

HTWG Konstanz

Fakultät für Maschinenbau

Studiengang: Automotive Systems Engineering



Masterarbeit zum Thema:

Studie zur Auslegung eines CO₂-neutralen Antriebs für ein Binnenschiff

Zur Erlangung des Grades eines Master of Engineering (M. Eng.)

Vorgelegt von:

Emanuel Sailer

Erstgutachter: Prof. Dr. Peter Stein

Zweitgutachter: Dr. Kristian Peter

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Inhaltsverzeichnis..... | I |
| Abbildungsverzeichnis..... | IV |
| Tabellenverzeichnis..... | IV |
| Verwendete Formelzeichen und Symbole | VI |
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Problembeschreibung | 1 |
| 1.2. Vorgehen | 1 |
| 2. Das Schiff..... | 3 |
| 2.1. Geschichte..... | 3 |
| 2.2. Bisheriger Antrieb | 4 |
| 3. Methoden | 5 |
| 3.1. Bewertungsmatrix | 5 |
| 3.2. Morphologischer Kasten | 6 |
| 4. Brennstoffe..... | 8 |
| 4.1. Wasserstoff (H)..... | 10 |
| 4.2. Kohlenstoff (C)..... | 12 |
| 4.3. Methanol (CH ₄ O)..... | 14 |
| 4.4. Ethanol (C ₂ H ₆ O) | 16 |
| 4.5. Ameisensäure (CH ₂ O ₂)..... | 18 |
| 4.6. Propanol (C ₃ H ₈ O) | 19 |
| 4.7. Glycerin (C ₃ H ₈ O ₃)..... | 21 |
| 4.8. Synthetische Kraftstoffe | 23 |
| 4.9. Ammoniak (NH ₃) | 24 |
| 4.10. Hydrazin (N ₂ H ₄) | 26 |
| 5. Speicher | 28 |
| 5.1. Druckspeicher | 30 |
| 5.2. Kryospeicher..... | 31 |

| | | |
|--------|--|----|
| 5.3. | Kryodruckspeicher | 33 |
| 5.4. | Metallhydridspeicher | 35 |
| 5.5. | Adsorptionsspeicher..... | 36 |
| 5.6. | Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)..... | 38 |
| 5.7. | Powerpaste | 40 |
| 5.8. | Metalltank | 40 |
| 5.9. | Nickel-Mangan-Cobalt Batterie (NMC) | 41 |
| 6. | Energiewandler | 44 |
| 6.1. | Brennstoffzellen | 46 |
| 6.1.1. | Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEM) | 48 |
| 6.1.2. | Alkalische Brennstoffzelle (AFC) | 50 |
| 6.1.3. | Direkt Methanol Brennstoffzelle (DMFC) | 51 |
| 6.1.4. | Direkt Ethanol Brennstoffzelle (DEFC)..... | 52 |
| 6.1.5. | Phosphorsäure Brennstoffzelle (PAFC) | 53 |
| 6.1.6. | Schmelzkarbonat Brennstoffzelle (MCFC)..... | 54 |
| 6.1.7. | Oxidkeramik Brennstoffzelle (SOFC)..... | 55 |
| 6.2. | Verbrennungsmotor | 57 |
| 6.2.1. | Fremdzünder | 60 |
| 6.2.2. | Selbstzünder | 61 |
| 6.3. | Elektromotor | 61 |
| 7. | Kombinierte Auswertung..... | 64 |
| 7.1. | Morphologischer Kasten | 66 |
| 7.2. | Wasserstoff mit 35 MPa Druckspeicher & AFC | 67 |
| 7.3. | Wasserstoff mit 35 MPa Druckspeicher & LT-PEM | 68 |
| 7.4. | Wasserstoff mit Powerpaste & LT-PEM | 68 |
| 7.5. | Wasserstoff mit 35 MPa Druckspeicher & HT-PEM..... | 68 |
| 7.6. | Methanol mit Metalltank & HT-PEM | 68 |
| 7.7. | E-Fuel mit Metalltank & Selbstzünder | 69 |
| 7.8. | Methanol mit Metalltank & Fremdzünder | 69 |
| 7.9. | NMC-Batterie mit Elektromotor | 70 |

| | |
|--|-------|
| 8. Diskussion..... | 71 |
| 9. Fazit | 72 |
| Literaturverzeichnis | VII |
| Anhang..... | XXVI |
| A1: Eigenschaften der Brennstoffe..... | XXVI |
| A2: Eigenschaften der Speicher | XXXVI |
| A3: Eigenschaften der Energiewandler | XLVI |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Fährschiff „Meersburg ex Konstanz“ | 3 |
| Abbildung 2: Beispielbewertungsmatrix | 6 |
| Abbildung 3: Schema eines morphologischen Kastens | 7 |
| Abbildung 4: Unterschied 1-Propanol zu 2-Propanol | 19 |
| Abbildung 5: Strukturvergleich von Ethanol (links) und OME2 (rechts) | 23 |
| Abbildung 6: Betankungsroboter | 33 |
| Abbildung 7: Kartusche mit PowerPaste..... | 40 |
| Abbildung 8: Grundlegender Ablauf Brennstoffzelle | 46 |
| Abbildung 9: Brennstoffzellensystem mit notwendigen Zusatzkomponenten | 47 |
| Abbildung 10: PEM Zellreaktion | 49 |
| Abbildung 11: DMFC Zellreaktion | 51 |
| Abbildung 12: DEFC Zellreaktion | 52 |
| Abbildung 13: PAFC Zellreaktion..... | 53 |
| Abbildung 14: MCFC Zellreaktion | 54 |
| Abbildung 15: SOFC Zellreaktion | 56 |
| Abbildung 16: Gleichraum-, Gleichdruck- und Seiligerprozess | 58 |
| Abbildung 17: Reale Ladungswechselschleife | 59 |
| Abbildung 18: Mitteldruckherleitung durch Ladungswechselschleife..... | 59 |
| Abbildung 19: Grundkonfiguration eines Drehstrommotors links $\varphi = 60^\circ$ & rechts $\varphi = 120^\circ$.. | 62 |
| Abbildung 20: unterschiedliche Rotortypen..... | 63 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|--------|
| Tabelle 1: Bewertungsmatrix Brennstoffe | 9 |
| Tabelle 2: Bewertungsmatrix Speichertechnologien | 29 |
| Tabelle 3: Energiedichten ausgewählter LOHC-Trägerstoffe | 38 |
| Tabelle 4: Bewertungsmatrix Energiewandler..... | 45 |
| Tabelle 5: Bewertungsmatrix kombinierte Lösungen | 65 |
| Tabelle 6: Morphologischer Kasten zur Lösungsfindung..... | 67 |
| Tabelle 7: Eigenschaften von Wasserstoff..... | XXVI |
| Tabelle 8: Eigenschaften von Kohlenstoff..... | XXVII |
| Tabelle 9: Eigenschaften von Methanol..... | XXVIII |
| Tabelle 10: Eigenschaften von Ethanol | XXIX |
| Tabelle 11: Eigenschaften von Ameisensäure | XXX |
| Tabelle 12: Eigenschaften von Propanol | XXXI |

| | |
|---|---------|
| Tabelle 13: Eigenschaften von Glycerin | XXXII |
| Tabelle 14: Eigenschaften von synthetischem Kraftstoff..... | XXXIII |
| Tabelle 15: technische Daten von Ammoniak..... | XXXIV |
| Tabelle 16: Eigenschaften von Hydrazin..... | XXXV |
| Tabelle 17: Eigenschaften von Typ 3 Druckspeicher | XXXVI |
| Tabelle 18: Eigenschaften von Typ 4 Druckspeicher | XXXVII |
| Tabelle 19: Eigenschaften des Kryospeichers | XXXVIII |
| Tabelle 20: Eigenschaften des Kryodruckspeichers | XXXIX |
| Tabelle 21: Eigenschaften von Metallhydridspeicher | XL |
| Tabelle 22: Eigenschaften von Adsorptionspeicher | XLI |
| Tabelle 23: Eigenschaften des Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)..... | XLII |
| Tabelle 24: Eigenschaften der Powerpaste des Fraunhofer Instituts | XLIII |
| Tabelle 25: Eigenschaften des Metalltanks..... | XLIV |
| Tabelle 26: Eigenschaften der Nickel-Mangan.Cobalt-Batterie | XLV |
| Tabelle 27: Daten Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembran Brennstoffzelle | XLVI |
| Tabelle 28: Daten der Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran Brennstoffzelle | XLVII |
| Tabelle 29: technische Daten der Alkalischen Brennstoffzelle (AFC)..... | XLVIII |
| Tabelle 30: technische Daten der Direkt Methanol Brennstoffzelle (DMFC)..... | XLIX |
| Tabelle 31: technische Daten der Direkt Ethanol Brennstoffzelle (DEFC)..... | L |
| Tabelle 32: technische Daten der Phosphorsäure Brennstoffzelle (PAFC) | LI |
| Tabelle 33: technische Daten der Schmelzkarbonat Brennstoffzelle (MCFC) | LII |
| Tabelle 34: technische Daten der Oxidkeramik Brennstoffzelle (SOFC) | LIII |
| Tabelle 35: technische Daten des Fremdzünders..... | LIV |
| Tabelle 36: technische Daten des Selbstzünders | LV |
| Tabelle 37: technische Daten des Elektromotos | LVI |

