschlossen ist. Dies führt zu erhöhten Emissionen, einem schlechteren Wirkungsgrad und höheren thermischen Belastungen im Abgastrakt. Abhilfe kann das Aufteilen des Brennraums mithilfe mehrerer Zündkerzen schaffen. Auch die Corona-Zündung scheint geeignet, das Klopfisiko zu verringern. Eine weitere Maßnahme stellt die partielle Dekomposition dar. Ammoniak wird dabei in Stickstoff und Wasserstoff zerlegt. Das Kraftstoffgemisch im Brennraum besteht dann anteilig aus Ammoniak, Stickstoff und Wasserstoff. Wasserstoff besitzt eine über 20-fach größere laminare Flammgeschwindigkeit im Vergleich zu Ammoniak und fungiert dadurch als Zündhilfe. [ZAMF09]

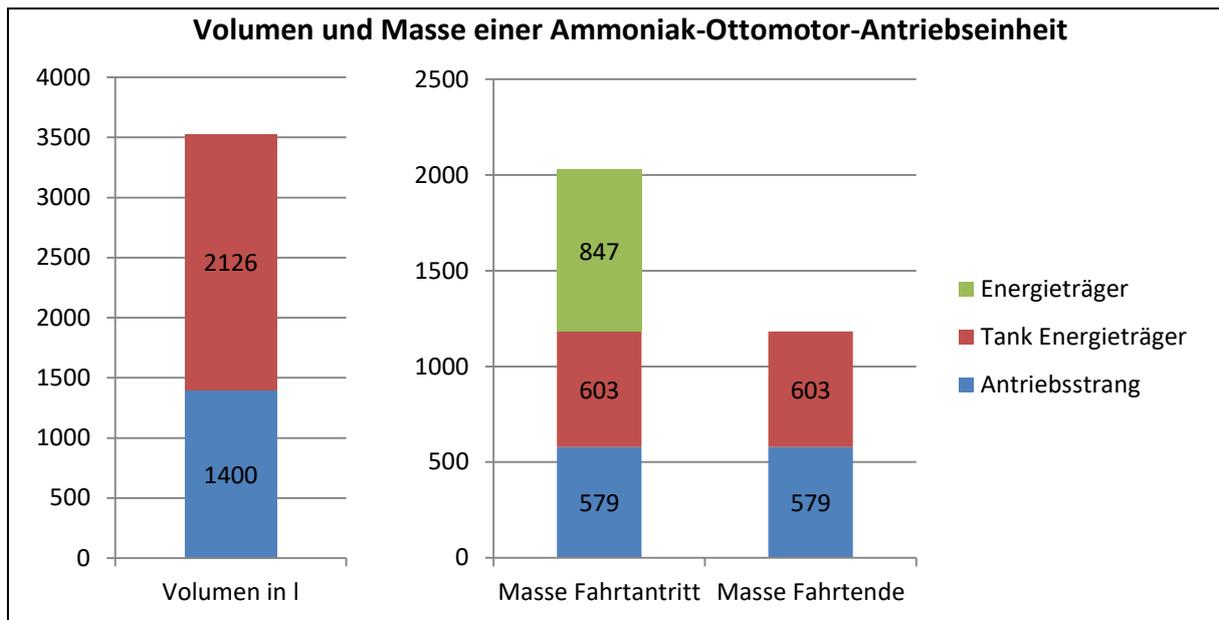


Abbildung 7-6: Ammoniak-Ottomotor-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration

Im Unterschied zum Dieselmotor basieren die Masse und das Volumen des Ottomotors auf keinem realen Motor, sondern wurden gemäß der Leistungsdichten aus Kapitel 5.3.3 Tabelle 5-9 berechnet. Zusätzlich wird eine Gewichtsreduktion für den Motor und das Getriebe von 10% durch Leichtbau unterstellt. Der Ottomotor ist deutlich leichter und kleiner als der Dieselmotor mit gleicher Leistung. Der Vorteil wird jedoch durch den schlechteren Wirkungsgrad und damit höheren Kraftstoffverbrauch teilweise aufgebrochen. Der höhere Verbrauch führt auch zu höheren Betriebskosten. Der negative Einfluss des schlechteren Wirkungsgrads nimmt mit sinkender geforderter Reichweite ab. Der analysierte Ottomotor stammt aus dem Pkw-Bereich und liefert ein deutlich geringeres maximales Drehmoment, so dass es bei niedrigen Drehzahlen zu schlechten Beschleunigungswerten oder sogar Anfahrproblemen kommen kann. Der Vorteil des geringen Volumens wird durch höhere Drehzahlen erkauft, welche zu größerem Verschleiß führen. Der Einfluss auf die Lebensdauer ist kritisch zu bewerten.

Die Anpassung auf die Minimalkonfiguration erfolgt durch die Skalierung des Motors und des Kraftstoffbedarfs. In der Minimalkonfiguration liegt der Gewichtsmalus bei 28% und das Volumen wächst lediglich um 15% gegenüber der Referenzantriebseinheit.

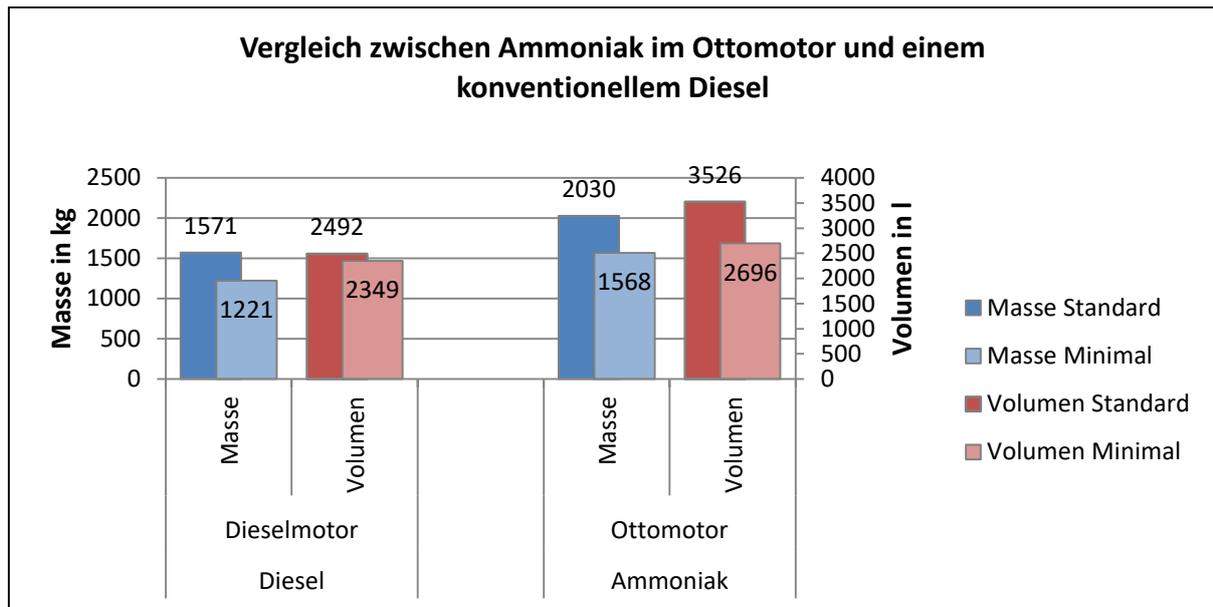


Abbildung 7-7: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselantrieb und Ammoniak im Ottomotor

### 7.2.3 Ammoniak im Freikolbenlineargenerator

Da sowohl für den ottomotorischen als auch dieselmotorischen Betrieb größere Anpassungen nötig sind, kommen auch gänzlich neue Konzepte infrage. Van Blarigan stellte im Jahr 2000 einen Freikolbenlineargenerator vor, der mit Ammoniak betrieben werden kann und Wirkungsgrade bis zu 60% erreichen soll. Die Leistungsdichten liegen bei 0,8 kW/kg und 0,8 kW/l. [VAN00] Die technische Entwicklung und Umsetzung dieses Konzepts dauert weiterhin an. [JOHN13] In Abbildung 7-8 sind Testergebnisse aus dem Betrieb des Freikolbenlineargenerators mit Wasserstoff dargestellt.

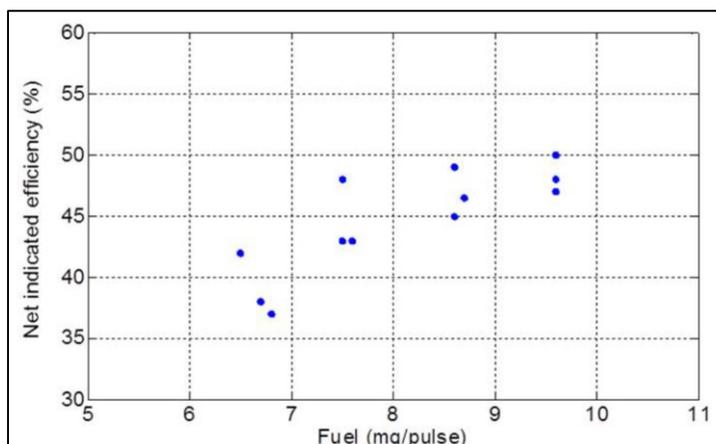


Abbildung 7-8: Wirkungsgrad des FKLG in Abhängigkeit zur Kraftstoffmenge bzw. Leistung [JOHN13]

Da dieses Konzept einen Elektromotor beinhaltet, der auch im Generatorbetrieb laufen kann, ist eine Rekuperation von Bremsenergie möglich. Für das Zwischenspeichern der Bremsenergie ist ein Puffer notwendig. Dieser Puffer entkoppelt die elektrische Energieerzeugung im Freikolbenlineargenerator von der Umsetzung in Antriebsenergie durch den Elektromotor, so dass der FKLG weniger transient und damit effizienter betrieben werden kann. Der Wirkungsgrad des FKLG wird daher mit 48% angesetzt. Wie in Kapitel 7.1 beschrieben, wird ein Supercap mit 428,6 kg und 300 l in der Standardkonfiguration verwendet.

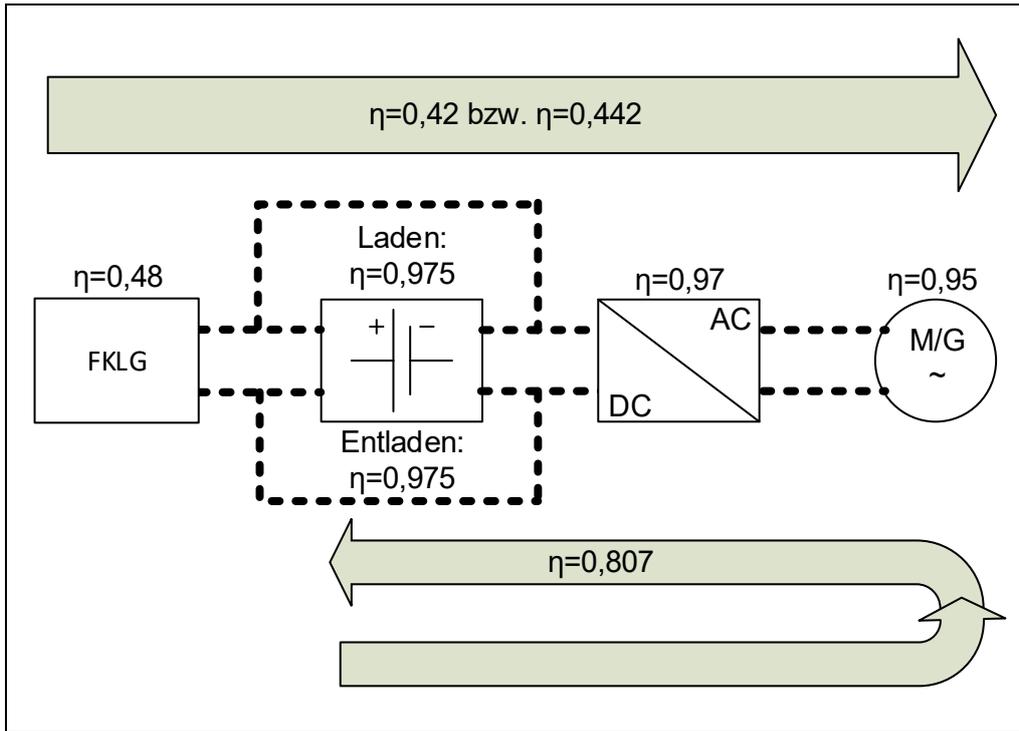


Abbildung 7-9: Wirkungsgradketten des Freikolbenlineargeneratorantriebs

Die Berechnung der nötigen Kraftstoffmenge baut auf dem errechneten Energiebedarf am Rad aus Kapitel 7.1 auf. Die Hälfte der nötigen Antriebsenergie wird direkt durch den Freikolbenlineargenerator bereitgestellt, ohne die Supercaps zu benutzen. Die andere Hälfte der Energie wird in den Supercaps zwischengespeichert, so dass zusätzliche Wandlungsverluste auftreten. Daraus ergibt sich ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 43,1%.

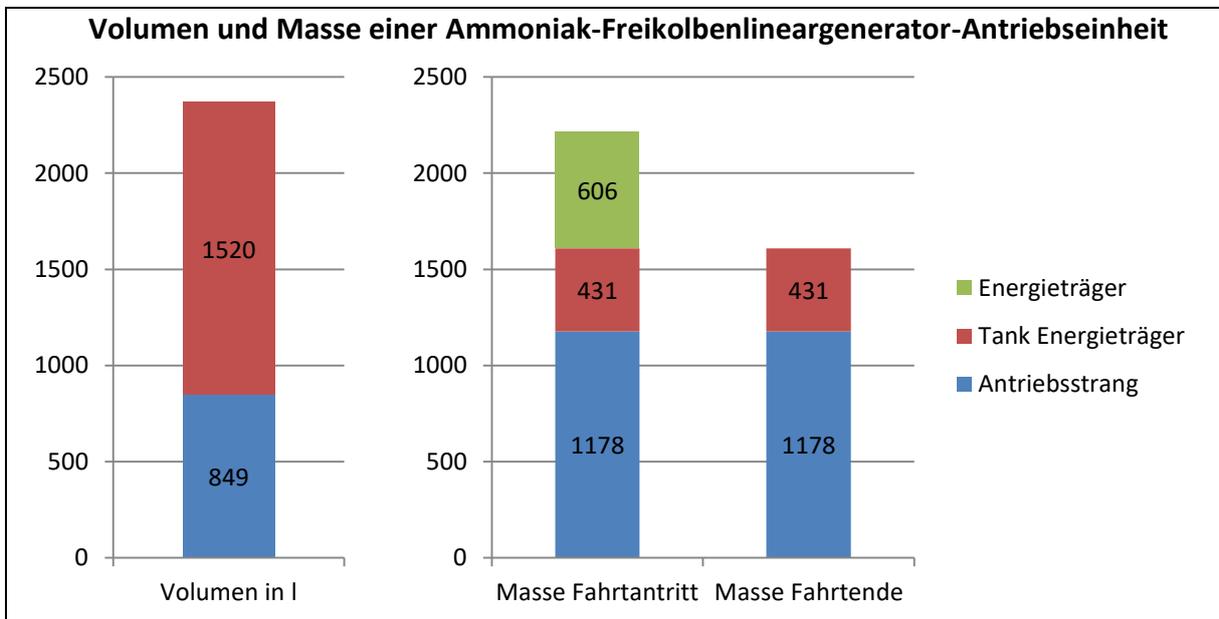


Abbildung 7-10: Ammoniak-Freikolbenlineargenerator-Antriebseinheit in der Standard-Konfiguration

Dieses Konzept profitiert von der hohen gravimetrischen und volumetrischen Leistungsdichte des Freikolbenlineargenerators. Zusätzlich sinkt durch die Möglichkeit der Rekuperation der Energiebedarf am Rad um ca. 19%. Der Vorteil wird durch die schweren Supercaps als Energiepuffer wieder aufgezehrt.

Durch den niedrigeren Heizwert von Ammoniak kann dieses Konzept nur bei geringen Reichweiten mit dem Referenzkonzept konkurrieren. Allerdings werden für den Wirkungsgrad und die Leistungsdichten des FKLG Laborwerte aus einer begrenzten Anzahl an Versuchen verwendet, so dass die Vergleichbarkeit mit einem realen Betriebsverhalten hinterfragt werden muss. Der Einfluss von Abweichungen der Parameter gegenüber den Annahmen wird in Kapitel 7.2.6 diskutiert.

Die Anpassung auf die Minimalkonfiguration erfolgt durch die Skalierung der Elektromotoren, des Freikolbenlineargenerators und des Energiepuffers. Die geringere Reichweite führt zu einem geringeren Energiebedarf, so dass der Tank samt Inhalt kleiner ausfällt. In der Minimalkonfiguration liegt der Gewichtsmalus bei 35% und das Volumen verringert sich um 25% gegenüber der Referenzantriebseinheit.

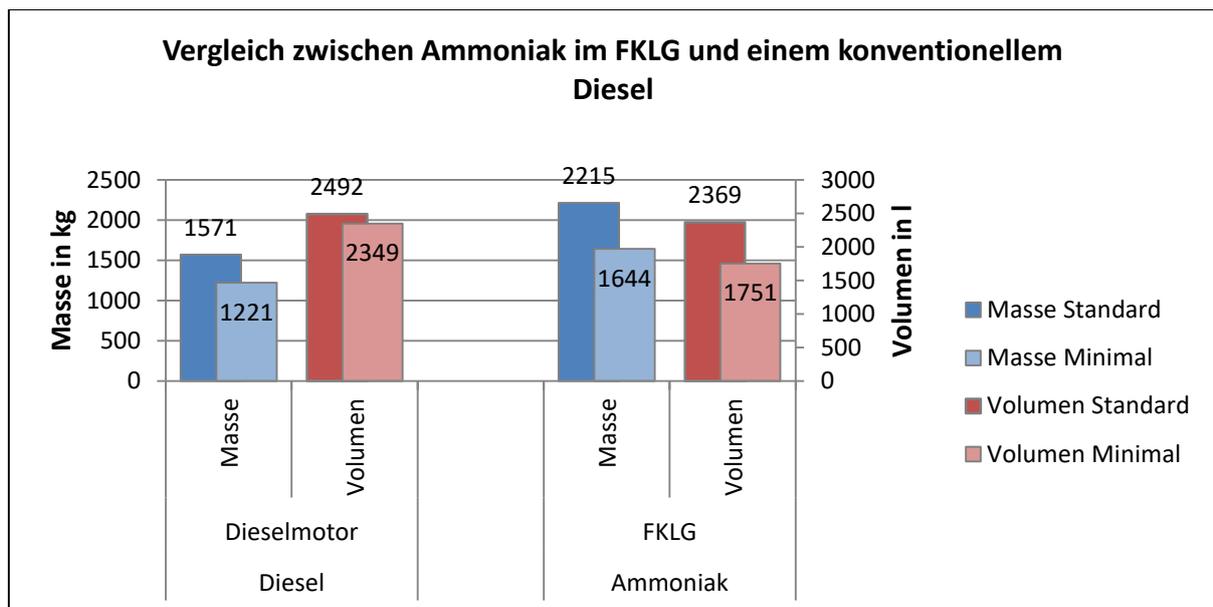


Abbildung 7-11: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselmotor und einem Freikolbenlineargenerator im Ammoniakbetrieb

#### 7.2.4 Ammoniak in der Festoxid-Brennstoffzelle

Statt Ammoniak in einer thermischen Maschine zu verbrennen, kann es auch in einer Brennstoffzelle oxidiert werden. Brennstoffzellen sind nicht an den Carnot-Wirkungsgrad gebunden und ermöglichen so bessere Wirkungsgrade auch bei niedrigen Betriebstemperaturen. Der Einsatz von Ammoniak in Brennstoffzellen mit einer Polymerelektrolytmembran führt zu einer Vergiftung der Membran und somit zu einer bleibenden Schädigung der Brennstoffzelle [REPG03]. Festoxid-Brennstoffzellen (Solid Oxid Fuel Cells – SOFC) sind dagegen für den direkten Einsatz von Ammoniak geeignet. Auf Zellebene erreicht Ammoniak in einer Festoxid-Brennstoffzelle Wirkungsgrade bis zu 70%. Dabei wird das Ammoniak innerhalb der Zelle in Stickstoff und Wasserstoff gespalten. Dieser endotherme Prozess sorgt für eine effiziente Kühlung der Zelle, so dass diese optimal arbeiten kann. Außerdem kann dadurch das Kühlsystem kleiner ausgeführt und der Energiebedarf der Nebenaggregate gesenkt werden [DEKK06]. Der Systemwirkungsgrad wird daher mit 55% angenommen [ROAD14].

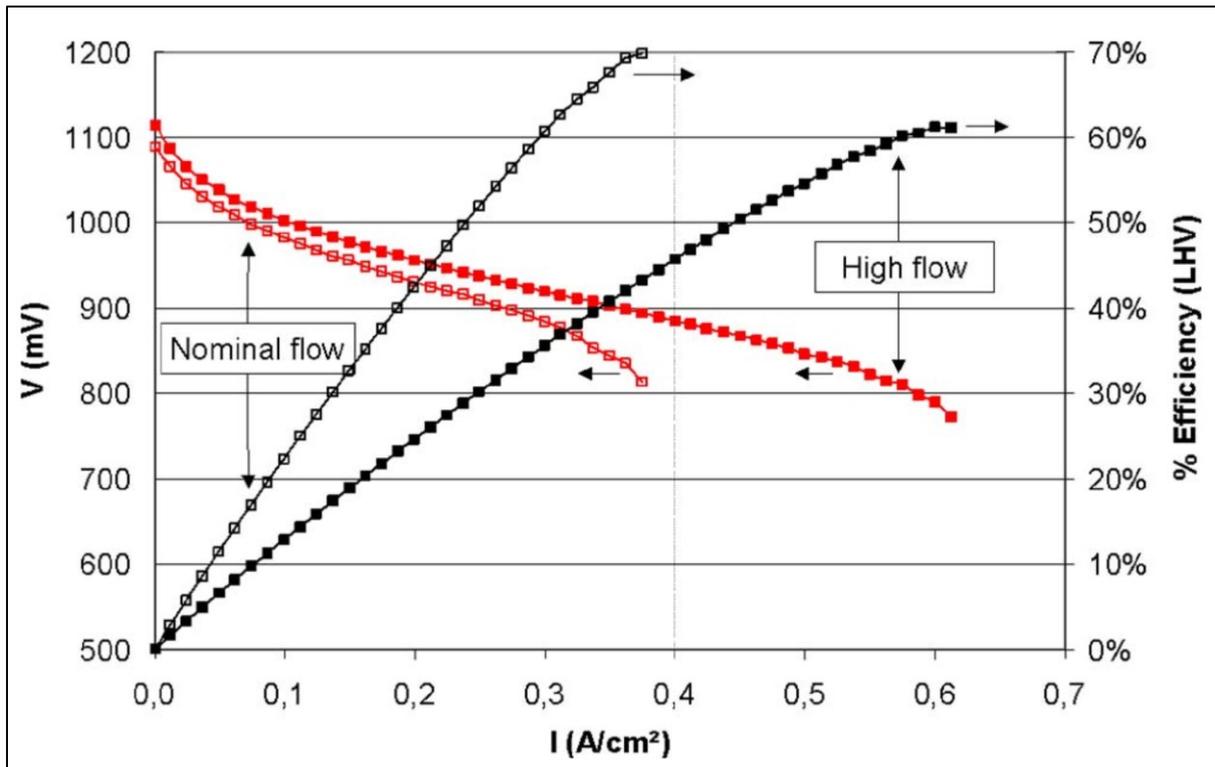


Abbildung 7-12: Zellspannung und Wirkungsgrad über der Stromdichte der Ammoniak-SOFC [DEKK06]

Der Antriebsstrang ist analog zum Freikolbenlineargenerator-Konzept aufgebaut. Die Dimensionierung des Energiepuffers, sowie die Annahmen der Randbedingungen werden aus Kapitel 7.1 bzw. Kapitel 7.2.3 übernommen. Damit ergibt sich ein durchschnittlicher Gesamtwirkungsgrad von 49,4%.

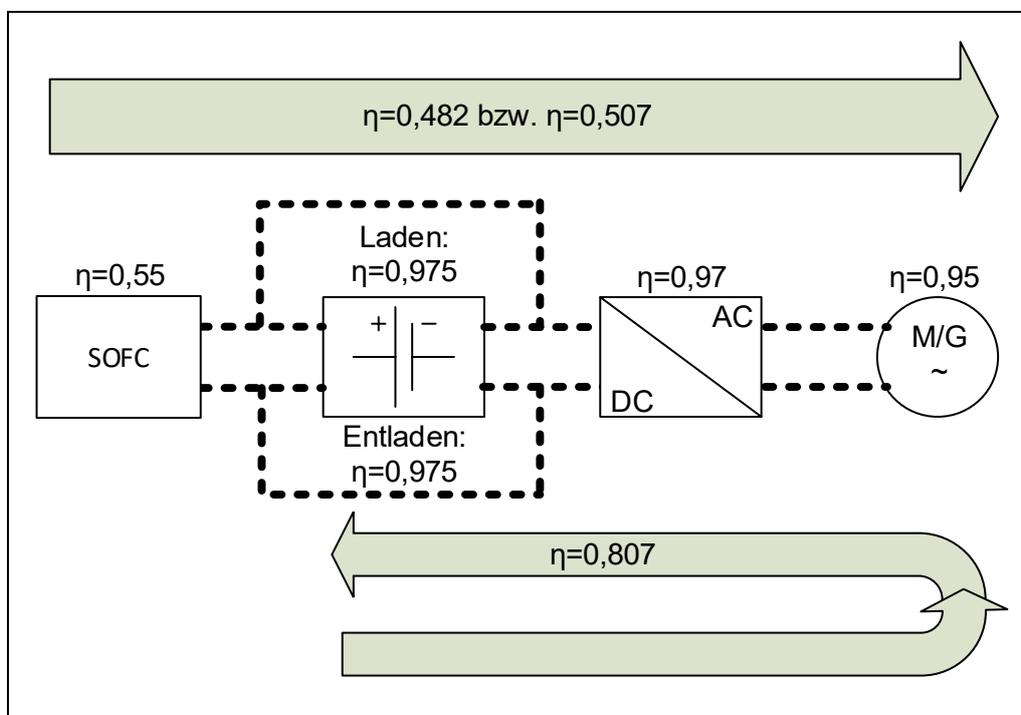


Abbildung 7-13: Wirkungsgradketten des SOFC-Ammoniak-Antriebsstrangs

Festoxid-Brennstoffzellensysteme werden vorwiegend im stationären Bereich eingesetzt. Sie sind dementsprechend voluminös und schwer. Bezogen auf den Brennstoffzellen-Stapel können Leistungsdichten von 700 W/kg bzw. 700 W/l erreicht werden [NGUY14].

Diese Werte wurden im Wasserstoff-Betrieb ermittelt und sind wahrscheinlich nicht direkt auf den Ammoniak-Betrieb übertragbar. Nebenaggregate wie Pumpen und Wärmeübertrager sind in diesen Leistungsdichten nicht enthalten. Im mobilen Bereich werden derzeit Auxiliary Power Units (APU) basierend auf Festoxid-Brennstoffzellen entwickelt. Stand 2010 lagen die Leistungsdichten für eine exemplarische APU bei 9,1 W/kg bzw. 5,9 W/l. Als Entwicklungsziel werden 37,5 W/kg und 30 W/l angestrebt [STEI12]. Diese Systeme arbeiten mit Dieseldieselkraftstoff und benötigen deshalb einen Reformer, der aus dem Dieseldieselkraftstoff den Wasserstoff für die Brennstoffzelle extrahiert. Ein Ammoniak-SOFC-System benötigt keinen extra Reformer und kann deshalb höhere Leistungsdichten erzielen. Für die gravimetrische Leistungsdichte werden 200 W/kg und für die volumetrische Leistungsdichte 150 W/l angesetzt.

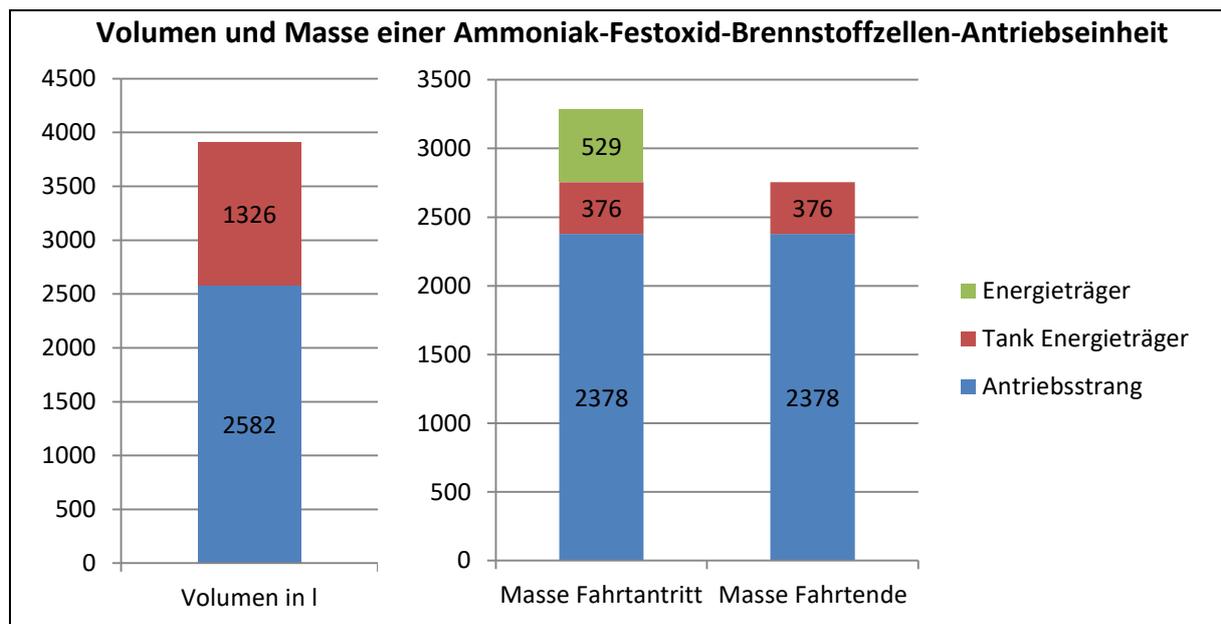


Abbildung 7-14: Ammoniak-Festoxid-Brennstoffzellen-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration

Der Vorteil des besseren Wirkungsgrades im Vergleich zum Freikolbenlineargenerator kann den Nachteil durch die geringe Leistungsdichte der Festoxid-Brennstoffzelle nicht kompensieren. Die gesamte Antriebseinheit ist deutlich schwerer und voluminöser. Hinzu kommt das Problem der geringen Lebensdauer. Die Dichtungen zwischen den einzelnen Zellen sind bei einem Kaltstart großen thermischen Spannungen ausgesetzt, so dass die Kaltstartanzahl, Stand 2010, auf 16 begrenzt werden muss. Selbst das Entwicklungsziel von 500 Kaltstarts stellt eine große Hürde für den Betrieb als Traktionsenergielieferant in einem schweren Lkw dar. [STEI12]

Auch hier erfolgt die Anpassung auf die Minimalkonfiguration durch Skalierung der Festoxid-Brennstoffzelle, der Elektromotoren sowie des Energiepuffers. Tank und Kraftstoffmenge werden auf die geringere Reichweite ausgelegt. In der Minimalkonfiguration liegt der Gewichtsmalus bei 94% und das Volumen vergrößert sich um 19% gegenüber der Referenzantriebseinheit.

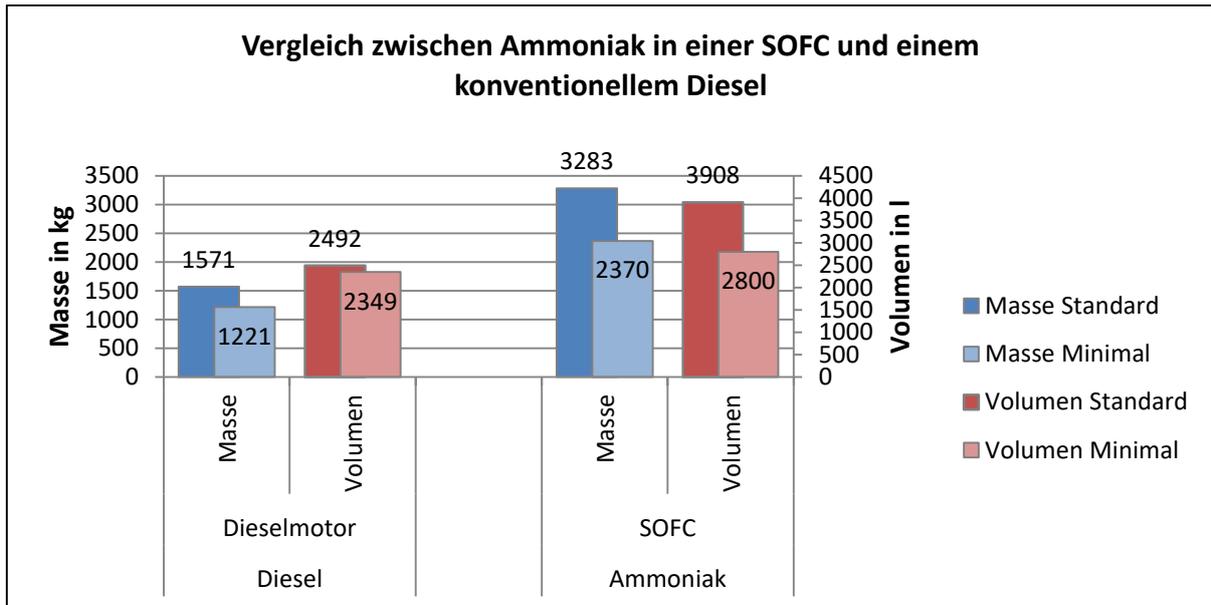


Abbildung 7-15: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselmotor und Ammoniak in einer Festoxid-Brennstoffzelle

## 7.2.5 Ammoniak – Übersicht

Die Ergebnisse der Berechnungen für die einzelnen Ammoniak-Konzepte sind in Abbildung 7-16 gegenüber gestellt. Der im Vergleich zum Dieselmotor verringerte Heizwert des Ammoniaks macht sich vor allem durch eine höhere Reichweitensensitivität bemerkbar. Um dennoch mit dem konventionellen Diesel konkurrieren zu können, müssen die Leistungsdichten der alternativen Energiewandler sowie die Gesamtwirkungsgrade auf einem höheren Niveau liegen. Am ehesten trifft dies auf den Freikolbenlineargenerator zu. Wobei abzuwarten bleibt, inwieweit die Laborwerte auf den realen Einsatz übertragen werden können.

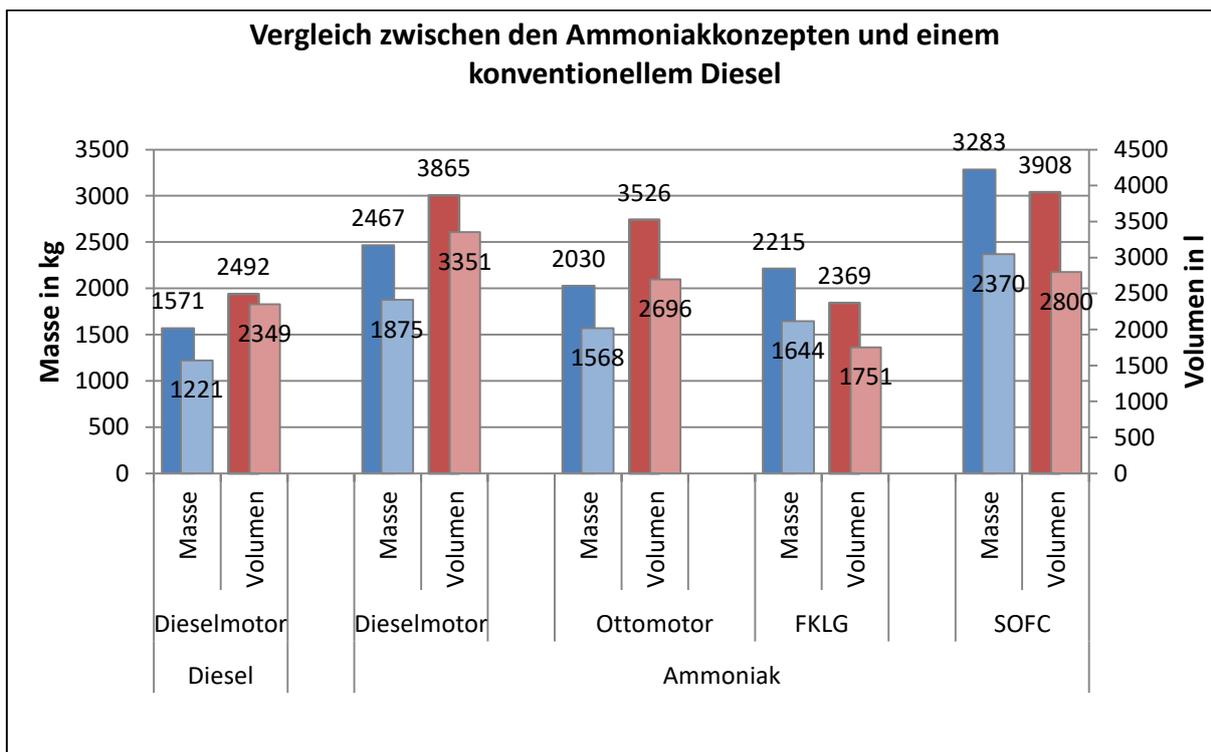


Abbildung 7-16: Übersicht der Ammoniakkonzepte neben der konventionellen Dieselantriebseinheit

## 7.2.6 Sensitivität - Ammoniak im Freikolbenlineargenerator

Das Konzept der Ammoniakverbrennung im Freikolbenlineargenerator verspricht eine kompakte und dabei auch recht leichte Antriebseinheit und ist damit der Favorit unter den Ammoniakkonzepten. Zum Abschätzen der Sensitivität werden analog zu Kapitel 2.6 drei einflussreiche Parameter identifiziert und deren Auswirkungen auf das Volumen und die Masse der Antriebseinheit berechnet. Für Ammoniak im FKLG werden der Wirkungsgrad und die Leistungsdichte (volumetrisch und gravimetrisch) des Freikolbenlineargenerators sowie die Speicherdichte (volumetrisch und gravimetrisch) des Ammoniakspeichers variiert.

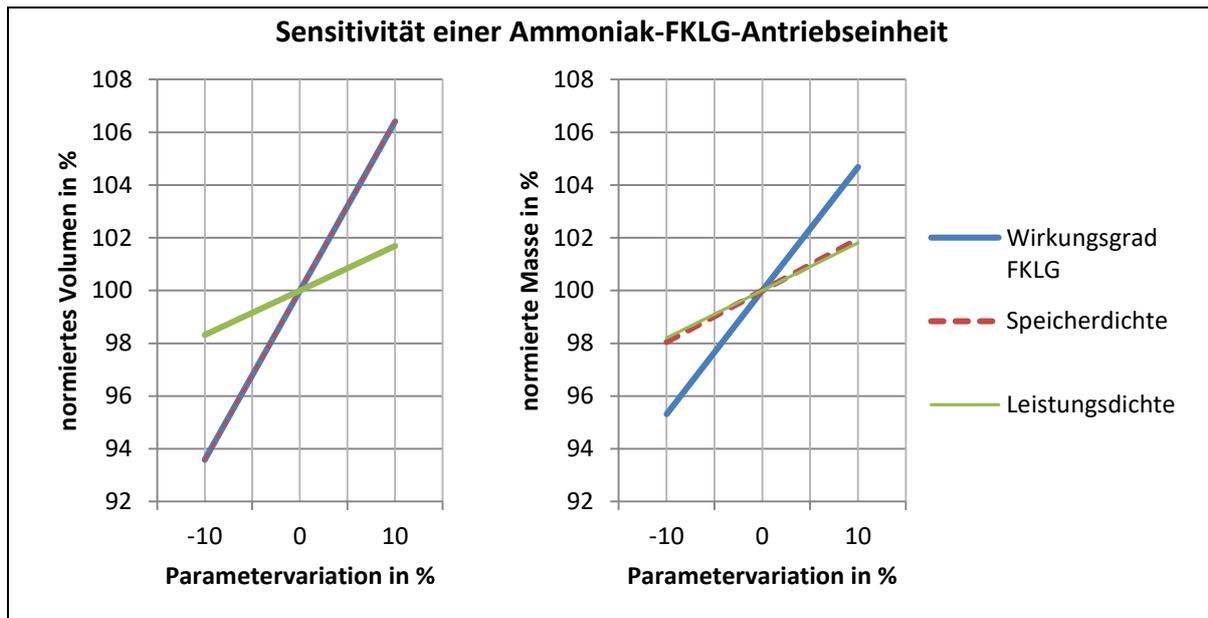


Abbildung 7-17: Einflüsse der Parameter Wirkungsgrad und Leistungsdichte des FKLG sowie Speicherdichte des Ammoniakspeichers auf die Masse und das Volumen der Ammoniak-FKLG-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration

Sowohl der Wirkungsgrad des FKLG als auch die Speicherdichte des Ammoniakspeichers haben einen identischen Einfluss auf das Volumen. Der Einfluss der Leistungsdichte ist relativ gering, da sie grundsätzlich auf einem sehr hohen Niveau liegt und dadurch der Anteil des FKLG an der Gesamtmasse und dem Gesamtvolumen sehr klein ist. Der Fehlerindikator für das Volumen liegt bei 0,48 und somit über dem Referenzdiesel. Für die Masse liegt der Fehlerindikator bei 0,28 und damit unter dem Niveau des Referenzdiesels. Damit reagiert die Ammoniak-FKLG-Antriebseinheit ähnlich empfindlich auf Änderungen der Parameter wie der Referenzdiesel, wobei das Volumen sensitiver ist als die Masse. Allerdings muss beachtet werden, dass die Wahrscheinlichkeit starker Parameterabweichungen aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums des FKLG im Vergleich zum Dieselmotor größer ist.

## 7.3 Wasserstoff

Wasserstoff wird als wichtiger Baustein für die Energiewende in Deutschland gesehen. Die Stromerzeugung aus Windkraft und Sonnenenergie unterliegt stärkeren Schwankungen. Ist die Stromnachfrage zu gering, kann der überschüssige Strom in einem Elektrolyseur genutzt werden um Wasserstoff zu erzeugen. Der so gewonnene Wasserstoff kann dann bei erhöhter Nachfrage rückverstromt oder als Kraftstoff in Fahrzeugen eingesetzt werden. Der Umgang mit Wasserstoff ist durch den jahrzehntelangen Einsatz in der chemischen Industrie erprobt.

Der Großteil des industriell benötigten Wasserstoffs wird vor Ort erzeugt. Nur ein kleiner Anteil wird über Pipelines oder im Güterverkehr zum Endverbraucher transportiert. [HÖHL13] Mit Wasserstoff als Energieträger für mobile Anwendungen gewinnt die Wasserstoffspeicherung immer mehr an Bedeutung. Verschiedene Speichertechnologien werden erforscht. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH-JU) gibt für 2015-2016 eine gravimetrische Wasserstoffdichte von 4,8% und eine volumetrische Wasserstoffdichte von 23 g<sub>H2</sub>/l als Zielwerte aus. Derzeit sind Kompositbehälter mit einem Systemdruck von 700 bar am ehesten in der Lage diese Zielvorgaben zu erfüllen. [DEVI14] Diverse Speichertechnologien sind mit ihren volumetrischen und gravimetrischen Wasserstoffdichten in Abbildung 7-18 dargestellt. Allerdings kann laut dieser Abbildung ein Wasserstoffspeicher aus Kompositmaterial bei 700 bar gravimetrische Wasserstoffdichten von 14% erreichen und 40 kg Wasserstoff pro Kubikmeter speichern. Diese hohen Werte konnten jedoch weder durch eine intensive Literaturrecherche noch durch eine Expertenbefragung verifiziert werden, so dass bei der Konzepterstellung mit den niedrigeren Werten des FCH-JU gerechnet wurde. Metallhydridspeicher bieten Potenziale zur Verbesserung der Wasserstoffspeicherung. Allerdings benötigen die Vorgänge der Wasserstoffabgabe hohe Temperaturen und dementsprechend temperaturfeste Materialien für die Behälter sowie ein Kühl-/Heizsystem um die Wasserstoffabgabe zu steuern.

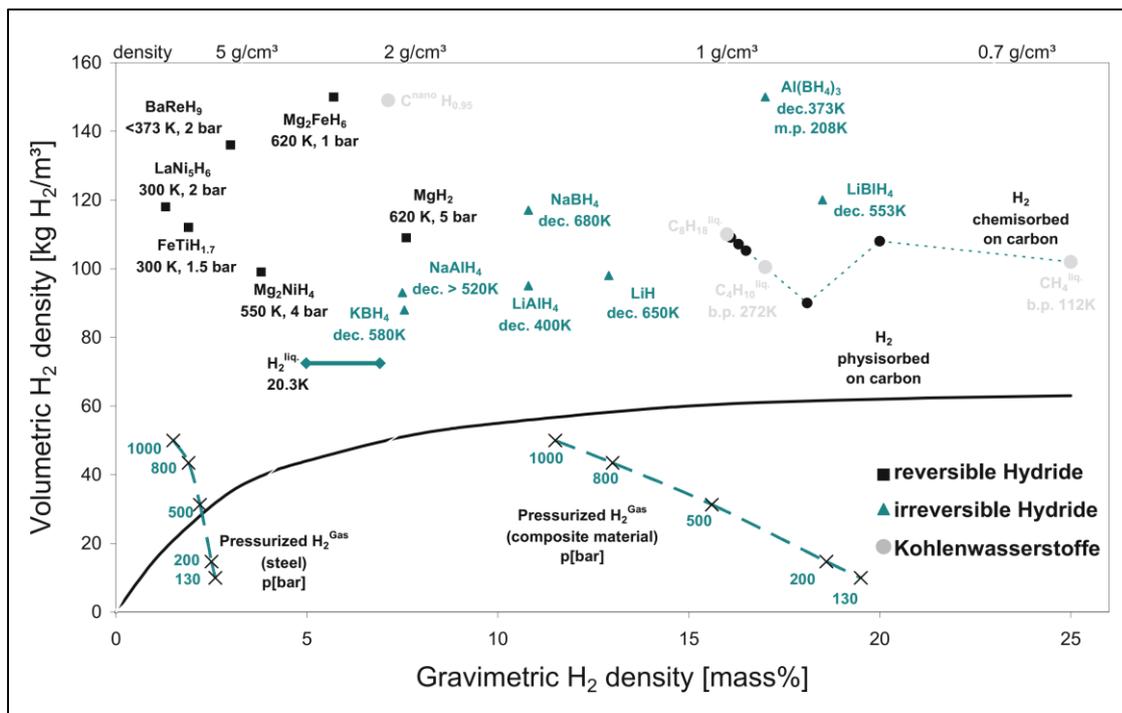


Abbildung 7-18: Wasserstoffspeichertechnologien [EICH08; SCHL01]

Wasserstoff kann sowohl in Verbrennungskraftmaschinen als auch in Brennstoffzellen zum Einsatz kommen. Die Eigenschaften von Wasserstoff werden in Tabelle 7-3 denen von Benzin und Dieselkraftstoff gegenübergestellt.