Verwendete Formelzeichen und Symbole

| | |
|----------------|----------------|
| \$ | Dollar |
| % | Prozent |
| € | Euro |
| °C | Celsius |
| °K | Kelvin |
| ‰ | Promille |
| bar | Bar |
| g | Gramm |
| GJ | Gigajoule |
| h | Stunde |
| ha | Hektar |
| kg | Kilogramm |
| km | Kilometer |
| kW | Kilowatt |
| kWh | Kilowattstunde |
| l | Liter |
| m ² | Quadratmeter |
| m ³ | Kubikmeter |
| min | Minute |
| MJ | Megajoule |
| MPa | Megapascal |
| MW | Megawatt |
| MWh | Megawattstunde |
| PS | Pferdestärke |
| s | Sekunde |
| t | Tonne |
| U | Umdrehung |
| W | Watt |

1. Einleitung

Der Klimawandel ist eines der größten Probleme der Neuzeit. Aufgrund immer stärker steigenden Temperaturen¹ kommt es zu immer größeren Schäden für die gesamte Weltbevölkerung.² Die Europäische Kommission macht unter anderem die Verbrennung fossiler Energieträger beziehungsweise die dadurch erhöhten Mengen an Treibhausgasen dafür verantwortlich, dass die Temperatur immer weiter steigt.³ Aus diesen Gründen beschloss der Konstanzer Gemeinderat am 2. Mai 2019 eine Resolution zur Ausrufung des Klimanotstands.⁴

Deshalb entschied sich der Verein „Rettet die Meersburg ex Konstanz! Verein zur Erhaltung der ersten Bodensee-Automobilfähre Baujahr 1928 e.V.“ als Vorbild voranzuschreiten und den Antrieb des Schiffs mindestens CO₂ neutral auszulegen. Um dieses Vorhaben anzugehen wurde ein Team ausgewählt, bestehend aus Dr. Kristian Peter und Franz Reichenbach aus dem Verein „International Solar Energy Research Center Konstanz, ISC Konstanz e.V.“, Eric Hueber und dem 1. Vorsitzenden des auftraggebenden Vereins Andreas Ellegast. Die HTWG Konstanz ist mit Prof. Dr. Stein und dem Studenten Emanuel Sailer ebenfalls vertreten. Ihr Arbeitspaket ist nachfolgend beschrieben.

1.1. Problembeschreibung

Ziel dieser Arbeit ist, mittels Vorstudie einen geeigneten und mindestens CO₂ neutralen Antrieb für das historische Fährschiff zu finden. Dazu wird eine Übersicht über mögliche Brennstoffe, Speichertechnologien und Energiewandler und deren Eigenschaften aufgestellt. Wichtige Eigenschaften sind unter anderem die Umbau- und Betriebskosten oder die technologische Reife beziehungsweise Verfügbarkeit. Außerdem gilt zu beachten, dass die Betankung je nach Brennstoff problematisch werden könnte. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass das Fährschiff ebenfalls als Forschungsplattform dienen soll. Mithilfe dieser Vorstudie sollen im nächsten Schritt Fördermittel gesammelt werden, um das Schiff entsprechend umzubauen.

1.2. Vorgehen

Um das Problem anzugehen, wird das Gesamtsystem in die Komponenten Brennstoffe, Speichertechnologien und Energiewandler aufgeteilt und jedes Einzelsystem getrennt voneinander betrachtet und bewertet. Mittels dieser Einzelbewertungen werden die besten Einzellösungen dann mit einem morphologischen Kasten miteinander kombiniert, um die gefundenen

¹ vgl. (Statista Research Department, statista.com, 2023)

² vgl. (Statista Research Department, statista.com, 2016)

³ vgl. (Europäische Kommission, 2020)

⁴ vgl. (Konstanzer Gemeinderat, 2019)

Kombinationen darauf folgend noch einmal gesamtbetrachtend zu bewerten. Zusätzlich zu den gewählten Kombinationen wird eine batterieelektrische Lösung zum Vergleich aufgeführt.

Nach der Einleitung wird im zweiten Kapitel das historische Fährschiff vorgestellt. Hierbei wird Anfangs auf dessen allgemeine Geschichte eingegangen. Danach folgt die Beschreibung des bisherigen Antriebs.

Im nächsten Kapitel werden die angewandten Methoden erklärt. Dies ist aufgeteilt in der Bewertungsmatrix und dem morphologischen Kasten.

Das vierte Kapitel handelt von den Brennstoffen. Hier wird aus Gründen der Übersichtlichkeit schon Anfangs die Bewertungsmatrix mit den Ergebnissen gezeigt. Nachfolgend werden die einzelnen Brennstoffe im Detail erklärt und deren Eigenschaften beschrieben.

Die Speicher werden im fünften Kapitel im gleichen Stil wie die Brennstoffe bearbeitet.

Im sechsten Kapitel werden die Energiewandler beschrieben. Diese sind in Brennstoffzellen, Verbrennungsmotoren und Elektromotoren unterteilt. Innerhalb der jeweiligen Unterteilung sind die einzelnen Energiewandler im Detail beschrieben. Anfangs wird, wie in den vorangegangenen Kapitel die Bewertungsmatrix gezeigt.

Das darauf folgende Kapitel handelt von der Kombination der Einzelbestandteile. Auch hier wird anfangs die Bewertungsmatrix vorgegriffen. Danach wird der morphologische Kasten und damit die Auswahl der Lösungskombinationen beschrieben. Deren Eigenschaften werden in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben, sofern sie nicht aus den Einzelbewertungen bezogen werden.

Im vorletzten Kapitel erfolgt die Diskussion, in welcher das Ergebnis der Forschung und die ausgewählte Lösung beschrieben wird.

Abgeschlossen wird die Arbeit mit dem Fazit, in welchem eine Zusammenfassung erfolgt, die Herausforderungen beschrieben sind und ein Ausblick für weitere Forschung aufgezeigt wird.

2. Das Schiff

Das historische Fährschiff „Meersburg ex Konstanz“ abgebildet in Abbildung 1, ist die erste Binnenseefähre Europas für Kraftfahrzeuge.⁵ Seit der Restauration, in welcher auch ein neuer Antrieb eingebaut wurde, wird es für vereinzelte Ausfahrten oder Veranstaltungen genutzt. Ebenso können Getränke auf ihr verzehrt werden, während es am Hafen angelegt ist. Außerdem kann auch der ursprüngliche Antrieb besichtigt werden.



Abbildung 1: Fährschiff „Meersburg ex Konstanz“⁶

2.1. Geschichte

Die ersten Gespräche über ein Fährschiff begannen in einer Besprechung am 21. November 1924.⁷ In dieser wurde beantragt, dass geprüft werden soll, ob die Einrichtung einer Fähre zwischen Staad und Meersburg Sinn ergeben würde. Im Laufe der Jahre wurden einige Besprechungen über die Rentabilität, Sinnhaftigkeit und Realisierung des Fährschiffs vom Stadtrat gehalten. Ebenso wurden etwa 600 Kraftfahrzeugbesitzer zu ihrer Meinung befragt. Anschließend wurden Kostenvoranschläge entwickelt, staatliche Förderungen beantragt, mögliche Strecken diskutiert, bis am 9. November 1926 in einer Bürgerversammlung endgültig entschieden wurde, dass die Fähre gebaut wird. Der Auftrag zum Bau des Schiffs wurde Anfang des Jahres 1927 an die Bodan-Werft in Kressbronn erteilt. Am 7. Februar 1928 wurde der Schiffsrumpf im Rohbau zu Wasser gelassen, am 21. Juni 1928 fuhr das fertiggestellte Schiff in den Hafen Konstanz ein und nahm am 30. September 1928 schließlich den Betrieb auf.

Nach 35 Jahren im Betrieb der Stadtwerke Konstanz wurde das Fährschiff von diesem im Jahr 1963 abgestoßen.⁸ Es wurde von einem Überlinger Unternehmer aufgekauft, welcher dieses als Arbeitsschiff mit Kränen oder Bagger nutzte. Außerdem wurde es in „Lukas“ umbenannt.⁹

⁵ vgl. (Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V., kein Datum)

⁶ ebd.

⁷ vgl. (Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V., kein Datum)

⁸ vgl. (Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V., kein Datum)

⁹ vgl. (Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V., kein Datum)

Nach sieben Jahren in dieser Nutzung stellte der Unternehmer diesen Betrieb wieder ein und das Schiff lag viele Jahre unbeachtet im Überlinger Seglerhafen.

Am 7. Mai 1992 wurde das Schiff zum ersten Mal nach der Außerbetriebstellung besichtigt um zu prüfen, ob es nach einer Restaurierung als Fahrradfähre geeignet wäre.¹⁰ Im folgenden Jahr am 9. August wurde daraufhin der Verein „Rettet die Meersburg ex Konstanz!“ e.V. gegründet.¹¹ Dieser hat in mühevoller und jahrelanger Arbeit die Restaurierung vorangetrieben, bis das Schiff am 15. April 2011 wieder nach Konstanz zurück fahren konnte und am 16. Juli 2011 schließlich ihre zweite Jungfernfahrt antreten konnte. Direkt im August desselben Jahres begannen daraufhin die ersten Fahrten mit Gästen.

2.2. Bisheriger Antrieb

Das Fährschiff besitzt seit der Restaurierung zwei Antriebe. Zum einen den historischen und restaurierten ursprünglichen Antrieb aus dem Jahr 1928 und zum anderen einen neueren Antrieb.¹² Beide funktionieren unabhängig voneinander, während aber nur der neuere für den Vortrieb verantwortlich ist.

Der historische Antrieb wurde von der Firma „MWM“ im Jahr 1998 restauriert.¹³ Er besteht aus zwei Fahrmotoren, welche mit sechs Zylinder, 28,9 Liter Hubraum und im 4-Takt-Dieselmotorenverfahren 90 PS bei $500 \frac{U}{min}$ erzeugen.¹⁴ Das Gewicht des Motors liegt bei ungefähr 4 Tonnen und konnte das Schiff im Neuzustand auf circa $13 \frac{km}{h}$ beschleunigen.

Im Jahr 2002 wurden von der Firma „Deutz AG“ zwei neue Motoren des Typs „BF4M1013MC“ gestiftet.¹⁵ Diese erzeugen 160 PS bei $2300 \frac{U}{min}$ und nutzen dazu ebenfalls das 4-Takt-Dieselmotorenverfahren.¹⁶ Sie sind dabei jedoch deutlich kompakter, benötigen für diese Leistung einen Hubraum von nur 4,7 Liter und wiegen nur 580 kg. Dies liegt unter anderem daran, dass der Motor moderner ist und dass er eine Aufladung mit Ladeluftkühlung besitzt.

Der historische Antrieb sollte möglichst erhalten bleiben, während die moderneren Motoren der neuen Lösung weichen könnten, um so Platz für die benötigte Technik für den CO₂-neutralen Antrieb frei zu machen.

¹⁰ vgl. (Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V., kein Datum)

¹¹ vgl. (Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V., kein Datum)

¹² vgl. (Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V., kein Datum)

¹³ vgl. (Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V., kein Datum)

¹⁴ vgl. (Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V., kein Datum)

¹⁵ vgl. (Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V., kein Datum)

¹⁶ vgl. (Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V., kein Datum)

3. Methoden

Eine geeignete Methode zur Bewertung von Technologien oder technologischen Systemen/Objekten stellt die Nutzwertanalyse dar. Diese wird nachfolgend in Form der Bewertungsmatrix erklärt und genutzt. Um passende Kombinationen aus den Einzelsystemen bilden zu können wird in dieser Arbeit der morphologische Kasten genutzt, welcher ebenfalls nachfolgend erklärt wird.

3.1. Bewertungsmatrix

Mit der Nutzwertanalyse, welche auch als Bewertungsmatrix betitelt werden kann, können die Eigenschaften der Technologien quantifiziert und so miteinander vergleichbar gemacht werden.¹⁷ Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Kriterien unabhängig voneinander gewählt werden.

Jeder Eigenschaft wird ein Wert zugewiesen, welcher als Erfüllungsgrad (EG) bezeichnet wird.¹⁸ Je höher dieser Wert ist, desto besser wird die Eigenschaft erfüllt und desto besser ist diese Technologie in dem Bereich. Für diese Werte werden Skalen von eins bis drei, eins bis fünf und auch eins bis zehn genutzt. In dieser Arbeit wird die letztgenannte Skala genutzt, da diese eine differenziertere Einschätzung ermöglicht.

Da manche Eigenschaften für ein Projekt wichtiger sind als andere, wird zusätzlich eine Gewichtung pro Eigenschaft definiert.¹⁹ Man kann diese so auslegen, dass sämtliche Gewichtungspunkte summiert 100 ergeben oder mit dem gleichen System wie bei dem Erfüllungsgrad als Skala. In dieser Arbeit wird für die Gewichtung eine grobe Skala von eins bis drei genutzt, da eine genauere Einteilung der Gewichtung anfangs nicht möglich war.

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, steht im Normalfall der Wert der jeweiligen Eigenschaft neben dem Wert des Erfüllungsgrades. Da die Anzahl der zu vergleichenden Technologien in dieser Arbeit aber deutlich größer sind, als in dem unten stehenden Beispiel, wurde hier darauf verzichtet. Die genauen Werte sind in den Anhängen A1: Eigenschaften der Brennstoffe, A2: Eigenschaften der Speicher und A3: Eigenschaften der Energiewandler zu sehen.

¹⁷ vgl. (Haag, Schuh, Kreysa, & Schmelter, 2011) S. 327

¹⁸ vgl. ebd. S. 329

¹⁹ vgl. (Haag, Schuh, Kreysa, & Schmelter, 2011) S. 328

| Bewertungs-kriterium | Gewichtung | Strategiealternativen | | | | | |
|------------------------------|------------|-----------------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | | Technologie A | | Technologie B | | Technologie C | |
| | | EG | Wert | EG | Wert | EG | Wert |
| Technische Machbarkeit | 15 | 4 | 60 | 3 | 45 | 5 | 75 |
| Hohe Reife der Lösung | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 5 | 15 |
| Niedriges Risiko | 9 | 3 | 27 | 5 | 45 | 1 | 9 |
| Gute Technologiebeherrschung | 11 | 5 | 55 | 1 | 11 | 2 | 22 |
| Niedrige Herstellkosten | 23 | 1 | 23 | 5 | 115 | 2 | 46 |
| Niedrige Investitionskosten | 15 | 3 | 45 | 5 | 75 | 1 | 15 |
| Günstige Technologieposition | 24 | 1 | 24 | 3 | 72 | 5 | 120 |
| Summe | | | 237 | | 366 | | 302 |
| Rangliste | | | 3 | | 1 | | 2 |

Abbildung 2: Beispielbewertungsmatrix²⁰

Die Farben in den Feldern des Erfüllungsgrades in den nachfolgenden Bewertungsmatrizen stehen in dieser Arbeit für die Quellen. Grün heißt in diesem Fall, dass es mehrere wissenschaftliche Quellen und/oder Datenblätter käuflich erwerbbarer Technologien mit gleicher Aussage vorhanden sind. Gelb bedeutet, dass es nur Einzelquellen oder keine wissenschaftlich bestätigten Quellen gibt, während Rot darauf hinweist, dass die Quellen sich widersprechen, unseriös wirken oder nicht vorhanden sind und die Werte nur auf Eigenüberlegungen ohne Beweise basieren. Dadurch können die Werte und deren Erfüllungsgrad in Bezug auf die Quellen besser eingeordnet werden.