Tabelle 7-3: Eigenschaften von Wasserstoff im Vergleich zu Benzin und Dieseldieselkraftstoff

|                                      | Einheit           | Wasserstoff    | Benzin                         | Diesel                          |
|--------------------------------------|-------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------|
| <b>Formel</b>                        |                   | H <sub>2</sub> | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> | C <sub>12</sub> H <sub>23</sub> |
| <b>unterer Heizwert</b>              | MJ/kg             | 120            | 44,5                           | 43,4                            |
| <b>Zündgrenzen</b>                   | Vol. %            | 4 - 75         | 1,4 - 7,6                      | 0,6 - 5,5                       |
| <b>laminare Flammgeschwindigkeit</b> | m/s               | 2,65           | 0,58                           | k.A.                            |
| <b>Selbstzündungstemperatur</b>      | °C                | 585            | 300                            | 230                             |
| <b>Dichte</b>                        | kg/m <sup>3</sup> | 0,0899         | 698,3                          | 838,8                           |
| <b>Energiedichte</b>                 | MJ/m <sup>3</sup> | 10,788         | 31074                          | 36403                           |
| <b>Verdampfungsenthalpie</b>         | kJ/kg             | 450            | 71,78                          | 47,86                           |

### 7.3.1 Wasserstoff im Ottomotor

Die hohe Selbstzündungstemperatur erfordert eine Fremdzündung durch Zündkerzen oder durch einen Zündstrahl aus beispielsweise Dieseldieselkraftstoff. Die weiten Zündgrenzen ermöglichen eine Qualitätsregelung. [SCH196] Durch den darstellbaren Magerbetrieb können die Drosselverluste reduziert werden. Die hohe Flammgeschwindigkeit führt zu einer raschen Verbrennung, so dass der ideale Gleichraumprozess besser angenähert werden kann. Der Wirkungsgrad kann dadurch verbessert werden und wird mit 40% angenommen. Der Gemischheizwert ist jedoch geringer als bei einem Benzinmotor, so dass bei gleicher Aufladung und Saugrohreinspritzung mit einer geringeren Leistungsausbeute trotz des besseren Wirkungsgrades gerechnet werden muss. Durch die Verdampfung von flüssig transportiertem Wasserstoff wird die Frischluft gekühlt und somit ihre Dichte erhöht. Der Malus des schlechteren Gemischheizwertes kann dadurch kompensiert werden. Allerdings ist die Einspritzung von flüssigem Wasserstoff mit hohen technischen Anforderungen verbunden, damit beispielsweise die Einspritzdüsen nicht vereisen [HYIC07]. Alternativ kann der flüssige Wasserstoff auch direkt in den Brennraum eingespritzt werden.

Als Berechnungsgrundlage für die Masse und das Volumen des Wasserstoff-Ottomotor-Konzepts werden analog zum Ammoniak-Konzept die Leistungsdichten des Ottomotors aus Kapitel 5.3.3 Tabelle 5-9 verwendet. Der Wasserstoff wird unter 700 bar in Kompositbehältern an Bord gespeichert.

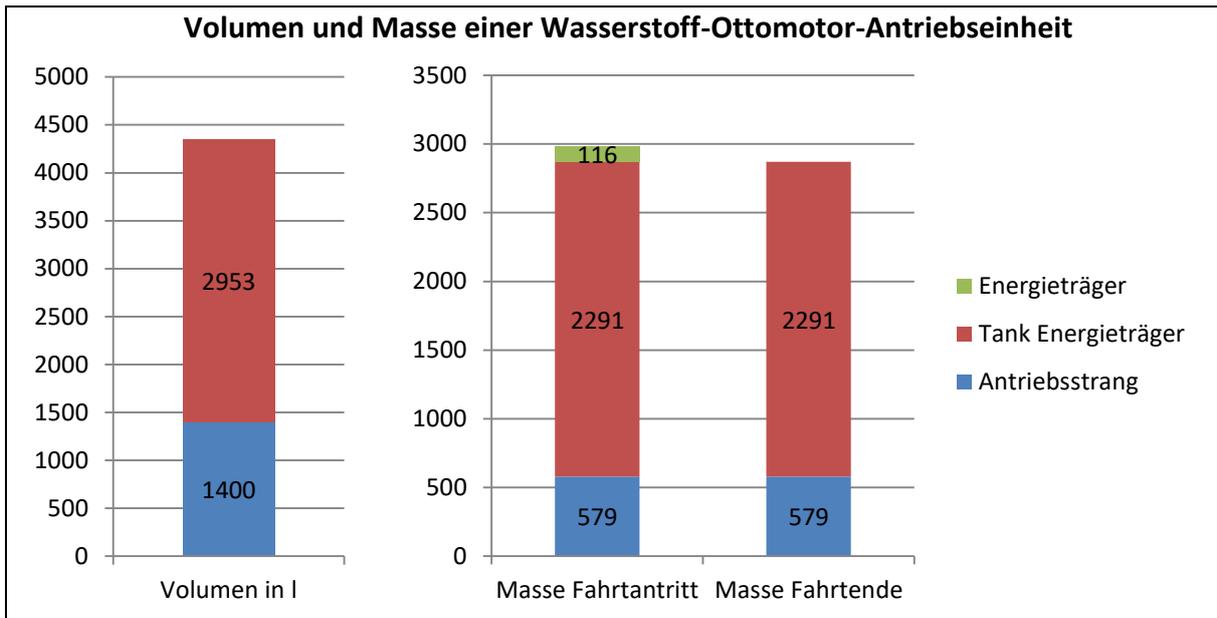


Abbildung 7-19: Wasserstoff-Ottomotor-Antriebseinheit in Standardkonfiguration

Bei diesem Wasserstoffkonzept fällt auf, dass 2/3 des Volumens und knapp 75% der Masse auf den Tank inklusive Wasserstoff entfallen. Sinkt die geforderte Reichweite oder wird der Energiebedarf durch bessere Wirkungsgrade und verringerte Fahrwiderstände gesenkt, dann entsteht erhebliches Volumen- und Gewichtseinsparungspotenzial. Eine reduzierte Menge getankten Wasserstoffs für eine kurze Fahrtstrecke verringert das Fahrzeuggewicht hingegen nur marginal, da der Großteil der Masse auf die Komposit tanks entfällt und diese in der Regel im Fahrzeug verbleiben. Wird, wie in der Minimalkonfiguration, die Reichweite reduziert und somit auch die Tankgröße verringert, dann können im Vergleich zur Wasserstoff-Standardkonfiguration ca. 700 kg und über 1000 l Bauraum eingespart werden. Motor, Tank und Kraftstoff werden anhand der geringeren Anforderungen skaliert. Gegenüber dem Referenzkonzept ist der Wasserstoff-Ottomotor selbst in der Minimalkonfiguration mit 85% mehr Masse und 40% Bauraumzuwachs nicht konkurrenzfähig.

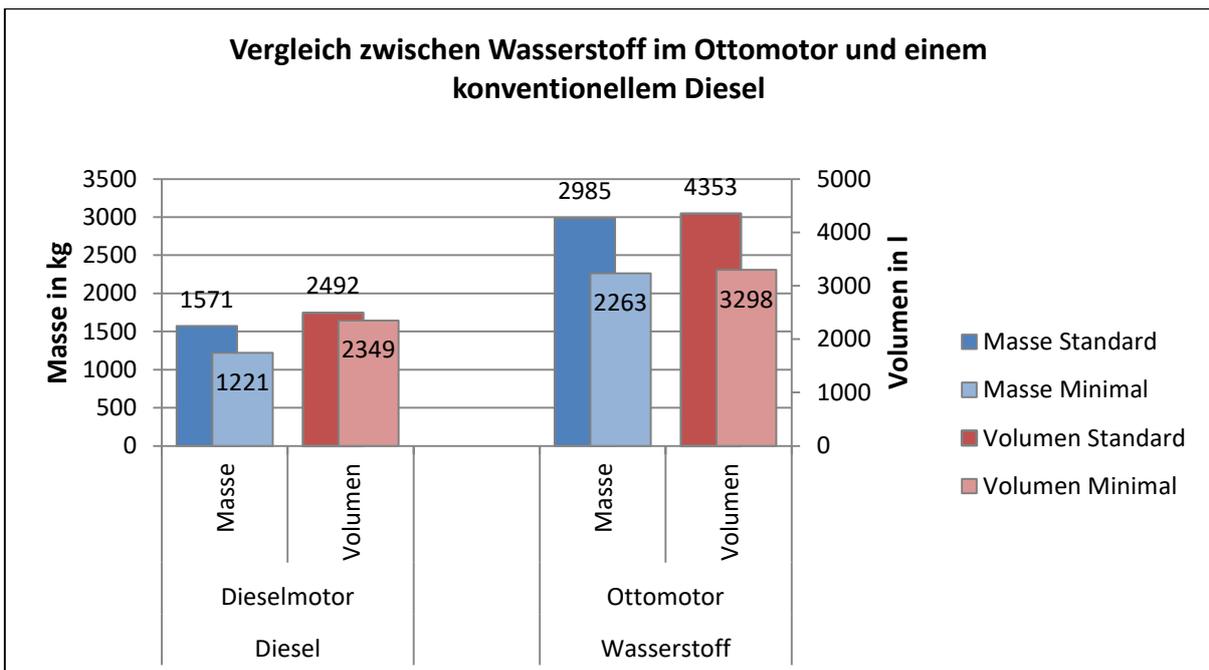


Abbildung 7-20: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und einem Ottomotor im Wasserstoffbetrieb

### 7.3.2 Wasserstoff im Freikolbenlineargenerator

Das Antriebsstrangkzept für die Verbrennung von Wasserstoff im Freikolbenlineargenerator wird aus Kapitel 7.2.3 Ammoniak im Freikolbenlineargenerator übernommen. Die Wirkungsgradkette wird in Abbildung 7-9 beschrieben. Lediglich die Substitution des Ammoniaks durch Wasserstoff und die damit verbundenen abweichenden Speichereigenschaften führen zu unterschiedlichen Massen und Volumina der Antriebseinheiten. Für den Wasserstoffbetrieb zeigt Abbildung 7-21 die Berechnungsergebnisse.

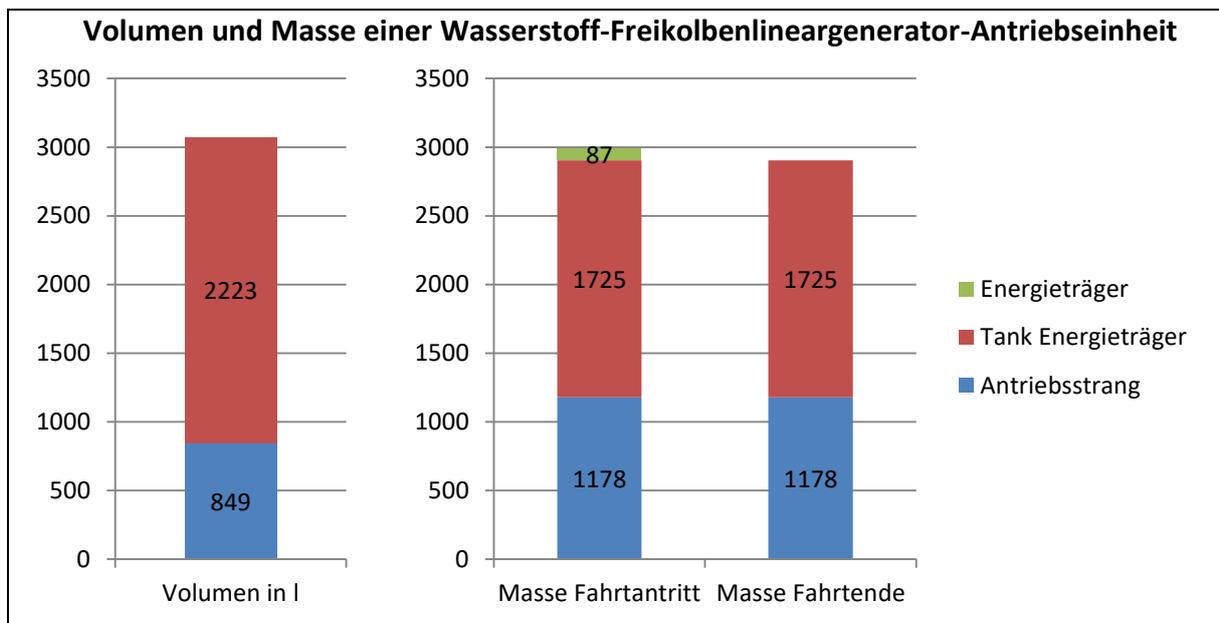


Abbildung 7-21: Wasserstoff-Freikolbenlineargenerator-Antriebseinheit in Standardkonfiguration

Durch den besseren Wirkungsgrad des Freikolbenlineargenerators sowie den geringeren Energiebedarf am Rad aufgrund möglicher Rekuperation ist das Tankgewicht und -volumen deutlich geringer als im Wasserstoff-Ottomotorkonzept. Die Masse des Antriebsstrangs ist etwas größer als beim Ottomotor, was auf den Energiepuffer zurückzuführen ist. Wird das System auf die Minimalkonfiguration skaliert, ist es beim Bauraumbedarf vergleichbar mit einem konventionellen Diesel. Dieser Umstand muss jedoch mit einem deutlich höheren Gewicht bezahlt werden. Um Wasserstoff platzsparend speichern zu können, müssen die Tanks den hohen Drücken standhalten, was zwangsläufig zu hohen Massen führt. Der Gewichtsmalus gegenüber der Referenzeinheit in der Minimalkonfiguration liegt bei 81%, während der Platzbedarf nahezu unverändert bleibt.

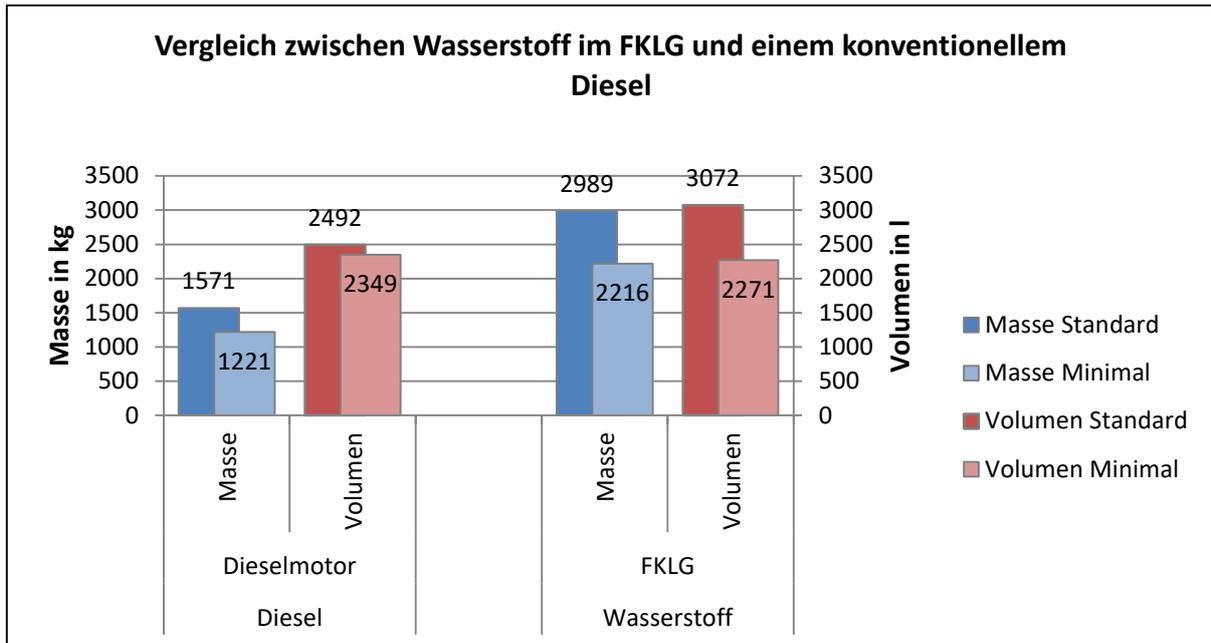


Abbildung 7-22: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselantrieb und Wasserstoff im FKLG

### 7.3.3 Wasserstoff in der Festoxidbrennstoffzelle

In der automotiven Praxis werden Festoxidbrennstoffzellen vorwiegend mit Diesel betrieben, da diese als Auxiliary Power Unit auf den konventionellen Fahrzeugtank zurückgreifen. Der Dieselmotorkraftstoff wird innerhalb der Brennstoffzelle reformiert. Allerdings entstehen dabei Kohlendioxidemissionen [RECH12]. In stationären Anwendungen werden Festoxidbrennstoffzellen mit Erdgas betrieben und in Kraftwerken zur Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt. [FONT04] Für den Wasserstoffbetrieb der Festoxidbrennstoffzellen konnten keine Wirkungsgradangaben gefunden werden. Etwaige Verluste bei der internen Kraftstoffreformation entfallen, dafür steigt im Vergleich zum Ammoniakbetrieb der Kühlungsbedarf. Es wird daher derselbe Wirkungsgrad von 55% für die Festoxidbrennstoffzelle angesetzt. Der Aufbau und die Randbedingungen des Antriebsstrangkonzepts entsprechen denen aus Kapitel 7.2.4 Ammoniak in der Festoxid-Brennstoffzelle. Auch hier ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von 49,4%.

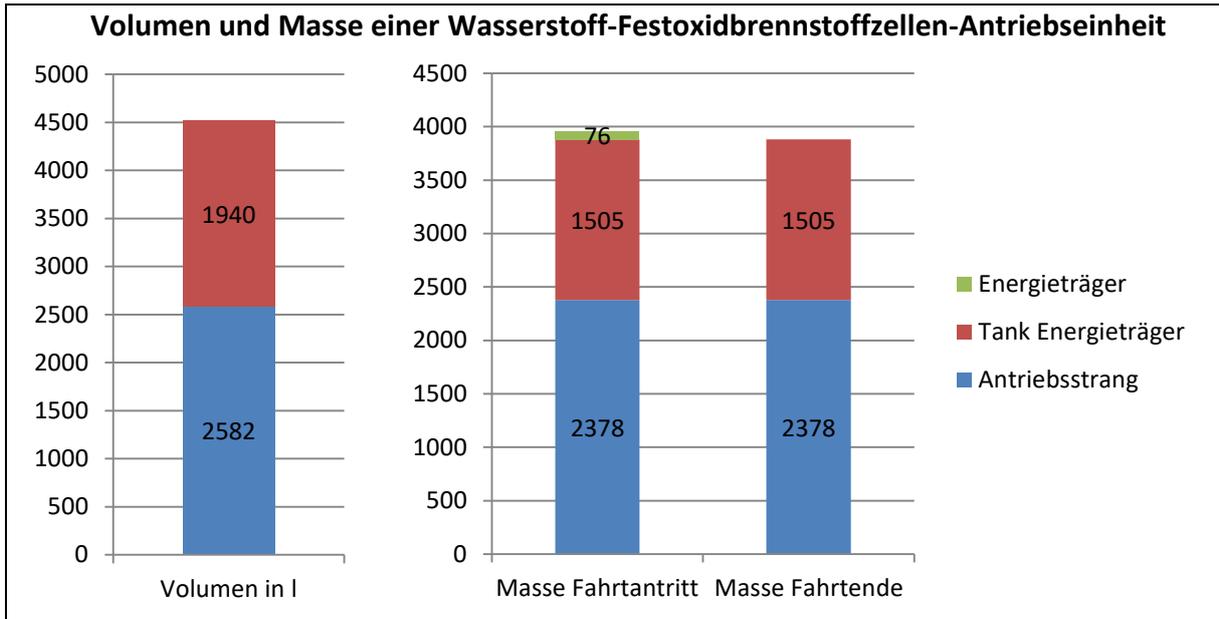


Abbildung 7-23: Wasserstoff-Festoxidbrennstoffzellen-Antriebseinheit in Standard-Konfiguration

Die geringe Leistungsdichte der Festoxidbrennstoffzelle kann durch den guten Wirkungsgrad nicht ausgeglichen werden. Insgesamt ist dieses Konzept fast 1 t schwerer und ca. 1400 l größer als die Freikolbenlineargenerator-Antriebseinheit. Auch die verringerten Anforderungen in der Minimalkonfiguration ändern nichts an diesem Verhältnis. Gegenüber der Referenzeinheit liegt die Masse in der Minimalkonfiguration um 135% höher. Der Bauraumbedarf legt um 38% zu. Die Festoxidbrennstoffzelle ist weder im Ammoniak- noch im Wasserstoffbetrieb geeignet, einen 40t-Lkw anzutreiben.

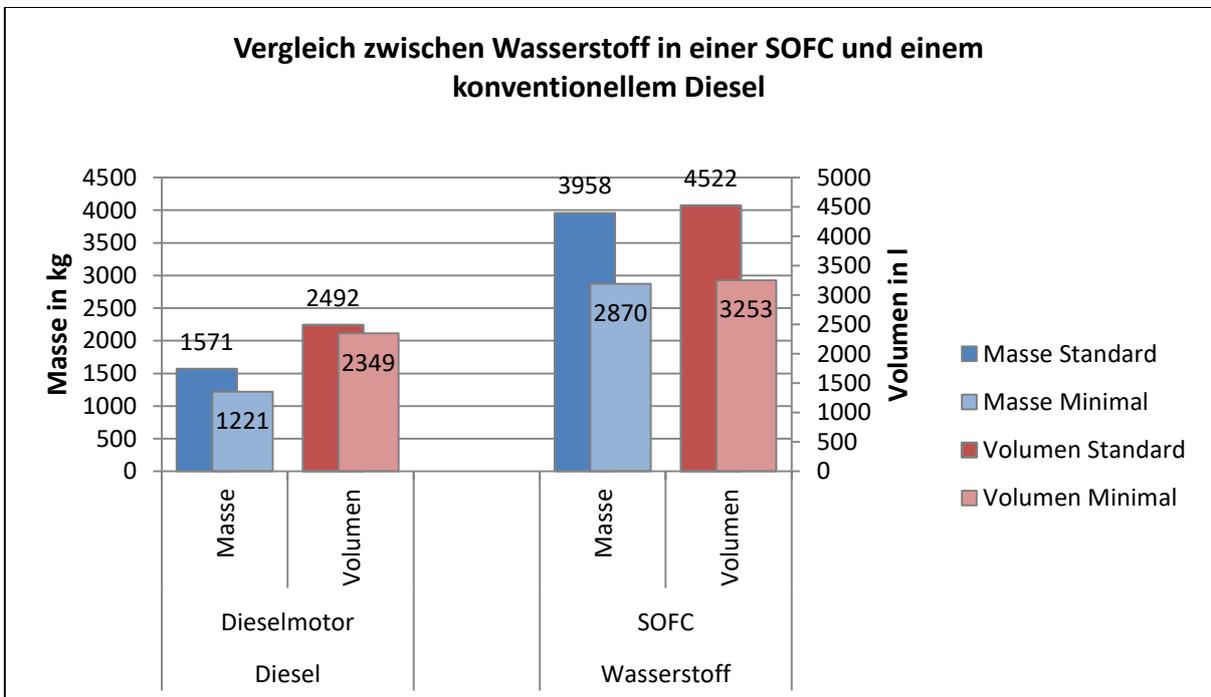


Abbildung 7-24: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselantrieb und Wasserstoff in der SOFC

### 7.3.4 Wasserstoff in der Polymerelektrolytbrennstoffzelle

Polymerelektrolytbrennstoffzellen (PEMFC) sind der meistverbaute Brennstoffzellentyp in der Automobilindustrie und es existieren mittlerweile käuflich erwerbbar Produkte auf dem Markt. Der Wirkungsgrad wird mit 50% angenommen. Die Leistungsdichten liegen bei 0,37 kW/kg bzw. bei 0,23 kW/l und wurden anhand eines Produktdatenblattes ermittelt. [BALL11] Der Pufferspeicher ist analog zu den vorigen Kapiteln aufgebaut. Es ergibt sich eine Wirkungsgradkette wie in Abbildung 7-25 dargestellt.

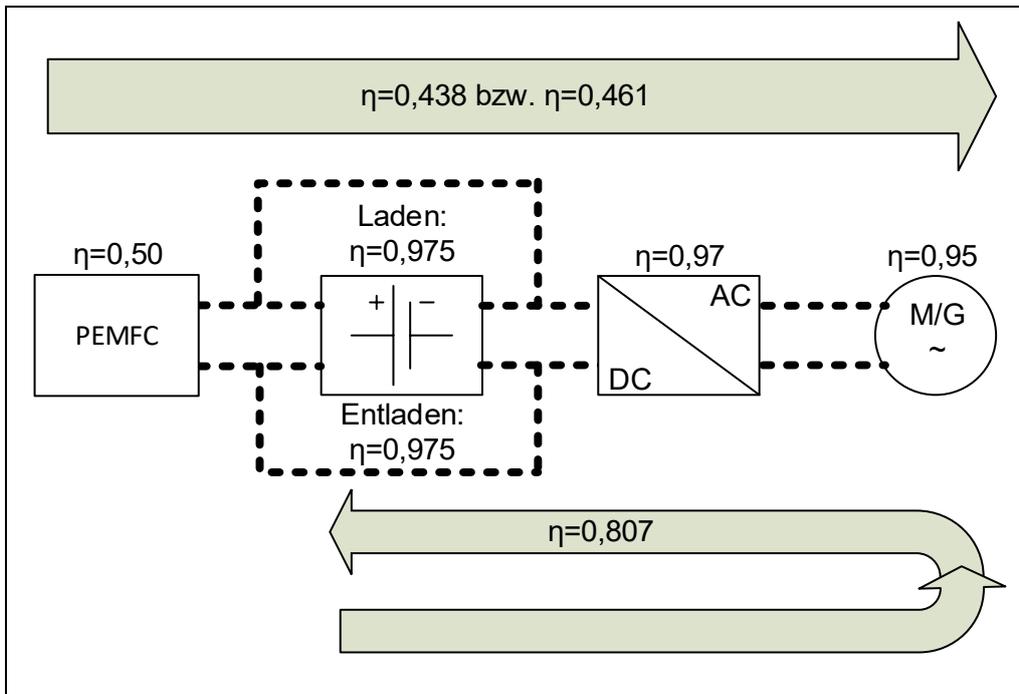


Abbildung 7-25: Wirkungsgradketten des Polymerelektrolyt-Brennstoffzellenantriebs

Der durchschnittliche Wirkungsgrad für dieses Konzept liegt bei knapp 45%.

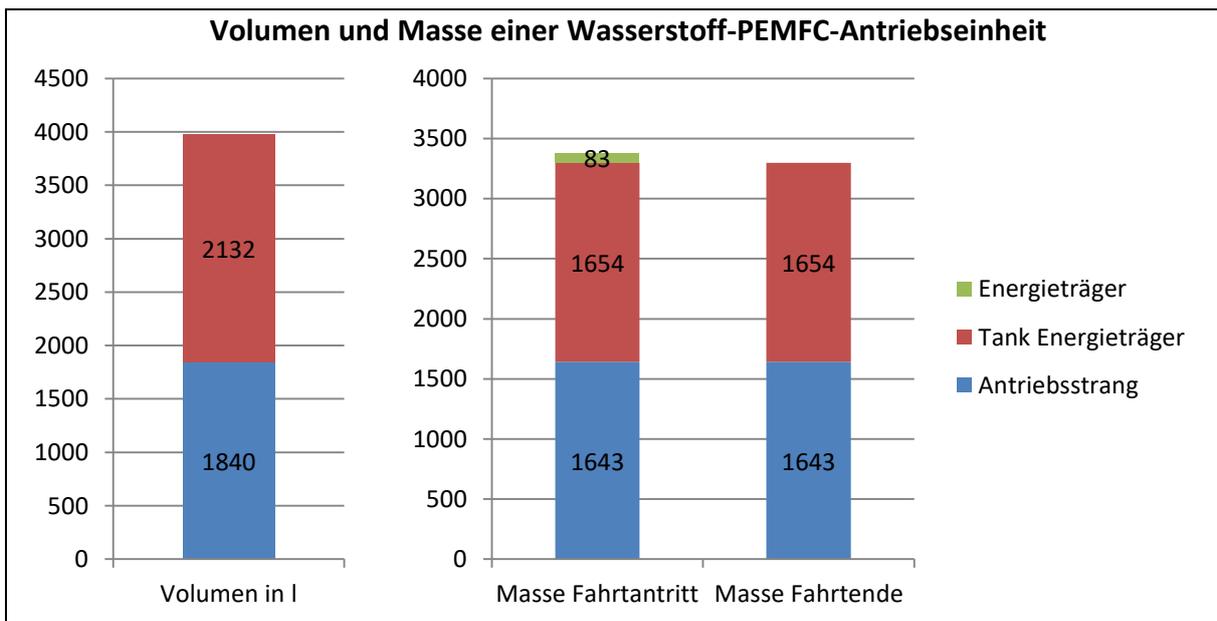


Abbildung 7-26: Wasserstoff-Polymerelektrolytbrennstoffzellen-Antriebseinheit in Standardkonfiguration

Durch die höhere Leistungsdichte kann die Polymerelektrolytbrennstoffzelle leichter und kleiner als die Festoxidbrennstoffzelle ausgeführt werden. Der im Vergleich etwas schlechtere Wirkungsgrad führt zu einer leichten Erhöhung der mitgeführten Kraftstoffmenge und damit vor allem zu einem etwas schwereren und voluminöseren Tank. Aus dem schlechteren Wirkungsgrad resultiert eine höhere Reichweitensensitivität, so dass in der Minimalkonfiguration die Tankmasse stärker als bei der SOFC zurückgeht. Dieser Umstand wird durch die reduzierte Leistungsanforderung in Verbindung mit der geringen Leistungsdichte der SOFC und daraus resultierenden größeren Masseinsparungen im SOFC-Antriebsstrang kompensiert. Letztendlich weisen SOFC und PEMFC ähnliche Einsparungen zwischen der Standard- und der Minimalkonfiguration auf. Demzufolge ist auch eine PEMFC derzeit nicht in der Lage, einen 40t-Lkw über längere Strecken anzutreiben. Wenngleich die Lebensdaueranforderungen durch eine PEMFC leichter erreichbar scheinen, als es mit einer SOFC der Fall ist.

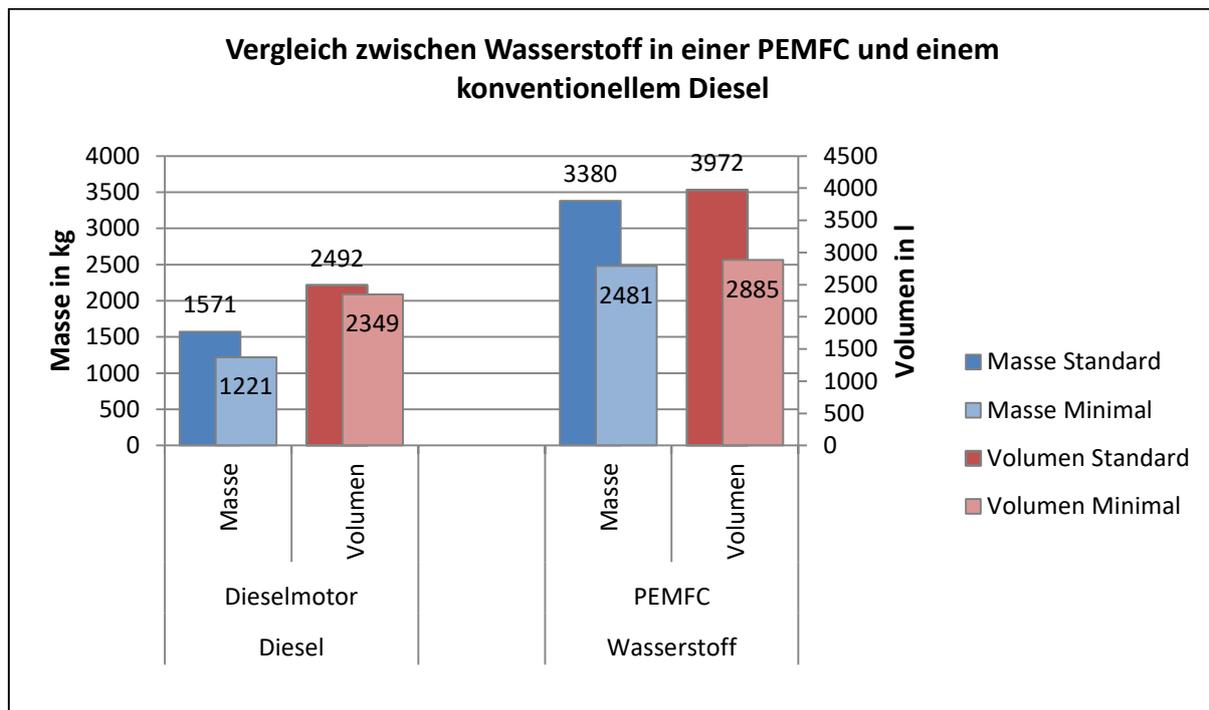


Abbildung 7-27: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselantrieb und Wasserstoff in der PEMFC

### 7.3.5 Wasserstoff – Übersicht

Die Ergebnisse der Berechnungen für die einzelnen Wasserstoffkonzepte sind in Abbildung 7-28 gegenüber gestellt. Der im Vergleich zum Dieselmotor höhere gravimetrische Heizwert des Wasserstoffs wird durch die zusätzlichen Massen der Maßnahmen zur Steigerung der volumetrischen Speicherdichte überkompensiert. Als Resultat schneiden die Wasserstoff-Konzepte sogar schlechter als die Ammoniakkonzepte ab. Die Tendenz innerhalb der Konzepte ist mit den Ammoniakkonzepten vergleichbar. Die Brennstoffzellenkonzepte sind aufgrund der geringeren Leistungsdichten weniger geeignet. Am besten schneidet der Freikolbenlineargenerator ab.

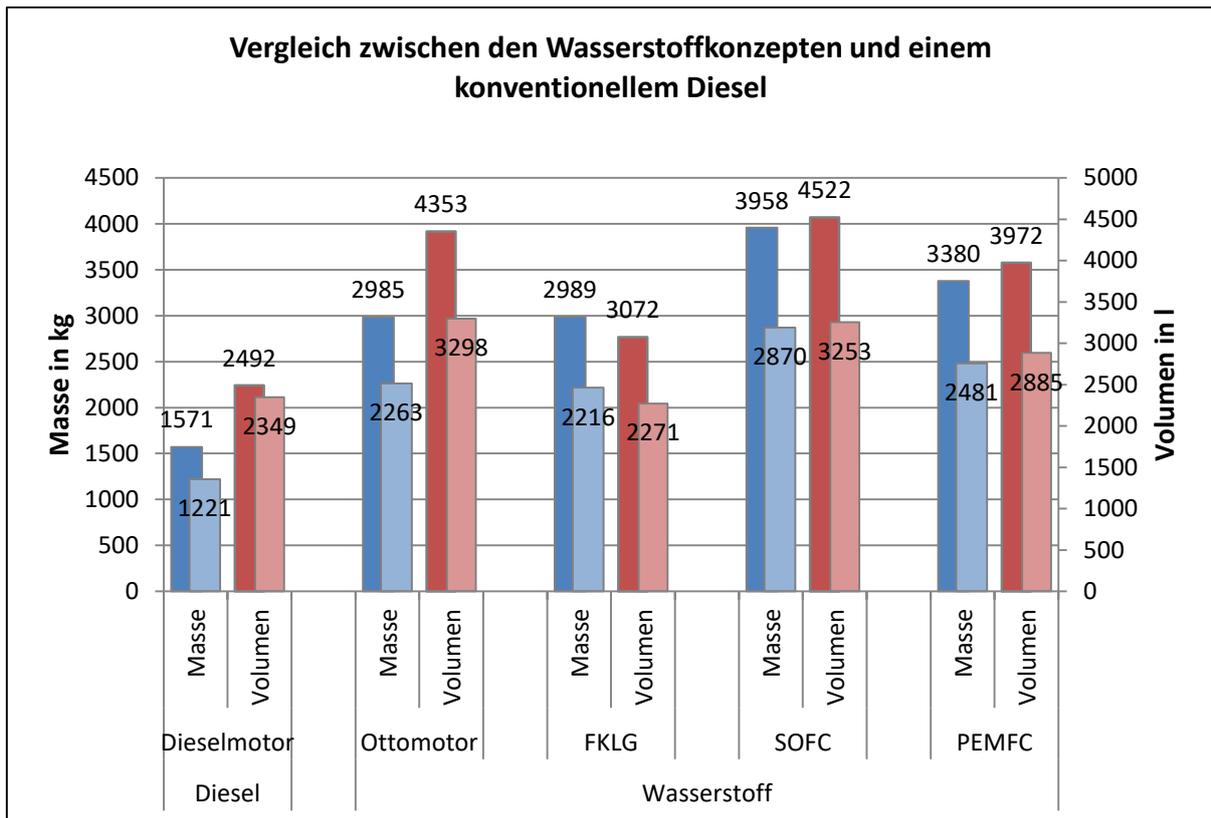


Abbildung 7-28: Übersicht der Wasserstoffkonzepte neben der konventionellen Dieselantriebseinheit

### 7.3.6 Sensitivität - Wasserstoff im Freikolbenlineargenerator

Ähnlich wie bei Ammoniak ist auch für Wasserstoff der Einsatz im Freikolbenlineargenerator die favorisierte Lösung. Aufgrund der Ähnlichkeit der Konzepte und für eine gute Vergleichbarkeit werden der Wirkungsgrad und die Leistungsdichte (volumetrisch und gravimetrisch) des Freikolbenlineargenerators sowie die Speicherdichte (volumetrisch und gravimetrisch) des Wasserstoffspeichers variiert.

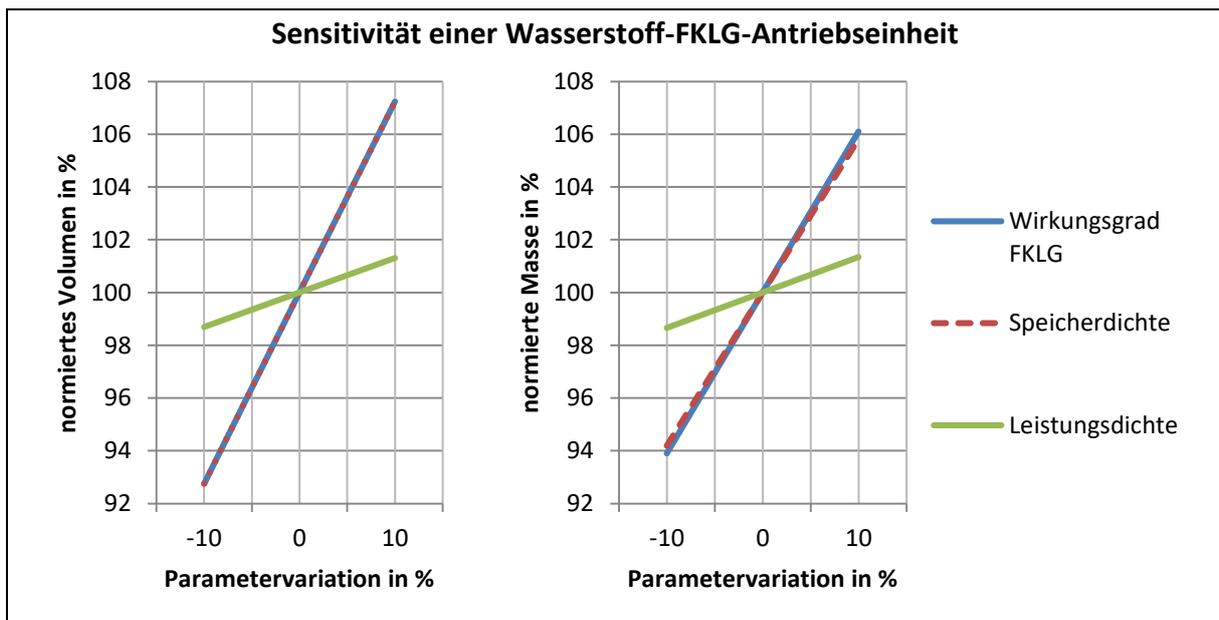


Abbildung 7-29: Einflüsse der Parameter Wirkungsgrad und Leistungsdichte des FKLG sowie Speicherdichte des Wasserstoffspeichers auf die Masse und das Volumen der Wasserstoff-FKLG-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration

Konzeptbedingt haben auch hier der Wirkungsgrad des FKLG und die Speicherdichte des Wasserstoffspeichers einen identischen Einfluss auf das Volumen. Wenngleich durch den größeren Anteil der Kraftstofftanks an Gesamtmasse und -volumen der Antriebseinheit alle Maßnahmen zur Verbesserung der Speicherdichte bzw. Reduktion des Kraftstoffbedarfs einen größeren Einfluss haben. Die Leistungsdichte hat einen ähnlich geringen Einfluss wie im Ammoniak-FKLG-Konzept. Die Fehlerindikatoren liegen für das Volumen bei 0,53 und für die Masse bei 0,44.

## 7.4 Dampfturbinenantriebseinheit

Alleinstellungsmerkmal der Dampfturbinenantriebseinheit ist die Möglichkeit, brennbare Feststoffe ohne einen Reformier als thermische Energiequelle zu nutzen. Aus Sicht der Energiewandlung wird dadurch der wenig effiziente Prozessschritt der Reformation eingespart, was den Aufwand verringert und die Gesamteffizienz der Anlage verbessert. Aus Sicht der CO<sub>2</sub>-Vermeidung können Kraftstoffe eingesetzt werden, deren Verbrennungsprodukte fest oder flüssig sind und sich leicht auffangen lassen. Dadurch entfällt die aufwendige Abtrennung gasförmiger Verbrennungsprodukte aus einem Gasstrom. Der Fokus der Betrachtung liegt auf dem Einsatz fester Kraftstoffe zur leichteren Abtrennung der Verbrennungsprodukte, der Einsatz von flüssigen oder gasförmigen Energieträgern ist aber ebenfalls möglich und bedingt nur leichte Änderungen im Konzeptaufbau.

Dampfturbinen werden in großen Kraftwerken eingesetzt. Die Auslegung der Turbine und die Prozessparameter werden für eine hohe Effizienz optimiert. Bauraum und Gewicht der Gesamtanlage spielen nur eine untergeordnete Rolle. Ein weiteres Feld für den Einsatz von Dampfturbinen ist die Abwärmenutzung. In stationärer Form finden sie Anwendung in chemischen Anlagen zur Prozessabwärmenutzung. Bauraum und Gewicht spielen ebenfalls kaum eine Rolle. Die Optimierung der Dampfturbine findet jedoch unter den Prozessdampfparametern statt, welche vom vorgeschalteten Prozess vorgegeben werden. Der dritte Anwendungsfall ist die Abwärmenutzung in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Package, Gewicht und Effizienz sind hier zum Teil gegenläufige Ziele. Die Dampfturbine muss mit einem veränderlichen Dampfangebot umgehen können und zugleich den bestmöglichen Kompromiss zwischen den einzelnen Zielen finden. Es ist klar, dass je nach Einsatzfall die Eigenschaften der Dampfturbinen und weiterer Komponenten wie Dampferzeugern und Wärmetauschern mehr oder weniger stark voneinander abweichen. Keiner der beschriebenen Einsatzfälle, für die es Daten in der Literatur zu finden gibt, passt auf eine Dampfturbinenantriebseinheit, wie sie für den Vortrieb eines schweren Nutzfahrzeugs im Fernverkehr benötigt wird. In diesem Fall spielen analog zur Abwärmenutzung im Fahrzeug Package, Gewicht und Effizienz eine große Rolle, jedoch kann das Dampfangebot an die Bedürfnisse der Dampfturbine weitestgehend angepasst werden. Als serieller Hybrid mit Speicher sind die Leistungsabgabe der Dampfturbine und die Leistungsanforderung der Traktionsmotoren voneinander getrennt. Dies steigert den Wirkungsgrad der Dampfturbinenantriebseinheit.

Im Folgenden werden zwei Konzepte aufgebaut. Das erste basiert auf Literaturdaten von Anlagen, die für den ortsfesten Betrieb entwickelt wurden. Das zweite Konzept verwendet Komponenten aus dem Automobilbereich, die jedoch zum Teil für andere Zwecke entwickelt wurden und unter anderen Bedingungen arbeiten. In beiden Konzepten wird in einem Dampferzeuger überhitzter Frischdampf bei 90 bar und 500 °C der Turbine bereitgestellt. Im ersten Konzept wird bei 50 °C rückgekühlt, so dass sich im Kondensator ein Druck von 0,124 bar einstellt.

Im zweiten Konzept findet die Rückkühlung durch einen handelsüblichen Fahrzeugkühler bei 80 °C statt, was einem Kondensatordruck von 0,474 bar entspricht. Das Temperaturniveau ist vergleichbar mit der Arbeitstemperatur eines Motorkühlers. Kondensationsturbinen in Kraftwerken erreichen isentrope Wirkungsgrade von 82%. [KRÄM05] Einstufige Kleindampfturbinen erreichen lediglich Wirkungsgrade von 58,8%, können aber einfacher im Teillastbereich betrieben werden. [HAMP08] In Abbildung 7-30 sind die daraus resultierenden Prozessschritte im relevanten Ausschnitt eines h-s-Diagramms dargestellt.

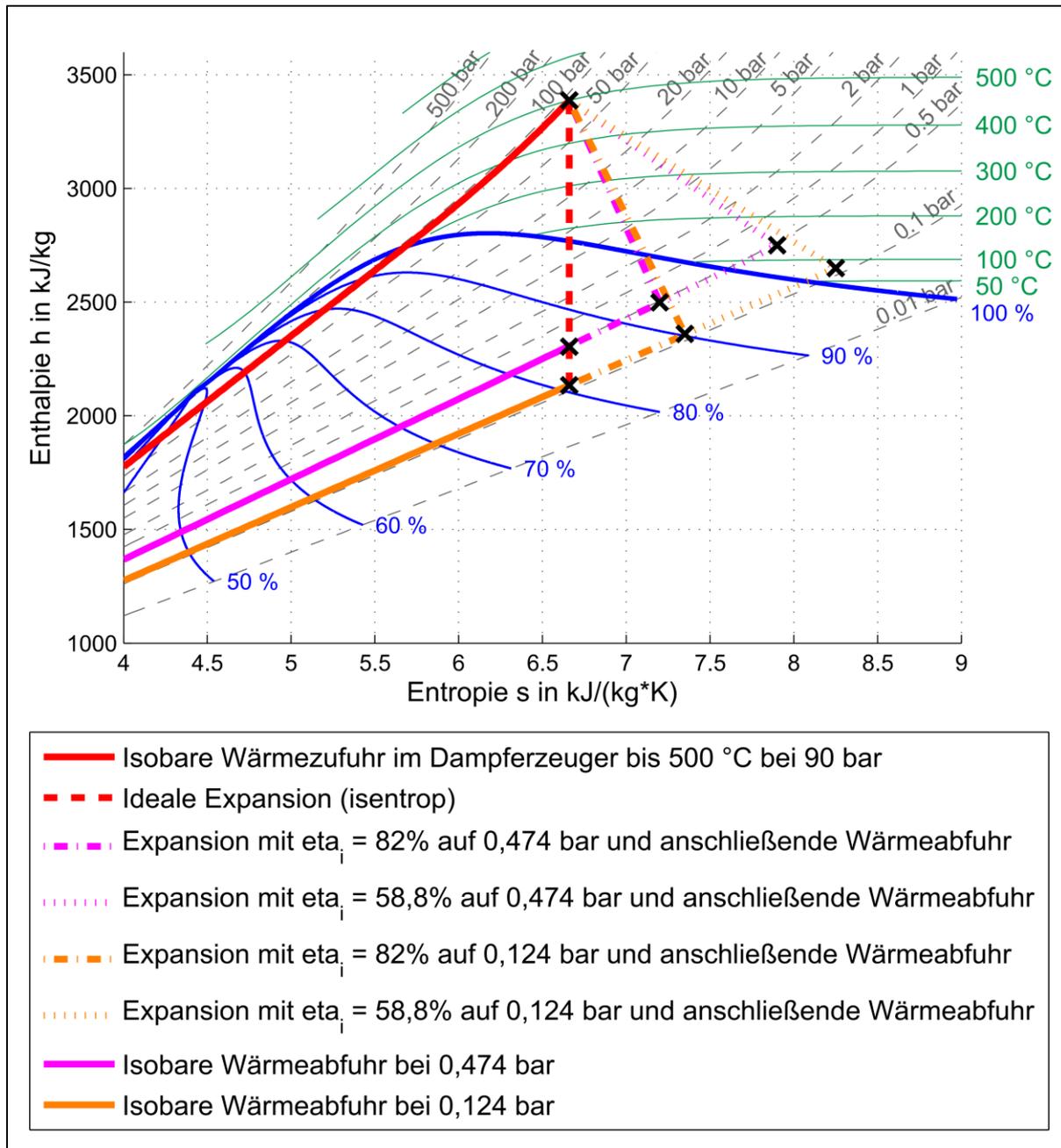


Abbildung 7-30: Zustandsänderungen im h-s-Diagramm (eigene Darstellung)

Ausgehend vom Frischdampfzustand 500 °C bei 90 bar erfolgt die Expansion. Die isentrope Expansion ist gleichbedeutend mit einem inneren Wirkungsgrad von 100% und ist die Bezugsgröße für reale Prozesse mit inneren Wirkungsgraden unter 100%. Sie stellt die maximale Arbeitsausbeute einer Turbine bei gegebenem Kondensationsdruck dar.