3.2. Morphologischer Kasten

Der morphologische Kasten ist eine Kreativitätstechnik, die der systematischen Analyse und Lösung von komplexen Problemen oder Aufgaben dient.²¹ Er wurde vom Schweizer Astrophysiker Fritz Zwicky entwickelt, der ihn als „Morphologische Analyse“ oder „Zwicky-Box“ bezeichnete. Diese Methode ist nützlich, um systematisch und kreativ Probleme zu lösen oder Aufgaben zu erfüllen, denn sie ermöglicht, alle relevanten Parameter und Ausprägungen zu berücksichtigen und verschiedene Lösungs- oder Konzeptvarianten zu generieren und zu bewerten.

Er besteht aus einer Tabelle, in welcher das zu lösende Problem in Teilfunktionen oder -systemen aufgegliedert wird, wobei jede einer einzelnen Zeile entspricht.²² In diesen Zeilen wird dann für jede Teilfunktion oder jedes Teilsystem mehrere unabhängige Lösungen eingetragen. Abschließend werden diese Lösungen miteinander verbunden. Es muss darauf geachtet

²⁰ ebd. S. 328

²¹ vgl. (Mareis, 2018) S. 116 ff.

²² (Gericke, Bender, Feldhusen, & Grote, 2020) S. 300f.

werden, dass die Einzellösungen miteinander kombinierbar sind. In Abbildung 3 ist das Schema des morphologischer Kasten zu sehen.

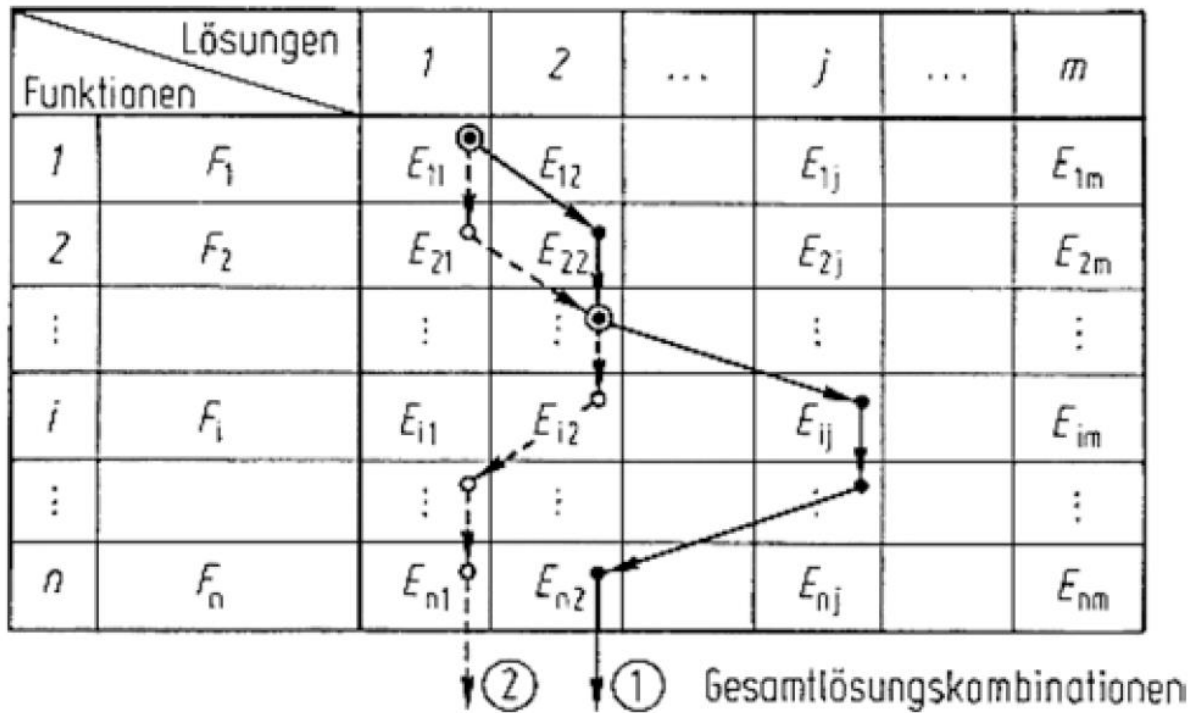


Abbildung 3: Schema eines morphologischen Kastens²³

²³ ebd. S. 300

4. Brennstoffe

Die Brennstoffe sind in alle potentiell möglichen Brennstoffe unterteilt. Dazu zählen offensichtliche Brennstoffe wie Wasserstoff, Methanol, Ethanol, synthetische Kraftstoffe und Ammoniak, sowie weniger offensichtliche Brennstoffe wie Kohlenstoff, Ameisensäure, Propanol, Glycerin und der Raketentreibstoff Hydrazin.

Jeder dieser Brennstoffe wird beschrieben und folgende Eigenschaften deklariert:

- Gravimetrische Energiedichte
- Volumetrische Energiedichte
- Gefahr für die Umwelt
- Gefahr für Personen
- Beschaffungsmöglichkeit
- Energieaufwand bei grüner Herstellung
- Flächenbedarf bei grüner Herstellung
- Kreislaufpotential
- Zulassungsfähigkeit
- Kosten bei der Beschaffung

Für jede dieser Eigenschaften ist eine Gewichtung in der Bewertungsmatrix vorgesehen. Da für das Projekt die Beschaffungsmöglichkeit, Zulassungsfähigkeit und die Kosten der Beschaffung zur Realisierung am wichtigsten sind, bekommen diese die höchste Gewichtung. Die Energiedichten und der Energieaufwand für die grüne Herstellung haben dagegen eine geringere Priorität, da im Team beschlossen wurde, dass die anderen Eigenschaften für die zukünftige Nutzung des Schiffs wichtiger sind.

Diese Eigenschaften werden im Anhang A1: Eigenschaften der Brennstoffe in Tabellenform zusammengefasst. Nicht jeder Brennstoff ist dabei für jede Speicherform oder jeden Energiewandler geeignet. Nachfolgend ist die Bewertungsmatrix in Tabelle 1 zu sehen.

| | | Brennstoffe | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------|------------------|------------------|-------------------------------|--|--|---|--|-----------------------------|---------------------------------------|---|
| | | Wasserstoff H | Kohlenstoff C | Kohlenwasserstoff | | | | | | Stickstoff Wasserstoffverbindungen | |
| Eigenschaften | Gew. | | | Methanol CH ₄ O | Ethanol C ₂ H ₆ O | Ameisensäure CH ₂ O ₂ | Propanol C ₃ H ₈ O | Glycerin C ₃ H ₈ O ₃ | synthetischer Kraftstoff | Ammoniak NH ₃ | Hydrazin N ₂ H ₄ |
| Gravimetrische Energiedichte | 1 | 10 | 8 | 4 | 6 | 1 | 7 | 2 | 9 | 5 | 3 |
| Volumetrische Energiedichte | 1 | 1 | 10 | 4 | 6 | 2 | 8 | 8 | 9 | 3 | 5 |
| Gefahr für Umwelt | 2 | 10 | 8 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 4 | 3 | 1 |
| Gefahr für Person | 2 | 9 | 10 | 5 | 7 | 3 | 6 | 8 | 2 | 4 | 1 |
| Beschaffungsmöglichkeit | 3 | 10 | 4 | 9 | 10 | 1 | 1 | 10 | 4 | 4 | 1 |
| Energieaufwand grüne Herstellung | 1 | 9 | 10 | 3 | 7 | 1 | 2 | 8 | 6 | 5 | 4 |
| Flächenbedarf | 2 | 10 | 3 | 9 | 2 | 9 | 1 | 2 | 8 | 7 | 6 |
| Kreislaufpotential | 2 | 10 | 1 | 8 | 9 | 7 | 6 | 9 | 8 | 8 | 7 |
| Zulassungsfähigkeit | 3 | 10 | 10 | 9 | 8 | 5 | 6 | 8 | 10 | 8 | 1 |
| Kosten/Beschaffung | 3 | 10 | 8 | 7 | 6 | 1 | 1 | 5 | 4 | 9 | 1 |
| Gesamt in % | | 94% | 69% | 71% | 71% | 39% | 41% | 70% | 61% | 60% | 26% |

Legende: grün = mehrere wissenschaftliche Quellen; gelb = Einzelquellen/nicht wissenschaftlich bestätigte Quellen; rot = kaum/keine wissenschaftlichen Quellen

Tabelle 1: Bewertungsmatrix Brennstoffe

4.1. Wasserstoff (H)

Wasserstoff ist das kleinste und häufigste vorhandene Element im Universum.²⁴ Es besteht im Normalfall aus einem Proton und einem Elektron. Da es so häufig vorhanden ist und dabei eine hohe Reaktionsfreudigkeit aufzeigt, kann es sehr gut als Energieträger genutzt werden.²⁵ Dabei kann sowohl die Verbrennung als auch umgekehrte Elektrolyse genutzt werden.

Im Regelfall liegt Wasserstoff auf der Erde entweder in chemischen Verbindungen gebunden oder als molekularer Wasserstoff, in welchem zwei Wasserstoffatome zu H_2 verbunden sind, vor.²⁶ Eine der bekanntesten chemischen Verbindungen ist dabei Wasser, in welchem der Wasserstoff mit Sauerstoff zu H_2O verbunden ist.

Die Herstellung von Wasserstoff kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Die häufigste Methode ist die Reformierung von Erdgas mit überhitztem Wasserdampf, bei der Wasserstoff und Kohlendioxid entstehen.²⁷ Bei diesem Prozess werden fossile Brennstoffe wie Erdgas oder Kohle, aber auch Quellen wie Methanol (CH_4O) oder Biomasse in einem mehrstufigen Verfahren der Wasserstoff entzogen.²⁸ Für den Reformierungsprozess lässt sich etwa überhitzter Wasserdampf nutzen, was als „Dampfreformierung“ bezeichnet wird. Zu den Nebenprodukten zählen Schwefeldioxid (SO_2), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide (NO_x). Diese Methode zur Herstellung wird als "grauer Wasserstoff" bezeichnet, da bei seiner Produktion Kohlendioxid (CO_2) ausgestoßen wird.

Im Gegensatz dazu steht die Herstellung von „grünem Wasserstoff“. Grüner Wasserstoff wird durch die Elektrolyse von Wasser hergestellt.²⁹ Bei diesem Prozess wird das Wasser mithilfe elektrischen Stroms in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Der benötigte Strom für die Elektrolyse kommt ausschließlich aus erneuerbaren Energien, wie Solarenergie und Windkraft. Dadurch sind der eingesetzte Strom und somit auch die Produktion von Wasserstoff CO_2 -frei. Daraus folgt, dass grüner Wasserstoff CO_2 -neutral ist. Bei der Elektrolyse werden aus zwei Wassermolekülen ($2 H_2O$) je zwei Wasserstoffmoleküle ($2 H_2$) und ein Sauerstoffmolekül (O_2) gewonnen.³⁰ Diese Form der Elektrolyse wird auch als „Wasserelektrolyse“ bezeichnet. Weitere Möglichkeiten, grünen Wasserstoff zu erzeugen, bestehen in der Vergasung und Vergärung von Biomasse sowie der Reformierung von Biogas. All diese Verfahren sind CO_2 -neutral. Die Elektrolyse erreicht einen Wirkungsgrad von mindestens 50 %.³¹ Großanlagen erreichen

²⁴ vgl. (Neugebauer, 2022) S. 1

²⁵ vgl. ebd. S. 3

²⁶ vgl. (Hamacher, 2017) S. 4

²⁷ vgl. (Matthes, et al., 2020) S. 3

²⁸ vgl. (Klell, Eichseder, & Trattner, 2018) S. 91 f.

²⁹ vgl. (Matthes, et al., 2020) S. 3

³⁰ vgl. (Klell, Eichseder, & Trattner, 2018) S. 75

³¹ vgl. ebd. S. 80 f.

dabei die höchsten Wirkungsgrade bis zu 85 %. Unter Einbezug der Energiedichte folgt daraus, dass der Energiebedarf zwischen $18 \frac{MJ}{kg}$ und $60 \frac{MJ}{kg}$ liegt. Der Flächenbedarf für den Elektrolyseur liegt bei einer 5 MW Anlage bei circa 1000 m² und bei einer 100 MW Anlage ungefähr 6300 m².³² Dabei ist jedoch nicht der Flächenbedarf zur Erzeugung der erneuerbaren Energien mit eingerechnet.

Bei „grünem Wasserstoff“ ist der Preis aufgrund der erneuerbaren Energien stark abhängig von den Wetterbedingungen.³³ Darum schwankt dieser zwischen $-1,6 \frac{€}{GJ}$ und $180,6 \frac{€}{GJ}$. Im besten Fall erwirtschaftet man einen Gewinn bei der Abnahme. Grauer Wasserstoff ist weniger schwankungsbehaftet und liegt zwischen $13,33 \frac{€}{GJ}$ und $45,83 \frac{€}{GJ}$. An Tankstellen für Kraftfahrzeuge liegt der Preis zwischen $107,08 \frac{€}{GJ}$ bei 350 bar und $115,42 \frac{€}{GJ}$ bei 700 bar Systemen.³⁴ Jedoch sind die 70 MPa Wasserstoff-Tankstellen deutlich teurer und mit 163 Standorten häufiger vertreten als die 35 MPa Tankstellen. Der Preisunterschied ist mit der Investition in die Infrastruktur deren Wartung und Betriebskosten sowie der Gewinnabsicht der Betreiber zu erklären.

Reiner Wasserstoff hat eine hervorragende gravimetrische Energiedichte von $120 \frac{MJ}{kg}$.³⁵ Da es aber zeitgleich eine äußerst geringe Dichte von nur $0,09 \frac{g}{l}$ bei Normaltemperatur und -druck hat, ist die volumetrische Energiedichte mit $0,0108 \frac{MJ}{l}$ sehr gering. Daraus folgt, dass der Wasserstoff entweder unter hohem Druck, niedrigen Temperaturen oder gebunden in Trägermedien gespeichert werden sollte, damit der Speicher nicht unnötig groß werden muss.

Ein Vorteil von Wasserstoff ist dessen geringe Gefahr für die Umwelt, da es nicht Wasser gefährdend, radioaktiv, ätzend, giftig, fruchtschädigend oder krebserregend ist.³⁶ Es bildet ein explosives Gemisch mit Luft zwischen 4 % und 75,6 Vol.-% Wasserstoff in der Luft.³⁷ Die Zündenergie gilt mit 0,02 mJ als niedrig. Außerdem ist die Flamme des Gemisches durchsichtig und kaum zu sehen. Darum muss bei einem Wasserstoffbetrieb eine ausgeklügelte Sicherheitstechnik bedacht werden. Aufgrund bereits vorhandener Technik sowohl im Personenkraftfahrzeug und Nutzfahrzeug Bereich als auch im Schiffsverkehr ist davon

³² vgl. (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR); Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST); Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE; KBB Underground Technologies GmbH, 2014) S. 36

³³ vgl. (Wencker, 2022)

³⁴ vgl. (H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, 2023)

³⁵ vgl. (Kurzweil & Dietlmeier, 2018) S. 483 f.

³⁶ vgl. (Rosen, 2017) S. 9

³⁷ vgl. (Kurzweil & Dietlmeier, 2018) S. 485

auszugehen, dass eine Zulassung zwar möglicherweise länger und aufwändiger als bei konventionellen Brennstoffen sein wird, jedoch keine besondere Herausforderung sein sollte.