Es ist zu beachten, dass bei der Expansion in das Nassdampfgebiet ein Dampfgehalt von 85% (blaue Linien) nicht unterschritten wird, da sonst die Turbine Schaden nimmt. [KRÄM05] Turbinen mit einem inneren Wirkungsgrad von 58,8% erreichen bei einer Expansion auf 0,474 bar bzw. 0,124 bar einen Zustandspunkt im Gasgebiet, während Turbinen mit  $\eta_i = 82\%$  bis in das Nassdampfgebiet expandieren. Eine Expansion in das Nassdampfgebiet (idealerweise isentrop) erhöht das Enthalpiegefälle und somit die nutzbare Energie zwischen den Zuständen vor und nach der Turbine. Für die Kondensation muss weniger Wärme abgeführt werden.

Die Dampfturbine muss 354 kW leisten, wenn ca. 5% des erzeugten Stroms für den Betrieb der Hilfsaggregate wie Pumpe und Mühle benötigt werden, der Generatorwirkungsgrad 95% und die verfügbare Nettoleistung 320 kW betragen soll. Mittels Turbinenleistung und dem Enthalpiegefälle aus Abbildung 7-30 wird der Massenstrom bestimmt. Aus dem Produkt aus Massenstrom und Enthalpiedifferenz wird die Abwärme, sowie Verdampfer- und Pumpenleistung berechnet. Der Quotient aus der Nettoleistung von 320 kW und der Verdampferleistung wird als Prozesswirkungsgrad definiert. Der Pumpenleistung liegt ein Pumpengesamtwirkungsgrad von 72% zugrunde. Die Ergebnisse für die jeweilige Prozessführung sind in Tabelle 7-4 dargestellt.

Tabelle 7-4: Massenströme, Wirkungsgrade und Leistungen für verschiedene Prozessführungen

| Rückkühltemperatur | Turbinenwirkungsgrad in % | Prozesswirkungsgrad in % | Massenstrom in kg/s | Abwärme in kW | Verdampferleistung in kW | Pumpenleistung in kW |
|--------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|---------------|--------------------------|----------------------|
| 80 °C              | 100                       | 32,17                    | 0,33                | 644           | 995                      | 4,3                  |
|                    | 82                        | 26,38                    | 0,4                 | 863           | 1213                     | 5,1                  |
|                    | 58,8                      | 18,92                    | 0,56                | 1343          | 1691                     | 7,1                  |
| 50 °C              | 100                       | 35,75                    | 0,28                | 544           | 895                      | 3,5                  |
|                    | 82                        | 29,31                    | 0,34                | 741           | 1092                     | 4,3                  |
|                    | 58,8                      | 21,02                    | 0,48                | 1173          | 1522                     | 6,0                  |

Anhand der Daten aus Tabelle 7-4 werden Dampfturbinen, Dampferzeuger, Kondensatoren und Pumpen in den folgenden Unterkapiteln ausgewählt.

#### 7.4.1 Dampfturbinenantriebseinheit aus ortsfest ausgelegten Komponenten

In diesem Konzept werden Komponenten verwendet, die für eine hohe Effizienz entwickelt wurden. Für die Prozessführung bedeutet dies, dass der eingesetzte Kondensator das Wasser bei 50 °C kondensiert und eine Turbine mit einem inneren Wirkungsgrad von 82% zum Einsatz kommt. Daraus resultiert ein Prozesswirkungsgrad von 29,3%. Der Wirkungsgrad eines typischen Dampferzeugers aus Dampfkraftwerken liegt bei 92%. [ETW11] Mit kleineren Bezugsdurchmessern der Beschaufelung steigt die Drehzahl der Turbine und für den Generatorbetrieb wird ein Getriebe nötig. [KRÄM05] Dies gilt jedoch nur für den direkten Anschluss an das Stromnetz. Zum Laden des Energiespeichers wird der Generatorstrom gleichgerichtet und das Getriebe entfällt. Der in Kapitel 7.2.3 vorgestellte E-Triebstrang komplettiert den Dampfturbinenantriebsstrang. Die resultierende Wirkungsgradkette ist in Abbildung 7-31 dargestellt.

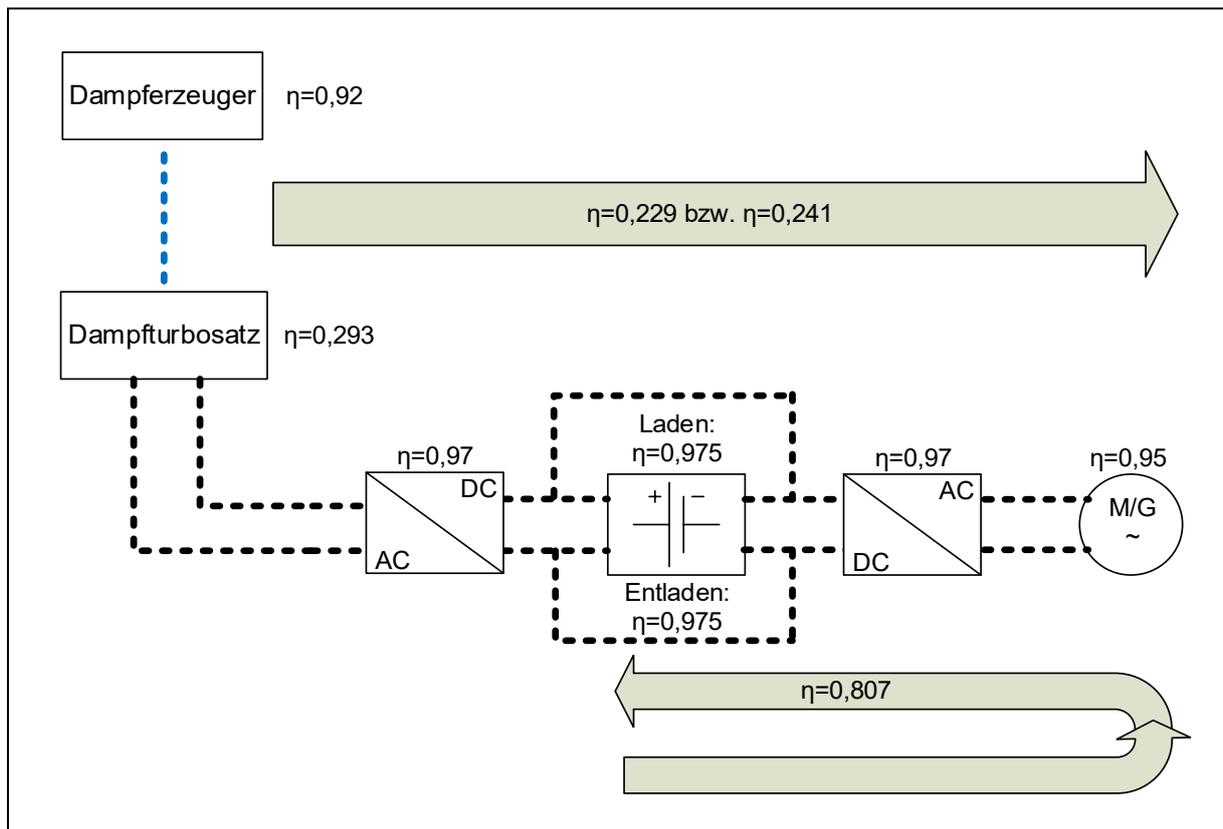


Abbildung 7-31: Wirkungsgradkette des Dampfturbinenkonzepts mit stationär ausgelegten Komponenten

Für die 320 kW Ausgangsleistung des Dampfturbosatzes muss der Verdampfer gemäß Tabelle 7-4 1092 kW Dampfleistung liefern. Die Mühle muss dementsprechend ein Brennstoffpulver mit einer Heizwertleistung, dem Produkt aus Heizwert und Massenstrom, von ca. 1187 kW herstellen. In Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff ergibt sich daraus der benötigte Massenstrom. Für einen stationären Prozess muss die Summe der zugeführten Energien der Summe der entnommenen Energien entsprechen. Die Pumpe und der Dampferzeuger übertragen Energie bzw. Leistung an das Arbeitsmedium, während die Turbine dem Medium Energie bzw. Leistung entzieht. Der Rückkühler führt die Differenz der Leistungen als Abwärme an die Umgebung ab. Mit den angenommenen Wirkungsgraden muss der Rückkühler bei maximaler Leistung und optimalem Wirkungsgrad ca. 741 kW abführen.

Silizium besitzt eine hohe gravimetrische und eine sehr hohe volumetrische Energiedichte (vgl. Tabelle 5-10) und wird daher für den Einsatz als Brennstoff im Dampfturbinenkonzept vorgesehen. In der Standard-Konfiguration liegt der Volumenvorteil des massiven Siliziums gegenüber der Pulverform bei ca. 167 l.

Die Auslegung der Mühle erfolgt anhand des benötigten Massenstroms, der in Verbindung mit dem Heizwert die geforderte Brennerleistung liefert. Demnach wiegt die Mühle ungefähr 245 kg und benötigt 207 l Bauraum. Im Vollastbetrieb liegt die Leistungsaufnahme bei ca. 1,3 kW. [LOES14] Mit den Leistungsdichten stationär eingesetzter Mühlen lässt sich kein Bauraumvorteil realisieren. Für den sinnvollen mobilen Einsatz einer Mühle muss deren Leistungsdichte deutlich gesteigert werden. Andernfalls muss das Konzept des Mahlens im Fahrzeug verworfen und stattdessen pulverförmiger Kraftstoff mitgeführt werden.

Als Orientierung zur Abschätzung der erforderlichen Größe des Siliziumbehälters dient ein handelsüblicher Kohlebehälter aus Stahl. Es wird angenommen, dass trotz erhöhter Dichte und somit fast verdoppelter Kraftstoffmasse, die Wandstärken von 1 mm beibehalten werden können. Demnach kann ein quaderförmiger 20 kg schwerer Behälter mit einem Volumen von 253 l ca. 584 kg massives Silizium aufnehmen. Nachdem das Silizium in der Mühle gemahlen wurde, wird es im Dampferzeuger verbrannt. Das entstehende Siliziumdioxid hat auf Kornebene in etwa die gleiche Dichte wie Silizium. Allerdings liegt es in Pulverform vor, wodurch sich die Speicherdichte auf ca. 60% verringert. Für die Reichweite von 1100 km müssen ca. 584 kg Silizium mitgeführt werden. Der Siliziumbehälter wiegt entsprechend der Annahmen ca. 20 kg und benötigt 253 l Bauraum. Die entstehende Asche wiegt 1250 kg und wird in einem 791 l großen und 42 kg schweren Behälter aufgefangen. Es besteht die Möglichkeit, den leeren Aschebehälter zu Beginn einer Fahrt als Kraftstoffbehälter zu nutzen. Der Kraftstoff wird während der Fahrt verbraucht und schafft somit Platz für die Asche. Dadurch könnten 20 kg und 253 l Bauraum eingespart werden, allerdings erhöht sich dadurch der Aufwand beim Tanken bzw. Entsorgen der Asche, vor allem wenn sowohl Kraftstoff als auch Asche im Behälter vorhanden sind. Aus diesem Grund sieht das Basiskonzept eine Zwei-Tank-Lösung vor.

Die Daten für den Dampferzeuger werden anhand eines NCB 1000 mit 1160 kW Leistung der Firma GTA Kesseltechnik ermittelt. Dieser weist eine gravimetrische Leistungsdichte von 0,374 kW/kg und eine volumetrische Leistungsdichte von 0,036 kW/l auf und stellt Dampf bei bis zu 90 bar bereit. Da für eine hohe übertragene Leistung eine große Übertragerfläche bei ausreichend dicken Wandstärken von Nöten ist, ist der Bauraumbedarf eines Dampferzeugers sehr groß. In der Konfiguration für dieses Konzept wiegt der Dampferzeuger 2918 kg und ist über 30,5 m<sup>3</sup> groß. Hinzu kommt der Rückkühler mit 13,4 m<sup>3</sup> und 1246 kg. Er basiert auf den technischen Daten eines ARW 280 der Firma Emicon. Dessen Datenblatt gibt die Leistung, Gewicht und Abmaße für das Rückkühlen von Wasser mit 45 °C am Einlass und 40 °C am Auslass bei einer Umgebungstemperatur von 35 °C an [EMIC16]. Die daraus resultierenden Leistungsdichten werden verdoppelt, da die im Konzept vorhandene Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungsluft bei 35 °C und der Kondensationstemperatur von 50 °C doppelt so groß ist. Es wird angenommen, dass sich die Einflüsse auf die Leistungsdichten aufgrund eines verbesserten Wärmeübergangs durch Phasenwechsel und dickeren Wandstärken aufgrund eines Druckgefälles zwischen Innen und Umgebung aufheben. Die Berechnungen der Leistungsdichten der Dampfturbine basieren auf den Zahlen des Kraftwerks Öresundsverket in Malmö. Dort kommen eine Hochdruck-, eine Mitteldruck- und eine Niederdruckturbine zum Einsatz. Die Hochdruckturbinensektion erreicht eine gravimetrische Leistungsdichte von 0,9 kW/kg, die Mitteldruckturbinensektion kommt auf 0,77 kW/kg und die Niederdruckturbinensektion schafft 0,81 kW/kg [E.ON10]. Die Festlegung auf eine gravimetrische Leistungsdichte von 0,86 kW/kg stellt einen Kompromiss dar. Darin ist das Gehäuse enthalten, Rohrleitungen jedoch nicht. Leider gibt es für diese Turbinen keine Bauraumangaben, so dass als Basis für die volumetrische Leistungsdichte die Siemens-Turbine SST-050 dient. Deren volumetrische Leistungsdichte wird mit 0,95 kW/l abgeschätzt [SIEM13]. Mit diesen Daten wiegt die Turbine 412 kg und benötigt ca. 373 l Bauraum. Aus dem Katalog der Firma Danfoss wird eine Hochdruckpumpe ausgewählt, die ungefähr den Anforderungen entspricht. Sie wiegt 8 kg und benötigt 2 l Bauraum [DANF07]. Die Basis für die Generatorberechnung liefert der gleiche Motor bzw. Generator von Brusa, der auch im E-Triebstrang als Motor zum Einsatz kommt. An diesen Generator wird besagter E-Triebstrang angeschlossen, um den Vortrieb darstellen zu können.

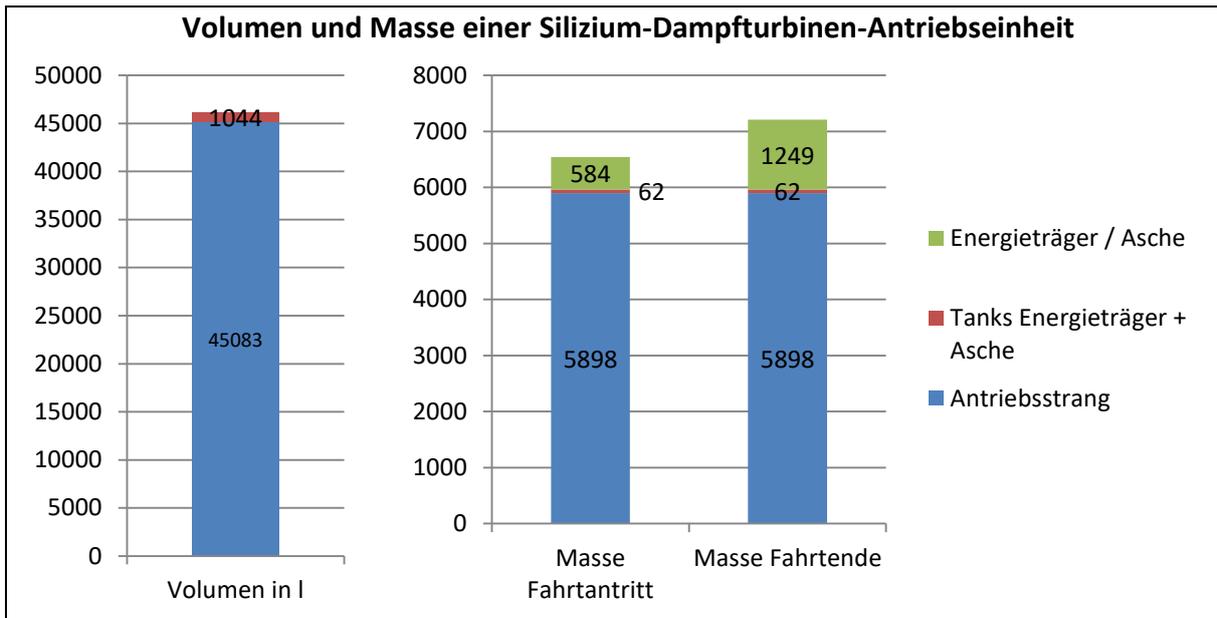


Abbildung 7-32: Silizium-Dampfturbinen-Antriebseinheit in der Standard-Konfiguration mit ortsfest ausgelegten Komponenten

Mit für den ortsfesten Betrieb ausgelegten Bauteilen ist die Silizium-Dampfturbinen-Antriebseinheit für den mobilen Einsatz nicht geeignet. Sie ist zu groß und zu schwer. Die Skalierung auf die Minimal-Konfiguration wirkt sich primär über die verminderte Leistungsanforderung aus. Dadurch können Wärmetauscher und Rückkühler deutlich kleiner ausgeführt werden. Die Einsparungen von ca. 30% entsprechen ungefähr der Leistungsreduktion von 320 kW auf 220 kW. Der Einfluss des Siliziums als Kraftstoff und die reduzierte Reichweitenanforderung sind untergeordnet.

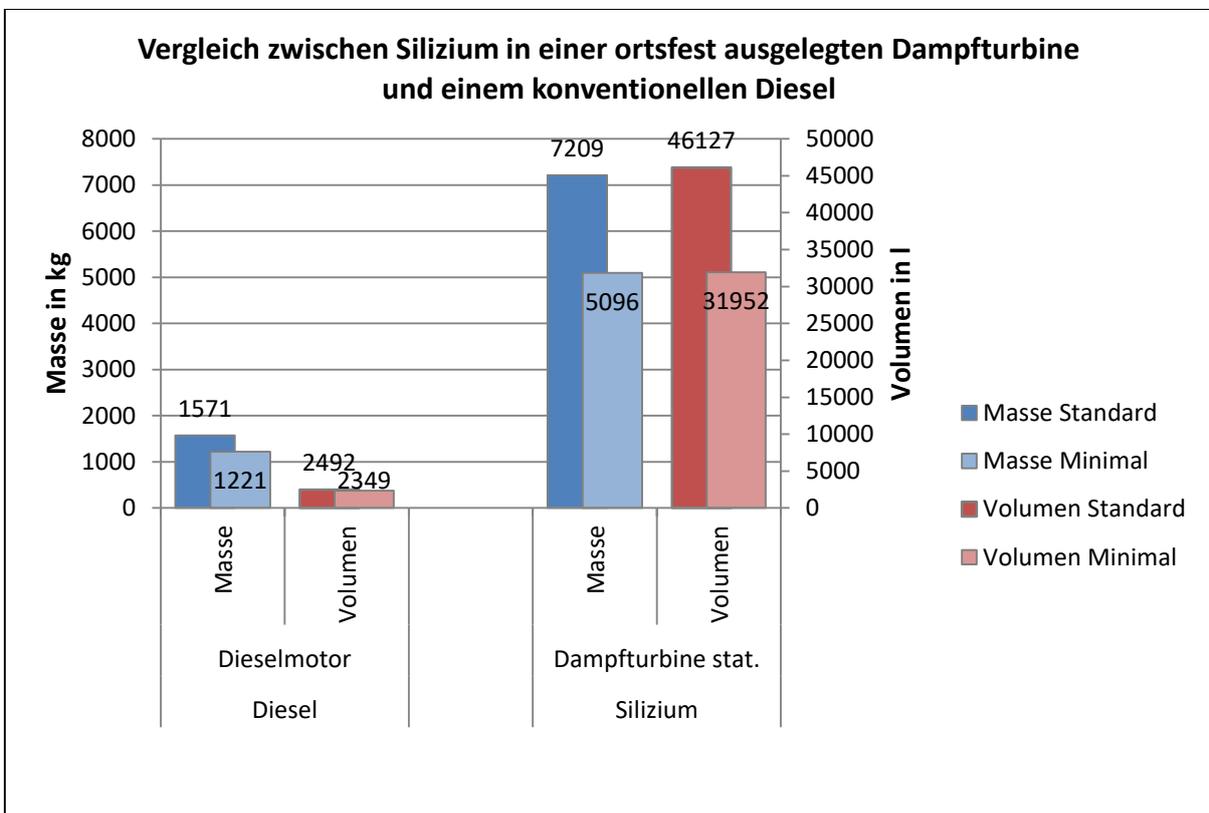


Abbildung 7-33: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselantriebsstrang und Silizium in der Dampfturbine auf Basis ortsfest ausgelegter Komponenten

Die Massen der Dampfturbinenkonzepte sind ca. viermal so groß wie ihre Diesel-Pendants. Zwischen den Volumina liegen sogar die Faktoren 13 bzw. 18. Dafür sind zwei Gründe maßgeblich verantwortlich. Die eingesetzten Technologien kommen aus der ortsfesten Energieversorgung, wo der Wirkungsgrad das ausschlaggebende Merkmal ist und Bauraum und Masse nur am Rande eine Rolle spielen. Außerdem benötigt der geschlossene Dampfkreis zwei Wärmeübertrager. Für eine hohe Leistung sind sehr große Übertragungsflächen oder Temperaturdifferenzen nötig, zudem können die Flächen nicht willkürlich im Fahrzeug angeordnet werden. Die Rückkühlung an Luft bei geringen Temperaturdifferenzen stellt grundsätzlich ein großes Problem dar. Mit der Reduktion der abzuführenden Wärmemenge durch Verbesserungen der Wirkungsgrade kann dieses Problem entschärft werden. Alternativ kann die Rückkühltemperatur angehoben werden, was die treibende Temperaturdifferenz vergrößert, jedoch auch den Carnot-Wirkungsgrad verschlechtert.

#### **7.4.2 Dampfturbinenantriebseinheit aus Komponenten für den Automobilbereich**

Zur Abschätzung des Verbesserungspotenzials wird ein zweites Konzept erstellt, welches vornehmlich auf Bauteile aus dem Automobilbereich zurückgreift. Als Basis für die Turbine dienen Daten der einstufigen SST-050 von Siemens. Der innere Wirkungsgrad wird auf 58,8% festgelegt [HAMP08]. Für die Wahl eines geeigneten Kondensators wird folgender Gedankengang verfolgt. Gemäß einer Faustregel wandelt ein Verbrennungsmotor ungefähr ein Drittel der Kraftstoffenergie in mechanische Arbeit um. Das zweite Drittel wird in Form von Wärme an das Kühlwasser übertragen und das dritte Drittel ist im Abgas enthalten. Demnach muss ein Kühler passend für einen 260 kW - Motor auch ungefähr 260 kW Wärme an die Umgebung übertragen können. Ein entsprechender Kühler aus einem Mercedes-Benz Axor wiegt weniger als 27 kg und besitzt ein Volumen von knapp 27,5 l [BEHR15]. Daraus werden die Leistungsdichten des Kondensators abgeleitet. Die 10 K geringere Kondensationstemperatur von 80 °C und die damit verbundene geringere Temperaturdifferenz zur Umgebung wird durch den Phasenübergang wahrscheinlich überkompensiert, so dass konservativ mit den Leistungsdichten des Motorkühlers gerechnet werden kann. Für den alternativen Dampferzeuger werden Daten aus dem Projekt CoolSteam verwendet. Die dort eingesetzte Einheit bestehend aus einem gewöhnlichen Standheizungs Brenner und einem nachgeschalteten Dampferzeuger der Firma Amovis wiegt 8 kg und benötigt 9,6 l Bauraum. Sie liefert ca. 11,5 kW Heizleistung. Der Wirkungsgrad für Wasser als Medium liegt bei 90%. Ethanol erreicht sogar einen Wirkungsgrad von 96%. Betrieben wird dieser Brenner mit Dieseldieselkraftstoff [CLEM12], woraus Unsicherheiten bei der Übertragbarkeit auf einen Feststoffbrenner resultieren. Die Speisewasserpumpe wiegt analog zum vorherigen Konzept 8 kg bei 2 l Bauraumbedarf.

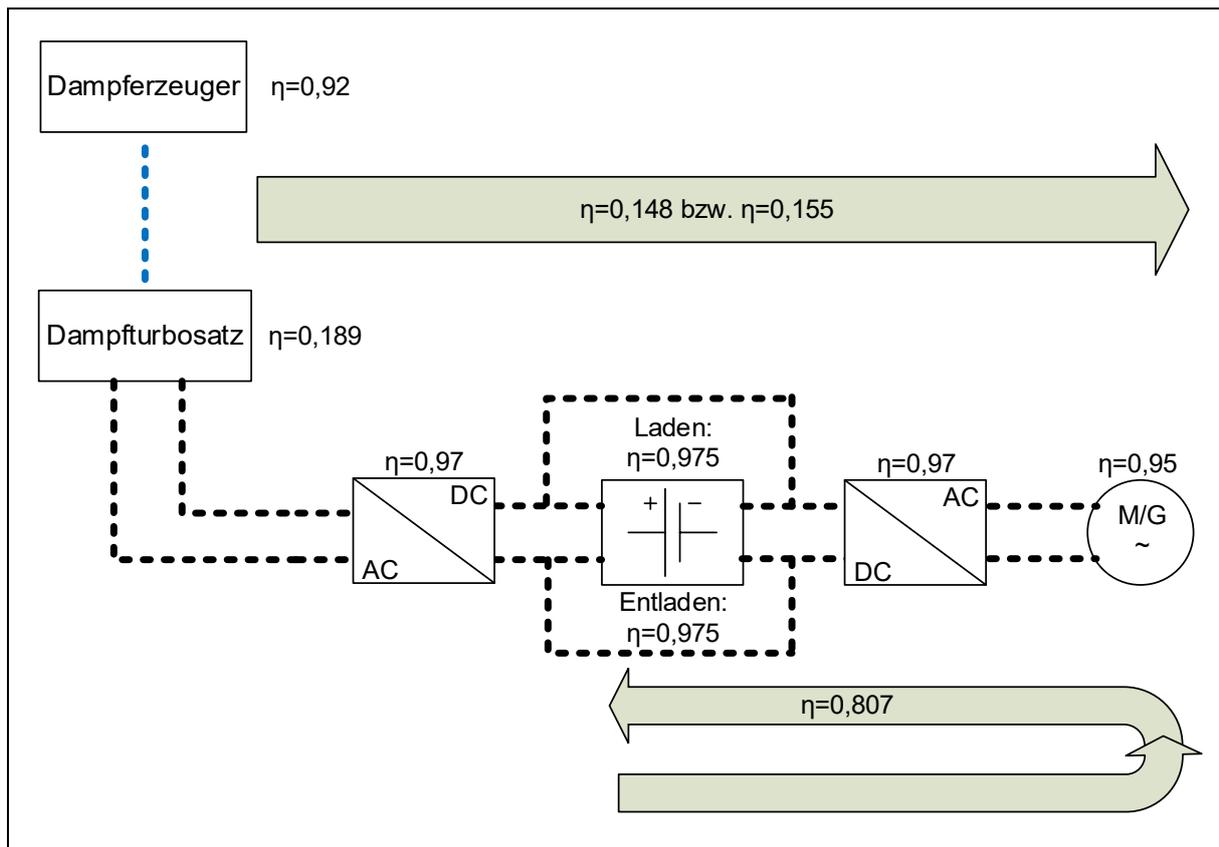


Abbildung 7-34:Wirkungsgradkette des Dampfturbinenkonzepts mit automatisch ausgelegten Komponenten

Durch den schlechteren Wirkungsgrad muss bei gleicher Reichweite mehr Kraftstoff mitgeführt werden. Mit steigender Kraftstoffmenge wird der Einsatz der Mühle attraktiver. Allerdings wird die Mühle selbst ebenfalls größer, da durch den schlechten Wirkungsgrad bei gleicher geforderter Leistung der Kraftstoffmassenstrom steigt. Für dieses Konzept wiegt eine passende Mühle 380 kg und benötigt 321 l Bauraum. Der Tank für 903 kg massives Silizium benötigt 391 l Bauraum. Die gleiche Masse als Pulver benötigt samt Tank 651 l Bauraum. Die Mühle ist somit größer, als das eingesparte Tankvolumen. Daher wird in diesem Konzept auf die Mühle an Bord verzichtet. Stattdessen muss das Silizium im gemahlene Zustand unter einer Schutzatmosphäre, wahrscheinlich Argon, da Silizium mit Stickstoff exotherm reagieren kann, getankt werden. Der Pulvertank wiegt 37 kg. Die resultierenden Massen und Volumina sind in Abbildung 7-35 dargestellt.

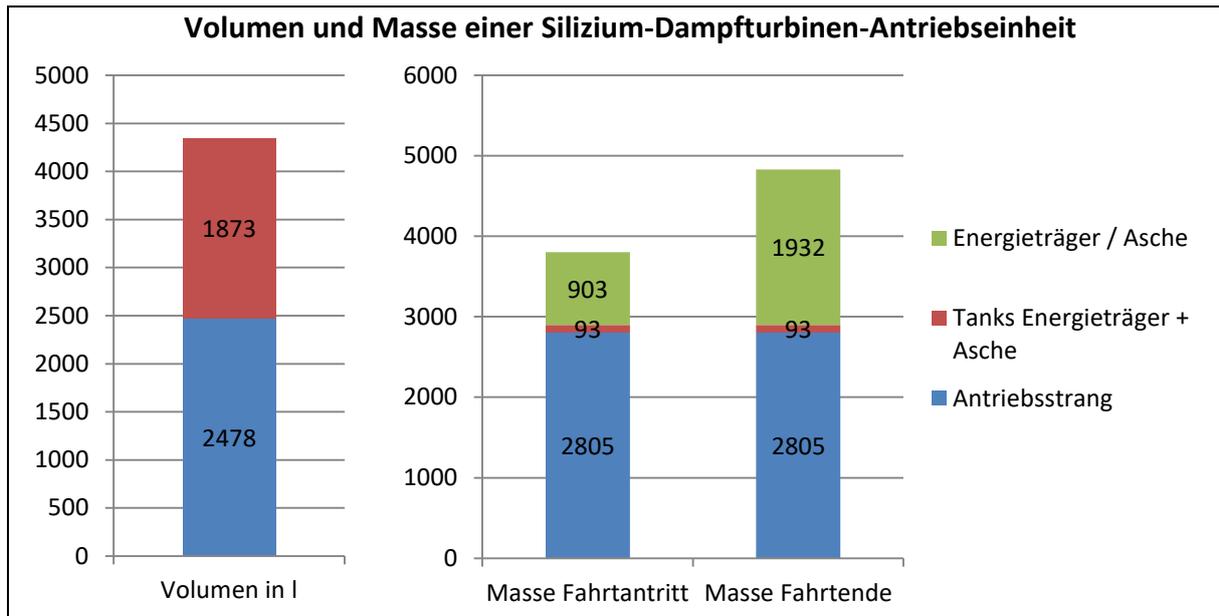


Abbildung 7-35: optimierte Silizium-Dampfturbinen-Antriebseinheit in der Standard-Konfiguration mit Automotive-Komponenten

Durch die höheren Leistungsdichten aus dem Automobilbereich teilt sich der Bauraumbedarf nahezu gleichmäßig auf den Antriebsstrang und die Tanks auf. Dementsprechend steigt der Einfluss der Reichweitenreduktion in der Minimalkonfiguration, so dass die Eigenschaften des Siliziums als Kraftstoff im Vergleich zur Standardkonfiguration an Bedeutung gewinnen.

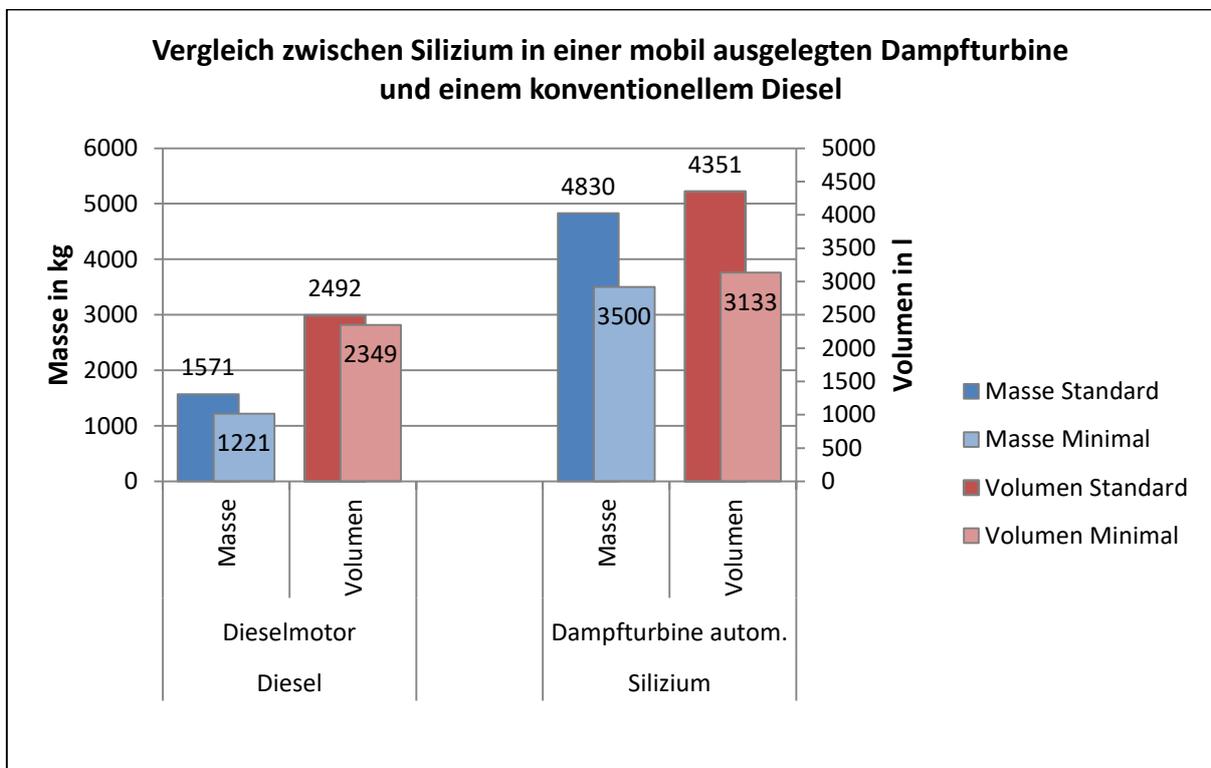


Abbildung 7-36: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und Silizium in der Dampfturbine auf Basis automotiver Komponenten

Silizium besitzt im Vergleich zum Diesekraftstoff trotz verringerter Schüttdichte einen größeren volumetrischen Heizwert, aber einen kleineren gravimetrischen Heizwert. Daraus resultiert in der Minimalkonfiguration ein Massezuwachs von 187%, während der Bauraumbedarf um 33% ansteigt.

In der Standardkonfiguration kommen die günstigen volumetrischen Eigenschaften des Siliziums weniger zum Tragen, der Einfluss des Antriebsstrangs mit den voluminösen Wärmetauschern steigt aufgrund der höheren Leistungsanforderung. Gegenüber der Diesel-Referenzeinheit legt die Masse um 186% zu und das Volumen steigt um 74%. Als Prognoseunsicherheit verbleibt die Eignung der Automotive-Komponenten für den Einsatz unter Dampfturbinenbedingungen bzw. die mögliche Reduktion der Leistungsdichten, wenn die Komponenten auf den Einsatz in der Dampfturbinenantriebseinheit angepasst werden müssen.

### 7.4.3 Dampfturbinenantriebseinheit – Übersicht

Die Auslegung ortsfester Komponenten strebt nach maximalen Gesamtwirkungsgraden und nimmt dabei kaum Rücksicht auf Bauraum und Masse. Daraus resultiert ein Bauraumbedarf von 46 m<sup>3</sup> bzw. 32 m<sup>3</sup> und das Ladevolumen eines 40-Tonnners verringert sich um die Hälfte bzw. ein Drittel. Der Ansatz Wirkungsgradverschlechterungen zu Gunsten des Bauraums in Kauf zu nehmen, ist vielversprechend. Der Mehrbedarf an Kraftstoff aufgrund der schlechteren Effizienz hat aufgrund der guten volumetrischen Eigenschaften des Siliziums nur einen geringen Einfluss auf das Volumen. Der Einfluss auf die Masse ist jedoch sehr groß. Im Vergleich zu den ortsfesten Komponenten kann mit Automotive-Komponenten 90% des Bauraums eingespart werden. Der Massevorteil liegt lediglich bei 33% bzw. 31%. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-37 gegenübergestellt.

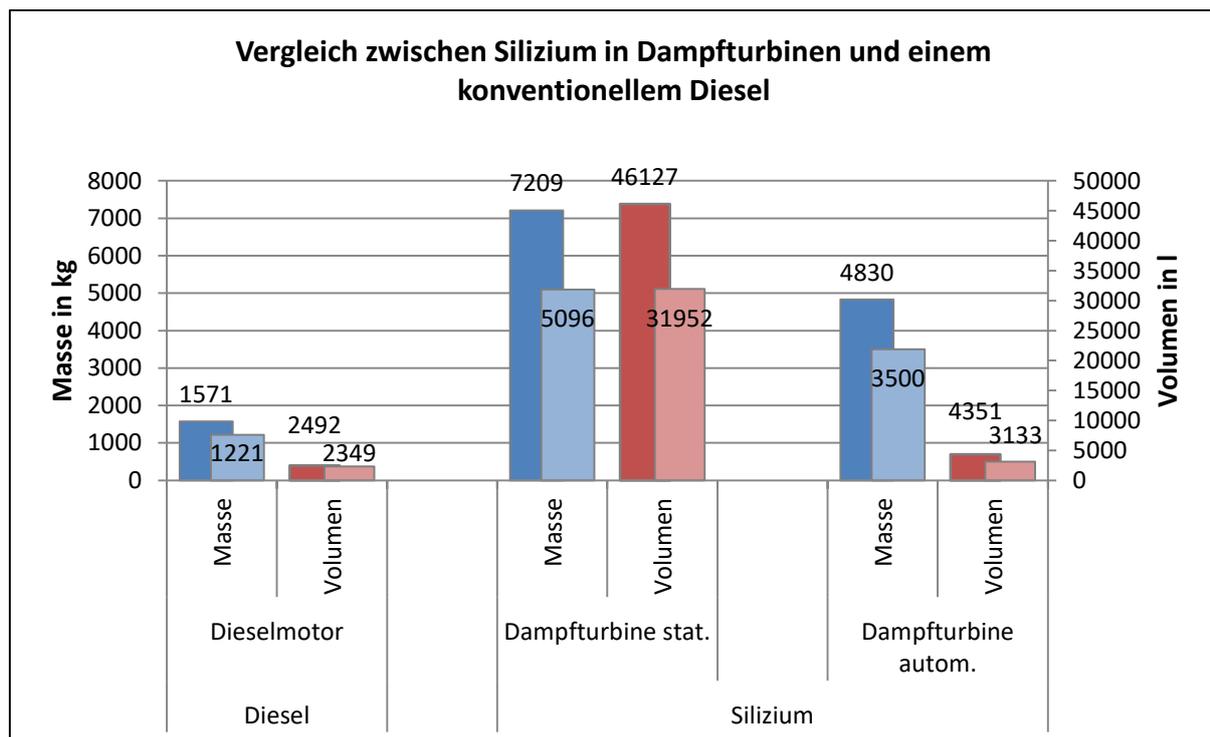


Abbildung 7-37: Übersicht der Silizium-Dampfturbinenkonzepte neben der konventionellen Dieselantriebseinheit

Die Dampfturbinenkonzepte in Kombination mit Silizium als Energieträger sind für den Antrieb von Langstrecken-Lkw nicht geeignet. Trotz des Einsatzes von automotive-Komponenten ist die Dampfturbinenantriebseinheit in der Standardkonfiguration dreimal so schwer wie die Referenzeinheit. Der Malus für das Volumen liegt bei ca. 75%. In der Minimalkonfiguration werden die Unterschiede geringer, sind aber dennoch beachtlich.

#### 7.4.4 Sensitivität – Silizium in einer Dampfturbine mit automotive-Komponenten

Die Dampfturbinenantriebseinheit unterscheidet sich in ihrem Aufbau recht stark von den Konzepten mit einem Freikolbenlineargenerator. Durch den geschlossenen Turbinenkreis beeinflusst der Gesamtwirkungsgrad nicht nur den Kraftstoffbedarf und damit die Tankgrößen, sondern auch die Komponenten für die Rückkühlung. Als große Einflussfaktoren auf den Gesamtwirkungsgrad werden der innere Turbinenwirkungsgrad und die Rückkühltemperatur als Parameter für die Sensitivitätsanalyse gewählt. Ergänzt werden sie durch die volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte der schwersten Komponente, dem Dampferzeuger.

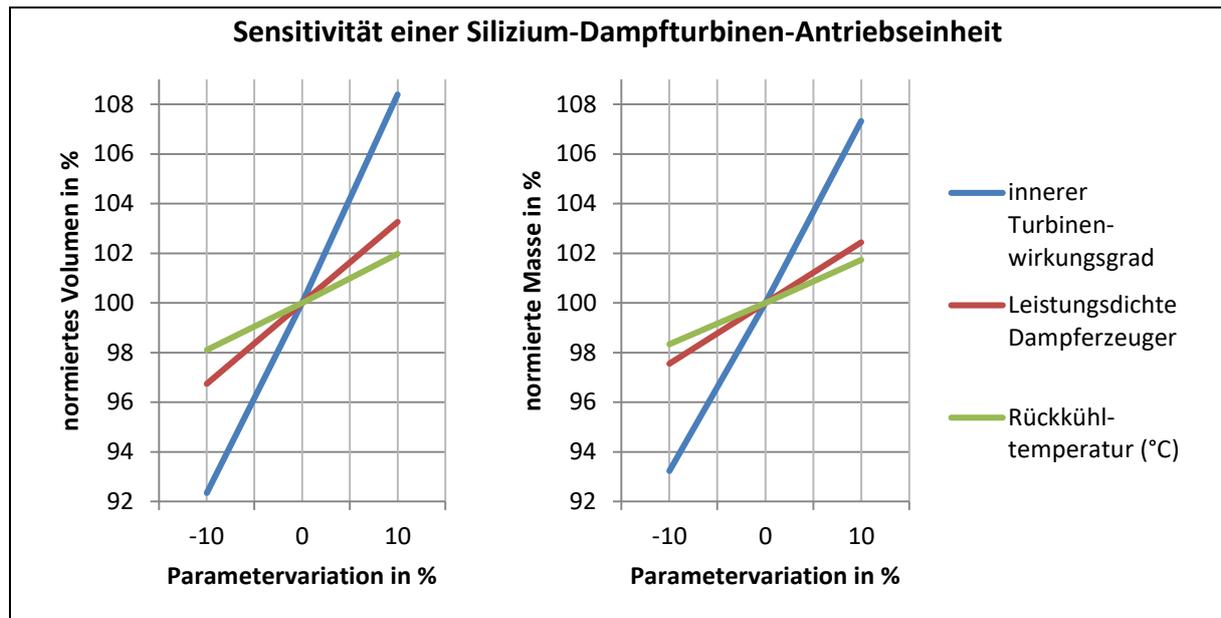


Abbildung 7-38: Einflüsse der Parameter innerer Turbinenwirkungsgrad, Leistungsdichte des Dampferzeugers sowie die Rückkühltemperatur auf die Masse und das Volumen der Silizium-Dampfturbinen-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration

Den größten Einfluss auf die Masse und das Volumen hat der Turbinenwirkungsgrad. Er wirkt auf verschiedene Baugruppen wie Tanks, Aschebehälter und Rückkühler und weist zudem ein nichtlineares Verhalten auf. Auch die Rückkühltemperatur beeinflusst den Gesamtwirkungsgrad und verhält sich nichtlinear, wenngleich die Empfindlichkeit nicht so groß ist wie beim inneren Turbinenwirkungsgrad. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die prozentuale Variation der Temperatur in °C vorgenommen wurde. Eine Variation der Temperatur in Kelvin um 10% hätte eine deutlich stärkere Änderung der Masse und des Volumens zur Folge, läge aber außerhalb des praktikablen Bereichs. Die Leistungsdichte des Dampferzeugers führt zu linearen Änderungen im Bereich zwischen Turbinenwirkungsgrad und Rückkühltemperatur. Die Fehlerindikatoren liegen für das Volumen bei 0,45 und für die Masse bei 0,38. Die starke Sensitivität auf den inneren Turbinenwirkungsgrad wird durch die kleineren Werte der anderen Parameter entschärft.

#### 7.5 Wasserstoffquellen mit geeigneten Energiewandlern

Basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 7.3 wird der Freikolbenlineargenerator als Energiewandler in den folgenden drei Konzepten eingesetzt, da er hohe Leistungsdichten aufweist und sowohl Wasserstoff als auch Spuren von Ammoniak ohne Schaden zu nehmen verarbeiten kann.

Darüber hinaus verfügen alle drei Konzepte über mindestens einen Tank bzw. Reaktor für die beteiligten Ausgangsstoffe und einen Pufferspeicher für den erzeugten Wasserstoff. Die Tanks für die Ausgangsstoffe bestehen aus Polypropylen. Zur einheitlichen Berechnung der Massen und Bauräume wird eine Wandstärke von 8 mm vorgegeben. Die Dichte des Polypropylens liegt bei  $0,91 \text{ g/cm}^3$ . Die Geometrie der Behälter entspricht einem Quader mit einem Seitenverhältnis von 2:1:1. Mit diesen Vorgaben und dem benötigten Volumen des Ausgangsstoffes werden die Tankmasse und der benötigte Bauraum in den einzelnen Konzepten berechnet.

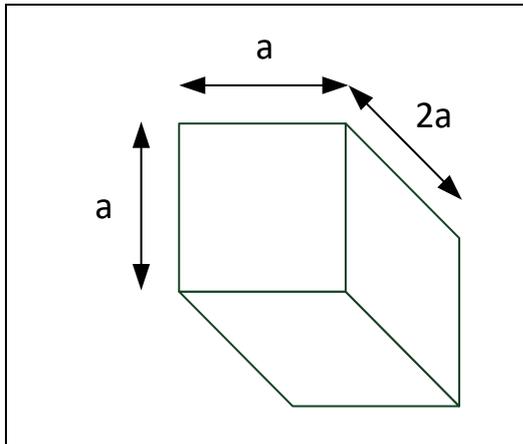


Abbildung 7-39: Seitenverhältnis der Behälterform für die Ausgangsstoffe

Der Pufferspeicher wird für alle Wasserstoffquellkonzepte gleich ausgeführt und auf eine Fahrstrecke von 10 km ausgelegt. Da sich aufgrund unterschiedlicher Rekuperationspotenziale in der Standard- und Minimalkonfiguration der Energiebedarf am Rad unterscheidet, gibt es für die Konfigurationen zwei leicht unterschiedliche Wasserstoffpuffer. In der Standardkonfiguration beträgt der Energiebedarf am Rad 11,36 kWh für 10 km. Mit einem Wirkungsgrad des angeschlossenen Freikolbenlineargenerators mit E-Triebstrang von 43,1% (vgl. Abbildung 7-9) müssen ungefähr 791 g Wasserstoff aufgenommen werden. Mit den avisierten Speicherdichten des FCH-JU ergibt sich eine Masse des Puffers von 16,5 kg bei 34,4 l Volumen. Für die Minimalkonfiguration erfolgt die Auslegung analog. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-5 dargestellt. Es wird vorausgesetzt, dass der Wasserstoff recht einfach vom Zustand beim Verlassen des Quellsystems in den Speicherzustand überführt werden kann. Die weiteren Bauteile des Wasserstoffquellsystems wie Pumpen, Ventile, Wasserrecycler, Leitungen und Filter werden pauschal mit 150 kg und 150 l für die Standardkonfiguration abgeschätzt. In der Minimalkonfiguration wird diese Pauschale mit dem Faktor 0,7 multipliziert.

Tabelle 7-5: Eigenschaften der Wasserstoffpuffer in der Standard- und Minimalkonfiguration

|                                       |              | Konfiguration |         |
|---------------------------------------|--------------|---------------|---------|
|                                       |              | Standard      | Minimal |
| Energiebedarf am Rad für 10 km in kWh |              | 11,36         | 11,54   |
| benötigte Wasserstoffmasse in g       |              | 790,8         | 803,3   |
| Puffer                                | Masse in kg  | 16,5          | 16,7    |
|                                       | Volumen in l | 34,4          | 34,9    |

### 7.5.1 Wasserstoffquellsystem basierend auf solvolytischer Amminboranzersetzung

Jana Baumann untersuchte im Rahmen ihrer Dissertation die Einflüsse auf die Zersetzung gelösten Amminborans in Anwesenheit von Katalysatoren. Für eine Freisetzung von 2,9 mol Wasserstoff pro mol Amminboran sind mindestens 3 mol Wasser nötig. Die Reaktionsgeschwindigkeit wird durch die Katalysatormenge beeinflusst, die Konzentration von Amminboran sowie das ausfallende Reaktionsprodukt Borsäure haben keinen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit oder den Umsatz. [BAUM03]

Auf Basis dieser Erkenntnisse wird ein Konzept für das Wasserstoffquellsystem im Langstrecken-Lkw erstellt. Der schematische Aufbau des Konzepts mit festem Amminboran ist in Abbildung 7-40 dargestellt.

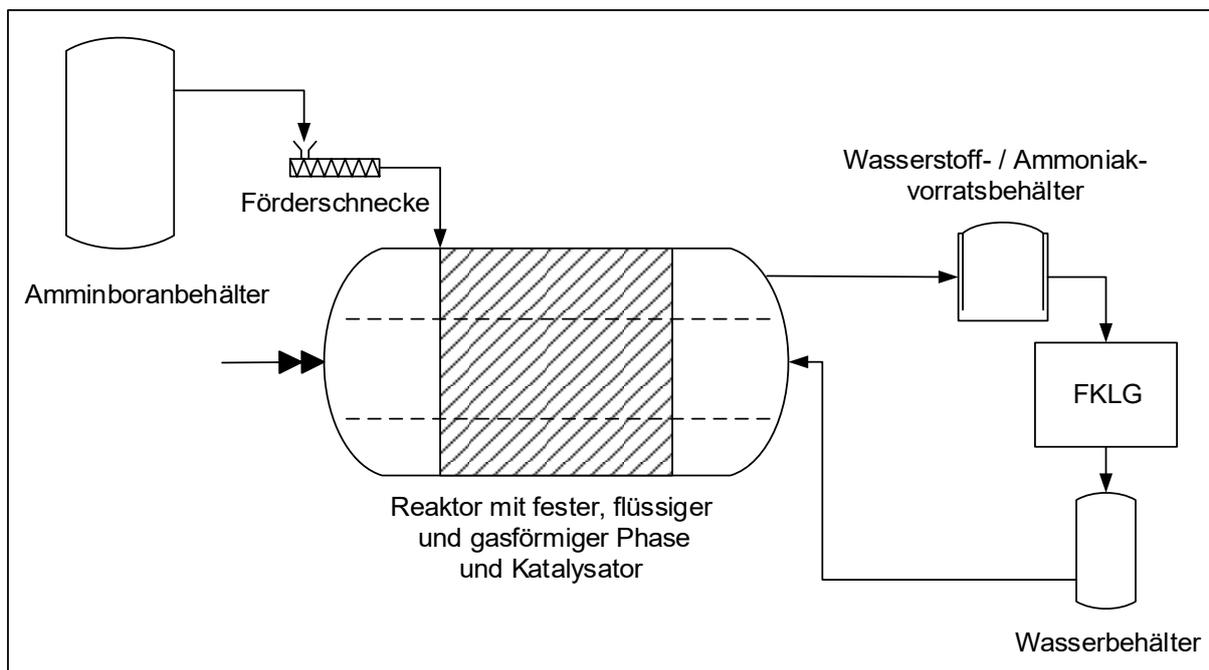


Abbildung 7-40: WQS-Schema für solvolytische Amminboran-Zersetzung mit Hilfe eines Katalysators

Das Amminboran wird fest an Bord mitgeführt und über eine Förderschnecke dosiert. In einem sich drehenden Reaktor, zur besseren Durchmischung, wird das Amminboran mit Wasser versetzt und mit einem Katalysator in Kontakt gebracht. Das entstehende Ammoniak-Wasserstoff-Gasgemisch wird in einem Behälter zwischengespeichert und anschließend einem Freikolbenlineargenerator zugeführt. Das Wasser aus dem Abgas wird auskondensiert und speist den Wasserbehälter. Durch die stöchiometrische Umsetzung liegen im Reaktor gasförmiger Ammoniak, Wasserstoff, Amminboranlösung und feste Borsäure parallel vor. Zum Fahrtende kann die feste Borsäure aus dem Reaktor entfernt und der Amminboranbehälter wieder befüllt werden. An den FKLG schließt sich der bereits vorgestellte E-Triebstrang an. Eine Ausbeute von 2,9 mol Wasserstoff pro mol Amminboran entspricht einem Umsatzungsgrad von 96,7%. Neben dem Wasserstoff entsteht 1 mol Ammoniak, welches durch den Freikolbenlineargenerator verbrannt werden kann (vgl. Gleichung 7). In der vereinfachten Betrachtung wird das mol Ammoniak durch 1,5 mol  $H_2$  ersetzt. Für die endotherme Ammoniakdekomposition wird ein Teil der Verbrennungswärme aufgebraucht. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Systeme wird dieser Effekt dem Wirkungsgrad des Wasserstoffquellsystems zugeschlagen und dieser auf 95% festgelegt. Die resultierende Wirkungsgradkette ist in Abbildung 7-41 dargestellt.

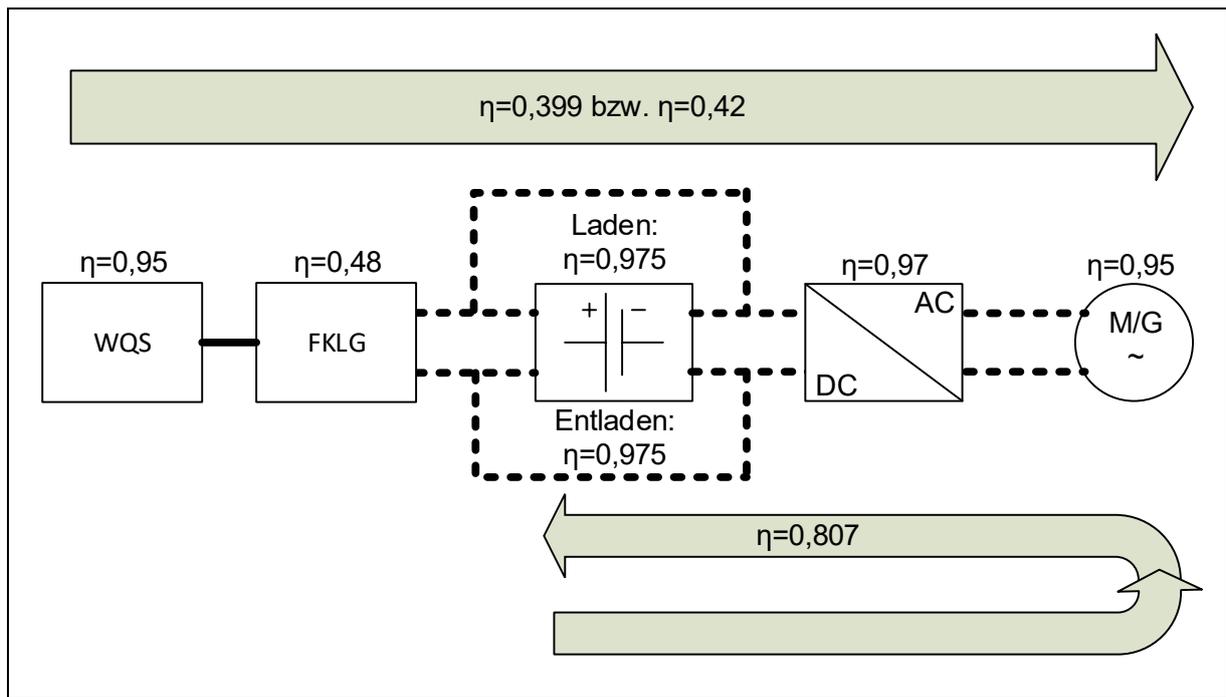


Abbildung 7-41: Wirkungsgradkette des Wasserstoffquellsystems auf Amminboranbasis mit einem FKLG

Für die Darstellung der geforderten Leistungen von 320 kW bzw. 220 kW am Freikolbenlineargeneratorausgang müssen pro Sekunde 5,6 g bzw. 3,8 g Wasserstoff freigesetzt werden.

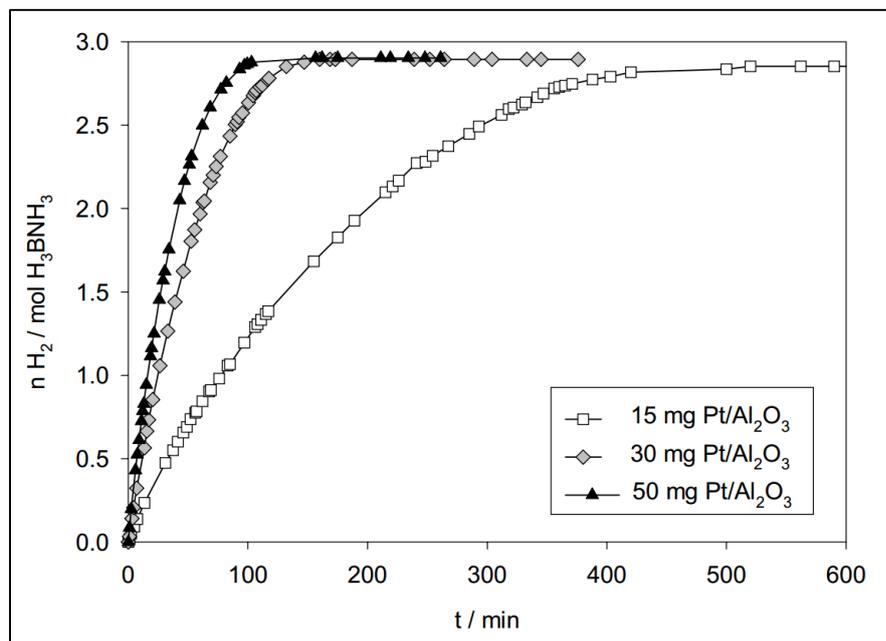


Abbildung 7-42: spezifische Wasserstofffreisetzung von 30 mg Amminboran in Abhängigkeit von der Katalysatormenge [BAUM03]

Gemäß Abbildung 7-42 werden aus 30 mg Amminboran in Gegenwart von 50 mg Katalysator nach ca. 25 Minuten 1,5 mol Wasserstoff pro mol Amminboran freigesetzt. Mit diesem Verhältnis aus Amminboran und Katalysator sowie der resultierenden Wasserstofffreisetzungsrates werden die nötigen Massen an Amminboran und Katalysator berechnet. Für eine Leistung von 320 kW in der Standardkonfiguration sind 85,8 kg Amminboran und 142,9 kg Katalysator erforderlich. Mit zunehmender Dauer nimmt die Wasserstofffreisetzung einer Kontrollmenge ab. Im Fahrbetrieb wird dies durch die Zugabe frischen Amminborans kompensiert.

Darüber hinaus stehen noch 1,5 mol Wasserstoffäquivalente aus der Ammoniakbildung zur Verfügung. Der Zeitpunkt deren Freisetzung kann jedoch nicht aus Abbildung 7-42 abgeleitet werden, so dass sie bei der Berechnung der Katalysatormenge nicht berücksichtigt werden.

Der Tank muss die benötigte Menge Amminboran als Schüttung vorliegend aufnehmen können. Der Reaktorbehälter muss der Reaktion und dem Katalysator genügend Raum geben und anschließend das Volumen der Borsäure aufnehmen können. Der Platzbedarf des Tanks beträgt ca. 897 l bei einer Masse von 41,2 kg. Der Reaktionsbehälter hat eine Größe von 1127 l und wiegt ca. 48 kg. Das Wasserstoffquellsystem auf Amminboranbasis setzt 91,44 kg Wasserstoff(-äquivalente) frei. Es benötigt 2208 l Bauraum und wiegt inklusive der benötigten Energieträger und Hilfsstoffe im ausschlaggebenden entladenen Zustand 995 kg. Im Vergleich zu den avisierten Wasserstoffspeicherdichten des FCH-JU von 4,8 Massenprozent und 23 g/l schneidet Amminboran besser ab und liegt bei 9 Massenprozent und 41 g<sub>H<sub>2</sub></sub>/l. Der nachgeschaltete Antriebsstrang entspricht dem Konzept aus Kapitel 7.2.3. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-43 dargestellt.

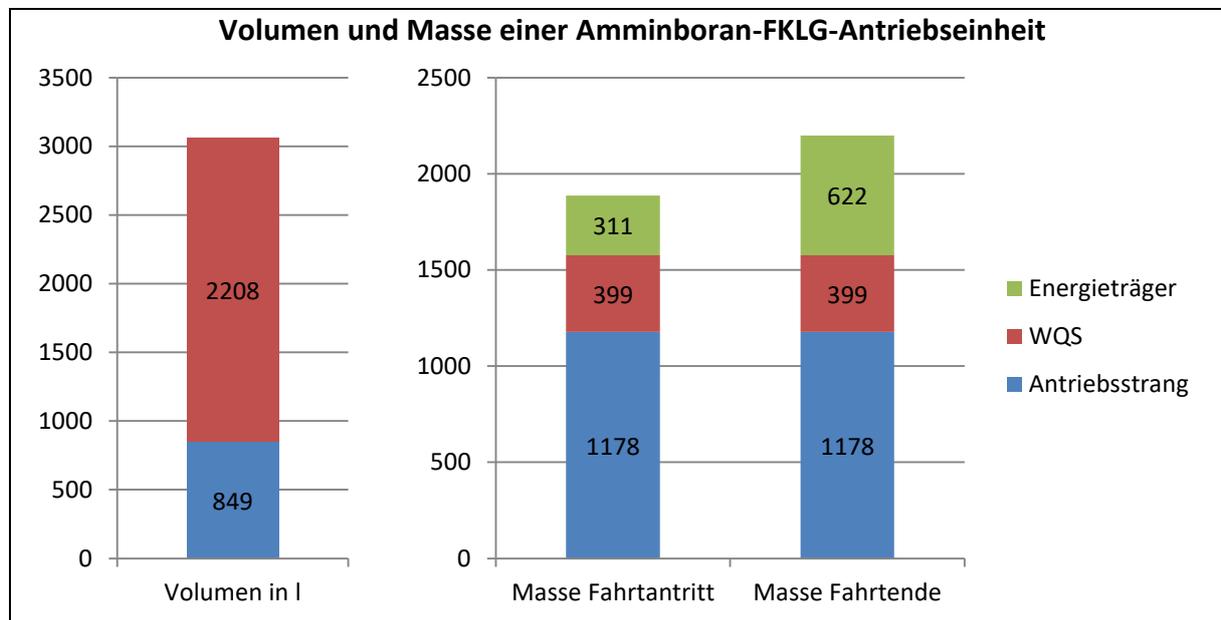


Abbildung 7-43: Amminboran-FKLG-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration

Die hohe Leistungsdichte des Freikolbenlineargenerators führt zu einem geringen Bauraumbedarf des Antriebsstrangs. Dafür benötigen die Tanks und der Reaktor viel Platz, sind aber in Summe etwas leichter als der Antriebsstrang. Im Vergleich zum Referenzdiesel steigen in der Standardkonfiguration die Masse um ca. 40% und das Volumen um 23%. In der Minimalkonfiguration liegt die Masse im Vergleich zur Referenz um 33% höher, während der Bauraumbedarf um ca. 2% geringer ist.

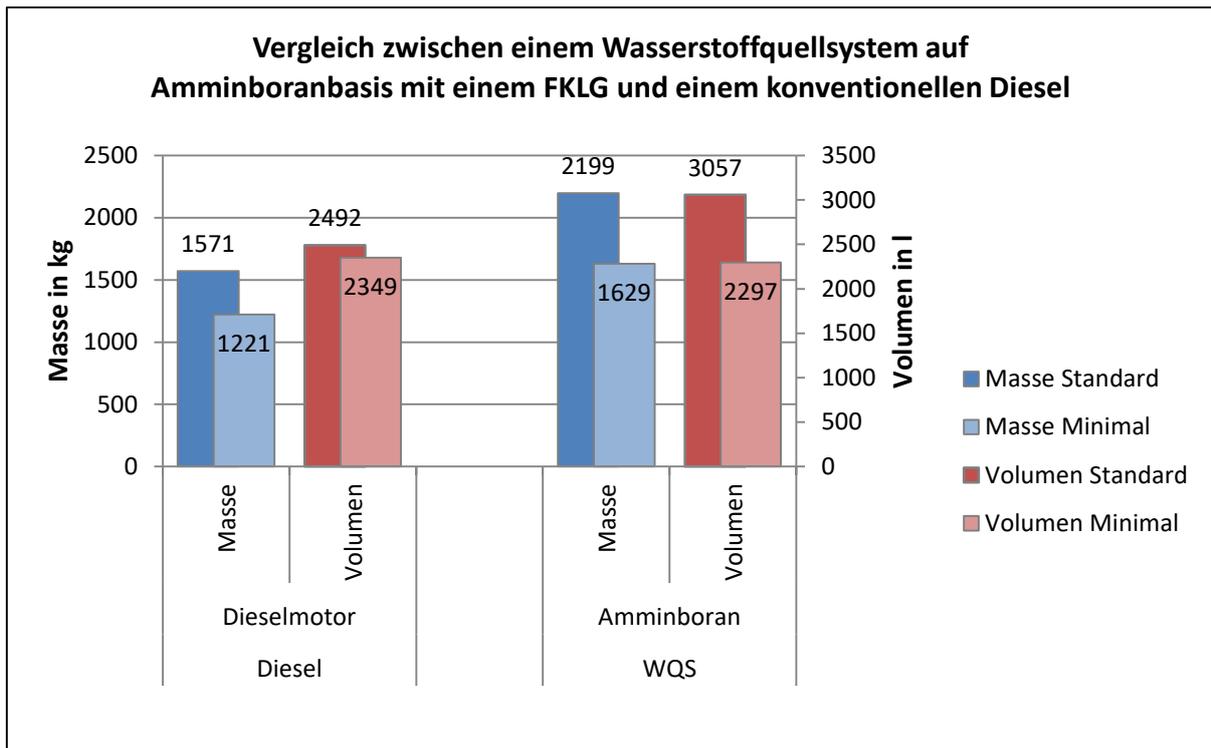


Abbildung 7-44: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und dem Wasserstoffquellsystem auf Amminboranbasis mit angeschlossenem Freikolbenlineargenerator

Die verringerten Reichweiten- und Leistungsanforderungen in der Minimalkonfiguration reduzieren das Tank- und Reaktorvolumen. Auf die gravimetrische Wasserstoffspeicherdichte des Wasserstoffquellsystems hat die Reduktion kaum einen Einfluss. Sie liegt weiterhin bei ca. 9 Massenprozent. Die volumetrische Speicherdichte bleibt bei ca. 41 g<sub>H<sub>2</sub></sub>/l.

### 7.5.2 Wasserstoffquellsystem basierend auf saurer Hydrolyse von Natriumborhydrid

Das Konzept baut auf der sauren Hydrolyse von Natriumborhydrid auf, obwohl theoretisch höhere Energiedichten mit anderen Verfahren erzielbar wären. Der verfahrenstechnische Aufwand ist im Vergleich zu den Alternativen jedoch geringer und günstiger. Es orientiert sich an der Arbeit von Kostka [KOST12] und weist an entsprechenden Stellen auf Unterschiede in den Systemanforderungen und auf resultierende Verbesserungspotenziale hin. Das Natriumborhydrid wird in Wasser gelöst mitgeführt. Als Stabilisator wird Natronlauge zugesetzt. Die Lösung wird mittels einer Dosierpumpe dem Reaktor zugeführt. Im Reaktor befindet sich Ameisensäure, welche für die sauren Prozessbedingungen sorgt. Der Wasserstoff wird freigesetzt, in einem Wasserstoffbehälter analog zu Kapitel 7.5 gepuffert und steht dann dem Freikolbenlineargenerator zur Verfügung. Das entstandene Natriummetaborat verbleibt im Reaktor und muss beim Nachtanken durch den Austausch des Reaktorbehälters entfernt werden.

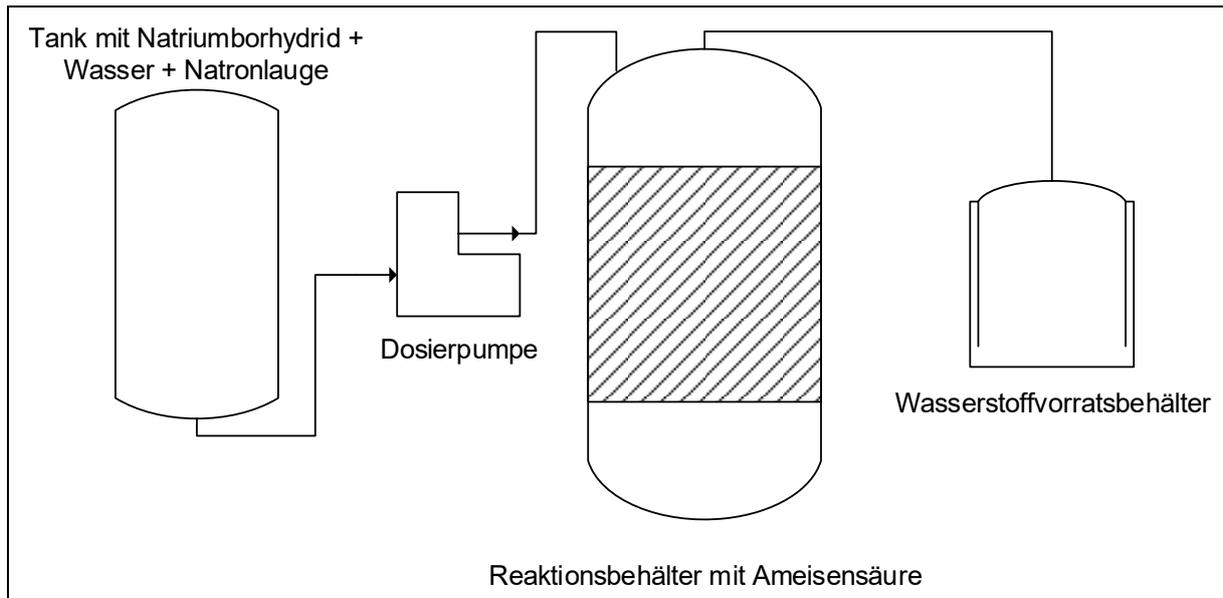


Abbildung 7-45: Prinzipieller Aufbau des Wasserstoffquellsystems auf Basis der sauren Hydrolyse von gelöstem Natriumborhydrid

Das benötigte Wasser wird in diesem Konzept durch die Natriumborhydrid-Natronlauge-Wasserlösung bereitgestellt und beim Tanken zugeführt. Ein Auffangen des Wassers aus der nachgeschalteten Verbrennung ist deshalb nicht erforderlich. Der Wirkungsgrad des Wasserstoffquellsystems wird auf 95% festgelegt [KOST12]. Damit entspricht die Wirkungsgradkette der des Konzepts aus 7.5.1. Dementsprechend werden je nach Konfiguration 5,6 g bzw. 3,8 g Wasserstoff pro Sekunde freigesetzt. Da keine Katalysatoren zum Einsatz kommen, bestimmt die Leistungsanforderung lediglich die maximale Fördermenge der Dosierpumpe. Sie muss in der Lage sein, 50 ml/s bzw. 34 ml/s zu fördern.

Die optimalen Stoffmengenverhältnisse für eine möglichst hohe Energiedichte der Wasserstoffquelle sind in Tabelle 7-6 aufgeführt.

Tabelle 7-6: Verhältnisse der Ausgangsstoffe für flüssiges NBH [nach KOST12]

|  | H <sub>2</sub> O | NaBH <sub>4</sub> | NaOH  | HCOOH |
|--|------------------|-------------------|-------|-------|
| Molares Verhältnis zu 1 mol H <sub>2</sub> | 1                | 0,25              | 0,035 | 0,25  |
| Masse für 1100 km Reichweite               | 815,7            | 428,2             | 63,4  | 520,9 |

Aus den Stoffmengenverhältnissen, einem realisierbaren Umsetzungsgrad im Reaktor von 95% und dem Wirkungsgrad des nachgeschalteten FKLG in Verbindung mit dem E-Triebstrang werden die Massen der Ausgangsstoffe berechnet. Der Tank nimmt das Volumen des Wassers, des Natriumborhydrids und der Natronlauge auf. Der Reaktionsbehälter muss zu Beginn das Volumen der Ameisensäure, sowie am Fahrtende vereinfacht angenommen das gesamte Volumen der Produkte aufnehmen. Das tatsächliche Volumen der Produkte ist nur schwer zu errechnen, da eine Suspension aus mehreren Stoffen vorliegt. Der Bauraumbedarf des Tanks beträgt ca. 861 l bei einer Masse von ca. 40 kg. Für den Reaktor werden ca. 2554 l benötigt und er wiegt knapp 84 kg. Die Pauschale für Pumpen, Ventile, Leitungen und Filter aus dem Amminborankonzept wird von 150 kg und 150 l auf 100 kg und 100 l reduziert, da das Wasserrecycling entfällt. Die Leistung des Systems kann über die Zugabe der NBH-Lösung in den Reaktor gesteuert werden. Der generierte Wasserstoff wird in einem Freikolbenlinear-generator verstromt und einem E-Triebstrang zugeführt. Der Aufbau wird aus Kapitel 7.3.2

übernommen. Das Wasserstoffquellsystem auf Basis gelösten Natriumborhydrids setzt 91,44 kg Wasserstoff frei. Es benötigt 3547 l Bauraum und wiegt im ausschlaggebenden aufgeladenen Zustand inklusive der beteiligten Stoffmengen 2068 kg. Dieses Konzept erreicht 4,4 Massenprozent und 25,8 g<sub>H<sub>2</sub></sub>/l, liegt damit im Bereich der avisierten Wasserstoffspeicherdichten von 4,8 Massenprozent und 23 g/l, schneidet aber schlechter als Amminboran ab.

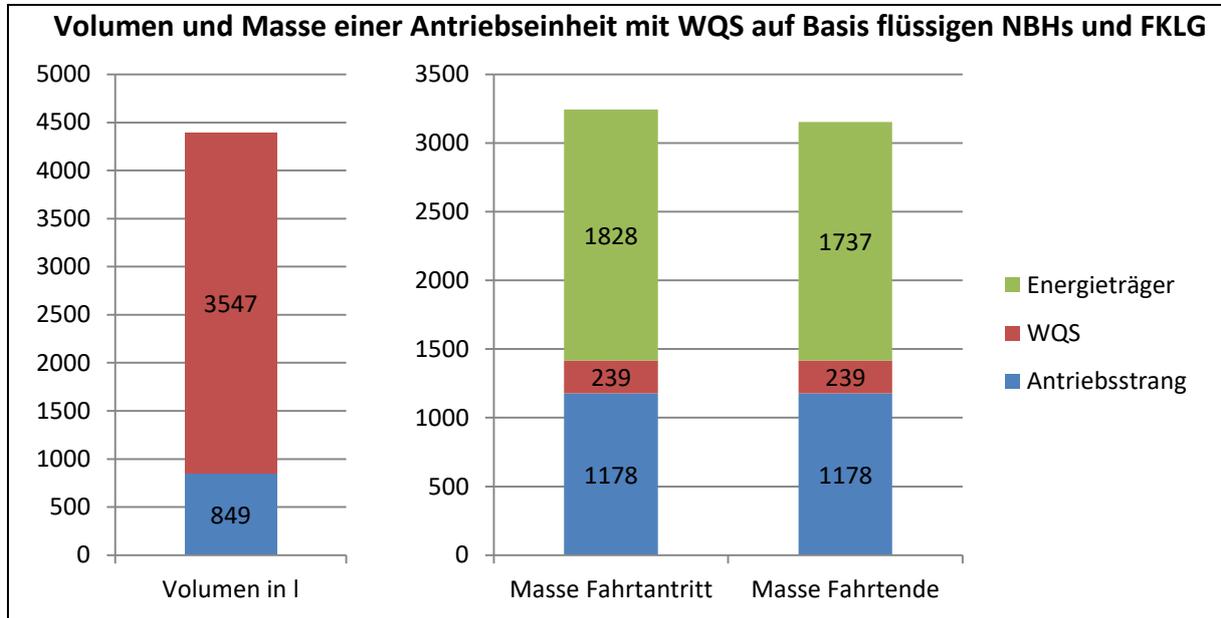


Abbildung 7-46: Natriumborhydrid-FKLG-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration mit flüssigem Kraftstoff

Die Substitution einer katalytischen Reaktion durch eine Reaktion unter sauren Bedingungen und das Mitführen des gesamten Wasserbedarfs resultieren in deutlich größeren Massen und Volumina der Energieträger. Durch eine verringerte Reichweite und Leistung kann die mitzuführende Menge an Natriumborhydrid, Wasser und Ameisensäure reduziert werden. Dementsprechend groß ist die Ersparnis zwischen Standard- und Minimalkonfiguration, wie in Abbildung 7-47 zu sehen ist.

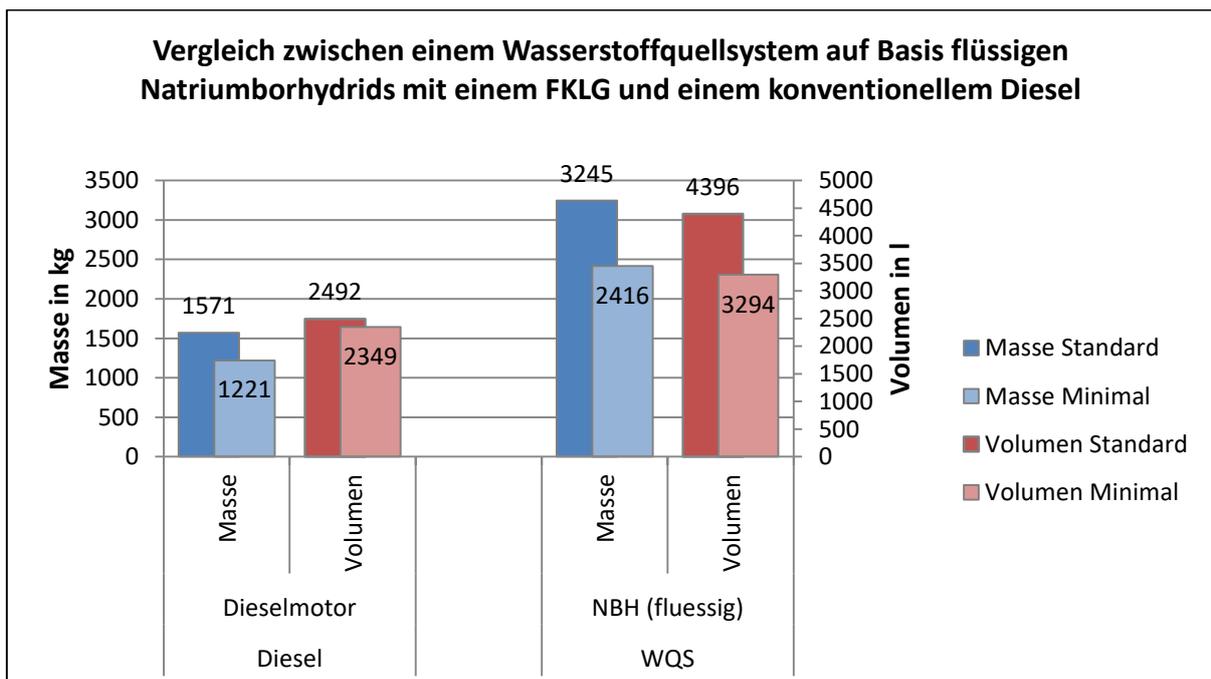


Abbildung 7-47: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und dem Wasserstoffquellsystem auf Basis flüssigen Natriumborhydrids mit angeschlossenen Freikolbenlineargenerator

Ein Ansatz zur Optimierung ist die Änderung der Vorhaltung. Wird die Natriumborhydridlösung bereits im Reaktor vorgehalten und die Ameisensäure aus einem Tank hinzudosiert, kann ein Volumen von ca. 390 l eingespart werden. Der Tank muss allerdings beheizt werden, da die Ameisensäure bei Temperaturen unter 8,4 °C auskristallisiert.

Eine weitere Möglichkeit zur Gewichtsreduzierung besteht im Nutzen des Produktwassers aus der Oxidation des Wasserstoffs. Dadurch kann die zu tankende Wassermenge reduziert bzw. gänzlich eingespart werden. Stattdessen wird ein kleiner Vorratsbehälter für das Abwasser des Freikolbenlineargenerators verbaut. Bei diesem Konzept kann jedoch das Natriumborhydrid nicht in flüssiger Form vorgehalten werden, da mit abnehmender Wassermenge die NBH-Lösung übersättigt, Feststoffe bildet und somit die Pumpen und Leitungen verstopfen können. Ein Konzept nach Kostka für festes Natriumborhydrid verwendet eine Schüttung aus NBH-Pellets in einem Reaktor. Für ein System im Kleinleistungsbereich ist es sinnvoll, die flüssigen Medien zu pumpen, während feste Medien bereits im Reaktor vorliegen. Dies hat allerdings zur Folge, dass für die große Menge Ameisensäure ein extra Behälter benötigt wird, der Reaktor das Ameisensäurevolumen ebenfalls aufnehmen muss und dadurch der Bauraumbedarf steigt. Bauraumgünstiger ist es, die Ameisensäure im Reaktor vorzuhalten und das feste Natriumborhydrid mit einer Förderschnecke zuzuführen. Der Aufbau ist in Abbildung 7-48 dargestellt.

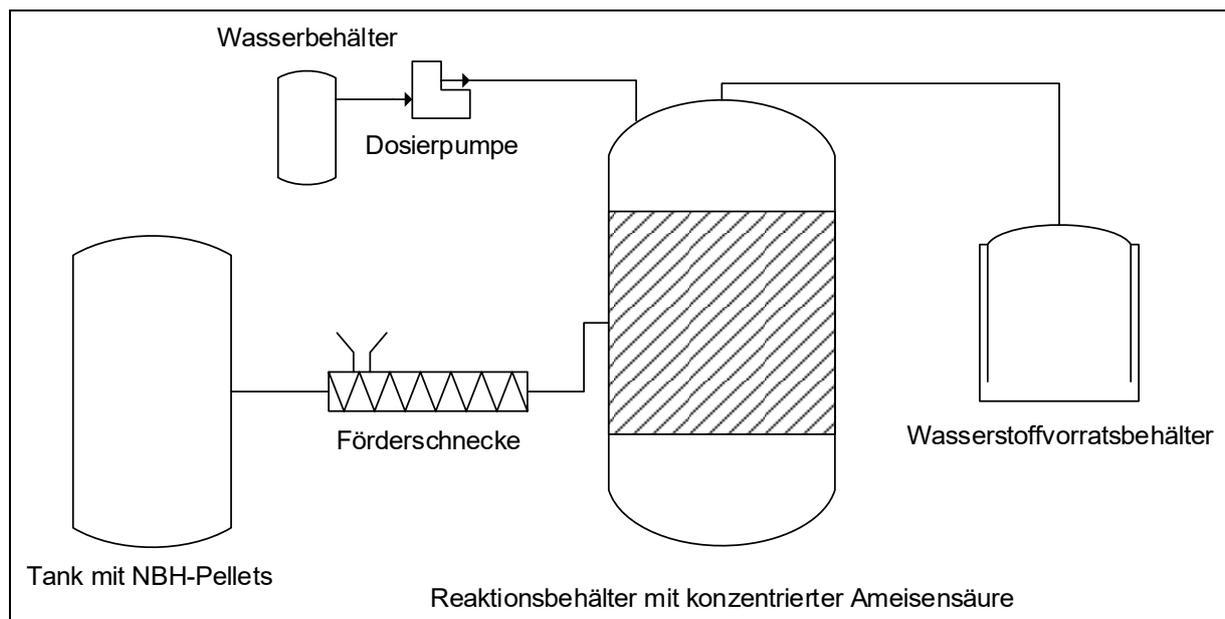


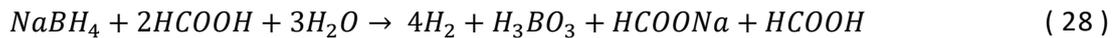
Abbildung 7-48: Prinzipieller Aufbau des Wasserstoffquellsystems auf Basis der sauren Hydrolyse festen Natriumborhydrids

Zur Steuerung der Wasserstofffreisetzung wird dem Reaktor mit der Ameisensäure Wasser und Natriumborhydrid in einem festen Verhältnis zugeführt. Die Stoffmengenverhältnisse für einen akzeptablen Reaktionsablauf sind in Tabelle 7-7 aufgeführt.

Tabelle 7-7: Verhältnisse der Ausgangsstoffe für festes NBH [nach KOST12]

|  | H <sub>2</sub> O | NaBH <sub>4</sub> | HCOOH  |
|--|------------------|-------------------|--------|
| Molares Verhältnis zu 1 mol H <sub>2</sub> | 0,63             | 0,25              | 0,5    |
| Masse für 1100 km Reichweite in kg         | 509,8            | 428,2             | 1041,9 |

Im Falle der Wasserrückgewinnung werden lediglich Natriumborhydrid und konzentrierte Ameisensäure getankt. Der Wasserbehälter fasst 10 l. Das Reaktionsprodukt wird im Reaktor gespeichert, muss am Fahrtende entsorgt werden und enthält Luftsauerstoff aus der Wasserstoffoxidation, weshalb die Masse am Fahrtende größer ist, als zu Beginn. Für die Volumenabschätzung der Produkte wird eine stöchiometrische Umsetzung angenommen, auch wenn im verwendeten Konzept die Reaktion unterstöchiometrisch (0,63 mol Wasser statt 0,75 mol Wasser) abläuft. Die Reaktionsgleichung lautet wie folgt:



Da es während der Reaktion zu einer Schaumbildung kommt, ist im ungünstigsten Fall mit einer losen Schüttung der festen Reaktionsprodukte zu rechnen. Dadurch verringert sich die Dichte der Produkte und der Reaktor muss dementsprechend voluminös ausgeführt werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-49 dargestellt.

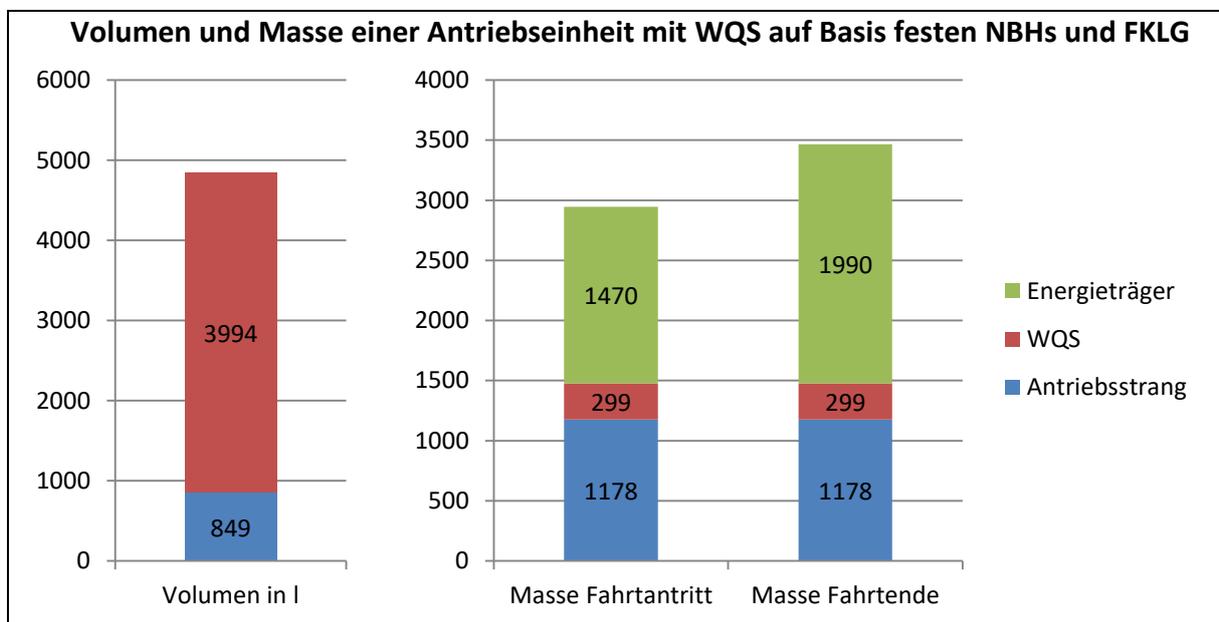


Abbildung 7-49: Natriumborhydrid-FKLG-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration mit festem Kraftstoff

Das Wasserstoffquellsystem auf Basis festen Natriumborhydrids unter Nutzung des Wassers aus der Oxidation setzt 91,44 kg Wasserstoff frei. Es benötigt 3994 l Bauraum und wiegt im ausschlaggebenden entladenen Zustand inklusive der beteiligten Stoffmengen 2289 kg. Dieses Konzept erreicht 4,0 Massenprozent und 22,9 g<sub>H<sub>2</sub></sub>/l, liegt damit unter den avisierten Wasserstoffspeicherdichten von 4,8 Massenprozent und 23 g/l. In der Minimalkonfiguration werden ähnliche Speicherdichten erreicht.

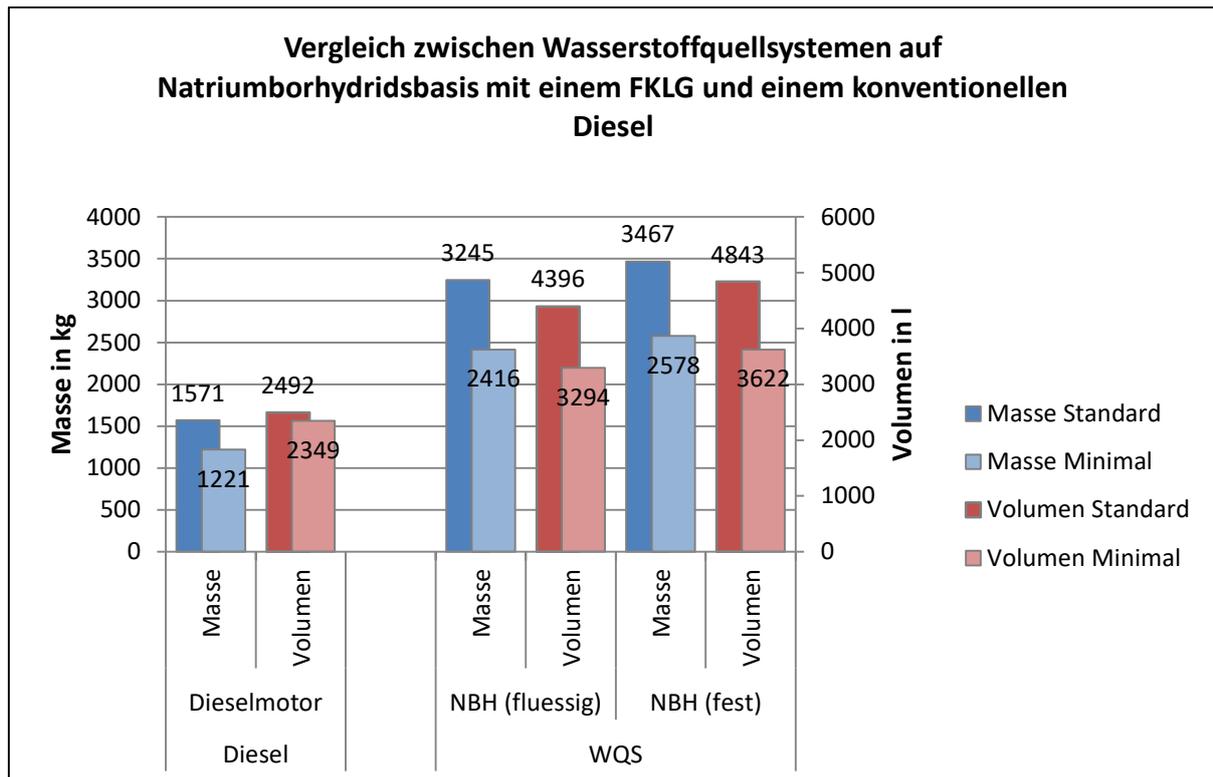


Abbildung 7-50: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und den Wasserstoffquellsystemen auf Basis flüssigen oder festen Natriumborhydrids mit angeschlossenem Freikolbenlinear-generator

Gemäß Abbildung 7-50 ist der Ansatz, das benötigte Wasser aus der Oxidation zu recyceln, nicht zielführend. Bei Fahrtantritt ist die Masse gegenüber dem System mit gelöstem Natriumborhydrid um 298 kg geringer. Dafür fallen die Tanks voluminöser und schwerer aus und durch die veränderten Stoffmengenverhältnisse verbleibt am Ende der Fahrt mehr Masse im Fahrzeug. An dieser Betrachtung wird noch einmal deutlich, dass nicht allein der Wasserstoffgehalt einer Trägerverbindung oder die Masse zu tankender Stoffe optimiert werden muss, sondern dass zusätzlich Löslichkeiten, Reaktionsgeschwindigkeiten sowie Lagerzustände aller Reaktionsteilnehmer zu betrachten sind.