Aufgrund vorhandener Technik im Fahrzeugbereich und auch schon vorhandenem Tankstellennetz ist die Beschaffung ebenfalls keine große Herausforderung. Eine eigene Tankstelle für das Schiff ist die technisch ideale Umsetzung, ist ökonomisch jedoch kaum zu stemmen. Eine weitere Möglichkeit wäre mit einem Elektrolyseur und einer erneuerbaren Energiequelle grünen Wasserstoff selbst herzustellen. Dies würde jedoch eine noch höhere Investition benötigen, da hierbei zusätzlich die Tankstellentechnik benötigt wird. Die wirtschaftlichste Lösung ist der Einsatz mobiler Wasserstofftankstellen. Hierbei wird ein LKW-Anhänger mit Tanktechnik und Wasserstoff zum Einsatzort transportiert und aus diesem getankt.³⁸ Zum Auffüllen wird dieser wieder abtransportiert. Dieses Tankverfahren benötigt keine Investitionskosten und keinen gesonderten Platz.

4.2. Kohlenstoff (C)

Kohlenstoff ist ein chemisches Element, welches durch das Elementsymbol C dargestellt wird. Ursprünglich entsteht es im Inneren von Sternen und wird durch Supernovae im All verteilt.³⁹ Auf der Erde wird es durch Erdöl, Erdgas oder Kohle gewonnen, indem es unter Hitzeeinfluss zersetzt wird.⁴⁰ Der Großteil des Kohlenstoffs wird dabei aus Erdöl gewonnen. Dieses entstand aus dem Abbau organischer Substanzen aus maritimen Quellen.⁴¹ Es tritt normalerweise in sekundären Lagerstätten auf und wird dort von porösem Gestein gespeichert. Die ölhaltige Schicht ist üblicherweise nach oben hin von undurchlässigen Gesteinsschichten begrenzt und nach unten hin oft von Salzwasser umgeben, das durch das Gestein in Verbindung mit dem Erdöl steht. Oberhalb des Erdöls befindet sich häufig auch eine Gasblase. Kohlenstoff ist nicht giftig und wassergefährdend.⁴² Eine Explosionsgefahr besteht nur wenn es als Pulver vorliegt, in der Luft aufgewirbelt wird und eine Zündquelle vorhanden ist (Staubexplosion). Die gravimetrische Energiedichte liegt bei $32,8 \frac{MJ}{kg}$ und die volumetrische Energiedichte bei $74,2 \frac{MJ}{l}$.⁴³

Im Gegensatz zur herkömmlichen Kohlenstoffherstellung, die Millionen von Jahren dauert, kann grüner Kohlenstoff in einem viel kürzeren Zeitraum hergestellt werden. Dabei wird dieser mittels Biomasse hergestellt.⁴⁴ Dazu wird diese torrefiziert, also thermisch ohne Luftzufuhr behandelt. Dies ähnelt einer milden Pyrolyse und schließt sich einem Trocknungsschritt an.

³⁸ vgl. (Brodüffel, 2023)

³⁹ vgl. (Börner & Zeidler, 2022) S. 1

⁴⁰ vgl. (Arndt, et al., 2007) S. 521

⁴¹ vgl. (Latscha, Kazmaier, & Klein, 2016) S. 509

⁴² vgl. (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), kein Datum)

⁴³ vgl. (Auner, 2004) S. 4

⁴⁴ vgl. (Fraunhofer IGB, 2023)

Dadurch verdampft das in der Biomasse gebundene Wasser. Die so entstandene „Biokohle“ kann dann wie herkömmliche Kohle durch Hitzezufuhr in Kohlenstoff umgewandelt werden. Laut der Firma EnBW, welche zusammen mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ein ähnliches Verfahren zur Kohleherstellung aus Biomasse entwickelte, wird für 0,4 kg Kohle 1 kg Biomasse benötigt.⁴⁵ Dadurch ergibt sich bei Nutzung von Weizen für die Biomasse, dass für 3 t Kohle 1 ha Fläche benötigt wird.⁴⁶ Bei der Anpflanzung des Weizens entsteht ein Energiebedarf von $3,5 \frac{MJ}{kg}$. Wenn man annimmt, dass die 0,6 kg Unterschied von Biomasse zu Kohle ausschließlich Wasser ist, besteht bei der Umwandlung durch die Torrefizierung ein Energiebedarf zwischen $1,62 \frac{MJ}{kg}$ und $1,94 \frac{MJ}{kg}$.⁴⁷ Wenn man die Umwandlungsverluste des letzten Prozessschrittes um aus der Kohle den Kohlenstoff zu extrahieren vernachlässigt, liegt der Energiebedarf zwischen $5,12 \frac{MJ}{kg}$ und $5,44 \frac{MJ}{kg}$. Die Kosten für grüne Kohle (Pflanzenkohle) liegt bei $400 \frac{€}{t}$ bis $500 \frac{€}{t}$.⁴⁸ Da diese Pflanzenkohle kein reiner Kohlenstoff ist, ist deren Energiedichte niedriger und entspricht $30 \frac{MJ}{kg}$.⁴⁹ Umgerechnet liegen die Kosten dementsprechend zwischen $60 \frac{MJ}{€}$ bis $75 \frac{MJ}{€}$.

Ein Einsatz in Verbrennungsmotoren ist mit reinem Kohlenstoff oder Kohle nicht möglich, da es nur in einer Staubexplosion umsetzen würde, was technisch in einem Verbrennungsmotor nicht produzierbar wäre.

Bei Brennstoffzellen wäre der Betrieb von regulären Wasserstoffbrennstoffzellen mittels Dampfreformierung der Kohle möglich.⁵⁰ Dazu erfolgt eine partielle Verbrennung der Kohle beziehungsweise des Koks gefolgt von einer exothermen Bildung von Wassergas. Dadurch entsteht Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂), welches anschließend in einer beliebigen Brennstoffzelle zu Energie umgewandelt wird.

Eine weitere Möglichkeit ist die direkte Nutzung von Kohlenstoff in einer Brennstoffzelle.⁵¹ Der theoretische Wirkungsgrad läge bei dieser Art der Brennstoffzelle bei 80 % und wäre dementsprechend sehr hoch.⁵² Die Technik befindet sich jedoch noch immer in der Forschung. Unter anderem löst sich der Kohlenstoff über die Zeit in der Alkalischmelze auf und die so erzeugte

⁴⁵ vgl. (EnBW, kein Datum)

⁴⁶ vgl. (Biedermann, 2009) S. 56

⁴⁷ vgl. (Fraunhofer IGB) S. 6

⁴⁸ vgl. (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2023)

⁴⁹ vgl. (Liebeck, 2014) S. 5

⁵⁰ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 237

⁵¹ vgl. (Lehmann & Lushtinetz, 2014) S. 26

⁵² vgl. (Cooper & Selman, 2009)

Asche verunreinigt den Elektrolyten.⁵³ Außerdem ist die beständige Zufuhr des Kohlenstoffs nicht einfach handzuhaben.

4.3. Methanol (CH₄O)

Methanol, auch bekannt als Methylalkohol, ist der einfachste organische Alkohol und eine wasseranziehende, farblose, brennbare Flüssigkeit.⁵⁴ Es hat eine molare Masse von $32,04 \frac{g}{mol}$ und eine Dichte von $0,7869 \frac{g}{cm^3}$. Methanol siedet bei $65 \text{ }^\circ C$ und ist polar. Dabei hat Methanol eine gravimetrische Energiedichte von $19,7 \frac{MJ}{kg}$ und eine volumetrische Energiedichte von $15,6 \frac{MJ}{l}$. Es löst sich leicht in Wasser und Ether, aber schlecht in Fetten und Ölen.⁵⁵ Methanol ist stark toxisch für Organismen und gilt als deutlich wassergefährdend.

Die derzeit vorwiegende Herstellung von Methanol erfolgt durch ein großtechnisches Verfahren, das in mehreren Varianten zur Herstellung von Methanol aus Synthesegas durchgeführt wird.⁵⁶ Dem Chemiker Matthias Pier gelang 1923 die großtechnische Herstellung von Methanol aus Synthesegas im Hochdruckverfahren an Zinkoxid-Chromoxid-Katalysatoren. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde Methanol nur durch trockene Destillation von Holz gewonnen. Methanol wird in einer Gleichgewichtsreaktion aus Synthesegas in einem Reaktor hergestellt. Ausgangsstoffe sind Synthesegas (aus Erdöl, Erdgas oder Kohle) mit Kohlenstoffmonooxid und Wasserstoff. Das Produkt der Reaktion ist Methanol.