### 7.5.3 Wasserstoffquellsystem basierend auf Silizium

In diesem Kapitel wird ein Silizium-Wasserstoffquellsystem in Anlehnung an die Dissertation von Daniel Herbst [HERB03] berechnet. Kern dieses Konzepts ist die beschleunigte Wasserstofffreisetzung durch Wasser, Silizium und einer 10 molaren Natronlauge in einem Reaktor bei 60 °C. Dabei wird die Natronlauge verbraucht und anschließend in einem Kristallisator unter Ausfällung von Quarz regeneriert. Die Reaktionsgeschwindigkeit der Wasserstofffreisetzung wurde von [HERB03] in Versuchen mit Siliziumgranulat von 10 mm Korndurchmesser ermittelt. Dabei wurden 0,124 mol Wasserstoff pro Minute und Kilogramm Siliziumgranulat freigesetzt. Unter der Annahme, dass die Reaktionsgeschwindigkeit mit der kugelförmigen Granulatoberfläche bzw. dem Oberflächen / Volumen - Verhältnis direkt proportional ansteigt, führt die Verringerung des Korndurchmessers von 10 mm auf 3 mm zu einer Verzehnfachung der Reaktionsgeschwindigkeit.

$$v_{\text{Reaktion}} \sim A_{\text{Granulat}} \sim 1/d_{\text{Korn}}^2 \quad (29)$$

Unter diesen Voraussetzungen müssen zu jeder Zeit mindestens 135,5 kg Siliziumgranulat mit 3 mm Korndurchmesser im Reaktionsbehälter vorhanden sein, um einen Wasserstoffmassenstrom von 5,6 g/s erzeugen zu können. Die weitere Reduktion des Korndurchmessers auf 1 mm verringert den Bedarf an Siliziumgranulat im Reaktor auf knapp 15 kg und wird in diesem Konzept angewandt. Zur Absicherung muss in einem Versuch bestimmt werden, ob die Menge an Lauge zum vollständigen Benetzen der Granulatoberfläche ausreicht und nicht die Reaktionsgeschwindigkeit durch Laugenmangel stagniert. Im Anschluss an die Wasserstofffreisetzung wird die Natronlauge regeneriert. Die Regeneration erfolgt über das Auskristallisieren von Quarz und ist der leistungsbegrenzende Prozessschritt. Die Kristallisationsgeschwindigkeit hängt wiederum vom Grad der Übersättigung ab. Die Betriebsparameter für den Zersetzungsreaktor und den Kristallisator werden unter Einhaltung thermischer, mechanischer und prozesstechnischer Grenzen für eine maximale Übersättigung ausgelegt.

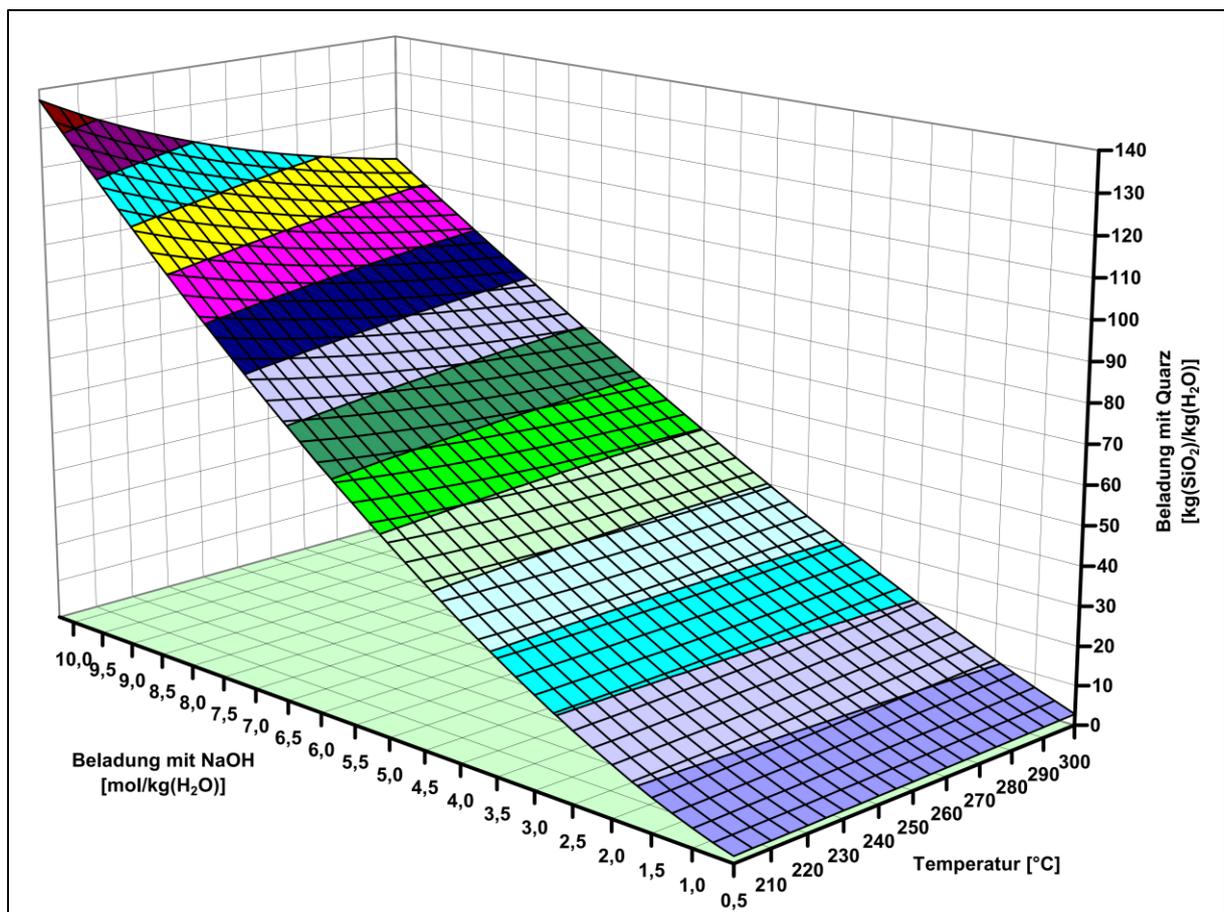


Abbildung 7-51: Sättigungskurve von Quarz in Natronlauge in Abhängigkeit des NaOH-Gehalts [HERB03]

Gemäß Abbildung 7-51 sinkt die Löslichkeit von Quarz ausgehend von einer 10-molaren Natronlauge mit steigender Temperatur und Abnahme der Laugenkonzentration. Die Lösung wird daher im Kristallisator auf ca. 4,2 mol NaOH verdünnt und auf 225 °C erhitzt. Damit das Wasser nicht verdunstet, liegt der Druck im System bei 50 bar. Laugenkonzentrationen von über 10 mol/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> würden die Übersättigung steigern, dadurch die benötigte Umlaufmenge des Lösungsmittels reduzieren und folglich den Energiebedarf zum Aufheizen des Lösungsmittelstroms senken. Allerdings wird dadurch auch die Löslichkeitsgrenze von NaOH in Wasser bei niedrigen Temperaturen überschritten und die Lauge würde unter 0 °C ausflocken.

Die Übersättigung der Lösung führt zu einem Kristallwachstum. Kristalle, die einen Durchmesser von 0,1 mm überschreiten, werden ausgeschleust und im Quarzbreitank gespeichert. Kleinere Kristalle verbleiben im Kristallisator bzw. werden im System umgepumpt. Das Ausschleusen der Quarzkristalle ist gleichbedeutend mit der Regeneration der Natronlauge. Deswegen müssen im Kristallisator ca. 19,2 kg Quarz, unter Annahme einer Gleichverteilung der Größe, vorhanden sein, um bei Volllast genügend Quarzkristallertrag sicherstellen zu können. [HERB03]

Die Konzepte von Daniel Herbst sind auf eine nutzbare Wasserstoffleistung von 2 g/s ausgelegt. Für die Erwärmung des Lösungsmittelstromes wird ein Teil des Wasserstoffs verbrannt, so dass für 2 g/s Wasserstoff ca. 3,2 g/s erzeugt werden müssen. [HERB03] Gemäß Abbildung 7-52 wird in diesem Konzept der erzeugte Wasserstoff in einem Freikolbenlineargenerator verstromt. Über die Hälfte des Heizwertes geht als Abwärme verloren. Diese Abwärme lässt sich nutzen, um den Lösungsmittelstrom zu erwärmen, so dass auf das Heizen durch Wasserstoffverbrennung verzichtet werden kann und die gesamte erzeugte Wasserstoffmenge zur Verfügung steht. Allerdings muss das Abwärmeniveau entsprechend hoch gewählt werden.

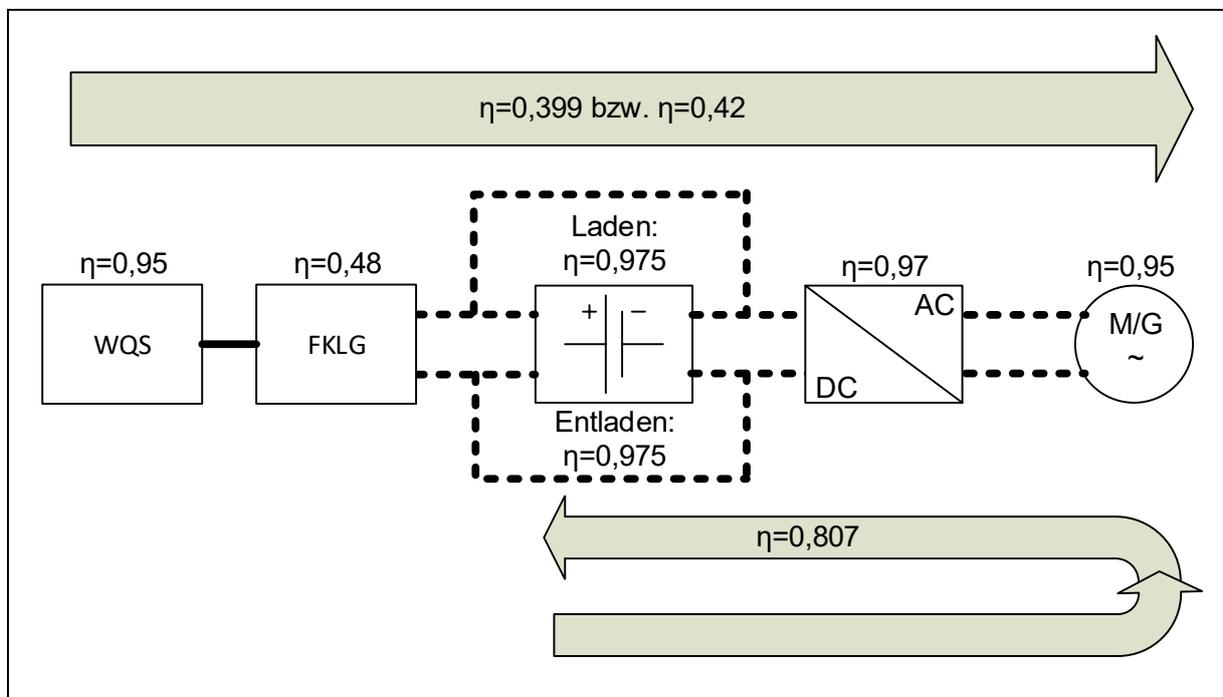


Abbildung 7-52: Wirkungsgradkette des Wasserstoffquellsystems auf Siliziumbasis mit einem FKLG

Für eine Ausgangsleistung des Freikolbenlineargenerators von 320 kW sind ca. 5,6 g Wasserstoff pro Sekunde erforderlich (vgl. Kapitel 7.5.1). Das System von Daniel Herbst wird auf diesen Wert skaliert. Die resultierenden Prozessmassenströme sind in Abbildung 7-53 dargestellt. Dabei wird auch ein nicht idealer Prozessablauf berücksichtigt. Die Quarzkristalle werden als Quarzbrei zusammen mit Natronlauge abgeführt und gespeichert. Die Zusammensetzung wurde aus der Dissertation von Herrn Herbst übernommen [HERB03]. Dadurch steigt die Masse der zu speichernden Produkte im Vergleich zum idealisierten Prozess, in dem lediglich das Siliziumdioxid (Quarz) aufgefangen wird. Der Verlust an Lauge muss dem System wieder zugeführt werden. Deshalb muss neben Silizium auch Wasser und Natriumhydroxid getankt und im Fahrzeug vorgehalten werden. Über den Wasserstoffproduktstrom entweicht ebenfalls Wasserdampf aus dem Wasserstoffquellsystem. Dieser Wasserdampf wird dem Freikolbenlineargenerator zugeführt und steht anschließend gemeinsam mit dem Wasser aus der Oxidation dem Wasserstoffquellsystem wieder zur Verfügung.

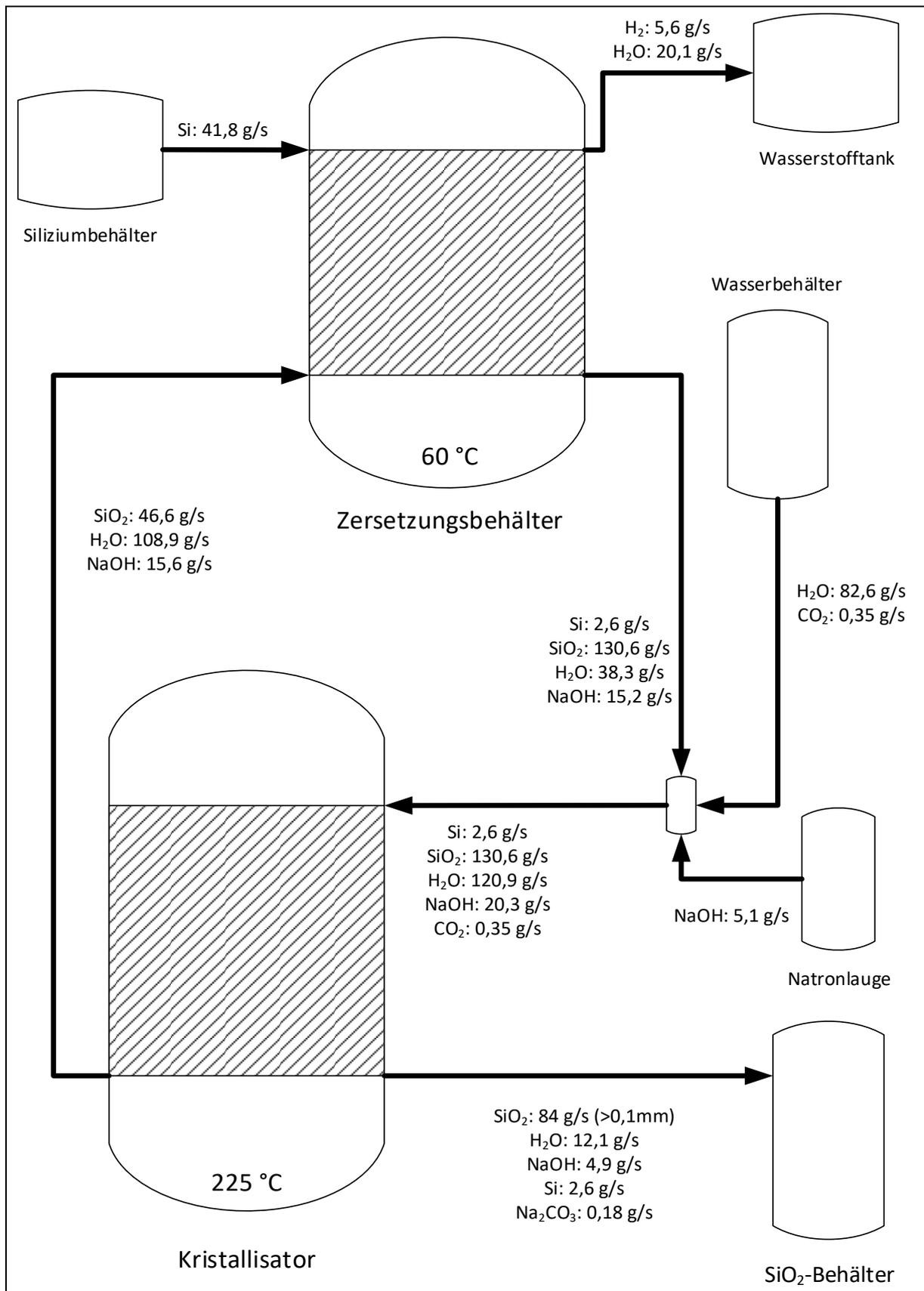


Abbildung 7-53: schematische Prozessführung zur siliziumbasierten Wasserstoffherzeugung unter Angabe der Massenströme bei Volllast

Wie in Abbildung 7-53 erkennbar, ist die große Anzahl Tanks bzw. Behälter für dieses Konzept charakteristisch. Der Wasserstoffpuffertank wurde bereits in Kapitel 7.5 ausgelegt.

Die Behälter für das Silizium, die Natronlauge, den Quarzbrei und das Ausgleichswasser werden aus Polypropylen gefertigt. Deren Dimensionierung erfolgte gemäß der in Kapitel 7.5 beschriebenen Vorgehensweise. Aufgrund des Drucks von 50 bar im Zersetzungsreaktor sowie im Kristallisator, werden diese beiden Komponenten aus Edelstahl und in zylindrischer Form gefertigt. Die Wandstärken werden so gewählt, dass die Vergleichsspannungen gemäß der Gestaltänderungsenergiehypothese unter  $300 \text{ N/mm}^2$  liegen. Der Kristallisator hat eine Wandstärke von 4 mm in der Standardkonfiguration bzw. 3,5 mm in der Minimalkonfiguration. Der Zersetzungsreaktor besitzt Wandstärken von 3 mm bzw. 2,5 mm. Zusätzlich befindet sich im Reaktor noch ein Siebmantel aus Edelstahl mit 1 mm Wandstärke [HERB03]. In Tabelle 7-8 sind die Komponenten mit ihren Massen und Bauräumen aufgeführt. Lediglich bei der Masse des Zersetzungsreaktors wird die Masse der permanent darin befindlichen Natronlauge berücksichtigt und die 150 kg für Pumpen + Filter enthalten die Masse des Prozesswassers. Alle anderen Werte gelten für die trockenen Tanks und leeren Behälter.

Tabelle 7-8: Massen und Bauräume der Wasserstoffquellsystemkomponenten

| Bauteil                    | Masse in kg  |              | Bauraum in l  |               |
|----------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
|                            | Standard     | Minimal      | Standard      | Minimal       |
| Wasserstoffpuffer          | 16,5         | 16,7         | 34,4          | 34,9          |
| Siliziumbehälter           | 28,1         | 22,9         | 510,2         | 379,7         |
| Natronlauge-Ausgleichstank | 7,1          | 5,8          | 68,4          | 51,6          |
| Wasser-Ausgleichstank      | 15,0         | 12,4         | 204,7         | 153,9         |
| Quarzbreibehälter          | 49,7         | 40,7         | 1184,2        | 881,4         |
| Pumpen + Filter etc.       | 150,0        | 150,0        | 150,0         | 150,0         |
| Zersetzungsreaktor         | 18,2         | 12,8         | 13,5          | 9,6           |
| Kristallisator             | 52,9         | 36,3         | 29,4          | 20,2          |
| <b>Gesamt</b>              | <b>337,5</b> | <b>297,5</b> | <b>2194,8</b> | <b>1681,3</b> |

Die Massen des Siliziums, der Ausgleichsnatronlauge, des Ausgleichswassers und des Quarzbreis werden den Energieträgern zugerechnet. Es wird angenommen, dass der entstehende Wasserstoff zu 100% dem Freikolbenlineargenerator zugeführt werden kann. Daher bedeuten 95% Wirkungsgrad für das Wasserstoffquellsystem, dass 5% des getankten Siliziums nicht umgesetzt werden und gemeinsam mit dem Quarzbrei ausgeschleust werden. Die Stoffmengen in den Ausgleichstanks errechnen sich aus den Stoffströmen in Abbildung 7-53 und der Gesamtwasserstoffmasse von 91,44 kg.

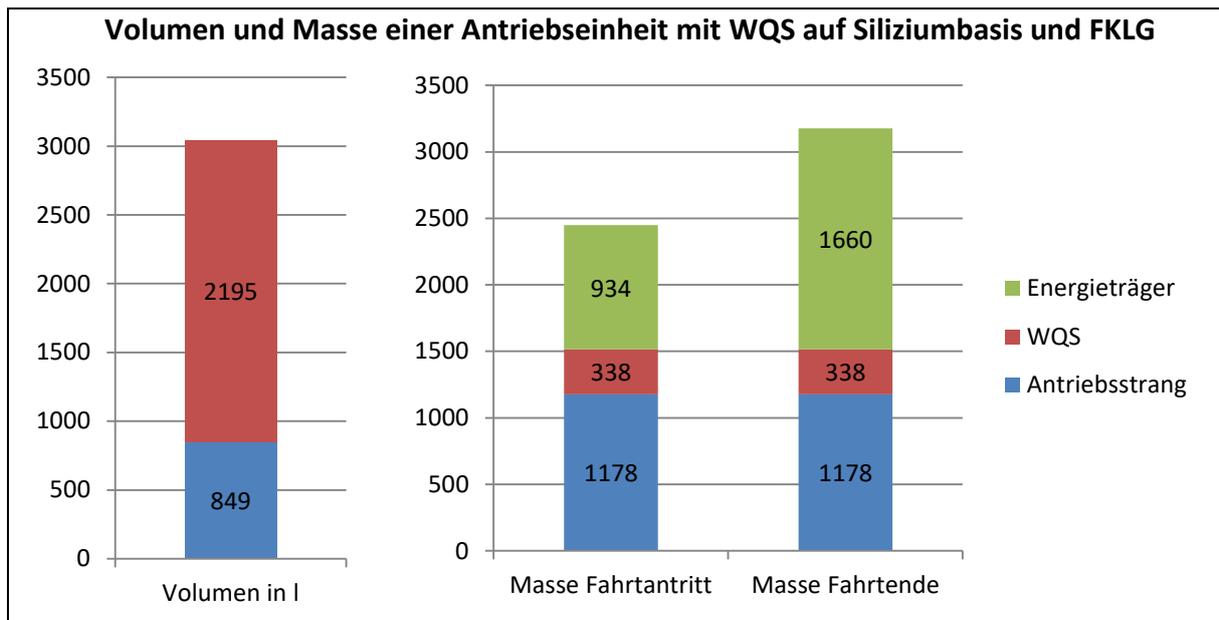


Abbildung 7-54: Silizium-WQS-FKLG-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration

Um bei einer maximalen Antriebsleistung von 320 kW die benötigten 91,44 kg Wasserstoff (vgl. Kapitel 7.5.1) bereitstellen zu können, ist ein Wasserstoffquellsystem auf Siliziumbasis, dessen Bauteile 338 kg wiegen und 2195 l Platz brauchen, erforderlich. Hinzu kommen im entladenen Zustand 1660 kg Quarzbrei. Daraus ergeben sich für das Speichersystem ein Wasserstoffmassengehalt von 4,6% und eine volumetrische Speicherdichte von 41,7 g<sub>H<sub>2</sub></sub>/l. Wird das Wasserstoffquellsystem für die Minimalkonfiguration ausgelegt, sind 4,6% und 41,3 g<sub>H<sub>2</sub></sub>/l darstellbar. Damit liegen die Massenprozentage knapp unter dem avisierten Wert von 4,8%. Der Zielwert der volumetrischen Speicherdichte wird hingegen um 81% übertroffen. Wie bei allen Wasserstoffquellsystemkonzepten sind die Massen und Volumina der Energieträger größer als die Gewichte und Bauräume der Reaktoren und des Antriebsstranges. Dementsprechend groß sind die Einsparungen bei verringerten Leistungs- und Reichweitenanforderungen.

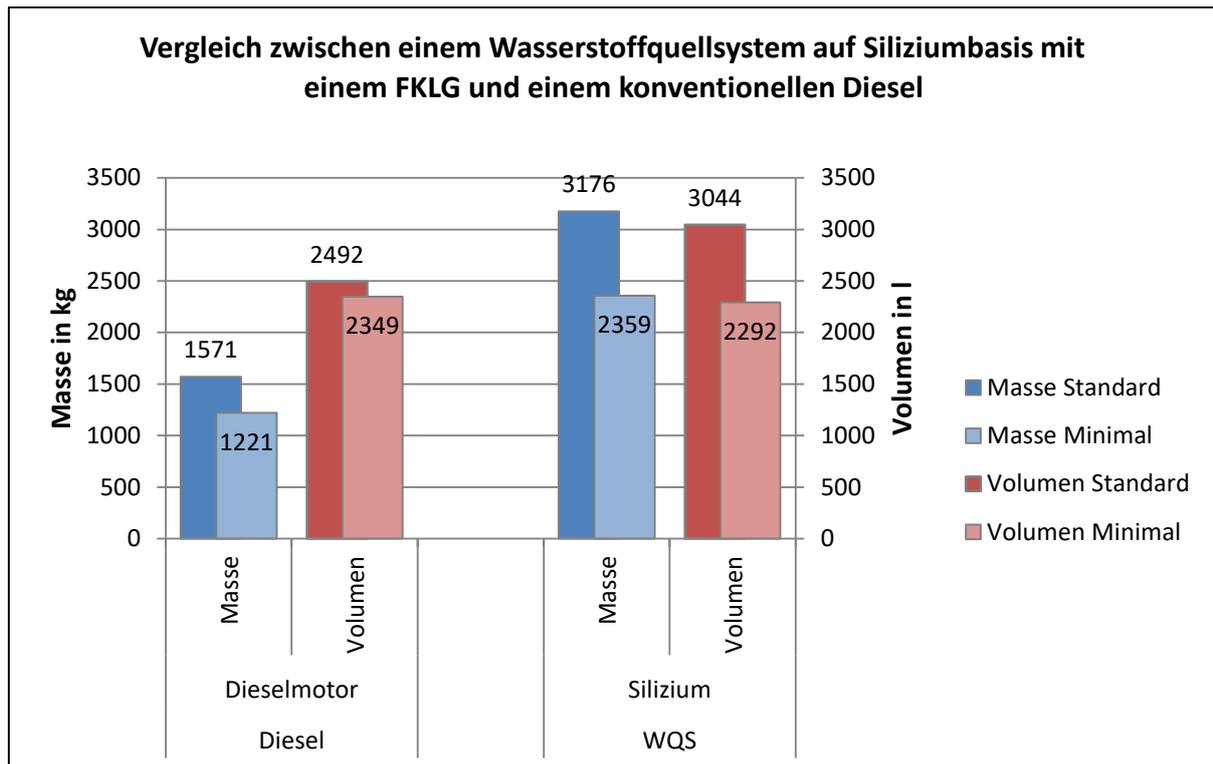


Abbildung 7-55: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und dem Wasserstoffquellsystem auf Siliziumbasis mit angeschlossenem Freikolbenlineargenerator

Im Vergleich zur Referenzdieselantriebseinheit sind die Antriebseinheiten mit einem Wasserstoffquellsystem auf Siliziumbasis um 102% bzw. 93% schwerer. In der Minimalkonfiguration nimmt das System etwas weniger Bauraum ein, während die Standardkonfiguration ca. 22% mehr Platz benötigt.

#### 7.5.4 Wasserstoffquellsysteme – Übersicht

Bis auf das Konzept mit festem Natriumborhydrid erreichen oder übertreffen alle Konzepte die Zielwerte des FCH-JU für die Wasserstoffspeicherung. Gemäß Abbildung 7-56 schneidet das Amminborankonzept am besten ab. Das Siliziumkonzept erreicht einen ähnlich geringen Platzbedarf, ist jedoch deutlich schwerer. Der Gewichtsvorteil des Amminborans ergibt sich aus mehreren Begebenheiten. Zum einen sind die molaren Massen der beteiligten Elemente sehr gering (z.B. 10,8 g/mol für Bor im Vergleich zu 28 g/mol für Silizium). Zum anderen kann nach erfolgter Ammoniakdekomposition Stickstoff an die Atmosphäre abgegeben und somit die Masse der Energieträger zum Fahrtende reduziert werden. Der notwendige Katalysator ist leichter und kleiner als die Hilfsstoffe der anderen Konzepte. Für das favorisierte Amminborankonzept wird in Kapitel 7.5.5 eine Sensitivitätsbetrachtung durchgeführt.

Eventuell ist der Massennachteil des Siliziumkonzepts hinnehmbar, falls eine Kostenbetrachtung deutliche Kostenvorteile offenbart.

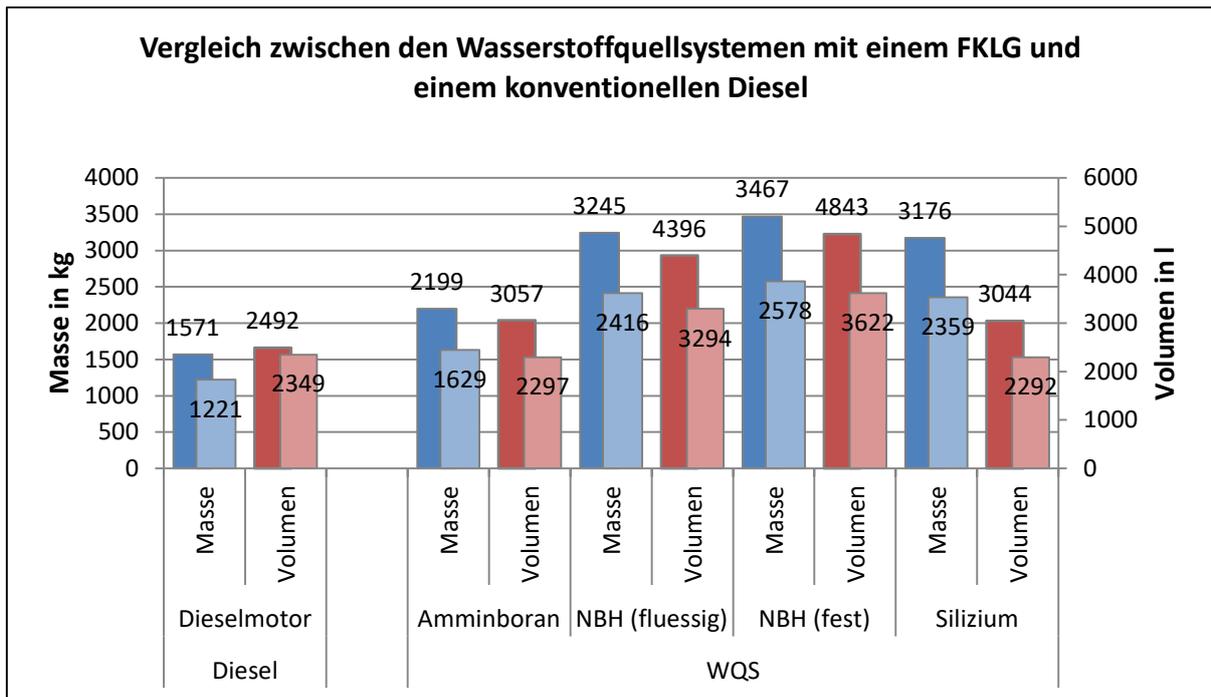


Abbildung 7-56: Übersicht der Wasserstoffquellsystemkonzepte neben der konventionellen Dieselantriebseinheit

### 7.5.5 Sensitivität – Wasserstoffquellsystem auf Basis Amminborans mit einem Freikolbenlineargenerator

Für das Amminborankonzept sind die Tanks der Edukte und Produkte im Vergleich zu den restlichen Komponenten am voluminösesten. Aus diesem Grund werden zur Sensitivitätsanalyse Parameter gewählt, deren Wirkung auf die Tanks am größten ist. Konkret sind es der Wirkungsgrad des Freikolbenlineargenerators, sowie die Schüttdichte des Amminborans und die Schüttdichte der Borsäure.

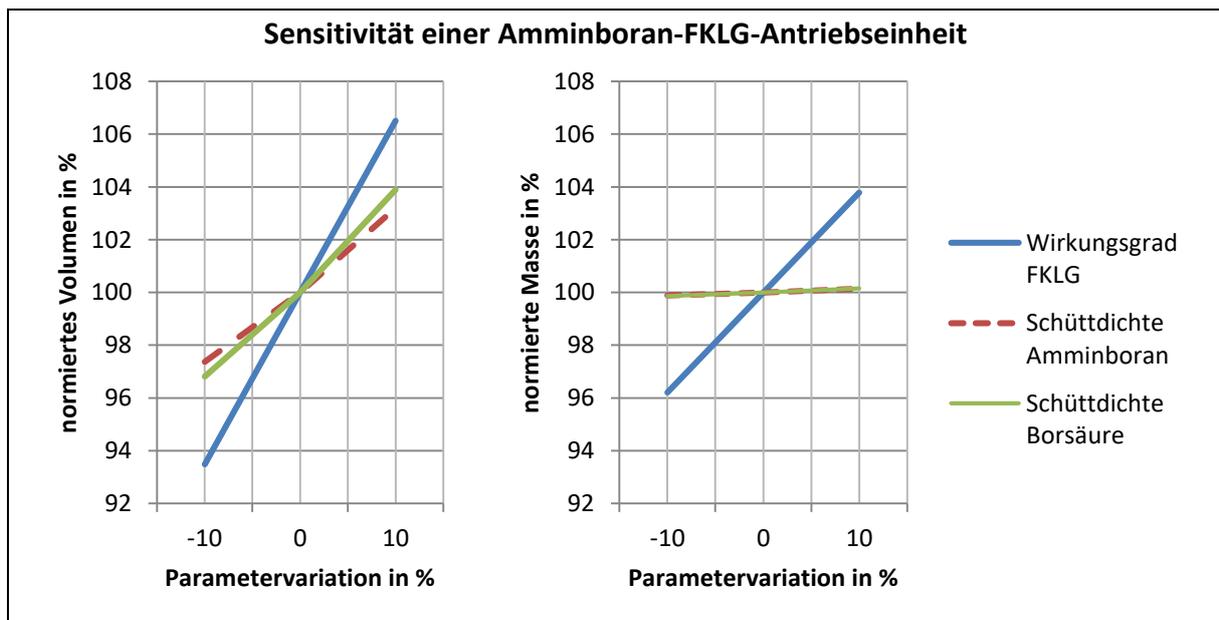


Abbildung 7-57: Einflüsse der Parameter Wirkungsgrad des FKLG sowie Schüttdichten des Amminborans und der Borsäure auf die Masse und das Volumen der Amminboran-FKLG-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration

Der Wirkungsgrad des FKLG beeinflusst die Masse des Amminborans und damit auch die Masse der Borsäure. Darüber hinaus ändert sich auch die notwendige Katalysatormenge. Die Schüttdichten beeinflussen lediglich die Volumina. Die Massen des Amminborans bzw. der Borsäure bleiben nahezu unverändert. Die leicht veränderten Massen beruhen auf den veränderten Tankgrößen. Die Fehlerindikatoren liegen für das Volumen bei 0,45 und für die Masse bei 0,14.

## 7.6 Gaswäschekonzepte

Der Gaswäscheprozess wird durch viele Parameter beeinflusst. Zum Teil handelt es sich dabei um Stoffeigenschaften, die selbst von etlichen Parametern wie Temperatur, Druck, pH-Wert etc. abhängen und im Versuch nur schwer zu bestimmen sind. Derzeit werden die meisten Waschmittel auf ihre Tauglichkeit im Kraftwerkseinsatz untersucht. Die Übertragbarkeit auf Zustände, wie sie in einem Nutzfahrzeugantriebsstrang vorkommen, stellt eine weitere Hürde dar. Die Gaswäschekonzepte werden zunächst mit dem chemischen Absorptionsmittel Monoethylamin (MEA) aufgebaut, da dessen breite Datenbasis bezüglich der Stoffeigenschaften einen verlässlichen Modellaufbau ermöglicht. Zu diesem Zweck wird von [PENT16] ein Modell zur Abgaswäsche gemäß des Konzepts aus Kapitel 6.3.1 in der Prozesssimulationssoftware Aspen Plus 8.6. aufgebaut, um Aussagen über Wärmetauscher, Stoffströme und Reaktoren treffen zu können. Anhand dieser Ergebnisse werden die Konzepte für einen Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche und/ohne Waschmittelregeneration konkretisiert. Abschließend wird der Einsatz besser bewerteter Waschmittel aus Tabelle 6-4 diskutiert.

### 7.6.1 Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche und Waschmittelregeneration

Zunächst werden der Umfang und die Zusammensetzung des Abgasstroms für einen 320 kW-Dieselmotor unter Vollast errechnet. Dazu werden folgende Annahmen getroffen:

1. H/C-Verhältnis = 1,95; Dies entspricht 86 Ma% Kohlenstoff und 14 Ma% Wasserstoff im Dieselmotorkraftstoff.
2. Der Mindestluftbedarf liegt dementsprechend bei  $15,2 \text{ kg}_{\text{Luft}}/\text{kg}_{\text{Kraftstoff}}$ .
3. Für eine rußarme Verbrennung wird das Verbrennungsverhältnis auf  $\lambda=1,3$  festgelegt.
4. Vor Eintritt in den Absorber liegen die Temperatur des Abgases bei  $40 \text{ °C}$  und der Druck bei  $1,2 \text{ bar}$ .
5. Der Motorwirkungsgrad liegt bei  $42,8\%$ .

Aus der geforderten Leistung und dem Wirkungsgrad resultiert ein benötigter Kraftstoffmassenstrom. Der Frischluftmassenstrom ist über den Mindestluftbedarf und das Verbrennungsluftverhältnis an diesen Kraftstoffmassenstrom gekoppelt. Anhand der Zusammensetzung von Frischluft und Kraftstoff wird die Abgaszusammensetzung berechnet. Die errechneten Massenströme sind in Tabelle 7-9 dargestellt.

Tabelle 7-9: Zusammensetzung der Massenströme bei Nennleistung

|                                  | Abgas in kg/h | Kraftstoff in kg/h | Frischlufte in kg/h |
|----------------------------------|---------------|--------------------|---------------------|
| <b>Gesamtmassenstrom</b>         | 1305,1        | 62,6               | 1242,5              |
| <b>Kohlenstoff C</b>             | -             | 53,8               | -                   |
| <b>Wasserstoff H<sub>2</sub></b> | -             | 8,8                | -                   |
| <b>CO<sub>2</sub></b>            | 197,4         | -                  | -                   |
| <b>H<sub>2</sub>O</b>            | 78,9          | -                  | -                   |
| <b>N<sub>2</sub></b>             | 934,1         | -                  | 934,1               |
| <b>O<sub>2</sub></b>             | 73,8          | -                  | 287,5               |
| <b>Ar</b>                        | 16,0          | -                  | 16,0                |

Es ist zu beachten, dass die Zusammensetzung von Gasgemischen nicht in Massenprozent, sondern in Stoffmengenanteilen angegeben wird. Die Umrechnung erfolgt über die molaren Massen der einzelnen Bestandteile. Die Stoffmengenanteile für Frischluft und Abgas sind in Tabelle 7-10 aufgeführt.

Tabelle 7-10: Stoffmengenanteile in Frischluft und Abgas

|                       | Stoffmengenanteil in mol/mol |       |
|-----------------------|------------------------------|-------|
|                       | Frischlufte                  | Abgas |
| <b>CO<sub>2</sub></b> |                              | 0,100 |
| <b>H<sub>2</sub>O</b> |                              | 0,098 |
| <b>N<sub>2</sub></b>  | 0,780                        | 0,742 |
| <b>O<sub>2</sub></b>  | 0,210                        | 0,051 |
| <b>Ar</b>             | 0,009                        | 0,009 |

Mit diesen Daten hat Alberto Penteadó ein Modell in Aspen Plus 8.6. aufgebaut. Es umfasst sowohl die Anlagen zur Gaswäsche als auch die Komponenten zur CO<sub>2</sub>-Verflüssigung und -speicherung. Anhand der berechneten Pump- und Wärmeübertragungsleistungen werden die Massen und Volumina der Pumpen und Wärmetauscher abgeschätzt. Hinzu kommen die Massen und Volumina der gewählten Ab- und Desorptionskolonnen, der strukturierten Packungen, der gesamten Waschlösungsumlaufmenge sowie der CO<sub>2</sub>-Druckbehälter.

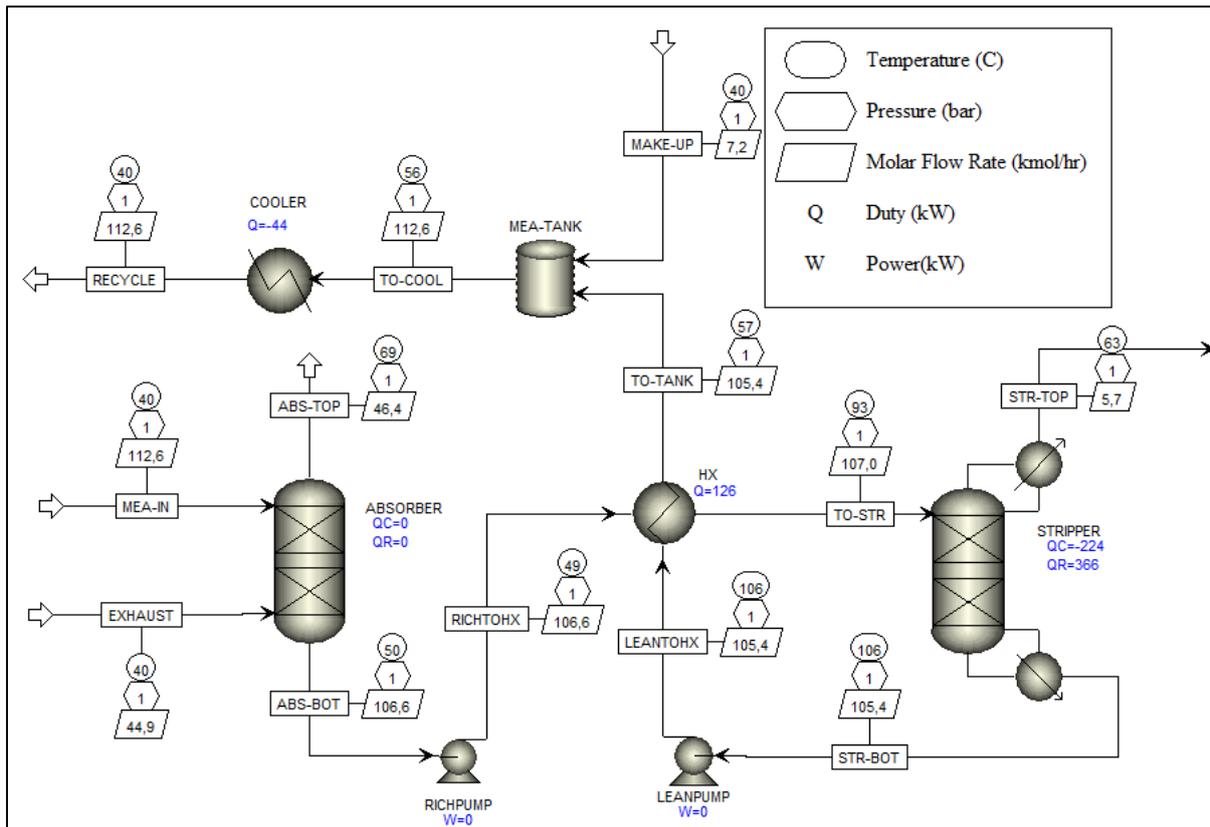


Abbildung 7-58: Flussdiagramm der Abgaswäsche aus der Simulation [PENT16]

In Abbildung 7-58 sind die simulierten Stoffmengenströme, deren Drücke und Temperaturen sowie die Leistungen der Wärmeübertrager dargestellt. Der Absorber hat einen Durchmesser von 44 cm und eine Packungshöhe von 12 m. Durch einen 20% Zuschlag auf die Gesamthöhe des Absorbers werden weitere Bauteile wie Zu- und Abläufe berücksichtigt. Bei der verwendeten strukturierten Packung handelt es sich um Sulzer Mellapak 350X. Die Fülldichte der Packung beträgt  $280 \text{ kg/m}^3$ . Insgesamt wiegt der Absorber 683 kg und benötigt 2210 l Bauraum. Zur Regeneration des Waschmittels kommt in der Desorptionskolonne (Stripper) Sulzer Mellapak Plus 350Y zum Einsatz. Der Durchmesser der Desorptionskolonne beträgt 40 cm. Die Packungshöhe beträgt ebenfalls 12 m und auch hier berücksichtigt ein Aufschlag von 20% die Anbauteile. Die Gesamtmasse der Kolonne beträgt 578 kg, das Volumen 1828 l. Die Höhen von 14,4 m können baulich aufgeteilt werden, so dass ein Überschreiten der zulässigen Fahrzeughöhe von 4 m noch nicht automatisch zum Ausschluss des Konzepts führt.

Anhand der übertragenen Wärmeleistungen, der beteiligten Medien und deren Vor- und Rücklauftemperaturen werden die Wärmeübertrager ausgewählt. Für die Wärmerückgewinnung zwischen beladener und unbeladener Waschmittellösung wird ein Plattenwärmetauscher verwendet. Er wiegt lediglich 1 kg und benötigt weniger als 1 l Bauraum. Zur Erzeugung des Stripdampfes wird ein Teil des Wassers aus der Waschmittelmenge im Stripper verdampft. Dafür werden 366 kW Heizleistung benötigt. Unter den gegebenen Annahmen kann dieser nur ungefähr zur Hälfte aus der Abgasenergie gedeckt werden. Die Bereitstellung der fehlenden Heizenergie wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Die Abgaswärme wird über einen „Luft-Wasser-Wärmetauscher“ an die Waschlösung übertragen. Im Kapitel 7.4.2 wurde bereits ein Wärmetauscher aus dem automotive Bereich ausgewählt. Dessen Leistungsangabe ist etwas geringer. Die Übertragung von 366 kW Wärme stellt allerdings kein Problem dar, da die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz ausreichend groß ist. Der gleiche Kühler wird auch als Waschmittelkühler und Stripdampfkondensator eingesetzt.