Grünes Methanol kann aus biogenen Rohstoffen oder aus der Luft entnommenem Kohlendioxid (CO₂) zusammen mit grünem Wasserstoff hergestellt werden.⁵⁷ Für die umweltfreundliche Technik zur Methanol-Herstellung benötigt man neben grünem Strom auch CO₂ und Wasser. Aus dem Wasser wird per Elektrolyse und mithilfe des Stroms Wasserstoff erzeugt, der anschließend mit CO₂ in Methanol umgesetzt wird. Dabei wird pro Tonne Methanol 1,38 Tonnen CO₂, 0,19 Tonnen Wasserstoff und 36 – 40 GJ an Elektrizität benötigt. Das meiste dieser elektrischen Energie wird für die Elektrolyse zur Wasserstoffherstellung benötigt. Am Beispiel einer Demonstrationsanlage der Climesworks AG kann abgeleitet werden, dass sich der Energieaufwand zur Abtrennung von CO₂ aus der Umgebungsluft zwischen 6 und $8 \frac{MJ}{kg_{CO_2}}$ beläuft.⁵⁸ Dabei wird die meiste Energie mit $5,4 - 7,2 \frac{MJ}{kg_{CO_2}}$ in Form von Wärme benötigt und der Rest in Form von elektrischer Energie. Wie vom Forschungsverbund

⁵³ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 10

⁵⁴ vgl. (LUMITOS AG, kein Datum)

⁵⁵ vgl. (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), kein Datum)

⁵⁶ vgl. (Willig, kein Datum)

⁵⁷ vgl. (Irena and methanol institute, 2021) S. 42 ff.

⁵⁸ vgl. (Otto, 2015) S. 47

E4MeWi gezeigt, können diese Anlagen im Containerformat gebaut und betrieben werden.⁵⁹ Dies sind jedoch nur Demonstrationsanlagen, welche nur dafür gebaut sind, um herauszufinden, ob die Laborergebnisse in größeren Anlagen verifiziert werden können.

Herkömmlich hergestelltes Methanol kostet Stand September im Jahr 2023 $454 \frac{\text{€}}{\text{t}}$.⁶⁰ Dies entspricht umgerechnet $43,4 \frac{\text{MJ}}{\text{€}}$. Im Gegensatz dazu liegen die Kosten von grünem Methanol zwischen $800 \frac{\text{USD}}{\text{t}}$ und $1600 \frac{\text{USD}}{\text{t}}$ bei angenommenen zukünftigen Kosten des CO₂s von $10 \frac{\text{USD}}{\text{t}}$ bis $50 \frac{\text{USD}}{\text{t}}$.⁶¹ Wenn man die vorhandenen Kosten des CO₂s von $300 \frac{\text{USD}}{\text{t}}$ bis $600 \frac{\text{USD}}{\text{t}}$ annimmt, liegt der Preis für grünes Methanol zwischen $1200 \frac{\text{USD}}{\text{t}}$ und $2400 \frac{\text{USD}}{\text{t}}$. Letzteres entspricht umgerechnet, bei einem durchschnittlichen Wechselkurs der letzten drei Jahre von $1,12 \frac{\text{USD}}{\text{€}}$,⁶² $9,2 \frac{\text{MJ}}{\text{€}}$ beziehungsweise $18,4 \frac{\text{MJ}}{\text{€}}$.

Methanol eignet sich hervorragend als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren.⁶³ In China nutzt man es bereits als Beimischung oder direkten Treibstoff für Autos in Verbrennungsmotoren. Auch in Südamerika wurden und werden viele Fahrzeuge auf Methanolbetrieb umgerüstet. Der Vorteil ist, dass mit Methanol betriebene Verbrennungsmotoren im Verhältnis zur abgegebenen Energie weniger Kohlenstoffdioxid als mit Diesel oder Benzin betriebene Verbrennungsmotoren emittieren. Außerdem lassen sich methanolbetriebene Fahrzeuge auf die gleiche Weise wie herkömmlich angetriebene Fahrzeuge betanken.

Außerdem kann Methanol in Brennstoffzellen genutzt werden. Beispielsweise in der Direktmethanolbrennstoffzelle (englisch Direct Methanol Fuel Cell, DMFC), welche zwar unkomplizierter im Aufbau und Betrieb als eine vergleichbare Wasserstoff Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle ist, besitzt jedoch im Gegenzug deutlich schlechtere Leistungsdaten.⁶⁴ Eine weitere Methode Methanol als Brennstoff für Brennstoffzellen zu nutzen, ist der Reformer.⁶⁵ Mit diesem wird das Wasserstoff aus dem Methanol extrahiert und für einen beliebigen Brennstoffzellentyp genutzt. Dieser Prozess geht mit einem Wirkungsgradverlust einher.

⁵⁹ vgl. (Weiler, 2020)

⁶⁰ vgl. (Pawlik, 2023)

⁶¹ vgl. (Irena and methanol institute, 2021) S. 5

⁶² vgl. (Statista Research Department, 2023)

⁶³ vgl. (Bergins, Fox, Tran, & Wuebben, 2016)

⁶⁴ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 145

⁶⁵ vgl. ebd. S. 124 f.

4.4. Ethanol (C₂H₆O)

Ethanol, auch bekannt als Ethylalkohol, ist eine farblose, klare, brennbare und leicht entzündliche Flüssigkeit.⁶⁶ Es hat einen charakteristischen Geruch und einen brennenden Geschmack. Ethanol verbrennt mit einer blassblauen, schwach leuchtenden Flamme zu Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf. Es hat eine molare Masse von $46,07 \frac{g}{mol}$ und eine Dichte von $0,79 \frac{g}{cm^3}$ bei 20 °C. Ethanol ist sehr gut in Wasser, Diethylether, Chloroform, Benzin und Benzol löslich und zählt nur als schwach wassergefährdend. Es hat einen Siedepunkt von 78 °C und einen Schmelzpunkt von -114 °C. Die gravimetrische Energiedichte liegt bei $26,8 \frac{MJ}{kg}$ und die volumetrische Energiedichte bei $21,1 \frac{MJ}{l}$.⁶⁷ Für den Menschen gilt Ethanol als giftig. Ab einer Menge von etwa über 1 ‰ Ethanol im Blut sind typische Trunkenheitssymptome wie Übelkeit, Orientierungsstörungen und Schwindel bemerkbar. Ab 3 – 4 ‰ gilt die Dosis als tödlich.

Die reguläre Herstellung von Ethanol erfolgt durch einen Prozess, der als alkoholische Gärung bekannt ist.⁶⁸ In diesem Prozess verwandeln Hefepilze, wenn sie sich in einer Umgebung mit wenig Sauerstoff befinden, Glucose in Ethanol und Kohlenstoffdioxid um. Diese Reaktion setzt Energie frei und ist daher exotherm. Die freigesetzte Energie wird in den Hefezellen in Form von Adenosintriphosphat gespeichert, einer energiereichen Verbindung, welche die Zelle bei Bedarf zur Energiegewinnung nutzt. Für diesen Prozess benötigen die Hefezellen spezielle Enzyme. Diese Enzyme katalysieren bestimmte Stoffwechselreaktionen, indem sie die Aktivierungsenergie der Reaktion senken und so deren Geschwindigkeit erhöhen. Die Geschwindigkeit der alkoholischen Gärung hängt dabei außerdem von der Temperatur ab. Je höher die Temperatur, desto schneller verläuft die Gärung. Allerdings werden die Enzyme in den Hefezellen bei Temperaturen von etwa 40 °C denaturiert, was den Gärprozess zum Erliegen bringt. Ethanol kann von den Hefezellen nicht weiter metabolisiert werden und wird daher als Abfallprodukt ausgeschieden.