In Summe wiegen die Wärmeübertrager 82 kg und benötigen 83 l Bauraum. Zur Bestimmung der mitzuführenden Waschmittelmenge wird angenommen, dass der Absorber zu 50% und der Stripper zu 40% mit der Waschlösung gefüllt sind. Weitere 200 l Lösung befinden sich in den Leitungen. Dies ergibt ein Gesamtvolumen von 2036 l und eine Masse von 2647 kg. Für die CO<sub>2</sub>-Speicherung kommen handelsübliche Stahlflaschen zum Einsatz. Eine Flasche mit einem Eigengewicht von 62,5 kg und einem Bauraum von ca. 68 l ist in der Lage 37,5 kg CO<sub>2</sub> zu speichern, wobei die Flaschen nicht der Gaswäsche bzw. dem Antriebsstrang, sondern den Tanks für die Energieträger zugerechnet werden. In Tabelle 7-11 sind die Komponenten mit ihren Massen und Volumen zusammengefasst, die für eine Nachrüstung einer konventionellen Dieselantriebseinheit nötig wären.

Tabelle 7-11: Massen und Bauräume der Komponenten einer Gaswäsche

| Bauteil                      | Masse in kg |             | Bauraum in l |             |
|------------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
|                              | Standard    | Minimal     | Standard     | Minimal     |
| <b>Absorber</b>              | 683         | 493         | 2210         | 1522        |
| <b>Stripper</b>              | 578         | 419         | 1828         | 1259        |
| <b>Wärmetauscher</b>         | 82          | 56          | 83           | 57          |
| <b>Pumpen + Kompressoren</b> | 333         | 229         | 795          | 546         |
| <b>MEA-Lösung</b>            | 2647        | 1904        |              |             |
| <b>CO2-Flaschen</b>          | 1724        | 1254        | 1880         | 1367        |
| <b>CO2</b>                   | 1034        | 752         |              |             |
| <b>Gesamt</b>                | <b>7080</b> | <b>5107</b> | <b>6796</b>  | <b>4752</b> |

In Verbindung mit der Dieselantriebseinheit aus Kapitel 2.5 ergeben sich die in Abbildung 7-59 dargestellten Massen und Volumina. Der Energieträger wird während der Fahrt oxidiert und an Bord zurückgehalten. Die Massenzunahme während der Fahrt ist daher dem Energieträger zuzurechnen.

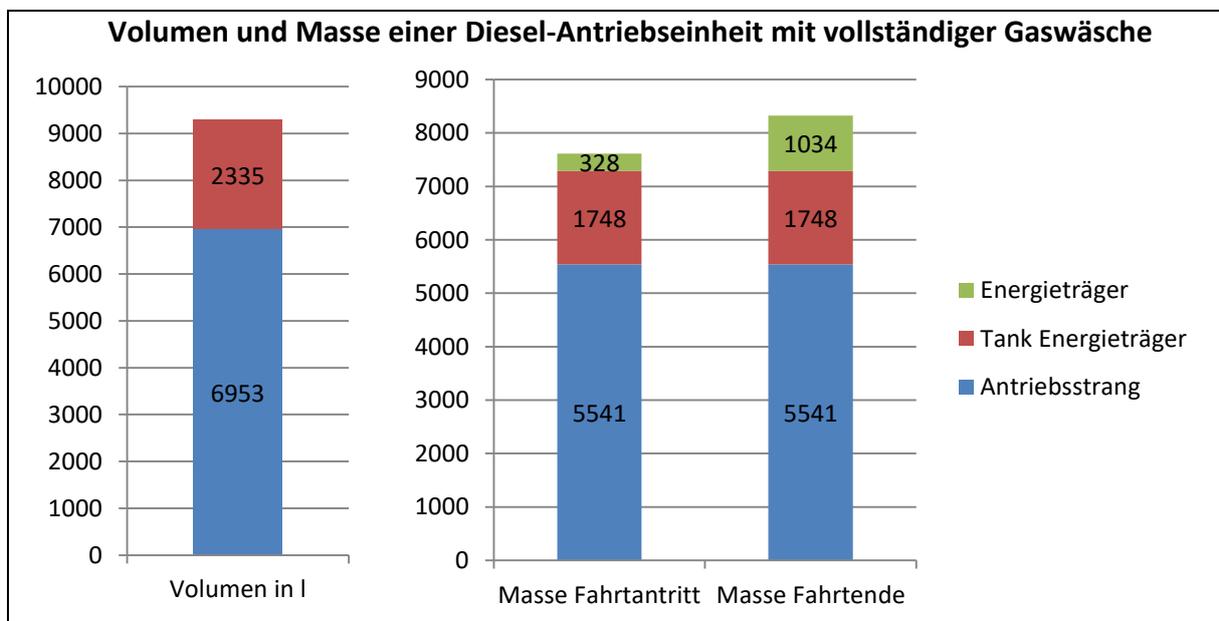


Abbildung 7-59: Diesel-Antriebseinheit mit vollständiger Gaswäsche in der Standardkonfiguration

Einige Aspekte wie der hohe Energiebedarf beim Strippen oder die Trockner für den CO<sub>2</sub>-Gasstrom werden nicht berücksichtigt und dennoch sind Masse und Bauraum der Gaswäsche sehr groß. Verbesserungspotenzial bietet die CO<sub>2</sub>-Speicherung, wenn statt der Stahlflaschen effizientere Materialien eingesetzt werden.

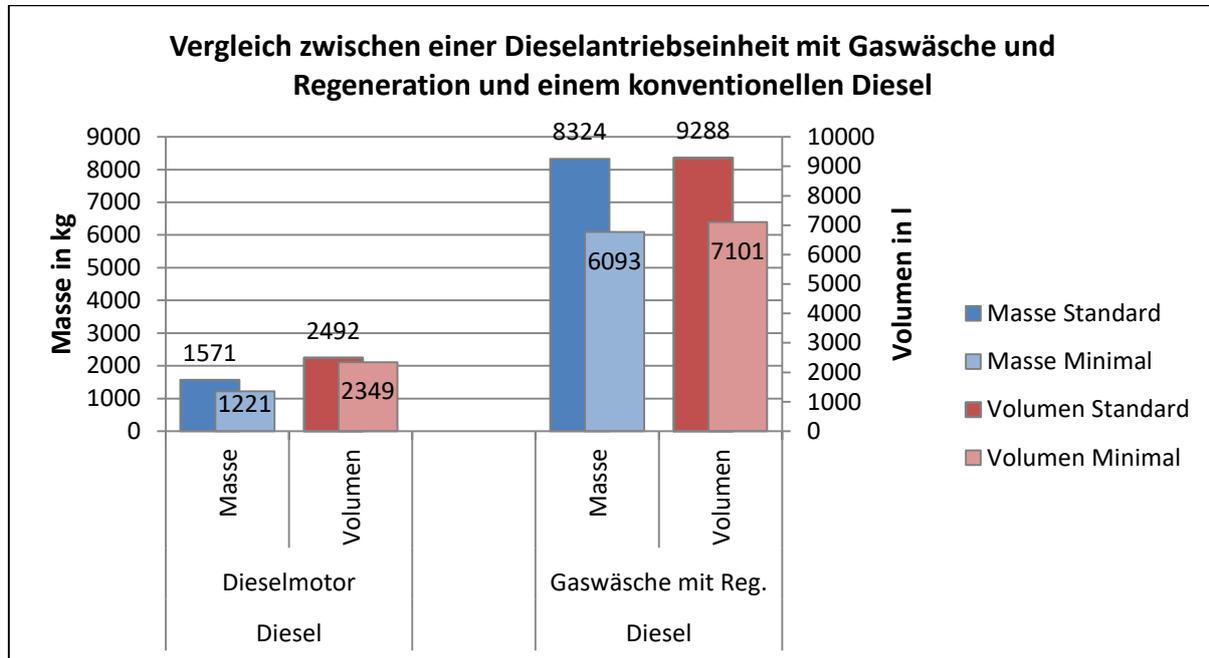


Abbildung 7-60: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und einer Dieselantriebseinheit mit Gaswäsche und Regeneration

Das Konzept der Gaswäsche mit onboard-Regeneration ist fast fünfmal so groß und schwer wie eine konventionelle Dieselantriebseinheit. Da die konventionelle Dieselantriebseinheit lediglich erweitert wurde, teilen sich die zusätzlichen Massen und Bauräume auf die Komponenten der Gaswäsche und das zurückgehaltene CO<sub>2</sub> auf.

## 7.6.2 Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche ohne Waschmittelregeneration

Aus den Ergebnissen aus Kapitel 7.6.1 wird klar, dass die Regeneration des Waschmittels mehr Energie benötigt, als nutzbare Abwärme zur Verfügung steht. Darüber hinaus wiegen Stripper und CO<sub>2</sub>-Flaschen 2,3 t und benötigen 3,7 m<sup>3</sup> Bauraum. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, ein Konzept ohne Waschmittelregeneration für einen Vergleich zu konkretisieren. Der Absorber wird aus Kapitel 7.6.1 übernommen. Gemäß Tabelle 6-5 fällt für dieses Konzept die Wahl auf Ethylendiamin als Waschmittel. Zur Beibehaltung der identischen CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus dem Abgasstrom muss das Waschmittel bei der als Prozessmaximum festgelegten CO<sub>2</sub>-Beladung, also gegen Ende der Reichweite, die gleiche mittlere Reaktionsgeschwindigkeit aufweisen wie MEA in dem simulierten Prozess aus Kapitel 7.6.1. Da in der Literatur unter diesen Prozessbedingungen nur schwer vergleichbare Daten zu den Waschmitteln MEA und EDA vorliegen, werden im Folgenden Vereinfachungen getroffen und sich der Ähnlichkeitstheorie bedient. Anhand der Daten aus [PENT16] errechnet sich der Beladungszustand von MEA im Absorbereinlass zu 0,134 mol<sub>CO<sub>2</sub></sub>/mol<sub>MEA</sub> und im Absorbereustritt zu 0,5 mol<sub>CO<sub>2</sub></sub>/mol<sub>MEA</sub>, während die Gleichgewichtsbeladung unter diesen Bedingungen bei 0,61 mol<sub>CO<sub>2</sub></sub>/mol<sub>MEA</sub> liegt [MAUN13]. Vereinfacht angenommen, liegt die durchschnittliche Beladung von MEA im Absorber bei 52% der Gleichgewichtsbeladung. Der Einfluss der Beladung  $x$  auf die Massentransferrate  $r$  ist in Gleichung 30 dargestellt.

$$r_n \sim -x_n^{1,5} \quad (30)$$

Da die Prozessparameter bis auf die Beladung des Waschmittels konstant gehalten werden, vereinfacht sich die Formel für die Massentransferrate zu:

$$r_n = r_{n,0} - (Z_n * x_n^{1,5}) \quad (31)$$

$r_{n,0}$  ist gleichbedeutend mit Massentransferrate im unbeladenen Zustand und für  $Z$  gilt der Zusammenhang in Gleichung 32.

$$Z_n = \frac{r_{n,0}}{x_{n,Gleichgewicht}^{1,5}} \quad (32)$$

Mit  $n=MEA$  bzw.  $n=EDA$  können die jeweiligen Werte für  $x_{n,Gleichgewicht}$  und  $r_{n,0}$  aus Tabelle 6-4 übernommen werden. Die Massentransferraten für MEA und EDA werden gleichgesetzt und es wird nach  $x_{EDA}$  aufgelöst. Setzt man 52% der MEA-Gleichgewichtsbeladung für  $x_{MEA}$  ein, erhält man für  $x_{EDA}$  0,0147 mol<sub>CO<sub>2</sub></sub>/g<sub>EDA</sub>. Das entspricht 73,3% der EDA-Gleichgewichtsbeladung. Demzufolge weist eine MEA-Lösung, die zu 52% mit CO<sub>2</sub> beladen ist, die gleiche Massentransferrate auf wie eine zu 73,3% beladene EDA-Lösung. Die Zahlenwerte aus Tabelle 6-4 gelten jedoch nur für 1-molare Waschlösungen. Mit steigender Waschmittelkonzentration sinkt die Gleichgewichtsbeladung. Nach [MAUN13] verringert sich Gleichgewichtsbeladung einer Waschlösung mit 30-Ma% MEA um 24,7% im Vergleich zu einer 1-molaren Waschlösung. Legt man für EDA den gleichen Konzentrationseinfluss zugrunde, folgt für eine Waschlösung mit 30-Ma% EDA als Prozessmaximum eine CO<sub>2</sub>-Beladung von 0,0111 mol<sub>CO<sub>2</sub></sub>/g<sub>EDA</sub> bzw. 0,488 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/g<sub>EDA</sub>. Mit diesen Werten lässt sich die benötigte Waschmittelmenge berechnen. In Tabelle 7-12 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 7-12: Massen und Volumina der Bestandteile einer Abgaswäsche ohne Regeneration

| Bauteil                      | Masse in kg |             | Bauraum in l |             |
|------------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
|                              | Standard    | Minimal     | Standard     | Minimal     |
| <b>Absorber</b>              | 683         | 493         | 2210         | 1522        |
| <b>Wärmetauscher</b>         | 27          | 19          | 28           | 19          |
| <b>Pumpen + Kompressoren</b> | 5           | 3           | 4            | 3           |
| <b>EDA-Lösung</b>            | 7065        | 5138        |              |             |
| <b>EDA-Tank</b>              | 201         | 163         | 7477         | 5453        |
| <b>CO<sub>2</sub></b>        | 1034        | 752         |              |             |
| <b>Gesamt</b>                | <b>9015</b> | <b>6568</b> | <b>9718</b>  | <b>6997</b> |

Der Stripper, einige Wärmetauscher, der CO<sub>2</sub>-Verdichter sowie die CO<sub>2</sub>-Flaschen entfallen. Dafür steigt die Masse der Waschlösung auf über das 2,6-fache im Vergleich zum Konzept mit einer onboard-Regeneration. In diesem Konzept wird die Waschlösung den Energieträgern zugerechnet, da sie in einem festen Verhältnis mit dem Dieselmotorkraftstoff getankt wird. Ist lediglich eine kurze Fahrt geplant, kann entsprechend weniger Kraftstoff und EDA-Lösung getankt werden, so dass dadurch die Gesamtmasse des Fahrzeugs reduziert wird.

Der EDA-Tank besteht aus Edelstahl mit einer Wandstärke von 1 mm und gemeinsam mit dem Dieseltank bildet er die Baugruppe „Tank Energieträger“. Die Ergebnisse für die Standardkonfiguration sind in Abbildung 7-61 dargestellt.

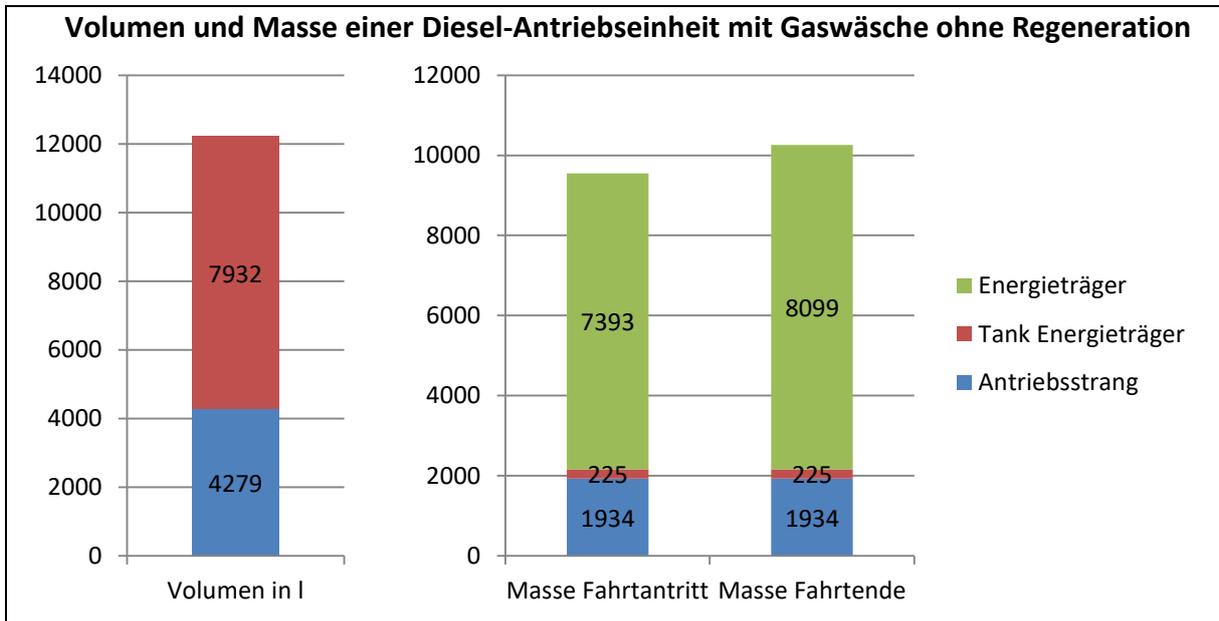


Abbildung 7-61: Diesel-Antriebseinheit mit Gaswäsche ohne Regeneration in der Standardkonfiguration

Für den Vergleich mit der konventionellen Dieselantriebseinheit ist der Zustand zum Fahrtende ausschlaggebend. In der Standardkonfiguration ist das Konzept ohne Regeneration des Waschmittels ca. 6-mal so schwer und 5-mal so voluminös wie die Referenzeinheit, wie Abbildung 7-62 entnommen werden kann.

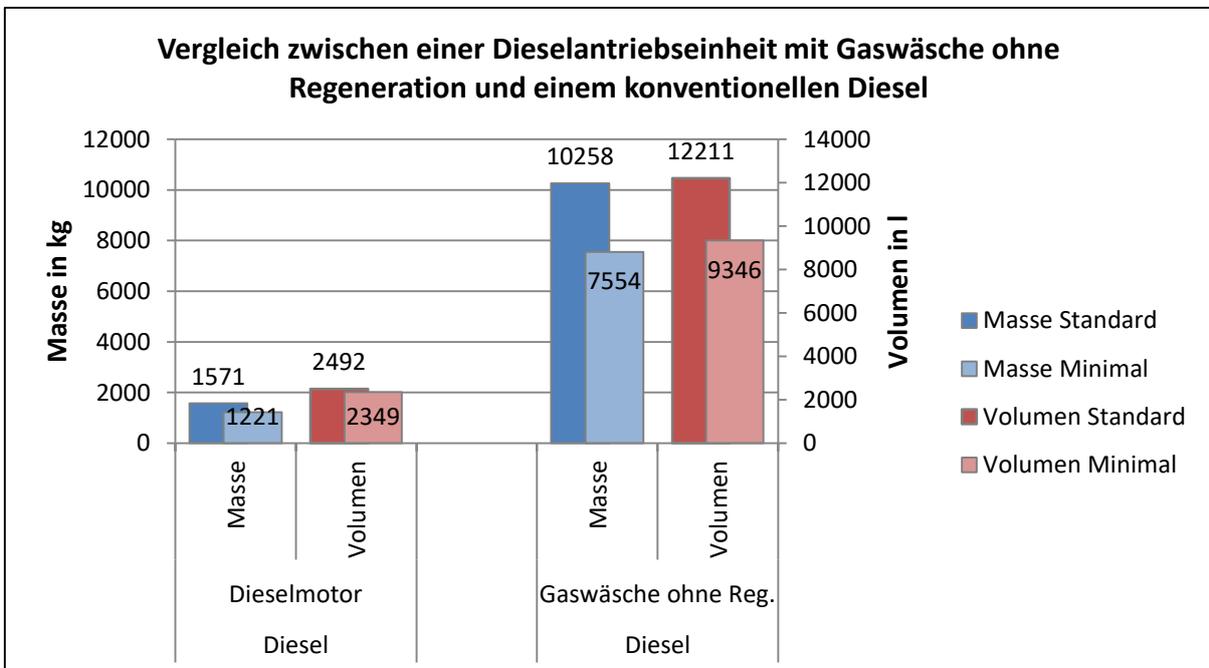


Abbildung 7-62: Vergleich zwischen einer Dieselantriebseinheit mit Gaswäsche ohne Regeneration und einer konventionellen Dieselantriebseinheit

### 7.6.3 Gaswäschekonzepte – Übersicht

Die Gaswäschekonzepte sind mit den getroffenen Annahmen um ein Vielfaches schwerer und voluminöser als konventionelle Dieselantriebseinheiten. Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus dem Abgas ist eine Gleichgewichtsreaktion. Die Prozessbedingungen bei der Absorption und Regeneration liegen relativ dicht am Gleichgewichtszustand, so dass die Reaktionsgeschwindigkeiten gering sind und deshalb die Reaktoren groß sein müssen. Das Speichern des CO<sub>2</sub> in schweren Gasflaschen oder in gebundener Form benötigt ebenfalls viel Bauraum.

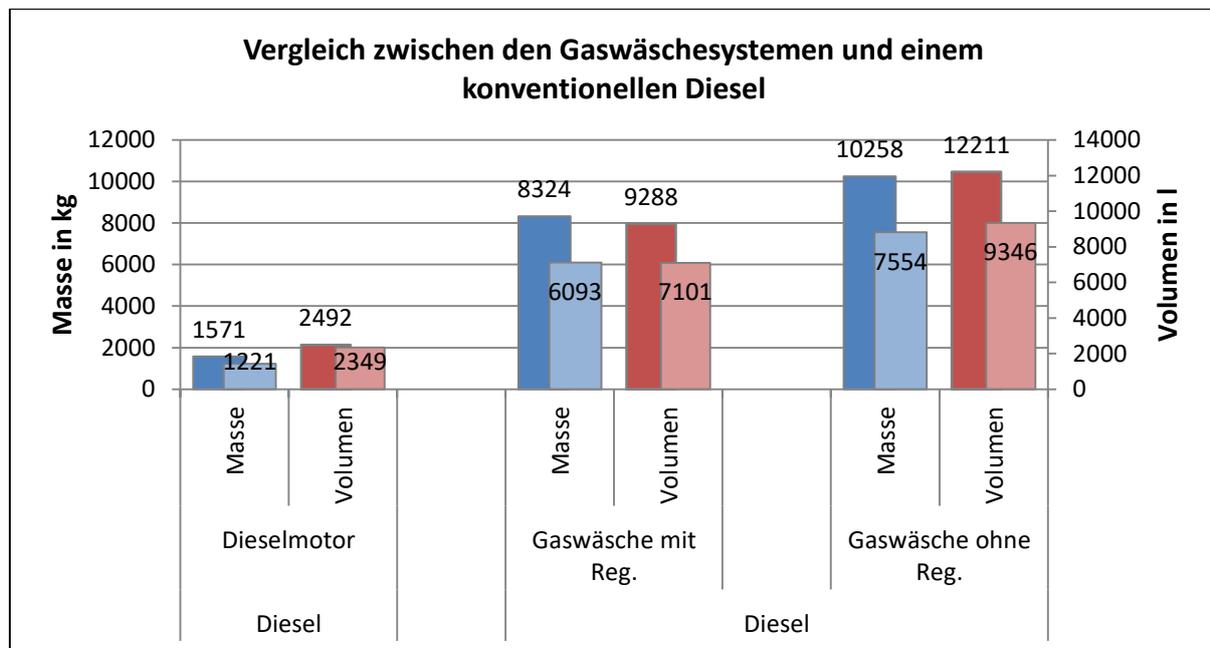


Abbildung 7-63: Vergleich zwischen den Gaswäschesystemen und einer konventionellen Dieselantriebseinheit

Der Verzicht auf die onboard-Regeneration bringt einige Vorteile in Bezug auf die Komplexität und den Energiebedarf des Systems. Die großen Komponenten Stripper, CO<sub>2</sub>-Verdichter und CO<sub>2</sub>-Flaschen entfallen. Dafür muss fast die dreifache Menge Waschmittel mitgeführt werden, so dass die Antriebseinheit ohne Regeneration schwerer und voluminöser wird als die Antriebseinheit mit Regeneration des Waschmittels.

Mit der Konkretisierung der Konzepte ist es möglich, die Haupttreiber für Masse und Volumen zu identifizieren. Für die Masse sind es das Waschmittel und gegebenenfalls die CO<sub>2</sub>-Speicher. Für das Volumen spielen darüber hinaus die Ab- und Desorber eine entscheidende Rolle. Die Waschmittel können mit Blick auf die Treiber ausgewählt werden. Ein erfolgversprechender Ansatz ist die Reduktion des Wasseranteils in der Waschlösung.

### 7.6.4 Sensitivität – Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche und Waschmittelregeneration

Für die Sensitivitätsanalyse werden die Parameter mit dem wahrscheinlich größten Einfluss auf die Treiber gesucht. Der Wirkungsgrad des Dieselmotors beeinflusst den Abgasmassenstrom und somit die Durchmesser der Ab- und Desorber, sowie die Speichermenge CO<sub>2</sub>. Daneben wird angenommen, dass die Massentransferrate direkten Einfluss auf die Bauhöhe der Ab- und Desorber hat. Abschließend wird die Speicherdichte des CO<sub>2</sub>-Speichers variiert.

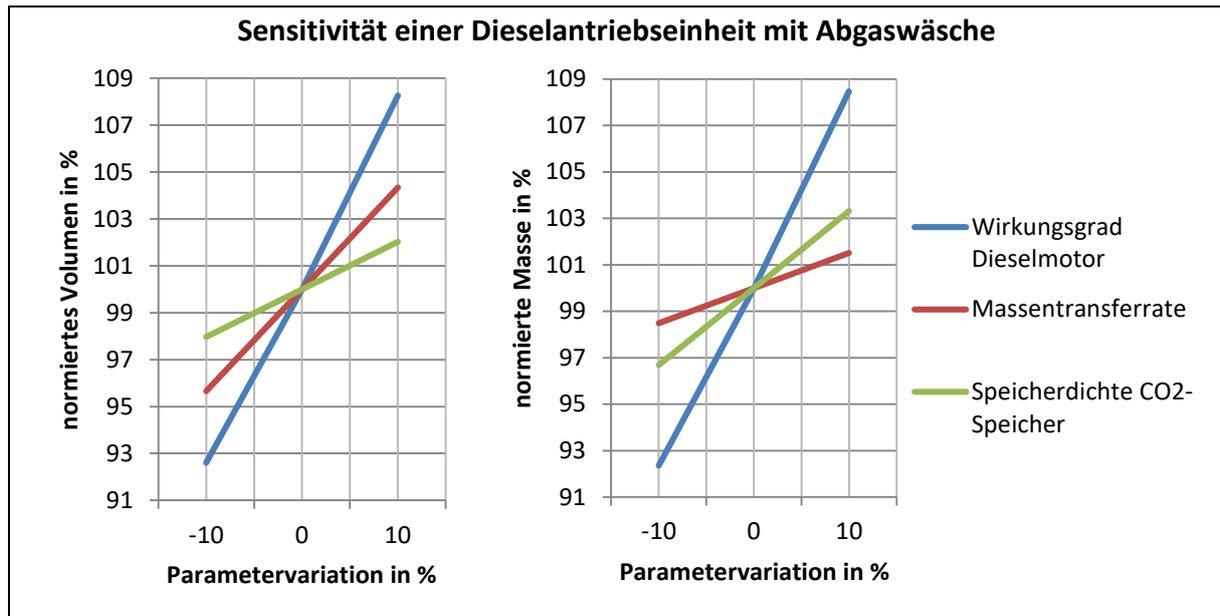


Abbildung 7-64: Einflüsse der Parameter Wirkungsgrad des Dieselmotors, Massentransferrate des Waschmittels sowie Speicherdichten des CO<sub>2</sub>-Speichers auf die Masse und das Volumen der Dieselantriebseinheit mit Abgaswäsche und onboard-Regeneration in der Standardkonfiguration

Der Wirkungsgrad des Dieselmotors hat einen starken Einfluss auf die Masse und das Volumen. Nahezu alle Komponenten können mit einer Verbesserung des Wirkungsgrades kleiner ausgeführt werden. Die Massentransferrate gibt die Bauhöhe der Sorptionskolonnen vor. Damit besitzt sie einen relativ starken Einfluss auf das Volumen, während die Masse nur wenig auf eine Parametervariation reagiert. Die Speicherdichten des CO<sub>2</sub>-Speichers beeinflussen das Gesamtsystem nur wenig. Die Masse reagiert dabei etwas stärker als das Volumen. Die Fehlerindikatoren liegen für das Volumen bei 0,49 und für die Masse bei 0,44.

## 8 Bewertung der Konzepte

Nach erfolgter Konkretisierung der Konzepte können die Ergebnisse miteinander verglichen werden. In Abbildung 8-1 sind die Massen und Volumina der Konzepte sowohl in der Standard- als auch in der Minimalkonfiguration dargestellt.

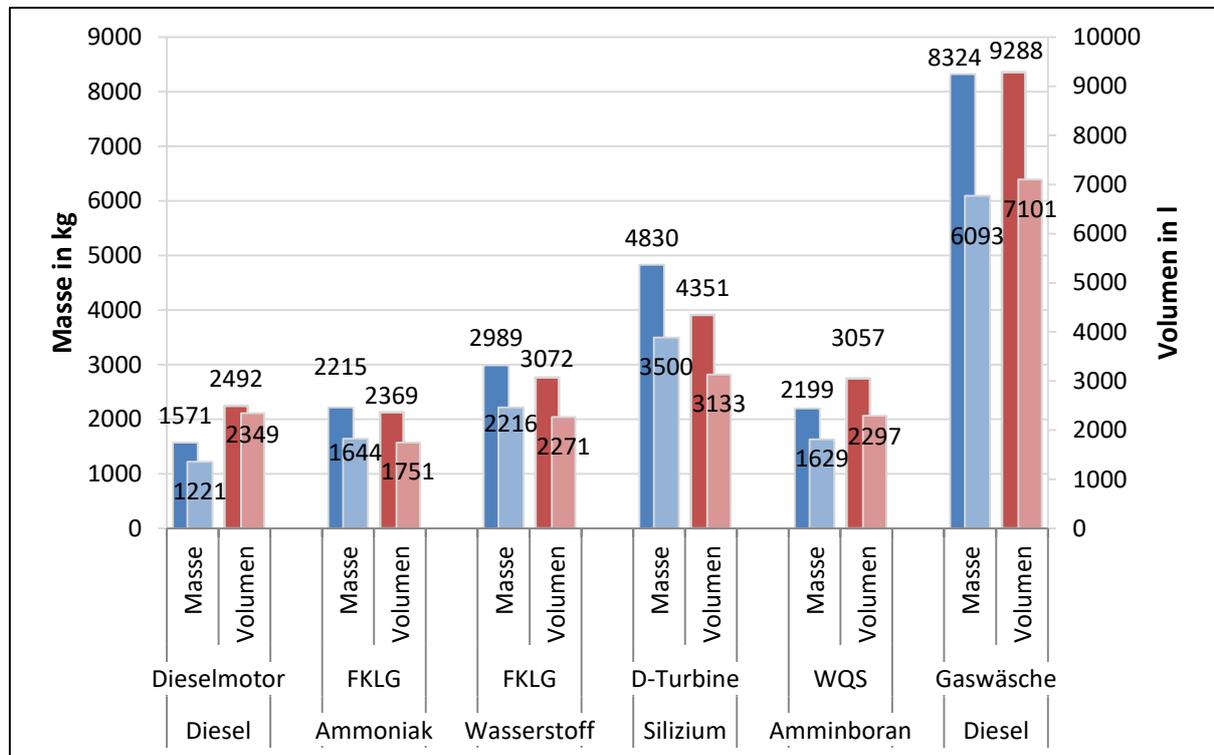


Abbildung 8-1: Vergleich aller bevorzugten Konzepte

In der Anforderungsliste aus Kapitel 2.7 wurden als Maximalmasse 1600 kg und als maximal zulässiger Bauraum 2500 l für die Antriebseinheit festgelegt. Diese Anforderungen wurden aus den Eigenschaften der Dieselantriebseinheit abgeleitet und keine alternative Antriebseinheit ist in der Lage, diese Anforderungen zu erfüllen. Somit könnte die These von Prof. Lenz gestützt werden, wenn keine Anforderung bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen bestünde. Da aber in dieser Arbeit eine Beschränkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen existiert, ist auch die Dieselantriebseinheit nicht in der Lage, alle Anforderungen zu erfüllen. Die Bewertung der Konzepte hängt maßgeblich von der Gewichtung der einzelnen Anforderungen ab. In Tabelle 8-1 werden die alternativen Antriebskonzepte anhand ihrer Massen gelistet.

Tabelle 8-1: Rangliste der alternativen Konzepte mit Fehlerindikatoren

| Rang | Energieträger | Konzept                 | Masse |                 | Volumen |                 |
|------|---------------|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|
|      |               |                         | in kg | Fehlerindikator | in l    | Fehlerindikator |
| 1    | Amminboran    | WQS + FKLG              | 2199  | 0,136           | 3057    | 0,454           |
| 2    | Ammoniak      | FKLG                    | 2215  | 0,281           | 2369    | 0,484           |
| 3    | Wasserstoff   | FKLG                    | 2989  | 0,442           | 3072    | 0,526           |
| 4    | Silizium      | Dampfturbine            | 4830  | 0,383           | 4351    | 0,454           |
| 5    | Diesel        | Dieselmotor + Gaswäsche | 8324  | 0,443           | 9288    | 0,488           |

Die Wasserstofffreisetzung aus Amminboran mit anschließender Verbrennung im Freikolbenlineargenerator ist das Antriebskonzept mit den geringsten Verletzungen der Anforderungsliste und sollte für den Einsatz in schweren Güterkraftfahrzeugen im Fernverkehr favorisiert werden. Ihm folgen die Verbrennung von Ammoniak in einem Freikolbenlineargenerator sowie die direkte Verbrennung von Wasserstoff im Freikolbenlineargenerator. Falls die Serieneinführung von Freikolbenlineargeneratoren noch lange auf sich warten lässt oder die Eigenschaften von den hier getroffenen Annahmen negativ abweichen, rücken die Polymerelektrolytbrennstoffzellen in den Fokus. Konzepte, die eine Speicherung der Oxidationsprodukte an Bord vorsehen, sind deutlich schwerer als die Konzepte mit harmlosen atmosphärischen Oxidationsprodukten. Eine Sortierung anhand des Bauraums ergibt eine ähnliche Reihenfolge. Die Fehlerindikatoren für das Volumen bzw. den Bauraum liegen alle im Bereich von 0,45 bis 0,53 und somit recht eng beieinander. Die Spreizung der Fehlerindikatoren für die Masse ist deutlich größer. Die Sensitivitätsanalyse für das Amminborankonzept basiert auf den Schüttdichten der Edukte und Produkte. Folglich reagiert die Masse bei der Änderung dieser Parameter kaum und der Gesamtfehlerindikator für die Masse ist gering. Die Fehlerindikatoren geben jedoch keine Auskunft darüber, wie wahrscheinlich eine Abweichung der Parameter ist. Die Wahrscheinlichkeit einer Abweichung nimmt mit zunehmendem Reifegrad der Technologie ab.

## 9 Neue Konzepte für elektrisch angetriebene Lkw

In den Medien wird derzeit die Elektrifizierung der Lkw diskutiert. Die Versorgung durch Oberleitungen kann auf ausgewählten Strecken sicherlich einen Beitrag leisten, wird jedoch in der Fläche mit Blick auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis nicht umsetzbar sein (vgl. Kapitel 5.2.2). Der Vollständigkeit halber werden in diesem Kapitel Konzepte untersucht, die aufgrund ihrer schlechten Bewertung in Kapitel 6.1 nicht weiter ausgearbeitet wurden aber dennoch in den Medien Beachtung finden. Vor allem Startup-Unternehmen aus Nordamerika haben angekündigt, schwere LKW für den Fernverkehr mit elektrifizierten Antrieben auf den Markt bringen zu wollen. Technische Daten der Konzepte sind jedoch meist nur über Umwege aus den Pressemitteilungen zu entnehmen, da diese sich vornehmlich an Investoren richten. Auch etablierte LKW-Hersteller stellen alternative Antriebskonzepte vor. Diese adressieren leichtere Fahrzeuge mit weniger Reichweite, als es die Konkurrenz aus Nordamerika verspricht.

### 9.1 Tesla Semi

Der Tesla Semi ist eine rein elektrisch angetriebene Zugmaschine mit Li-Ionen-Batterien und vier Elektromotoren. Auf der Homepage konnten am 22.06.2018 die Daten abgerufen werden, wie sie in Tabelle 9-1: Technische Daten Tesla Semi Tabelle 9-1 dargestellt sind.

Tabelle 9-1: Technische Daten Tesla Semi [TESL18]

|                                    |                    |
|------------------------------------|--------------------|
| <b>Gesamtgewicht in kg</b>         | 36287 (80.000 lbs) |
| <b>C<sub>w</sub>-Wert</b>          | 0,36               |
| <b>Geschwindigkeit in m/s</b>      | 26,82 (60 mph)     |
| <b>max. Steigung bei 26,82 m/s</b> | 0,05               |
| <b>Energiebedarf in kWh/km</b>     | <=1,25 (2 kWh/mi)  |
| <b>Reichweite in km</b>            | 805 (500 miles)    |

In sozialen Medien veröffentlicht das Management weitere Informationen, die dann in Foren und von Zeitschriften aufgegriffen werden. So soll die Höchstgeschwindigkeit bei 104 km/h und das Nachladen für 640 km lediglich 30 Minuten dauern. [JESS18]

Aus den Daten in Tabelle 9-1 sowie weiteren Annahmen wie einem Rollwiderstandsbeiwert von 0,006 und einer Stirnfläche von 10 m<sup>2</sup> können die Fahrwiderstände, die Leistungen und der Energiebedarf bestimmt werden. Anhand dieser Werte in Verbindung mit den recherchierten Leistungs- und Energiedichten können die Massen und Volumina der Komponenten errechnet werden. Bei einer Geschwindigkeit von 60 mph werden auf 100 km 43,16 kWh zum Überwinden des Luftwiderstands und 59,33 kWh für den Rollwiderstand benötigt. Die höhere Geschwindigkeit im Vergleich zu den europäischen LKW fällt durch die bessere Aerodynamik nicht so stark ins Gewicht, so dass der kombinierte Roll- und Luftwiderstand mit 102,49 kWh auf 100 km nur marginal über den 101,7 kWh des Referenzfahrzeugs liegt. Aus Mangel an Daten wird die in den Bremsen abgebaute kinetische Energie analog zum Referenzfahrzeug auf 38 kWh festgelegt. In Abbildung 9-1 ist die Wirkungsgradkette des Tesla-Semi-Konzepts dargestellt, mit deren Hilfe der Energiebedarf und daraus die Batteriegröße berechnet werden kann.

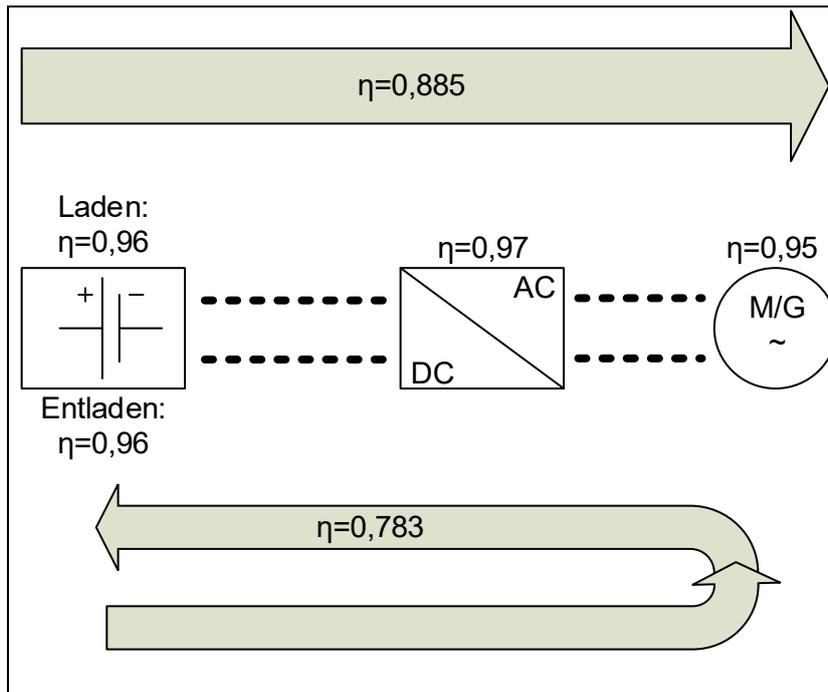


Abbildung 9-1: Wirkungsgradketten des Tesla-Antriebsstrangs mit Lithium-Ion-Batteriepaket

Im Gegensatz zur Betrachtung der Rekuperation der Bremsenergie in Kapitel 7.1 wird das Batteriepaket so groß dimensioniert sein, dass es weder Leistungs- noch Kapazitätsbeschränkungen bei der Rekuperation geben wird. Der Gesamtenergieverbrauch liegt demnach auf 100 km bei 125,2 kWh bzw. bei 1,25 kWh/km. Damit wird die Angabe aus Tabelle 9-1 bestätigt und konkretisiert.

Mit einer unterstellten Energiedichte von 160 Wh/kg (vgl. Tabelle 5-4) und 300 Wh/l [RZEP10] für Lithium-Ionen-Batterien wiegt das Batteriepaket für 805 km ca. 6289 kg und benötigt 3354 l Bauraum. Für eine Steigung von 5% bei einer Geschwindigkeit von 26,82 m/s werden vollbeladen ca. 580 kW Leistung benötigt. Wird unterstellt, dass diese Leistung nur kurzzeitig abgerufen wird, kann mit einer gravimetrischen Leistungsdichte von 3,2 kW/kg und mit einer volumetrischen Leistungsdichte von 11 kW/l für die Elektromotoren gerechnet werden (vgl. Tabelle 5-3). Die Elektromotoren wiegen demzufolge 181 kg, benötigen 53 l Bauraum und haben eine Dauerleistung von ca. 218 kW. Hinzu kommen noch skalierte Werte für den Umrichter und die Kabel. Zur Vergleichbarkeit wird das Tesla-Semi-Konzept auf die Eigenschaften des Referenzfahrzeugs angepasst und auf die Anforderungen aus Standard- und Minimalkonfiguration skaliert. D.h. es wird die Gesamtmasse auf 40 t erhöht, die Geschwindigkeit auf 83,2 km/h reduziert, die Dauerleistungen auf 320 kW respektive 220 kW und die Reichweiten auf 1100 km bzw. 800 km festgelegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9-2 dargestellt. Es bleibt fraglich, ob das Aerodynamikkonzept in seiner originalen Form in Europa eingesetzt werden kann, da unterschiedliche gesetzliche Vorgaben existieren.

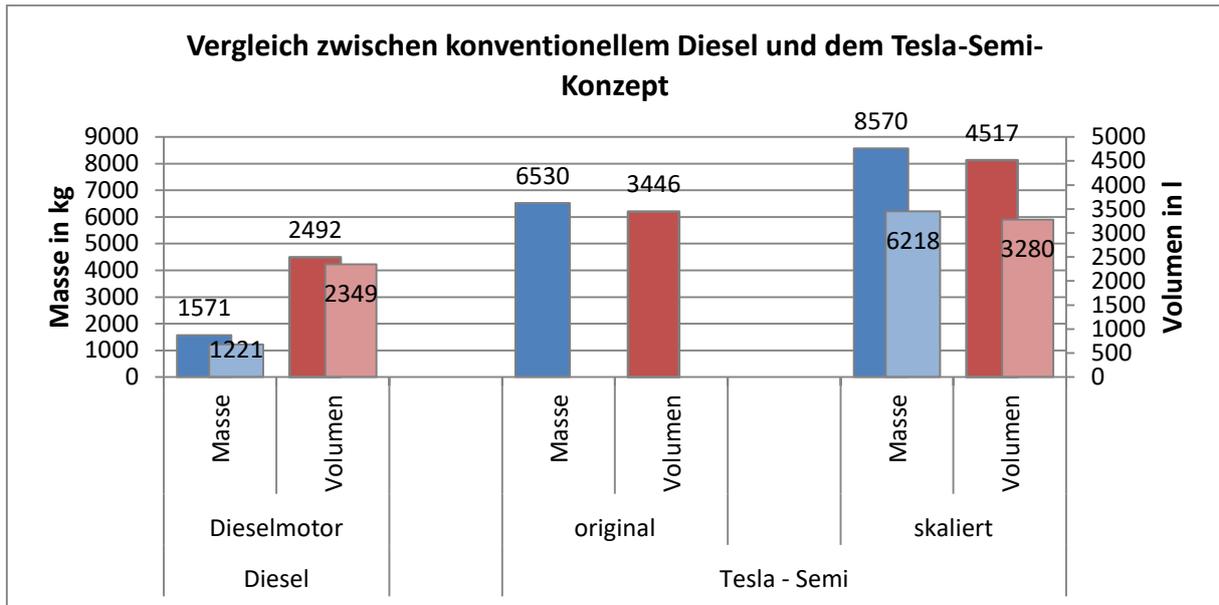


Abbildung 9-2: Vergleich zwischen konventionellem Diesel und dem Tesla-Semi-Konzept im Original und skaliert auf die Standard- und Minimalkonfiguration

Die Eigenschaften des originalen Tesla-Semi-Konzepts sind recht vergleichbar mit der Minimalkonfiguration. Die Minimalkonfiguration ist aufgrund des schweren Batteriepakets über 400% schwerer als die Dieselreferenz. Der Bauraumbedarf steigt um 40%. Ein zusätzlicher Nachteil ist die lange Ladedauer. Für 640 km Reichweite werden 30 Minuten veranschlagt. Dies entspricht einer benötigten Ladeleistung von 1,6 MW.

## 9.2 Nikola One

Das Modell One von Nikola ist eine elektrische Zugmaschine mit einer Batterie und einer Brennstoffzelle als Range-Extender. Verstromt wird komprimierter Wasserstoff. Auf der Homepage waren am 04.07.18 folgende Daten abrufbar:

Tabelle 9-2: Technische Daten Nikola One [NIKO18]

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| <b>Gesamtgewicht in kg</b>            | 37648 (83.000 lbs) bis 39009 (86.000 lbs) |
| <b>Nutzlast in kg</b>                 | 29484 (65.000 lbs)                        |
| <b>max. Geschwindigkeit in m/s</b>    | 29,06 (65 mph)                            |
| <b>max. Steigung bei 29,06 m/s</b>    | 0,06                                      |
| <b>Reichweite in km</b>               | 805 (500 miles) bis 1609 (1000 miles)     |
| <b>Batteriegröße in kWh</b>           | 240 bis 320                               |
| <b>Batteriereichweite in km</b>       | 161 (100 miles) bis 322 (200 miles)       |
| <b>Gesamtleistung in kW</b>           | 735                                       |
| <b>Brennstoffzellenleistung in kW</b> | 300                                       |

Durch die unscharfen Angaben zum Gesamtgewicht, zur Reichweite und Batteriegröße wird ein Abschätzen der verwendeten Komponenten erschwert. Die Stirnfläche und der  $C_w$ -Wert werden aus dem Tesla-Semi-Konzept mit  $10 \text{ m}^2$  und  $0,36$  übernommen. Der Rollwiderstandsbeiwert wird auf  $0,006$  festgesetzt. Es wird unterstellt, dass die Mindestreichweiten für die Batterie und das Gesamtfahrzeug gelten, wenn das Fahrzeug mit Maximalgeschwindigkeit und Maximalgewicht in der Ebene unterwegs ist. Der Einfluss eines Höhenprofils auf den Verbrauch wird nicht berücksichtigt. Auf der Homepage wird die Brennstoffzelle mit einem maximalen Wirkungsgrad von  $70\%$  beworben. Es ist anzunehmen, dass es sich dabei nicht um den System-, sondern um den Zellwirkungsgrad handelt. Das Brennstoffzellensystem soll während der halben Fahrzeit eingeschaltet sein, was für einen Betrieb im hohen Leistungsbereich spricht. Gemäß Tabelle 5-6 wird der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems während des Betriebs auf  $50\%$  festgelegt. Die Wirkungsgradkette ist in Abbildung 9-3 dargestellt.

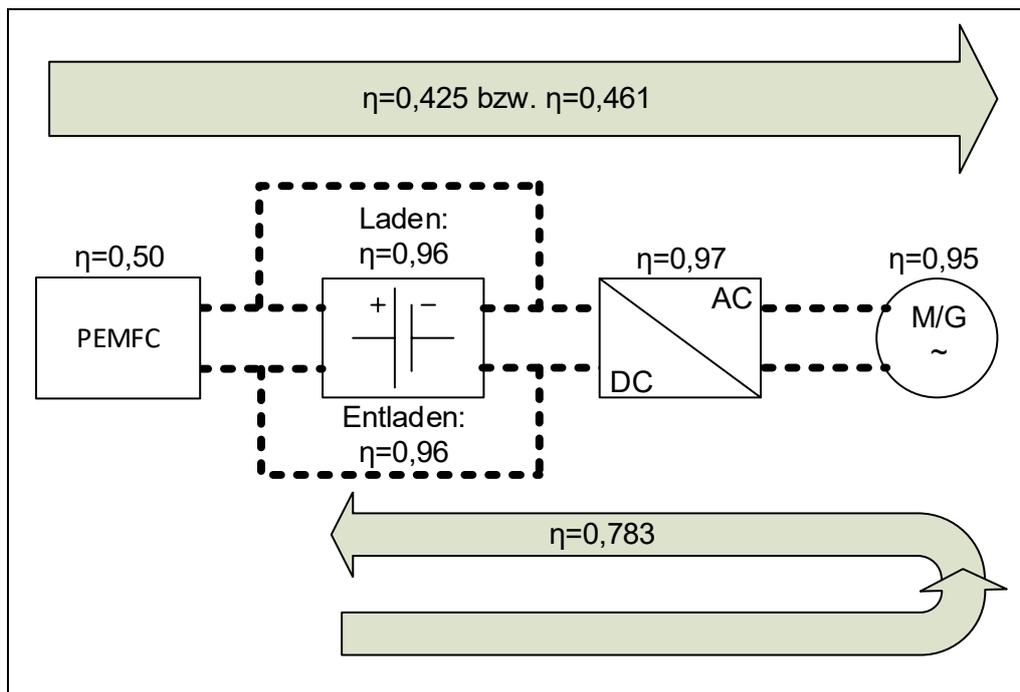


Abbildung 9-3: Wirkungsgradketten des Nikola-Antriebsstrangs mit Lithium-Ion-Batteriepaket und Brennstoffzelle

Mit einer unterstellten Energiedichte von  $160 \text{ Wh/kg}$  (vgl. Tabelle 5-4) und  $300 \text{ Wh/l}$  [RZEP10] für Lithium-Ionen-Batterien wiegt eine  $240\text{-kWh}$ -Batterie  $1500 \text{ kg}$  und benötigt  $800 \text{ l}$  Bauraum. Wird für das Brennstoffzellensystem eine Leistungsdichte von  $0,37 \text{ kW/kg}$  bzw.  $0,23 \text{ kW/l}$  angenommen [BALL11], wiegt das  $300\text{-kW}$ -Brennstoffzellensystem  $811 \text{ kg}$  und benötigt  $1304 \text{ l}$  Bauraum. Werden von  $500$  Meilen  $100$  Meilen Batteriereichweite abgezogen, muss Wasserstoff für  $400$  Meilen bzw.  $644 \text{ km}$  mitgeführt werden. Aus den Fahrwiderständen und der Wirkungsgradkette ergibt sich ein Heizwertbedarf von  $2,77 \text{ kWh/km}$ . Mit einem Heizwert für Wasserstoff von  $33,33 \text{ kWh/kg}$  folgt daraus für  $644 \text{ km}$  Reichweite eine Wasserstoffmasse von  $53,5 \text{ kg}$ . Für die Berechnung der Wasserstofftanks werden gemäß Kapitel 7.3 folgende Speichereigenschaften verwendet:  $4,8 \text{ Ma}\%$  und  $23 \text{ g}_{\text{H}_2/\text{l}}$ . Damit wiegen die Tanks inklusive Wasserstoff  $1115 \text{ kg}$  und benötigen  $2327 \text{ l}$  Bauraum. Für die Elektromotoren, die Umrichter und Kabel werden die Leistungsdichten aus dem Kapitel des Tesla Semi übernommen (vgl. Kapitel 9.1). Die Elektromotoren wiegen mit einer Spitzenleistung von  $735 \text{ kW}$   $230 \text{ kg}$  und brauchen  $67 \text{ l}$  Platz. Kabel und Umrichter wiegen  $75 \text{ kg}$  und benötigen  $50 \text{ l}$  Bauraum.

Für die Anpassung an die Anforderungen aus der Standard- bzw. Minimalkonfiguration wird festgelegt, dass im Bereich der Energiequellen das Batteriepaket unverändert bleibt und lediglich das Brennstoffzellensystem und die Wasserstofftanks adaptiert werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9-4 dargestellt.

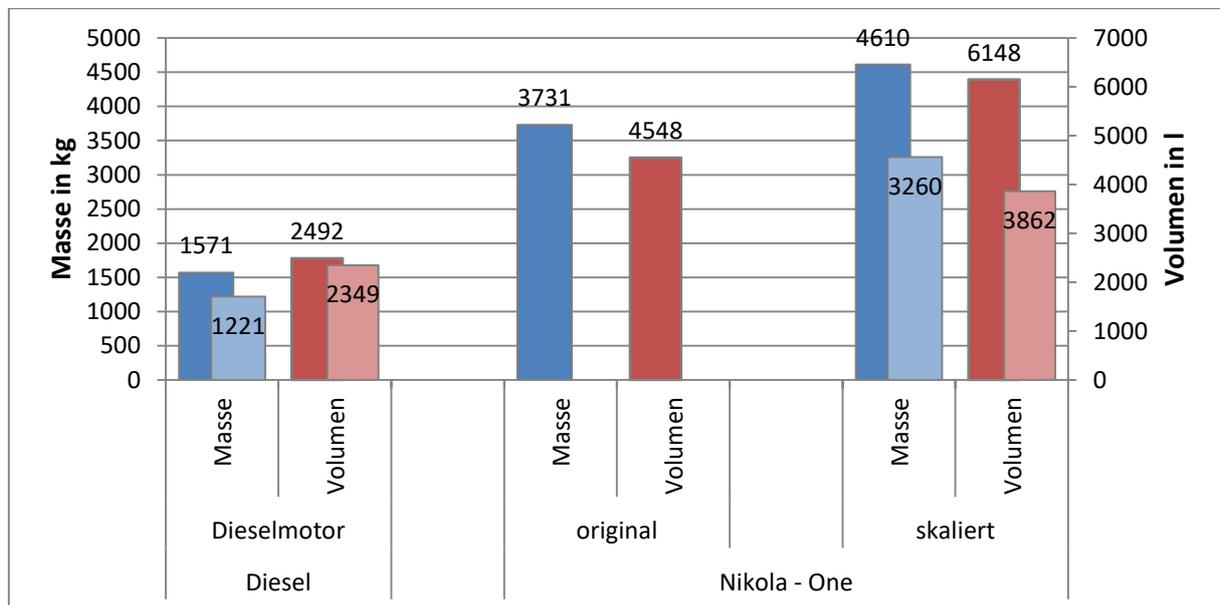


Abbildung 9-4: Vergleich zwischen konventionellem Diesel und dem Nikola-One-Konzept im Original und skaliert auf die Standard- und Minimalkonfiguration

Die Reichweitenanforderungen von Original- und Minimalkonfiguration sind nahezu identisch. Größere Abweichungen gibt es in den Leistungsanforderungen, so dass die Originalkonfiguration 14% schwerer und 18% voluminöser als die Minimalkonfiguration ist. Die Minimalkonfiguration ist wiederum 167% schwerer und 64% voluminöser als das Dieselreferenzkonzept.

### 9.3 Vergleich

Um die Modelle Tesla Semi und Nikola One miteinander und mit anderen Konzepten vergleichen zu können, muss ein Blick auf die Geschäftsmodelle der Hersteller geworfen werden. Als Idee wollen beide regenerative Energien im Verkehrssektor einsetzen.

Tesla besitzt seine Gigafactory für den Bau von Lithium-Ionen-Batterien, erschließt mit dem Nutzfahrzeugsektor ein neues Geschäftsfeld und hofft durch zusätzliche Stückzahlen auf Skaleneffekte bei der Batterieproduktion, die sich letztendlich im gesamten Unternehmen positiv auswirken. Damit ist man logischerweise auf den Einsatz von Batterien im Tesla Semi als Traktionsenergiespeicher festgelegt. Die benötigte Ladeinfrastruktur bietet Tesla inklusive Strom selbst an. Dem Kunden wird damit Sicherheit versprochen und Tesla ist in der Lage defizitäre Teilsparten mit Gewinnen aus anderen Bereichen zu stützen. Die Reichweite der Fahrzeuge kann dadurch auf die eigene installierte Ladeinfrastruktur abgestimmt werden. Die schwere Batterie geht zu Lasten der Zuladung.

Nikola konnte sein Antriebskonzept unabhängig von übergeordneten Zwängen entwickeln. So war zunächst eine Gasturbine als Range-Extender geplant. Später wurde die Gasturbine durch eine Wasserstoff-Brennstoffzelle ersetzt [SEIB17]. Im Vergleich zur Batterie sind die Wasserstofftanks leichter, aber voluminöser.

Da in Nordamerika für die Sattelzugmaschine und den Anhänger getrennte Vorschriften für die Abmaße gelten, kann der Mehrbedarf an Bauraum auf der Sattelzugmaschine gewährt werden, ohne Laderaum zu verlieren. Nikola bietet ebenfalls das Wasserstofftankstellennetz an und kann somit bei der Auslegung des Gesamtsystems das wirtschaftliche Optimum aus Reichweite und Tankstellendichte wählen.

Essentieller Bestandteil beider Geschäftsmodelle ist das Leasing einer Transportfunktion. Der Kunde zahlt eine Gebühr und kann damit das Fahrzeug, die Betankung und Serviceleistungen nutzen. Alles wird aus einer Hand angeboten, so dass das europäische „Henne-Ei-Problem“ zwischen Fahrzeugherstellern und Wasserstofftankstellen- bzw. Ladesäulenbetreibern umgangen wird.

Vergleicht man lediglich die Massen und Volumen der Konzepte, dargestellt in Abbildung 9-5, wird sich ein rein batterieelektrischer Lkw in Europa nur schwer auf der Langstrecke durchsetzen. Die Kombination aus Wasserstoff und Brennstoffzelle verspricht mehr Potenzial, wenngleich die nordamerikanische Gesetzgebung bezüglich der Abmaße etwas günstiger ist als die europäische. Die Diskrepanz zwischen dem Nikola - One und dem Wasserstoff-PEMFC-Konzept beruht auf den hohen geforderten Leistungen und der großen Batterie seitens des Nikola - One. Der Vorteil der großen Batterie ist eine geringere Einschaltzeit der Brennstoffzelle und damit verbunden eine größere Lebensdauer.

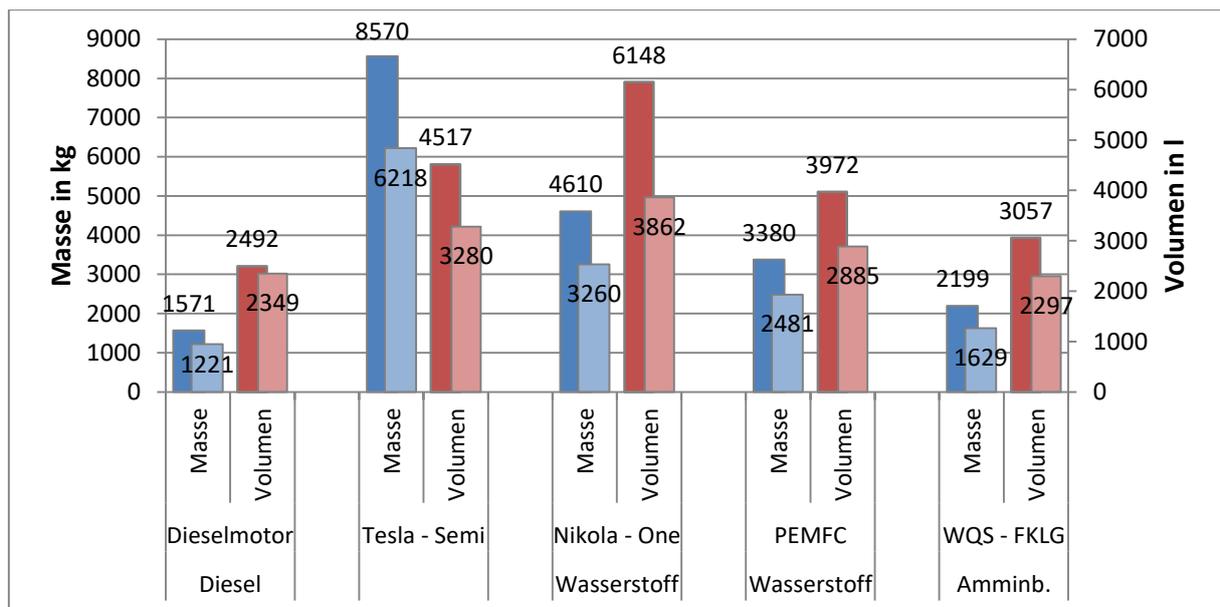


Abbildung 9-5: Vergleich ausgewählter Konzepte

Wenn sich die Brennstoffzellentechnologie als ausreichend robust erweist, kann als nächster Schritt die Speicherung des Wasserstoffs weiter verbessert werden. Allerdings wird Nikola kein Druckwasserstofftankstellennetz aufbauen, um es anschließend auf beispielsweise Amminboran umzurüsten.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von schweren Güterkraftfahrzeugen im Fernverkehr führt in Abhängigkeit von Typ, Beladungszustand, Streckenprofil und Fahrweise zu einer großen Anforderungsbandbreite an die Antriebseinheit. Mit der Festlegung auf die Daten des Mercedes-Benz Actros 1844 LS auf der Strecke Stuttgart-Hamburg-Stuttgart wird versucht, möglichst viele Anwendungsfälle abzudecken. Auf Basis dieser Daten hat sich die Bremsenergierückgewinnung grundsätzlich als probates Mittel zur Energiebedarfsreduktion hervor getan. Der Energiebedarf kann im Idealfall um 27% reduziert werden. Einschränkungen durch die Betriebsstrategie und Leistungsgrenzen sowie der Zusatzenergiebedarf durch ein erhöhtes Fahrzeuggewicht sind dabei nicht berücksichtigt.

Die Konzepterstellung zeigt, dass der Vergleich einzelner Kenngrößen wie Wirkungsgrad und Heizwert zur Auswahl einer Teillösung nicht immer ausreichend ist. Die Aussagekraft hängt stets vom resultierenden Konzept ab. So verliert beispielsweise der Heizwert seine Aussagekraft, wenn die Reaktionsprodukte an Bord zurückgehalten werden. Dies führt zu Iterationen im Konstruktionsprozess. Die Kennwerte dienen als erste Orientierung, anhand derer grobe Konzepte erstellt werden. Danach erfolgt die Prüfung, ob der Kennwert in der Lage ist, z.B. die Masse des Konzepts adäquat zu beschreiben. Ist dies nicht der Fall, wird ein neuer Kennwert erzeugt (z.B. Heizwert bezogen auf die Masse der Produkte), die Teillösungen werden neu bewertet und ausgewählt. Der Vergleich der Konzepte zeigt, dass das Speichern der Reaktionsprodukte in der Regel zu schweren Lösungen führt. Demnach sind Konzepte, die ihre harmlosen Reaktionsprodukte an die Atmosphäre abgeben können, besser für den Fahrzeugeinsatz geeignet.

Betrachtet man die nordamerikanischen Geschäftsmodelle, tritt ein weiterer Aspekt der Problematik zutage: Es bestehen bessere Erfolgsaussichten für ein Konzept, wenn Antriebsstrang und Versorgungsinfrastruktur aus einer Hand angeboten werden. Dadurch steigen Investitionsbedarf und Risiko jedoch deutlich. Außerdem verschieben sich Ziele bei der Antriebsstrangentwicklung. Fahrzeugeigenschaften konkurrieren mit den Kosten für die Ladeinfrastruktur.

Diese Untersuchung zeigt, wie aufwändig die CO<sub>2</sub>-Vermeidung an Bord der Güterkraftfahrzeuge ist. Energieträger wie Ammoniak, Amminboran oder Wasserstoff müssen zudem auch erst unter Einsatz von Energie hergestellt werden. Diese Energie muss aus regenerativen Quellen stammen, da sonst das Ziel der CO<sub>2</sub>-Vermeidung konterkariert wird. Steht diese regenerativ erzeugte Energie tatsächlich zur Verfügung, ließe sich darüber nachdenken, mit geeigneten Verfahren aus CO<sub>2</sub> und Wasser Kohlenwasserstoffe herzustellen, da diese sehr hohe Energiedichten aufweisen. Sie könnten in Dieselmotoren verbrannt werden und es entstünde ein geschlossener CO<sub>2</sub>-Kreislauf. Dadurch hätte die These von Prof. Lenz noch länger Bestand.

## 11 Abkürzungsverzeichnis

| <b>Abkürzung</b> | <b>Bedeutung</b>  |
|------------------|---|
| AB               | Amminboran  |
| AC/DC            | Gleich- bzw. Wechselrichter   |
| ADR              | <b>A</b> ccord européen relatif au transport international des marchandises <b>D</b> angereuses par <b>R</b> oute |
| AFC              | alkalische Brennstoffzelle  |
| AMP              | 2-Amino-2-methyl-1-propanol   |
| APU              | Auxiliary Power Unit  |
| BMUB             | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit  |
| BSZ              | Brennstoffzelle   |
| CA               | Cyclohexylamin  |
| CEP              | Clean Energy Partnership  |
| DA               | Diethylamin   |
| DEA              | Diethanolamin   |
| DETA             | Diethylentriamin  |
| DGA              | Diglykolamin  |
| DME              | Dimethylether   |
| DMFC             | Direkt-Methanol-Brennstoffzelle   |
| EDA              | Ethylendiamin   |
| EDG              | Energiedichtegüte   |
| EMEA             | 2-Ethylaminoethanol   |
| ESA              | Electric Swing Adsorption   |
| ETH              | Eidgenössische Technische Hochschule  |
| FCH-JU           | Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking   |
| FKLG             | Freikolbenlineargenerator   |
| grav.            | gravimetrisch   |
| HT-PEMFC         | Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle  |
| Li-Ion           | Lithiumionen  |
| M/G              | Motor bzw. Generator  |
| MCFC             | Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle   |
| MDEA             | Methyldiethanolamin   |
| MEA              | Monoethanolamin   |
| Meg              | Meglumin  |
| MeOH             | Methanol  |
| MI               | Morpholin   |
| MMEA             | 2-Methylaminoethanol  |
| NaOH             | Natriumhydroxid   |
| NaS              | Natrium-Schwefel  |
| NBH              | Natriumborhydrid  |
| NiCd             | Nickel-Cadmium  |
| NiMH             | Nickel-Metallhydrid   |
| NT-PEMFC         | Niedrigtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle   |
| PAFC             | Phosphorsäure-Brennstoffzelle   |
| PEM              | Polymerelektrolytmembran  |

|       |  |
|-------|--|
| Pip   | Piperidin  |
| PSA   | Pressure Swing Adsorption                        |
| PSI   | Paul Scherrer Institut                           |
| Py    | Pyrrolidin                                       |
| Pz    | Piperazin  |
| Reg.  | Regeneration                                     |
| SelOx | Selektive Oxidation                              |
| SOFC  | Festoxid-Brennstoffzelle                         |
| StVZO | Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung               |
| TSA   | Temperature Swing Adsorption                     |
| VDI   | Verein Deutscher Ingenieure                      |
| vol.  | volumetrisch                                     |
| WHTC  | World Harmonized Transient Cycle                 |
| WQS   | Wasserstoffquellsystem                           |
| ZEV   | Zero Emission Vehicle - emissionsfreies Fahrzeug |
| ZnO   | Zinkoxid   |

## 12 Symbolverzeichnis

| Symbol                | Bezeichnung                               | Dimension                   |
|-----------------------|---|-----------------------------|
| $\Delta m$            | relative Massenveränderung                | %                           |
| $\Delta P$            | relative Parameterveränderung             | %                           |
| $\overline{\Delta m}$ | gemittelte relative Massenveränderung     | %                           |
| FI                    | Fehlerindikator                           | -                           |
| $\dot{L}$             | Waschmittelmengenstrom                    | l/h                         |
| $\dot{G}$             | Gasmengenstrom                            | m <sup>3</sup> /h           |
| X                     | Massenbeladung in der Flüssigphase        | -                           |
| Y                     | Massenbeladung in der Gasphase            | -                           |
| $\eta$                | Wirkungsgrad                              | -                           |
| w                     | Energiedichte                             | Wh/kg oder Wh/l             |
| V                     | Volumen                                   | l, m <sup>3</sup>           |
| F                     | F-Faktor                                  | Pa <sup>0,5</sup>           |
| v                     | Strömungsgeschwindigkeit                  | m/s                         |
| $\rho$                | Dichte                                    | kg/m <sup>3</sup>           |
| J                     | Stoffmengenstromdichte                    | mol/(m <sup>2</sup> *s)     |
| A                     | Phasengrenzfläche                         | m <sup>2</sup>              |
| $\dot{n}$             | Stoffmengenstrom                          | mol/s                       |
| p                     | Partialdruck                              | bar                         |
| He                    | Henry-Koeffizient                         | Pa*m <sup>3</sup> /mol      |
| $k_{ov}$              | Reaktionsgeschwindigkeitskonstante        | 1/s                         |
| D                     | Diffusionskoeffizient                     | m <sup>2</sup> /s           |
| R                     | Rest, z.B. ein Wasserstoffatom H          | -                           |
| r                     | Massentransferrate                        | mol/(s*bar*m <sup>2</sup> ) |
| $r_{n,0}$             | Massentransferrate im unbeladenen Zustand | mol/(s*bar*m <sup>2</sup> ) |
| WL                    | Waschlösungsmenge                         | kg                          |
| d                     | Durchmesser                               | m                           |

## 13 Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1-1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren [BUND15] .....  | 1  |
| Abbildung 1-2: Treibhausgasemissionen im Transportsektor [MCKI07] .....  | 2  |
| Abbildung 1-3: Entwicklung der Güterverkehrsleistung [ICKE07] .....  | 2  |
| Abbildung 1-4: Vermeidungskostenkurve Transport [MCKI09] .....   | 3  |
| Abbildung 1-5: Vermeidungskostenkurve Gebäude [MCKI09] .....   | 4  |
| Abbildung 2-1: schematischer Antriebsstrang (eigene Darstellung) .....   | 5  |
| Abbildung 2-2: exemplarischer Antriebsstrang - Dreiachsige Sattelzugmaschine mit einer angetriebenen Achse [HOLL10] .....  | 5  |
| Abbildung 2-3: Vollastkurven aktueller Dieselmotoren im gewählten Leistungsbereich [ZEIT10] .....  | 7  |
| Abbildung 2-4: Unterschiede zwischen realem und idealem Verbrauch [HOLL08] .....   | 8  |
| Abbildung 2-5: Energiesenken im Lkw [nach HOLL08] .....  | 9  |
| Abbildung 2-6: Masse und Volumen der konventionellen Diesel-Antriebseinheit .....  | 10 |
| Abbildung 2-7: Masse und Volumen der Leichtbau-Diesel-Antriebseinheit .....  | 11 |
| Abbildung 2-8: Einflüsse der Parameter Leichtbau, Leistungsdichte des Motors und Energiebedarf am Rad auf die Masse und das Volumen der Referenz-Diesel-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration ..... | 12 |
| Abbildung 2-9: Vergleich der Massen und Volumina zwischen Standard- und Minimalkonfiguration für die Dieselantriebseinheit (eigene Berechnung) .....   | 14 |
| Abbildung 3-1: Hauptarbeitsschritte zum Erstellen der Anforderungsliste [PAHL06] .....   | 15 |
| Abbildung 3-2: Arbeitsschritte beim Konzipieren [BEIT01] .....   | 16 |
| Abbildung 3-3: Methode der Aufgliederung und Verknüpfung zur Problem- und Systemstrukturierung [VDI93] .....   | 17 |
| Abbildung 4-1: Gesamtfunktion des Dieselantriebsstrangs .....  | 18 |
| Abbildung 4-2: Funktionsstruktur ausgehend vom Energieträger .....   | 19 |
| Abbildung 4-3: Energieformen (eigene Darstellung) .....  | 20 |
| Abbildung 4-4: Funktionsstruktur ausgehend vom Rad .....   | 21 |
| Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der drei Hauptverfahren zur Kohlenstoffdioxidabscheidung in stationärer Anwendung [RADG06] .....   | 34 |
| Abbildung 5-2: Zusammenhang zwischen dem CO <sub>2</sub> -Partialdruck und der Löslichkeit von CO <sub>2</sub> in ausgewählten Waschmitteln [OHLE09] .....   | 35 |
| Abbildung 5-3: Absorptionsraten in Abhängigkeit von Der CO <sub>2</sub> -Beladung bei 40 °C und 100% CO <sub>2</sub> [KEMP12] .....  | 36 |
| Abbildung 5-4: Modellvorstellung zum Gastransport durch eine Membran [OHLR06] .....  | 37 |
| Abbildung 5-5: maximal erreichbare Sauerstoffanreicherung in Abhängigkeit von der Membranselektivität (N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> ) und dem Druckverhältnis [OHLR06] .....                             | 38 |
| Abbildung 5-6: Beladungsdiagramm für die Absorption [GMEH08] .....   | 39 |
| Abbildung 5-7: Gleichgewichtspunkte für MEA und Methanol in Abhängigkeit von Temperatur und CO <sub>2</sub> -Partialdruck [KEMP12] .....   | 40 |
| Abbildung 5-8: thermische Zersetzung von Amminboran [nach BAUM03] .....  | 44 |
| Abbildung 6-1: Schematischer Aufbau des Dampfturbinenantriebsstrangs .....   | 58 |
| Abbildung 6-2: Schematische Antriebseinheit mit Wasserstoffquellsystem .....   | 58 |
| Abbildung 6-3: strukturierte Packung Sulzer MellaPak .....   | 60 |
| Abbildung 6-4: Phasengleichgewicht und Reaktionsschema in der Flüssigphase für das System H <sub>2</sub> O-R <sub>1</sub> R <sub>2</sub> R <sub>3</sub> N-CO <sub>2</sub> [NOTZ09] .....                   | 60 |
| Abbildung 6-5: Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche und Regeneration .....   | 61 |
| Abbildung 6-6: Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche ohne Regeneration .....  | 62 |
| Abbildung 6-7: Fließschema für einen Dampfreformer mit Brennstoffzelle und CO <sub>2</sub> -Speicherung .....  | 64 |
| Abbildung 6-8: Fließschema für eine Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft mit anschließender Abgaswäsche .....   | 65 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 7-1: Schema der Energieflüsse zur Bestimmung des Energiebedarfs (vgl. Kapitel 2.3) .....  | 66 |
| Abbildung 7-2: $\eta_{\text{Kapazität}}$ in Abhängigkeit von der Puffergröße .....  | 68 |
| Abbildung 7-3: Auszug Produktdatenblatt Ammoniak 3.8 von Linde .....  | 70 |
| Abbildung 7-4: Volumen und Masse einer Ammoniak-Dieselmotor-Antriebseinheit in der<br>Standardkonfiguration .....   | 71 |
| Abbildung 7-5: Vergleich der Massen und Volumina zwischen konventionellem Diesel- und Ammoniakbetrieb<br>eines Dieselmotors .....   | 72 |
| Abbildung 7-6: Ammoniak-Ottomotor-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration .....  | 73 |
| Abbildung 7-7: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselantrieb und<br>Ammoniak im Ottomotor .....  | 74 |
| Abbildung 7-8: Wirkungsgrad des FKLG in Abhängigkeit zur Kraftstoffmenge bzw. Leistung [JOHN13] .....   | 74 |
| Abbildung 7-9: Wirkungsgradketten des Freikolbenlineargeneratorantriebs .....   | 75 |
| Abbildung 7-10: Ammoniak-Freikolbenlineargenerator-Antriebseinheit in der Standard-Konfiguration .....  | 75 |
| Abbildung 7-11: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselmotor und<br>einem Freikolbenlineargenerator im Ammoniakbetrieb .....  | 76 |
| Abbildung 7-12: Zellspannung und Wirkungsgrad über der Stromdichte der Ammoniak-SOFC [DEKK06] .....   | 77 |
| Abbildung 7-13: Wirkungsgradketten des SOFC-Ammoniak-Antriebsstrangs .....  | 77 |
| Abbildung 7-14: Ammoniak-Festoxid-Brennstoffzellen-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration .....   | 78 |
| Abbildung 7-15: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselmotor und<br>Ammoniak in einer Festoxid-Brennstoffzelle .....  | 79 |
| Abbildung 7-16: Übersicht der Ammoniakkonzepte neben der konventionellen Dieselantriebseinheit .....  | 79 |
| Abbildung 7-17: Einflüsse der Parameter Wirkungsgrad und Leistungsdichte des FKLG sowie Speicherdichte<br>des Ammoniakspeichers auf die Masse und das Volumen der Ammoniak-FKLG-Antriebseinheit in der<br>Standardkonfiguration .....       | 80 |
| Abbildung 7-18: Wasserstoffspeichertechnologien [EICH08; SCHL01] .....  | 81 |
| Abbildung 7-19: Wasserstoff-Ottomotor-Antriebseinheit in Standardkonfiguration .....  | 83 |
| Abbildung 7-20: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und einem<br>Ottomotor im Wasserstoffbetrieb .....  | 83 |
| Abbildung 7-21: Wasserstoff-Freikolbenlineargenerator-Antriebseinheit in Standardkonfiguration .....  | 84 |
| Abbildung 7-22: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselantrieb und<br>Wasserstoff im FKLG .....   | 85 |
| Abbildung 7-23: Wasserstoff-Festoxidbrennstoffzellen-Antriebseinheit in Standard-Konfiguration .....  | 86 |
| Abbildung 7-24: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselantrieb und<br>Wasserstoff in der SOFC .....   | 86 |
| Abbildung 7-25: Wirkungsgradketten des Polymerelektrolyt-Brennstoffzellenantriebs .....   | 87 |
| Abbildung 7-26: Wasserstoff-Polymerelektrolytbrennstoffzellen-Antriebseinheit in Standardkonfiguration .....  | 87 |
| Abbildung 7-27: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselantrieb und<br>Wasserstoff in der PEMFC .....  | 88 |
| Abbildung 7-28: Übersicht der Wasserstoffkonzepte neben der konventionellen Dieselantriebseinheit .....   | 89 |
| Abbildung 7-29: Einflüsse der Parameter Wirkungsgrad und Leistungsdichte des FKLG sowie Speicherdichte<br>des Wasserstoffspeichers auf die Masse und das Volumen der Wasserstoff-FKLG-Antriebseinheit in der<br>Standardkonfiguration ..... | 89 |
| Abbildung 7-30: Zustandsänderungen im h-s-Diagramm (eigene Darstellung) .....   | 91 |
| Abbildung 7-31: Wirkungsgradkette des Dampfturbinenkonzepts mit stationär ausgelegten Komponenten .....   | 93 |
| Abbildung 7-32: Silizium-Dampfturbinen-Antriebseinheit in der Standard-Konfiguration mit ortsfest<br>ausgelegten Komponenten .....  | 95 |
| Abbildung 7-33: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Dieselantriebsstrang<br>und Silizium in der Dampfturbine auf Basis ortsfest ausgelegter Komponenten .....  | 95 |
| Abbildung 7-34: Wirkungsgradkette des Dampfturbinenkonzepts mit automotiv ausgelegten Komponenten .....   | 97 |
| Abbildung 7-35: optimierte Silizium-Dampfturbinen-Antriebseinheit in der Standard-Konfiguration mit<br>Automotive-Komponenten .....   | 98 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 7-36: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und Silizium in der Dampfturbine auf Basis automotiver Komponenten .....  | 98  |
| Abbildung 7-37: Übersicht der Silizium-Dampfturbinenkonzepte neben der konventionellen Dieselantriebseinheit .....  | 99  |
| Abbildung 7-38: Einflüsse der Parameter innerer Turbinenwirkungsgrad, Leistungsdichte des Dampferzeugers sowie die Rückkühltemperatur auf die Masse und das Volumen der Silizium-Dampfturbinen-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration ..... | 100 |
| Abbildung 7-39: Seitenverhältnis der Behälterform für die Ausgangsstoffe .....  | 101 |
| Abbildung 7-40: WQS-Schema für solvolytische Amminboran-Zersetzung mit Hilfe eines Katalysators .....   | 102 |
| Abbildung 7-41: Wirkungsgradkette des Wasserstoffquellsystems auf Amminboranbasis mit einem FKLG ..   | 103 |
| Abbildung 7-42: spezifische Wasserstofffreisetzung von 30 mg Amminboran in Abhängigkeit von der Katalysatormenge [BAUM03] .....   | 103 |
| Abbildung 7-43: Amminboran-FKLG-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration .....  | 104 |
| Abbildung 7-44: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und dem Wasserstoffquellsystem auf Amminboranbasis mit angeschlossenem Freikolbenlineargenerator .....  | 105 |
| Abbildung 7-45: Prinzipieller Aufbau des Wasserstoffquellsystems auf Basis der sauren Hydrolyse von gelöstem Natriumborhydrid .....   | 106 |
| Abbildung 7-46: Natriumborhydrid-FKLG-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration mit flüssigem Kraftstoff .....   | 107 |
| Abbildung 7-47: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und dem Wasserstoffquellsystem auf Basis flüssigen Natriumborhydrids mit angeschlossenem Freikolbenlineargenerator .....                                  | 107 |
| Abbildung 7-48: Prinzipieller Aufbau des Wasserstoffquellsystems auf Basis der sauren Hydrolyse festen Natriumborhydrids .....  | 108 |
| Abbildung 7-49: Natriumborhydrid-FKLG-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration mit festem Kraftstoff .....  | 109 |
| Abbildung 7-50: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und den Wasserstoffquellsystemen auf Basis flüssigen oder festen Natriumborhydrids mit angeschlossenem Freikolbenlineargenerator .....                    | 110 |
| Abbildung 7-51: Sättigungskurve von Quarz in Natronlauge in Abhängigkeit des NaOH-Gehalts [HERB03]..  | 111 |
| Abbildung 7-52: Wirkungsgradkette des Wasserstoffquellsystems auf Siliziumbasis mit einem FKLG .....  | 112 |
| Abbildung 7-53: schematische Prozessführung zur siliziumbasierten Wasserstoffherzeugung unter Angabe der Massenströme bei Vollast.....  | 113 |
| Abbildung 7-54: Silizium-WQS-FKLG-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration.....   | 115 |
| Abbildung 7-55: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und dem Wasserstoffquellsystem auf Siliziumbasis mit angeschlossenem Freikolbenlineargenerator .....  | 116 |
| Abbildung 7-56: Übersicht der Wasserstoffquellsystemkonzepte neben der konventionellen Dieselantriebseinheit.....   | 117 |
| Abbildung 7-57: Einflüsse der Parameter Wirkungsgrad des FKLG sowie Schüttdichten des Amminborans und der Borsäure auf die Masse und das Volumen der Amminboran-FKLG-Antriebseinheit in der Standardkonfiguration.....                            | 117 |
| Abbildung 7-58: Flussdiagramm der Abgaswäsche aus der Simulation [PENT16] .....   | 120 |
| Abbildung 7-59: Diesel-Antriebseinheit mit vollständiger Gaswäsche in der Standardkonfiguration .....   | 121 |
| Abbildung 7-60: Vergleich der Massen und Volumina zwischen einem konventionellen Diesel und einer Dieselantriebseinheit mit Gaswäsche und Regeneration .....  | 122 |
| Abbildung 7-61: Diesel-Antriebseinheit mit Gaswäsche ohne Regeneration in der Standardkonfiguration ..  | 124 |
| Abbildung 7-62: Vergleich zwischen einer Dieselantriebseinheit mit Gaswäsche ohne Regeneration und einer konventionellen Dieselantriebseinheit .....  | 124 |
| Abbildung 7-63: Vergleich zwischen den Gaswäschesystemen und einer konventionellen Dieselantriebseinheit.....   | 125 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Abbildung 7-64: Einflüsse der Parameter Wirkungsgrad des Dieselmotors, Massentransferrate des Waschmittels sowie Speicherdichten des CO<sub>2</sub>-Speichers auf die Masse und das Volumen der Dieselantriebseinheit mit Abgaswäsche und onboard-Regeneration in der Standardkonfiguration ....</b> | <b>126</b> |
| <b>Abbildung 8-1: Vergleich aller bevorzugten Konzepte .....</b>  | <b>127</b> |
| <b>Abbildung 9-1: Wirkungsgradketten des Tesla-Antriebsstrangs mit Lithium-Ion-Batteriepaket .....</b>  | <b>130</b> |
| <b>Abbildung 9-2: Vergleich zwischen konventionellem Diesel und dem Tesla-Semi-Konzept im Original und skaliert auf die Standard- und Minimalkonfiguration .....</b>  | <b>131</b> |
| <b>Abbildung 9-3: Wirkungsgradketten des Nikola-Antriebsstrangs mit Lithium-Ion-Batteriepaket und Brennstoffzelle.....</b>  | <b>132</b> |
| <b>Abbildung 9-4: Vergleich zwischen konventionellem Diesel und dem Nikola-One-Konzept im Original und skaliert auf die Standard- und Minimalkonfiguration .....</b>  | <b>133</b> |
| <b>Abbildung 9-5: Vergleich ausgewählter Konzepte .....</b>   | <b>134</b> |

## 14 Tabellenverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle 2-1: Anzahl neuzugelassener Sattelzugmaschinen nach Motorisierung [KRAF15; KRAF13] .....  | 6   |
| Tabelle 2-2: Anforderungsliste .....  | 13  |
| Tabelle 2-3: Anforderungen der Standard- u. Minimalkonfiguration .....  | 14  |
| Tabelle 5-1: Lösungen für Teilfunktionen mit mechanischer Energie .....   | 22  |
| Tabelle 5-2: Eigenschaften mechanischer Energiespeicher .....   | 23  |
| Tabelle 5-3: Eigenschaften mechanischer Wandler .....   | 24  |
| Tabelle 5-4: Übersicht elektrische Energiespeicher .....  | 25  |
| Tabelle 5-5: Übersicht Wandler für elektrische Energie .....  | 26  |
| Tabelle 5-6: Brennstoffzellentypen [EICH08; PEIG10] .....   | 27  |
| Tabelle 5-7: Ordnungsschema für Wärmekraftmaschinen .....   | 28  |
| Tabelle 5-8: Übersicht thermische Energiespeicher .....   | 29  |
| Tabelle 5-9: Spitzen- und Teillastwirkungsgrade sowie Leistungsdichten der Wärmekraftmaschinen .....  | 30  |
| Tabelle 5-10: Eigenschaften möglicher Energieträger unter Normalbedingungen (20 °C, 1013 mbar) .....  | 32  |
| Tabelle 5-11: Kategorisierte Eigenschaften der Amine [KEMP12] .....   | 36  |
| Tabelle 5-12: Übersicht der Abscheideverfahren .....  | 38  |
| Tabelle 5-13: CO <sub>2</sub> -Beladungen in Abhängigkeit von der Regenerationsdauer [KEMP12] .....   | 41  |
| Tabelle 5-14: Zuordnung von Abscheideprozessen und Abscheideverfahren [FISC15] .....  | 42  |
| Tabelle 5-15: nutzbare Energiedichten der Wasserstoffquellen .....  | 49  |
| Tabelle 5-16: Kohlendioxid-Eigenschaften [FISC07] .....   | 50  |
| Tabelle 6-1: Morphologischer Kasten für hohe Energiedichtegüte .....  | 53  |
| Tabelle 6-2: gravimetrische Energiedichtegüte ausgewählter Kombinationen .....  | 54  |
| Tabelle 6-3: volumetrische Energiedichtegüte ausgewählter Kombinationen .....   | 55  |
| Tabelle 6-4: Massentransferraten und maximale Beladungen bei 30 °C, 1 mol Amin/l Waschmittel und<br>pCO <sub>2</sub> =0,14 bar [eigene Darstellung nach MAUN13] ..... | 63  |
| Tabelle 6-5: nötige Waschlösungsmasse beim Einsatz von EDA, Py und Pip bei Beladung bis zum<br>Gleichgewichtszustand .....  | 63  |
| Tabelle 7-1: Auslegung des Energiepuffers .....   | 68  |
| Tabelle 7-2: Eigenschaften von Ammoniak im Vergleich zu Benzin und Dieselkraftstoff [MAY190; ZACH13;<br>KRAM10; NIST15; JÜRG90; BEIL10] .....                         | 69  |
| Tabelle 7-3: Eigenschaften von Wasserstoff im Vergleich zu Benzin und Dieselkraftstoff .....  | 82  |
| Tabelle 7-4: Massenströme, Wirkungsgrade und Leistungen für verschiedene Prozessführungen .....   | 92  |
| Tabelle 7-5: Eigenschaften der Wasserstoffpuffer in der Standard- und Minimalkonfiguration .....  | 101 |
| Tabelle 7-6: Verhältnisse der Ausgangsstoffe für flüssiges NBH [nach KOST12] .....  | 106 |
| Tabelle 7-7: Verhältnisse der Ausgangsstoffe für festes NBH [nach KOST12] .....   | 108 |
| Tabelle 7-8: Massen und Bauräume der Wasserstoffquellsystemkomponenten .....  | 114 |
| Tabelle 7-9: Zusammensetzung der Massenströme bei Nennleistung .....  | 119 |
| Tabelle 7-10: Stoffmengenanteile in Frischluft und Abgas .....  | 119 |
| Tabelle 7-11: Massen und Bauräume der Komponenten einer Gaswäsche .....   | 121 |
| Tabelle 7-12: Massen und Volumina der Bestandteile einer Abgaswäsche ohne Regeneration .....  | 123 |
| Tabelle 8-1: Rangliste der alternativen Konzepte mit Fehlerindikatoren .....  | 127 |
| Tabelle 9-1: Technische Daten Tesla Semi [TESL18] .....   | 129 |
| Tabelle 9-2: Technische Daten Nikola One [NIKO18] .....   | 131 |
| Tabelle 16-1: Dieselreferenzeinheit mit Leichtbaukomponenten .....  | 158 |
| Tabelle 16-2: Ammoniak im Dieselmotor .....   | 158 |
| Tabelle 16-3: Ammoniak im Ottomotor .....   | 158 |
| Tabelle 16-4: Ammoniak im Freikolbenlineargenerator .....   | 158 |
| Tabelle 16-5: Ammoniak in der Festoxid-Brennstoffzelle .....  | 159 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Tabelle 16-6: Wasserstoff im Ottomotor .....</b>   | <b>159</b> |
| <b>Tabelle 16-7: Wasserstoff im Freikolbenlineargenerator .....</b>   | <b>159</b> |
| <b>Tabelle 16-8: Wasserstoff in der Festoxidbrennstoffzelle .....</b>   | <b>159</b> |
| <b>Tabelle 16-9: Wasserstoff in der Polymerelektrolytbrennstoffzelle .....</b>                                | <b>160</b> |
| <b>Tabelle 16-10: Dampfturbinenantriebseinheit aus ortsfest ausgelegten Komponenten .....</b>                 | <b>160</b> |
| <b>Tabelle 16-11: Dampfturbinenantriebseinheit aus Komponenten für den Automobilbereich .....</b>             | <b>160</b> |
| <b>Tabelle 16-12: Wasserstoffquellsystem basierend auf solvolytischer Amminboranzersetzung .....</b>          | <b>161</b> |
| <b>Tabelle 16-13: Wasserstoffquellsystem basierend auf saurer Hydrolyse von flüssigem Natriumborhydrid ..</b> | <b>161</b> |
| <b>Tabelle 16-14: Wasserstoffquellsystem basierend auf saurer Hydrolyse von festem Natriumborhydrid .....</b> | <b>161</b> |
| <b>Tabelle 16-15: Wasserstoffquellsystem basierend auf Silizium .....</b>                                     | <b>162</b> |
| <b>Tabelle 16-16: Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche und Waschmittelregeneration .....</b>                  | <b>162</b> |
| <b>Tabelle 16-17: Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche ohne Waschmittelregeneration .....</b>                 | <b>162</b> |
| <b>Tabelle 16-18: Tesla-Semi-Antriebsstrang .....</b>   | <b>163</b> |
| <b>Tabelle 16-19: Nikola-One-Antriebsstrang.....</b>  | <b>163</b> |

## 15 Literatur

[AMMI15]

Amminex Emissions Technology A/S; *AdAmmine*, 2015, <http://www.amminex.com/products/adammine.aspx>.

Abgerufen am 25.11.2015.

[AUSF08]

Ausfelder, F.; Bazzanella, A.; *Verwertung und Speicherung von CO<sub>2</sub>*, in: Dechema - Diskussionspapier, 2008.

[BALL11]

Ballard Power Systems, Inc.; *FCvelocity-HD6*, Burnaby, British Columbia, 2011.

Abgerufen am 22.01.2014.

[BALL12]

Ballard Power Systems, Inc.; *Product Portfolio*, Burnaby, British Columbia, 2012.

Abgerufen am 28.01.2014.

[BARO08]

Barote, L.; Weissbach, R.; Teodorescu, R.; Marinescu, C.; Cirstea, M.; *Stand-alone wind system with Vanadium Redox Battery energy storage*, in: *2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2008, S. 407–412.

[BART02]

Barth; Kentschke; *Druckluft als Energieträger für die Spitzenlast-Stromerzeugung*, in: TU Contact, 6, 2002, S. 17–20.

[BAUM03]

Baumann, J.; *Physikalisch-chemische Untersuchungen zur Wasserstoffabgabe von BNH-Verbindungen*, Freiberg, 23.04.2003

Dissertation, Fakultät für Chemie und Physik, Technische Universität Bergakademie Freiberg.

[BEHR15]

Behr Hella Service; *8MK 376 722-021: Artikelinformation*, 2015, <http://www.behrhellaservice.com/beh-hella-service/de/Kuehlung-5069.html>.

Abgerufen am 26.02.2015.

[BEIL10]

Beilicke, Gert; *Bautechnischer Brandschutz: Brandlastberechnung*, 1. Auflage, Leipzig. BBV, Beilicke-Brandschutz-Verl, 2010.

[BEIT01]

Beitz, Wolfgang; Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.); *Taschenbuch für den Maschinenbau*, 20. Auflage, Berlin [etc.]. Springer, 2001.

[BOGD13]

Bogdan, Niko; *Einfluss des Tankinhalts auf die Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Mittel- bis Langstrecken-Lkw*, Berlin, 01.11.2013

Bachelorarbeit, FG Kraftfahrzeuge, Fakultät Verkehrs- u. Maschinensysteme, TU Berlin.

[BRAE12]

Braess, Hans-Hermann; Seiffert, Ulrich; *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 6. Auflage, Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag, 2012.

[BRAN06]

Brandt, Hendrik; *ENTWURF, AUFBAU UND OPTIMIERUNG EINES PEM-BRENNSTOFFZELLENSYSTEMS ZUR HAUSENERGIEVERSORGUNG MIT DAMPFREFORMER*, Duisburg-Essen, 2006

Dissertation, Abteilung Maschinenbau, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen.

[BREE14]

Breeze, Paul; *Power generation technologies*. 2nd Edition, Newnes, Elsevier, 2014.

[BRET12]

Bretschneider, Peter; *Herausforderung der Integration in das Netz und Überblick über die Speichertechnologien*, Tambach-Dietharz, Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik AST, 06.10.2012, 6. Oktober 2012.

[BRUS 13a]

BRUSA Elektronik AG; *High Performance Drivetrain / Double Traction Drive*, 2013,

[http://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA\\_FL\\_EN\\_GDO.pdf](http://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA_FL_EN_GDO.pdf).

[BRUS 13b]

BRUSA Elektronik AG; *HSM1 - Hybrid Synchronous Motor 750*, 2013, [http://www.brusa.biz/fileadmin/Diverses/Download/Datenblaetter/BRUSA\\_DB\\_EN\\_HSM1\\_750V.pdf](http://www.brusa.biz/fileadmin/Diverses/Download/Datenblaetter/BRUSA_DB_EN_HSM1_750V.pdf).

Abgerufen am 06.04.2014.

[BUND13]; *Freistellungen in Zusammenhang mit der Beförderung von flüssigen Kraftstoffen*, in: , *Anlageband zum Bundesgesetzblatt Teil II Nr. 15*, 2013.

[BUND15]

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), [www.bmu.de](http://www.bmu.de); *Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren*, 2015,

[http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/entwickl\\_treibhausgasemissionen\\_sektoren\\_2014.png](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/entwickl_treibhausgasemissionen_sektoren_2014.png).

Abgerufen am 23.06.2016.

[CEP]

CEP; *Clean Energy Partnership*, <http://cleanenergypartnership.de/>.

[CLEM12]

clemens, herbert; *CoolSteam - Meilenstein 2: Integration und Inbetriebnahme der Dampf- und Adsorptionsanlage am Prüfstand*, Berlin, 13.06.2012.

Abgerufen am 26.02.2015.

[CONR13]

Conrad, Klaus-Jörg; *Grundlagen der Konstruktionslehre: Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik ; mit 107 Tabellen, zahlreichen Kenntnisfragen und Aufgabenstellungen mit Lösungen*, 6. Auflage, München. Hanser, 2013.

[DAIM13]

Daimler AG; *Der neue Actros: Technisches Portfolio 2013*, 01.02.2013.  
Abgerufen am 24.03.2014.

[DAIM16]

Daimler AG; *Mercedes-Benz: Erster vollelektrischer Lkw*, 2016, <https://www.daimler.com/produkte/lkw/mercedes-benz/urban-etruck.html>.  
Abgerufen am 21.12.2016.

[DAIM02]

DaimlerChrysler AG; *Mit Salz und Wasser unterwegs: Neues Konzept für Brennstoffzellenantriebe: Natriumborhydrid als Energiespeicher*, in: IKZ-Haustechnik, 2002, 70 ff.

[DANF07]

Danfoss A/S; *Nessie: Hochdruck-Pumpen für technisches Wasser, Typ PAH*, 2007.

[DEKK06]

Dekker, N. J. J.; Rietveld, G.; *Highly Efficient Conversion of Ammonia in Electricity by Solid Oxide Fuel Cells*, in: Journal of Fuel Cell Science and Technology, 3, 2006, S. 499.

[DEN13]

den Boer, Eelco; Aarnink, Sanne; Kleiner, Florian; Pagenkopf, Johannes; *Zero emissions trucks: An overview of state-of-the-art technologies and their potential*, Delft, 2013.  
Publication code: 13.4841.21, CE Delft

[DEVI14]

DEVILLIERS, Clemence; *HyCOMP: Enhanced Design Requirements and Testing Procedures for Composite Cylinders intended for the Safe Storage of Hydrogen*, Paris, 05.03.2014. HyCOMP dissemination workshop, 5. März 2014.

[DIMR13]

Dimroth, Frank; *Weltrekord-Solarzelle mit 44,7 Prozent Wirkungsgrad*, Freiburg, 23.09.2013.

[DOET14]

Doetsch, Christian; Burfeind, Jens; *Batterietechnologien - jenseits von Lithium und Blei*, Halle, Leopoldina, 06.02.2014. LEOPOLDINA-SYMPOSIUM „ENERGIESPEICHER - DER FEHLENDE BAUSTEIN DER ENERGIEWENDE“, 6. Februar 2014.

[DÖTS06]

Dötsch, C.; Huang, L.; *PCM Slurries als Hochleistungs-Kältespeicher / Kälteträger*, in: Fraunhofer (Hrsg.), *Statusseminar Thermische Energiespeicherung*, Freiburg, 2006, S. 181–191.

[E.ON10]

E.ON Värmekraft Sverige AB; *Öresundsverket /CHP Malmö: The steam turbine*, 2010, [www.eon.se/oresundsverket](http://www.eon.se/oresundsverket).  
Abgerufen am 27.05.2014.

[EBER06]

Ebert, Hans-Peter; *Forschungsnetzwerk LWSNet: Grundlagenaspekte in der aktuellen PCM-Forschung*, in: Fraunhofer (Hrsg.), *Statusseminar Thermische Energiespeicherung*, Freiburg, 2006.

[EICH08]

Eichseder, Helmut; Klell, Manfred; *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, in: *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*, 2008.

[EMIC16]

EMICON; ARW: *TROCKENKÜHLER - DRY COOLERS AUSFÜHRUNG MIT AXIAL - VENTILATOREN MITTELGROSSE BIS GROSSE LEISTUNGEN*, 2016,  
[http://www.emiconac.it/deu/scheda\\_prodotto\\_deu.php?gruppo=ARW](http://www.emiconac.it/deu/scheda_prodotto_deu.php?gruppo=ARW).  
Abgerufen am 14.10.2014.

[EROG13]

Erogbogbo, Folarin; Lin, Tao; Tucciarone, Phillip M.; LaJoie, Krystal M.; Lai, Larry; Patki, Gauri D.; Prasad, Paras N.; Swihart, Mark T.; *On-Demand Hydrogen Generation using Nanosilicon: Splitting Water without Light, Heat, or Electricity*, in: *Nano Letters*, 13, 2013, S. 451–456.

[ETW11]

ETW; *3.2 Das Dampfkraftwerk*, Hochschule Mannheim, Institut für Energie- und Umwelttechnik, 2011.

[FISC15]

Fischedick, Manfred; *CO<sub>2</sub>: Abtrennung, Speicherung, Nutzung: Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie*, 2015. Auflage, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2015.

[FISCO7]

Fischedick, Manfred; Esken, Andrea; Pastowski, Andreas; Schüwer, Dietmar; Supersberger, Nikolaus; Nitsch, Joachim; Viebahn, Peter; Bandi, Andreas; Zuberbühler, Ulrich; Edenhofer, Ottmar; *RECCS: strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien (RE) mit Carbon Capture and Storage (CCS)*, 2007.

[FONT04]

Fontell, E.; Kivisaari, T.; Christiansen, N.; Hansen, J.-B.; Pålsson, J.; *Conceptual study of a 250kW planar SOFC system for CHP application*, in: *Journal of Power Sources*, 131, 2004, S. 49–56.

[FRIE98]

Friebe, Peter; *ADSORPTION UND REDUKTION VON KOHLENDIOXID AN ÜBERGANGSMETALLEN*, 1998

Dissertation, Fachbereich Chemie, Freie Universität Berlin

[GEST16]

Gestis; *GESTIS-Stoffdatenbank*, 2016.

[GLOB09]

global-hydrogen-bus-platform; *HyFLEET:CUTE*, 2009, <http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/www.global-hydrogen-bus-platform.com/Technology/HydrogenInternalCombustionEngines.html>.

[GMEH08]

Gmehling, J.; *Technische Chemie*, Universität Oldenburg, 2008.

[GOLD99]

Goldstein, Jonathan; Brown, Ian; Koretz, Binyamin; *New developments in the Electric Fuel Ltd. zinc/air system*, in: *Journal of Power Sources*, 80, 1999, S. 171–179.

[GROS12]

Gross, Christopher Wolfgang; *Combustion and emissions characteristics of a compression-ignition engine using ammonia-DME mixtures*, Ames, 2012

Master Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.

[GRUB13]

Grube, Th.; *Potentiale des Strommanagements zur Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs von Pkw*, Berlin, 2013

Dissertation, Fakultät Verkehrs- u. Maschinensysteme, TU Berlin.

[GRUB06]

Grube, Th.; Menzer, R.; Can Samsun, R.; Pasel, J.; Peters, R.; *Optionen und Herausforderungen des Einsatzes von Auxiliary Power Units in mobilen Anwendungen*, in: *Innovative Fahrzeugantriebe: 9./10. November 2006, Dresden*, Düsseldorf, VDI-Verl., 2006.

[GUET06]

Guétif, Abdelkader; *KLASSIFIZIERUNG VON BATTERIEN UND SUPER-KONDENSATOREN ALS ENERGIESPEICHER*, in: Wolf-Rüdiger Canders (Hrsg.), *Jahresbericht 2006*, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen, TU Braunschweig, 2006, S. 56–65.

[GUZZ13]

Guzzella, L.; Sciarretta, Antonio; *Vehicle propulsion systems: Introduction to modeling and optimization*, 3. Auflage, Heidelberg, New York. Springer-Verlag, 2013.

[HAMP08]

Hampel; *Getriebefreie Kleindampfturbine: Wirkungsgradsteigerung bei Teillast durch variable Drehzahl*, in: VGB PowerTech 04/2008, Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften, 2008, S. 75–80.

[HATA00]

Hatami, Homan; *Hydraulische Formelsammlung*, 2000.

[HEIß11]

Heißing, Bernd; Ersoy, Metin; Gies, Stefan; *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*, 3. Auflage, Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2011.

[HEND14]

Hendricks, Barbara; *Hendricks: Beim Klimaschutz ehrgeiziger werden: Gemeinsame Pressemitteilung mit dem Umweltbundesamt*, Berlin, 16.01.2014.

[HERB03]

Herbst, Daniel; *Untersuchung der Eignung eines neuartigen Verfahrens zur Erzeugung von Wasserstoff mit Hilfe von Silizium für den Einsatz in Kraftfahrzeugen*, Karlsruhe, 2003

Dissertation, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe, 2003.

[HINS16]

Hinsenkamp; Reinhardt; Hager; *Druckluft: Störungsfreie, kostengünstige und energieeffiziente Bereitstellung*, 2016, <http://www.energie-im-unternehmen.de/downloads/druckluft.pdf>.

Abgerufen am 01.02.2017.

[HÖHL13]

Höhlein, B.; Koch, F.; *Wasserstoff - Schlüssel zur Energiewende: Beispiele aus Nordrhein-Westfalen von der Herstellung bis zur Nutzung*, Düsseldorf, 2013.

Abgerufen am 28.01.2014.

[HOLL08]

Holloh; *Technologien für einen energieeffizienten Straßenverkehr*, Berlin, Daimler, Vortrag am 20.11.2008.

[HOLL10]

Holloh; *Anforderungen und Kenngrößen des Antriebs: Der Triebstrang*, TU Berlin, WS 10/11. Vorlesung Nutzfahrzeuge, WS 10/11.

[HÜGL11]

Hügler, Thomas; *Hydrazinboran als Wasserstoffspeichermedium*, Berlin, 2011, Dissertation, Fachbereich Biologie, Chemie, Pharmazie, Freie Universität Berlin.

[HUPP15]

Huppertz, Harald; *Benzinmotor*, 2015, <http://www.kfz-tech.de/Biblio/Benzinmotor/Benzinmotor.htm>.

[HYIC07]

HyICE; *Optimisation of the Hydrogen Internal Combustion Engine*, 2007.

Abgerufen am 04.08.2014.

[ICKE07]

Ickert, Lutz; *Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050: Schlussbericht*, Basel, 31.05.2007.

Abgerufen am 12.03.2014.

[JESS18]

Jess, C.; Haensch-Petersen, L.; *Tesla-Truck: Infos, Preis und Video*, 2018, <http://www.auto-bild.de/artikel/tesla-truck-infos-preis-und-video-8902683.html>, Abgerufen am 22.06.2018

[JOHN13]

Johnson, T.; Leick, M.; *Free-Piston Electric Generator (FPEG)*, in: FY 2013 Progress Report For Advanced Combustion Engine Research and Development, Energy Efficiency and Renewable Energy Vehicle Technologies Office, Washington, D.C., 2013, S. 112–116.

[JÜR90]

Jürgen Falbe; Manfred Regitz; *Römpf-Chemie-Lexikon*, 9. Auflage, Stuttgart, New York. Thieme, 1990.

[KARL06]

Karl Hoelemann; Andrzej Gorak; *Absorption*, in: Ralf Goedecke (Hrsg.), *Fluidverfahrenstechnik: Grundlagen, Methodik, Technik, Praxis*, Weinheim, Wiley-VCH, 2006.

[KEMP12]

Kemper, Jasmin; *Kinetik und Stoffübertragung bei der reaktiven CO<sub>2</sub>-Absorption/Desorption in speziellen Amin-Blends*, 2012,

Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum.

[KNOP13]

KNOPF, BRIGITTE; CHEN, YEN-HENG HENRY; CIAN, ENRICA de; FÖRSTER, HANNAH; KANUDIA, AMIT; KARKATSOULI, IOANNA; KEPPO, ILKKA; KOLJONEN, TIINA; SCHUMACHER, KATJA; VAN VUUREN, DETLEF P.; *BEYOND 2020 — STRATEGIES AND COSTS FOR TRANSFORMING THE EUROPEAN ENERGY SYSTEM*, in: *Climate Change Economics*, 04, 2013, S. 1340001.

[KOLL85]

Koller, Rudolf; *Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen des methodischen Konstruierens*, 2. Auflage, Berlin. Springer-Verlag, 1985.

[KOST12]

Kostka, Johannes; *Wasserstoffgenerator-Systeme auf Basis chemischer Hydride zur Versorgung von PEM-Brennstoffzellen im Kleinleistungsbereich*, 2012

Dissertation, Fakultät für Chemie und Physik, Technische Universität Bergakademie Freiberg.

[KRAF13]

Kraftfahrt-Bundesamt; *Kurzbericht Breites Leistungsspektrum: Neuzulassungen von ausgewählten Nutzfahrzeugen im Jahr 2012 nach Motorleistung*.

[KRAF15]

Kraftfahrt-Bundesamt; *Fahrzeugzulassungen (FZ): Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) Jahr 2014*, 2015.

[KRAM10]

Kramer, Matthias (Hrsg.); *Integratives Umweltmanagement: Systemorientierte Zusammenhänge zwischen Politik, Recht, Management und Technik*, 1. Auflage, Wiesbaden. Gabler, 2010.

[KRÄM05]

Krämer, E.; *Dampfturbinen*, in: Karl-Heinrich Grote, J. Feldhusen, Heinrich Dubbel (Hrsg.), *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, 21. Aufl., Berlin, New York, Springer, 2005, R57-R70.

[KROC45]

Kroch, Emeric; *AMMONIA - A FUEL FOR MOTOR BUSES*, in: *Journal of the Institute of Petroleum*, London, 1945, S. 213–223.

[LANG13]

Langbein, Sven; Czechowicz, Alexander; *Konstruktionspraxis Formgedächtnistechnik: Potentiale - Auslegung - Beispiele*, Wiesbaden. Imprint: Springer Vieweg, 2013.

[LAUT05]

Lautenschläger, Karl-Heinz; Schröter, Werner; Wanninger, Andrea; *Taschenbuch der Chemie*, 20. Auflage, Frankfurt am Main. Deutsch, 2005.

[LEDJ01]

Ledjeff-Hey, Konstantin; Mahlendorf, Falko; Roes, Jürgen (Hrsg.); *Brennstoffzellen: Entwicklung, Technologie, Anwendung*, 2. Auflage, Heidelberg. C. F. Müller, 2001.

[LENZ10]

Prof. Dr. Hans-Peter Lenz; „*Wer weit fährt wird immer einen Dieselmotor haben. Und es ist auch nicht vorstellbar einen 40 Tonnen Lastzug anders anzutreiben als mit dem Diesel*“, Vortrag am 06.08.2010.

[LIEB14]

Liebl, Johannes; *Internationaler Motorenkongress 2014: Antriebstechnik im Fahrzeug*, Wiesbaden. Springer Vieweg, 2014.

[LILI14]

Lilienhof; Freundlieb; Lupczyk; Betz; Schlüter; Schröder; Seydel; *Zink-Luft-Batterie*, Poster, Fachbereich Elektrotechnik und angewandte Naturwissenschaften, Westfälische Hochschule, 2014.

[LOES14]

Loesche GmbH; *Loesche-Mühlen für feste Brennstoffe*, Düsseldorf, 2014.  
Abgerufen am 08.09.2014.

[LUED14]

Luedicke, Ralph; *Ammoniakspalter, Wasserstoffgenerator.*, 26.10.2014, <https://www.crystec.com/kllhyamd.htm>.  
Abgerufen am 27.11.2014.

[MAIE12]

Maier, W. F.; *Technische Chemie 2: Adsorption*, Universität des Saarlandes, 2012.

[MARD07]

Marder, Todd B.; *Der Ammoniak-Boran-Komplex: ein Automobiltreibstoff der Zukunft?*, in: *Angewandte Chemie*, 119, 2007, S. 8262–8264.

[MAUC09]

Mauch, W.; Mezger, T.; Staudacher, T.; *Anforderungen an elektrische Energiespeicher*, in: *Stationärer und mobiler Einsatz, FFE*, München, 2009.

[MAUN13]

Maun, A.; *Optimierung von Verfahren zur Kohlenstoffdioxid-Absorption aus Kraftwerksrauchgasen mithilfe alkalischer Carbonat-Lösungen*, 2013  
Dissertation, Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik, Universität Duisburg-Essen.

[MAYI90]

Mayinger, Franz; Stephan, Karl; Stephan, Peter; *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*, 13. Auflage, Berlin [u.a.]. Springer, 1990.

[MCKE11]

McKenna, Phil; *Strom in der Warteschleife*, 2011, <https://www.heise.de/tr/artikel/Strom-in-der-Warteschleife-1205267.html>.

[MCKI07]

McKinsey&Company; *Kosten und Potentiale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland: Sektorperspektive Transport*, 2007.

[MCKI09]

McKinsey&Company; *Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland: Eine Studie von McKinsey & Company, Inc., erstellt im Auftrag von „BDI initiativ –*

*Wirtschaft für Klimaschutz*“, 03.2009.

Abgerufen am 07.03.2014.

[MENZ04]

Menzer, R.; Forster, R.; Roeb, M.; *Wasserstoff via Silizium: Ausführungen zum Vorschlag von Norbert Auner, Frankfurt, Remscheid, 21.06.2004, 21. Juni 2004.*

[MERC11]

Mercedes-Benz; *Technische Daten: OM 501 LA, 28.07.2011.*

Abgerufen am 24.03.2014.

[METZ05]

Metz, Bert; Davidson, Ogunlade; Coninck, Heleen de; Loos, Manuela; Meyer, Leo; Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change; others; *Carbon dioxide capture and storage.*

[METZ13]

Metzger, Michael; Stimming, Ulrich; *ENERGY SYSTEMS: THE IMPORTANCE OF ENERGY STORAGE, Dresden, 03.05.2013. DPG-Frühjahrstagung, 3. Mai 2013.*

[NGUY14]

Nguyen, M.; *Solid Oxide Fuel Cell Technology for Hybrid Power Generation, 2014,*  
[https://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/Hybrid/Hybrid2Minh.PDF.](https://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/Hybrid/Hybrid2Minh.PDF)

Abgerufen am 14.08.2014.

[NIKO18]

Nikola Corporation; Nikola One, <https://nikolamotor.com/one>, 2018.

Abgerufen am 04.07.2018.

[NIST15]

NIST; *NIST Chemistry WebBook: NIST Standard Reference Database Number 69, 2015,* [http://webbook.nist.gov/chemistry/.](http://webbook.nist.gov/chemistry/)

[NORE16]

Noreikat; Wagner; *Stirlingmotor, Dampfmotor, Gasturbine und Schwungrad*, in: Stefan Pischinger, Ulrich Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 8. Aufl., Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016, S. 234–242.

[NOTZ09]

Notz, Ralf Jörg; *CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus Kraftwerksabgasen mittels Reaktivabsorption*, Berlin. Logos-Verl., erschienen 2010

Dissertation, Universität Stuttgart, 2009.

[OHLE09]

Ohle, Andrea; *CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus Gasströmen durch Absorption in Poly(methyldiglykol)amin*, Dresden, 2009

Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden.

[OHLR06]

Ohlrogge, Klaus; Ebert, Katrin (Hrsg.); *Membranen: Grundlagen, Verfahren und industrielle Anwendungen*, Weinheim. Wiley-VCH, 2006.

[PAHL06]

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*, 7. Auflage, Berlin. Springer, 2006.

[PEIG10]

Peighambardoust, S. J.; Rowshanzamir, S.; Amjadi, M.; *Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications*, in: International Journal of Hydrogen Energy, 35, 2010, S. 9349–9384.

[PENT16]

Penteado, A.; *Conceptual Study for the Complete Removal of Carbon Dioxide from Truck Engine's Exhaust Gas*, Fachgebiet Dynamik und Betrieb technischer Anlagen der TU Berlin, 2016. (unveröffentlicht)

[RADG06]

Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P.; May, F.; Knopf, S.; *VERFAHREN ZUR CO<sub>2</sub>-ABSCHIEDUNG UND -SPEICHERUNG*, 2006, <http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/>.  
Abgerufen am 10.02.2015.

[RECH12]

Rechberger, J.; *DESTA - Demonstration of 1st European SOFC Truck APU*, Brüssel, 2012,  
Vortrag, FCH JU Program Review, 28.11.2012.

[REPG03]

Repges; *Zur elektrochemischen Oxidation des Ammoniak*, 17.12.2003  
Dissertation, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, RWTH Aachen.

[RIED12]

Riedel, Erwin; Alsfasser, Ralf; *Moderne anorganische Chemie: Mit CD-ROM*, 4. Auflage, Berlin  
[u.a.]. De Gruyter, 2012.

[RIED07]

Riedel, Erwin; Janiak, Christoph; *Anorganische Chemie*, in: Anorganische Chemie, 2007.

[ROAD14]

Roads2HyCom Hydrogen and Fuel Cell Wiki; *Solid Oxide Fuel Cell*, IKA RWTH Aachen, 2014,  
[https://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Solid\\_Oxide\\_Fuel\\_Cell.html](https://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Solid_Oxide_Fuel_Cell.html).  
Abgerufen am 11.08.2014.

[RZEP10]

Rzepka, M.; *Elektrische Energiespeicher*, in: H. Bruhns (Hrsg.), *AKE Tagungsband der DPG Frühjahrstagung Bonn 2010*, 2010.

[SCHE13]

Schenke, G.; *Mechatronik: Fluidische Aktoren*, Emden Leer, 2013.

[SCHI96]

Schindler, Volker; *Kraftstoffe für morgen: eine Analyse von Zusammenhängen und Handlungsoptionen*. Springer-Verlag, 1996.

[SCHL01]

Schlapbach, Louis; Züttel, Andreas; *Hydrogen-storage materials for mobile applications*, in: Nature, 414, 2001, S. 353–358.

[SCHM06]

Schmidt, F.; *Neue Materialien und Systemkonzepte für Adsorptionswärmespeicher: Ergebnisse des BMBF-Netzwerks*, in: Fraunhofer (Hrsg.), *Statusseminar Thermische Energiespeicherung*, Freiburg, 2006, S. 259–268.

[SCHM13]

Schmied, Martin; Knörr, Wolfram; *Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258: Begriffe, Methoden, Beispiele*, in: DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband eV (Hrsg.): *Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik*, 2, 2013.

[SCHR11]

Schraven, Sebastian; Kley, Fabian; Wietschel, Martin; *Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung*, in: *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 35, 2011, S. 209–219.

[SCHU09]

Schulze, Dietmar; *Pulver und Schüttgüter: Fließeigenschaften und Handhabung*, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2009.

[SCHÜ13]

Schütz, Dipl.-Ing Markus; Doll, Dipl.-Ing Gerhard; Waltner, Dipl.-Ing Anton; Kemmler, Dipl.-Ing Roland; *Der neue 3, 0-l-V6-DI-Ottomotor mit Bi-Turbo von Mercedes-Benz*, in: *MTZ-Motortechnische Zeitschrift*, 74, 2013, S. 462–471.

[SCHW02]

Schwaigerer, Frank; Sailer, Bernd; Glaser, Jochen; Meyer, H.; *Strom eiskalt serviert: Supraleitfähigkeit*, in: *Chemie in unserer Zeit*, 36, 2002, S. 108–124.

[SEIB17]

Seibt, Torsten; *NIKOLA ONE ELECTRIC TRUCK: Wasserstoff-Lkw mit 1.000 PS.*, in: *auto motor sport*, 2017.

[SIEM16]

Siemens; *eHighway*, 2016, [www.siemens.com/presse/ehighway](http://www.siemens.com/presse/ehighway).  
Abgerufen am 21.12.2016.

[SIEM13]

Siemens AG; *Pre-designed Steam Turbines: Kompakt-Dampfturbinen für den Leistungsbereich bis 12 Megawatt*, 2013, [www.siemens.com/energy/dampfturbinen](http://www.siemens.com/energy/dampfturbinen).  
Abgerufen am 02.09.2014.

[SOER07]

Soerijanto, Hary; *Catalytic on-board hydrogen production from methanol and ammonia for mobile application*, 2007

Dissertation, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, TU Berlin.

[STAT12]

statista; *Wirkungsgrade verschiedener Stromspeicher im Jahr 2012*, 2012, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156269/umfrage/wirkungsgrade-von-ausgewaehlten-stromspeichern/>.

Abgerufen am 15.01.2017.

[STEI12]

Steinberger-Wilckens, R.; Mubbala, R.; *Study on the Integration of an SOFC system into the On-Board Electricity System of the Biogas Bus: Deliverable WP 6.4 Final Report*, Baltic Biogas Bus, 2012.

Abgerufen am 28.07.2014.

[StVZO]; *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung: StVZO*.

[TANN45]

Tanner, Rudolf; *Über die Verwendung von Ammoniak als Treibstoff*, 1945  
Promotionsarbeit, ETH Zürich.

[TERR12]

Terry Costlow; *Making rare-earth materials even more rare*, in: SAE Vehicle Electrification, 2012, S. 12–13.

[TESL18]

Tesla Motors; Tesla Semi, <https://www.tesla.com/semi>, 2018.

Abgerufen am 22.06.2018.

[THYS13]

ThyssenKrupp AG; *InTruck: Innovation on road*, 2013.

Abgerufen am 23.10.2015.

[VAN00]

van Blarigan, Peter; *Advanced internal combustion engine research*, in: DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-570-28890, 2000, S. 1–19.

[VDI93]

*Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, Berlin. Beuth Verlag, 1993.

[VÖLK06]

Völklein, Friedemann; Zetterer, Thomas; *Praxiswissen Mikrosystemtechnik: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 2. Auflage, Braunschweig [u.a.]. Vieweg, 2006.

[WABC10]

Wabco; *Druckluft-Bremsanlage: Grundlehrgang*, 2010.

Abgerufen am 24.07.2014.

[WAGN12]

Wagner, Ulrich; *Speichertechniken für die zukünftige Energieversorgung*, Stuttgart, 07.03.2012.

Energiespeicher-Symposium, 7. März 2012.

[WISS08]

Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur; *Strategien zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor*, 2008.

[WOSN13]

Wosnitza, Franz; *Elektrochemische Energiespeicher: Ein Überblick heutiger Technologien*, Aachen, 2013.

[YANG02]

Yang, S.; *Design and analysis of aluminum/air battery system for electric vehicles*, in: Journal of Power Sources, 112, 2002, S. 162–173.

[YING14]

Yingli Green Energy Holding Co. Ltd.; *PANDA 60 Cell: 40mm SERIE*, 2014.

Abgerufen am 23.06.2014.

[ZACH13]

Zacharakis-Jutz, George; *Performance characteristics of ammonia engines using direct injection strategies*, Ames, Iowa, 2013

Master Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.

[ZAMF09]

Zamfirescu, C.; Dincer, I.; *Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications*, in: Fuel Processing Technology, 90, 2009, S. 729–737.

[ZEIT10]

Zeitzen, Frank; *Vergleich: MAN TGX gewinnt Effizienz-Kategorien klar nach Punkten.*, in: Sonderdruck aus lastauto omnibus 03/2010, ETM Verlag, 2010.

## 16 Anhang

### 16.1 Massen und Volumina der Elemente

Tabelle 16-1: Dieselreferenzeinheit mit Leichtbaukomponenten

| Element (Standard) | Standard    |              | Minimal     |              |
|--------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                    | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| Mercedes OM 501 LA | 851         | 1437         | 599         | 1422         |
| Mercedes G 211     | 219         | 200          | 219         | 200          |
| Tank 390 l, Alu    | 24          | 455          | 17          | 327          |
| Kraftstoff         | 328         |              | 235         |              |
| Abgasanlage        | 150         | 400          | 150         | 400          |

Tabelle 16-2: Ammoniak im Dieselmotor

| Element     | Standard    |              | Minimal     |              |
|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|             | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| Motor       | 851         | 1437         | 599         | 1422         |
| Getriebe    | 219         | 200          | 219         | 200          |
| Abgasanlage | 150         | 400          | 150         | 400          |
| Tank        | 519         | 1828         | 377         | 1329         |
| Kraftstoff  | 729         |              | 530         |              |

Tabelle 16-3: Ammoniak im Ottomotor

| Element     | Standard    |              | Minimal     |              |
|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|             | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| Motor       | 210         | 800          | 145         | 550          |
| Getriebe    | 219         | 200          | 219         | 200          |
| Abgasanlage | 150         | 400          | 150         | 400          |
| Tank        | 603         | 2126         | 439         | 1546         |
| Kraftstoff  | 847         |              | 616         |              |

Tabelle 16-4: Ammoniak im Freikolbenlineargenerator

| Element                      | Standard    |              | Minimal     |              |
|------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                              | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| FKLG                         | 400         | 400          | 275         | 275          |
| E-Motoren                    | 267         | 90           | 183         | 62           |
| Supercap + Umrichter + Kabel | 511         | 359          | 419         | 291          |
| Tank                         | 431         | 1520         | 319         | 1124         |
| Kraftstoff                   | 606         |              | 448         |              |

Tabelle 16-5: Ammoniak in der Festoxid-Brennstoffzelle

| Element                      | Standard    |              | Minimal     |              |
|------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                              | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| SOFC                         | 1600        | 2133         | 1100        | 1467         |
| E-Motoren                    | 267         | 90           | 183         | 62           |
| Supercap + Umrichter + Kabel | 511         | 359          | 419         | 291          |
| Tank                         | 376         | 1326         | 278         | 980          |
| Kraftstoff                   | 529         |              | 390         |              |

Tabelle 16-6: Wasserstoff im Ottomotor

| Element     | Standard    |              | Minimal     |              |
|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|             | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| Motor       | 210         | 800          | 145         | 550          |
| Getriebe    | 219         | 200          | 219         | 200          |
| Abgasanlage | 150         | 400          | 150         | 400          |
| Tank        | 2291        | 2953         | 1666        | 2148         |
| Kraftstoff  | 116         |              | 84          |              |

Tabelle 16-7: Wasserstoff im Freikolbenlineargenerator

| Element                      | Standard    |              | Minimal     |              |
|------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                              | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| FKLG                         | 400         | 400          | 275         | 275          |
| E-Motoren                    | 267         | 90           | 183         | 62           |
| Supercap + Umrichter + Kabel | 511         | 359          | 419         | 291          |
| Tank                         | 1725        | 2223         | 1275        | 1643         |
| Kraftstoff                   | 87          |              | 64          |              |

Tabelle 16-8: Wasserstoff in der Festoxidbrennstoffzelle

| Element                      | Standard    |              | Minimal     |              |
|------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                              | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| SOFC                         | 1600        | 2133         | 1100        | 1467         |
| E-Motoren                    | 267         | 90           | 183         | 62           |
| Supercap + Umrichter + Kabel | 511         | 359          | 419         | 291          |
| Tankmasse                    | 1505        | 1940         | 1112        | 1434         |
| Kraftstoffmasse              | 76          |              | 56          |              |

Tabelle 16-9: Wasserstoff in der Polymerelektrolytbrennstoffzelle

| Element                      | Standard    |              | Minimal     |              |
|------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                              | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| PEMFC                        | 865         | 1391         | 595         | 957          |
| E-Motoren                    | 267         | 90           | 183         | 62           |
| Supercap + Umrichter + Kabel | 511         | 359          | 419         | 291          |
| Tank                         | 1654        | 2132         | 1222        | 1576         |
| Kraftstoff                   | 83          |              | 62          |              |

Tabelle 16-10: Dampfturbinenantriebseinheit aus ortsfest ausgelegten Komponenten

| Element                     | Standard    |              | Minimal     |              |
|-----------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                             | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| Mühle                       | 245         | 207          | 168         | 142          |
| Brenner + Dampferzeuger     | 2918        | 30565        | 2006        | 21014        |
| Dampfturbine + Nebenverbr.  | 412         | 373          | 283         | 256          |
| Generator                   | 291         | 95           | 200         | 65           |
| Rückkühler                  | 1246        | 13391        | 856         | 9206         |
| Pumpe                       | 8           | 2            | 6           | 1            |
| E-Motoren                   | 267         | 90           | 183         | 62           |
| Supercap + Umrichter+ Kabel | 511         | 359          | 419         | 291          |
| Tank                        | 20          | 253          | 16          | 328          |
| Kraftstoff                  | 584         |              | 432         |              |
| Aschebehälter               | 42          | 791          | 34          | 585          |
| Asche                       | 1249        |              | 924         |              |

Tabelle 16-11: Dampfturbinenantriebseinheit aus Komponenten für den Automobilbereich

| Element                      | Standard    |              | Minimal     |              |
|------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                              | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| Brenner + Dampferzeuger      | 1176        | 1417         | 809         | 974          |
| Dampfturbine + Nebenverbr.   | 412         | 373          | 283         | 256          |
| Generator                    | 291         | 95           | 200         | 65           |
| Rückkühler                   | 139         | 142          | 96          | 97           |
| Pumpe                        | 8           | 2            | 6           | 1            |
| E-Motoren                    | 267         | 90           | 183         | 62           |
| Supercap + Umrichter + Kabel | 511         | 359          | 419         | 291          |
| Tank                         | 37          | 651          | 30          | 481          |
| Kraftstoff                   | 903         |              | 668         |              |
| Aschebehälter                | 56          | 1222         | 46          | 904          |
| Asche                        | 1932        |              | 1428        |              |

Tabelle 16-12: Wasserstoffquellsystem basierend auf solvolytischer Amminboranzersetzung

| Element                         | Standard    |              | Minimal     |              |
|---------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                                 | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| Puffer                          | 16          | 34           | 17          | 35           |
| Pumpen + Filter + Wasservor-rat | 150         | 150          | 105         | 105          |
| Katalysator                     | 143         |              | 98          |              |
| Tank                            | 41          | 897          | 34          | 666          |
| Reaktor                         | 48          | 1127         | 39          | 835          |
| FKLG                            | 400         | 400          | 275         | 275          |
| E-Motoren                       | 267         | 90           | 183         | 90           |
| Supercap + Umrichter + Kabel    | 511         | 359          | 419         | 291          |
| Kraftstoff                      | 311         |              | 229         |              |
| Reaktionsprodukte               | 622         |              | 460         |              |

Tabelle 16-13: Wasserstoffquellsystem basierend auf saurer Hydrolyse von flüssigem Natriumborhydrid

| Element                      | Standard    |              | Minimal     |              |
|------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                              | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| Puffer                       | 15          | 33           | 17          | 35           |
| Pumpen + Filter              | 100         | 100          | 70          | 70           |
| Tank                         | 40          | 861          | 33          | 639          |
| Reaktor                      | 84          | 2554         | 68          | 1894         |
| FKLG                         | 400         | 400          | 275         | 275          |
| E-Motoren                    | 267         | 90           | 183         | 90           |
| Supercap + Umrichter + Kabel | 511         | 359          | 419         | 291          |
| Kraftstoff                   | 1828        |              | 1351        |              |
| Reaktionsprodukte            | 1737        |              | 1283        |              |

Tabelle 16-14: Wasserstoffquellsystem basierend auf saurer Hydrolyse von festem Natriumborhydrid

| Element                         | Standard    |              | Minimal     |              |
|---------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                                 | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| Puffer                          | 16          | 34           | 17          | 35           |
| Pumpen + Filter + Wasservor-rat | 150         | 150          | 105         | 105          |
| Tank                            | 41          | 903          | 34          | 671          |
| Reaktor                         | 91          | 2907         | 75          | 2156         |
| FKLG                            | 400         | 400          | 275         | 275          |
| E-Motoren                       | 267         | 90           | 183         | 90           |
| Supercap + Umrichter + Kabel    | 511         | 359          | 419         | 291          |
| Kraftstoff                      | 1470        |              | 1086        |              |
| Reaktionsprodukte               | 1990        |              | 1470        |              |

Tabelle 16-15: Wasserstoffquellsystem basierend auf Silizium

| Element                           | Standard    |              | Minimal     |              |
|-----------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                                   | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| Tank Si                           | 27          | 495          | 23          | 371          |
| Tank NaOH                         | 7           | 70           | 6           | 53           |
| Tank Wasser                       | 15          | 205          | 12          | 154          |
| Tank Quarzbrei                    | 49          | 1152         | 40          | 863          |
| Reaktor                           | 18          | 14           | 13          | 10           |
| Kristallisor                      | 53          | 29           | 36          | 20           |
| Puffer                            | 16          | 34           | 17          | 35           |
| Pumpen + Filter +<br>Wasservorrat | 150         | 150          | 105         | 105          |
| FKLG                              | 400         | 400          | 275         | 275          |
| E-Motoren                         | 267         | 90           | 183         | 90           |
| Supercap+Umrichter+Kabel          | 511         | 359          | 419         | 291          |
| Kraft-/Betriebsstoffe             | 915         |              | 682         |              |
| Quarzbrei                         | 1610        |              | 1200        |              |

Tabelle 16-16: Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche und Waschmittelregeneration

| Element               | Standard    |              | Minimal     |              |
|-----------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                       | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| Absorber              | 683         | 2210         | 493         | 1522         |
| Stripper              | 578         | 1828         | 419         | 1259         |
| Wärmetauscher         | 82          | 83           | 56          | 57           |
| Pumpen + Kompressoren | 333         | 795          | 229         | 546          |
| MEA-Lösung            | 2647        |              | 1904        |              |
| CO2-Flaschen          | 1724        | 1880         | 1254        | 1367         |
| Dieselantriebsstrang  | 1219        | 2037         | 968         | 2022         |
| Dieseltank            | 24          | 455          | 17          | 327          |
| Kraftstoff            | 328         |              | 235         |              |
| CO2                   | 1034        |              | 752         |              |

Tabelle 16-17: Dieselantriebsstrang mit Abgaswäsche ohne Waschmittelregeneration

| Element               | Standard    |              | Minimal     |              |
|-----------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                       | Masse in kg | Volumen in l | Masse in kg | Volumen in l |
| Absorber              | 683         | 2210         | 493         | 1522         |
| Wärmetauscher         | 27          | 28           | 19          | 19           |
| Pumpen + Kompressoren | 5           | 4            | 3           | 3            |
| EDA-Lösung            | 7065        |              | 5138        |              |
| EDA-Tank              | 201         | 7477         | 163         | 5453         |
| Dieselantriebsstrang  | 1219        | 2037         | 968         | 2022         |
| Dieseltank            | 24          | 455          | 17          | 327          |
| Kraftstoff            | 328         |              | 235         |              |
| CO2                   | 1034        |              | 752         |              |

Tabelle 16-18: Tesla-Semi-Antriebsstrang

| Element           | Original |      | Standard |      | Minimal |      |
|-------------------|----------|------|----------|------|---------|------|
|                   | [kg]     | [l]  | [kg]     | [l]  | [kg]    | [l]  |
| Batterie          | 6289     | 3354 | 8216     | 4382 | 5975    | 3187 |
| E-Motoren         | 181      | 53   | 267      | 78   | 183     | 53   |
| Umrichter + Kabel | 59       | 40   | 87       | 58   | 60      | 40   |

Tabelle 16-19: Nikola-One-Antriebsstrang

| Element           | Original |      | Standard |      | Minimal |      |
|-------------------|----------|------|----------|------|---------|------|
|                   | [kg]     | [l]  | [kg]     | [l]  | [kg]    | [l]  |
| PEMFC             | 811      | 1304 | 1131     | 1819 | 410     | 659  |
| Batterie          | 1500     | 800  | 1500     | 800  | 1500    | 800  |
| E-Motoren         | 230      | 67   | 267      | 78   | 183     | 53   |
| Umrichter + Kabel | 75       | 50   | 87       | 58   | 60      | 40   |
| Tank              | 1062     | 2327 | 1548     | 3393 | 1053    | 2309 |
| Kraftstoff        | 54       |      | 78       |      | 53      |      |

## 16.2 Dimensionierung der Tanks und Reaktoren

### 16.2.1 Katalytische Amminboranzersetzung für FKLG

|          |             | Masse | Stoff-<br>menge | Mol-<br>Masse | (Schütt-<br>dichte | Löslich-<br>keit | Volu-<br>men | max. ge-<br>löste Masse | Rest-<br>vol. |
|----------|-------------|-------|-----------------|---------------|--------------------|------------------|--------------|-------------------------|---------------|
|          |             | kg    | mol             | g/mol         | kg/l               | kg/l             | l            | kg                      | l             |
| Edukte   | Wasser      | 543,8 | 30179,3         | 18,0          | 1,00               |                  | 543,8        |                         | 543,8         |
|          | Amminboran  | 310,5 | 10059,8         | 30,9          | 0,37               | 0,34             | 850,8        | trocken                 | 850,8         |
| Produkte | Borsäure    | 622,0 | 10059,8         | 61,8          | 0,60               | 0,05             | 1036,7       | trocken                 | 1036,7        |
|          | Wasserstoff | 91,4  | 45269,0         | 2,0           |                    |                  |              |                         |               |

### 16.2.2 Saure Natriumborhydridzerersetzung(flüssig)

|          |                       | Masse | Stoff-<br>menge | Mol-<br>Masse | (Schütt-<br>) dichte | Lös-<br>lichkeit | Volu-<br>men | max. ge-<br>löste Masse | Rest-<br>vol. |         |
|----------|-----------------------|-------|-----------------|---------------|----------------------|------------------|--------------|-------------------------|---------------|---------|
|          |                       | kg    | mol             | g/mol         | kg/l                 | kg/l             | l            | kg                      | l             |         |
| Edukte   | Wasser                | 815,7 | 45269,0         | 18,0          | 1,00                 |                  | 815,7        |                         | 815,7         | Tank    |
|          | Natrium-<br>borhydrid | 428,2 | 11317,2         | 37,8          | 0,50                 | 0,55             |              | 448,7                   | 0,0           |         |
|          | Natronlauge           | 63,4  | 1584,4          | 40,0          |                      | 1,09             |              | 889,2                   | 0,0           |         |
|          | Ameisensäure          | 520,9 | 11317,2         | 46,0          | 1,22                 |                  | 427,0        |                         | 427,0         |         |
| Produkte | Natriumformiat        | 769,7 | 11317,2         | 68,0          | 0,64                 | 0,55             |              | 112,2                   | 1035,5        | Reaktor |
|          | Borsäure              | 699,7 | 11317,2         | 61,8          | 0,60                 | 0,05             |              | Lsg. bereits gesättigt  | 1166,2        |         |
|          | Wasser                | 203,9 | 11317,2         | 18,0          | 1,00                 |                  | 203,9        |                         | 203,9         |         |
|          | Natronlauge           | 63,4  | 1584,4          | 40,0          | 1,15                 | 1,09             |              |                         | 55,1          |         |
|          | Wasserstoff           | 91,4  | 45269,0         | 2,0           |                      |                  |              |                         |               |         |

### 16.2.3 Saure Natriumborhydridzerersetzung(fest)

|          |                       | Masse  | Stoff-<br>menge | Mol-<br>Masse | (Schütt-<br>) dichte | Löslich-<br>keit | Volu-<br>men | max.<br>gelöste<br>Masse | Rest-<br>vol. |         |
|----------|-----------------------|--------|-----------------|---------------|----------------------|------------------|--------------|--------------------------|---------------|---------|
|          | Einheit               | kg     | mol             | g/mol         | kg/l                 | kg/l             | l            | kg                       | l             |         |
| Edukte   | Wasser                | 509,8  | 28293,1         | 18,0          | 1,00                 |                  | 509,8        |                          | 509,8         |         |
|          | Natrium-<br>borhydrid | 428,2  | 11317,2         | 37,8          | 0,50                 | 0,55             |              |                          | 856,5         |         |
|          | Ameisensäure          | 1041,9 | 22634,5         | 46,0          | 1,22                 |                  | 854,0        |                          | 854,0         |         |
| Produkte | Natriumfor-<br>miat   | 769,7  | 11317,2         | 68,0          | 0,64                 | 0,55             | 1212,1       | trocken                  | 1212,1        | Reaktor |
|          | Borsäure              | 699,7  | 11317,2         | 61,8          | 0,60                 | 0,05             |              | trocken                  | 1166,2        |         |
|          | Ameisensäure          | 520,9  | 11317,2         | 46,0          | 1,22                 |                  | 427,0        |                          | 427,0         |         |
|          | Wasserstoff           | 91,4   | 45269,0         | 2,0           |                      |                  |              |                          |               |         |

### 16.2.4 Wasserstofferzeugung mittels Silizium

|        |                                   | Masse  | Stoffmenge | Mol-<br>Masse | (Schütt-<br>) dichte | Volumen |               |
|--------|-----------------------------------|--------|------------|---------------|----------------------|---------|---------------|
|        | Einheit                           | kg     | kmol       | g/mol         | kg/l                 | l       |               |
| Zulauf | Wasser im Ausgleichstank          | 187,7  | 10,4       | 18,0          | 1,0                  | 187,7   |               |
|        | Natriumhydroxid im Ausgleichstank | 77,1   | 1,9        | 40,0          | 1,3                  | 60,3    |               |
|        | 10molare Natronlauge im Reaktor   | 8,5    |            |               |                      |         |               |
|        | Silizium                          | 669,2  | 23,8       | 28,1          | 1,4                  | 478,7   |               |
|        | Kohlendioxid                      | 1,2    | 0,0        | 44,0          |                      |         |               |
| Ablauf | Natriumhydroxid im Quarzbrei      | 76,0   | 1,9        | 40,0          | 1,3                  | 59,5    | Quarzbehälter |
|        | Natriumcarbonat im Quarzbrei      | 2,8    | 0,0        | 106,0         | 1,3                  | 2,1     |               |
|        | Silizium im Quarzbrei             | 33,5   | 1,2        | 28,1          | 1,4                  | 23,9    |               |
|        | Quarz                             | 1360,3 | 22,6       | 60,1          | 1,6                  | 855,5   |               |
|        | Wasser im Quarzbrei               | 187,7  | 10,4       | 18,0          | 1,0                  | 187,7   |               |
|        | Wasserstoff                       | 91,4   | 45,3       | 2,0           |                      |         |               |
|        | Produktwasser                     | 815,7  | 45,3       | 18,0          |                      |         |               |