Für einen Liter Ethanol sind circa 2,5 kg Getreide erforderlich.⁶⁹ Aus einem Hektar Weizen können ungefähr 2800 l Ethanol gewonnen werden. Je nach Produktions-, Bodenbearbeitungssystem, Bodenbearbeitungswiderstand und Betriebsgrößen wird für ein Hektar Winterweizen zwischen 7480 und 16530 MJ Energie benötigt.⁷⁰ Für die weiteren Berechnungen wird der Mittelwert von $10710 \frac{MJ}{ha}$ und damit $1530 \frac{MJ}{t_{Winterweizen}}$ herangezogen. Außerdem werden für die Getreidelagerung $150 \frac{MJ}{t_{Winterweizen}}$, für die Ethanol Produktion $2500 \frac{MJ}{t_{Winterweizen}}$ und für die

⁶⁶ vgl. (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), kein Datum)

⁶⁷ vgl. (LUMITOS AG, kein Datum)

⁶⁸ vgl. (Joachim Herz Stiftung, kein Datum)

⁶⁹ vgl. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), kein Datum)

⁷⁰ vgl. (Biedermann, 2009) S. 56

Schlempe Trocknung $2400 \frac{MJ}{t_{Winterweizen}}$ benötigt.⁷¹ Damit entsteht ein Gesamtenergiebedarf von $6580 \frac{MJ}{t_{Winterweizen}}$, was umgerechnet $16,45 \frac{MJ}{l_{Ethanol}}$ und damit $20,82 \frac{MJ}{kg_{Ethanol}}$ entspricht. Die Kosten für 1 Liter E100 Bioethanol liegen bei ungefähr $2 \frac{€}{l}$ und damit bei $14,35 \frac{MJ}{€}$.

In Verbrennungsmotoren werden Ottokraftstoffe mit unterschiedlich hohen Anteilen an Ethanol verwendet. Die Gemische werden nach dem Anteil von Ethanol im Benzin bezeichnet, zum Beispiel E85 mit 85 % Ethanol.⁷² Nikolaus August Otto verwendete bereits in den 1860er Jahren Ethanol als klopffesten Kraftstoff, in den Prototypen seines Verbrennungsmotors, da diese mindestens eine Oktanzahl von 104 haben.⁷³ Bei der Verbrennung von 1 Liter Ethanol wird 34 % weniger Energie freigesetzt als bei der Verbrennung eines ähnlichen Benzinvolumens.⁷⁴ Dies liegt daran, dass der Heizwert und der stöchiometrische Luftbedarf geringer ist. Dadurch steigt der Verbrauch, was mit einem angepassten Einspritzsystem kompensiert werden muss. Wenn der Verbrennungsmotor von Anfang an auf Ethanolbetrieb ausgelegt konstruiert wird, lassen sich dadurch höhere Wirkungsgrade erreichen. Beispielsweise kann gezeigt werden, dass der Betrieb mit E85 einen Wirkungsgrad von 39,1 % erzielen kann und damit deutlich über dem Wirkungsgrad von 29,4 % im Benzinbetrieb liegt.⁷⁵

In Brennstoffzellen kann Ethanol wie auch Methanol als Brennstoff verwendet werden. Dazu wird ein gasförmiges Ethanol-Wassergemisch als Brennstoff verwendet, welches für den Betrieb in allgemeinen Brennstoffzellen reformiert werden muss.⁷⁶ Da Ethanol reaktionsträger als Methanol ist, wird es bei höheren Temperaturen umgesetzt. Ein Beispiel für diesen Betrieb ist die sogenannte e-Bio-Brennstoffzelle im Nissan-e-Bio-Fuel-Cell-Prototyp.⁷⁷ Dies ist eine Festoxid-Brennstoffzelle, um aus dem Bioethanol in einem chemischen Prozess elektrische Energie zu gewinnen.

Zusätzlich wird außerdem an der Direktethanolbrennstoffzelle (englisch Direct Ethanol Fuel Cell, DEFC) geforscht.⁷⁸ Diese ist ein Brennstoffzellentyp, der Ethanol direkt als Energielieferant nutzt, wie die Direktmethanolbrennstoffzelle Methanol direkt nutzt. Anwendungen, für die Direktethanolbrennstoffzellen als Stromquellen angedacht wurden, reichen von Handys und Laptops bis hin zu Elektroautos.

⁷¹ vgl. (Senn & Lucà, 2002) S. 2

⁷² vgl. (Stan, 2020) S. 245

⁷³ vgl. ebd. S. 239

⁷⁴ vgl. ebd. S. 246

⁷⁵ vgl. (Schwaderlapp, Adomeit, Kolbeck, & Thewes, 2012)

⁷⁶ vgl. (Vaidya & Rodrigues, 2006)

⁷⁷ vgl. (Mitzel & Friedrich, 2017) S. 127

⁷⁸ vgl. (Bullis, 2009)

4.5. Ameisensäure (CH₂O₂)

Methansäure, auch als Ameisensäure (CH₂O₂) bekannt, ist eine chemische Verbindung mit einer Vielzahl von Anwendungen und einzigartigen Eigenschaften, die sie in verschiedenen Bereichen unverzichtbar machen.⁷⁹ Als einfachste und kürzeste Alkansäure spielt sie eine besondere Rolle. Sie wird von Ameisen zur Verteidigung gegen Feinde und zur Pfadmarkierung verwendet, und ihr markanter Geruch erinnert an den Duft, den diese Insekten abgeben. Die gravimetrische Energiedichte beträgt $6,2 \frac{MJ}{kg}$ und die volumetrische Energiedichte liegt bei $7,2 \frac{MJ}{l}$.⁸⁰ Es gilt als schwach wassergefährdend und giftig für den Menschen.⁸¹ Es verursacht schwere Verätzungen der Haut und darf nicht eingeatmet oder verschluckt werden. Außerdem ist sowohl die Flüssigkeit als auch der Dampf entzündbar.

Ameisensäure wird heutzutage vor allem aus Methanol und Kohlenstoffmonoxid hergestellt.⁸² Die Reaktion hat zwei Stufen, in denen sich zuerst als Zwischenprodukt Methylformiat (C₂H₄O₂) bildet. Das Methylformiat wird anschließend zur Ameisensäure hydrolysiert. Außerdem gibt es weitere Verfahren, welche in der Massenfertigung jedoch deutlich seltener genutzt werden.

Die grüne Herstellung von Ameisensäure ist derzeit noch in der Forschung.⁸³ Dabei liegt der Technology Readiness Level, also die Technologiereife, zwischen drei und fünf von insgesamt möglichen neun Punkten. Derzeitige Bemühungen legen ihren Fokus auf die Reduzierung der benötigten Energie. Diese liegt derzeit elektrisch bei $14,4 \frac{MJ}{kg}$ und thermisch in Form von Dampf bei $10 \frac{MJ}{kg}$.⁸⁴ Zusätzlich kommt die benötigte Energie für $0,834 \frac{kg_{CO_2}}{kg_{Ameisensäure}}$.⁸⁵ Diese Energie beläuft sich auf $3 \frac{MJ}{kg}$.⁸⁶ Damit beläuft sich der gesamte Energiebedarf auf $27,4 \frac{MJ}{kg}$. Aufgrund der Ähnlichkeit zur Synthese von grünem Methanol wird der Flächenbedarf für die Anlagen zur Herstellung von grüner Ameisensäure ähnlich ausfallen.

Der niedrigste gefundene Preis für nahezu 100-prozentige Ameisensäure liegt Stand September 2023 bei $7,5 \frac{€}{l}$.⁸⁷ 75-prozentige Ameisensäure kostet mindestens $1,57 \frac{€}{kg}$.⁸⁸ Umgerechnet

⁷⁹ vgl. (Böhmer, 2023)

⁸⁰ vgl. (Mardini & Bicer, 2021)

⁸¹ vgl. (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), kein Datum)

⁸² vgl. (Schack & Sundmacher) S. 6

⁸³ vgl. (Pérez-Fortes & Tzimas, 2016) S. 45

⁸⁴ vgl. ebd. S. 56

⁸⁵ vgl. ebd. S. 53

⁸⁶ vgl. (Otto, 2015) S. 46

⁸⁷ vgl. (Fisher Scientific GmbH, kein Datum)

⁸⁸ vgl. (chemishop24.de, kein Datum)

liegt der Preis von 100-prozentiger Ameisensäure bei $0,96 \frac{MJ}{\epsilon}$ und von 75-prozentiger Ameisensäure bei $3,95 \frac{MJ}{\epsilon}$. Da die Herstellung von grüner Ameisensäure noch in der Forschung ist, gibt es Stand September 2023 noch keine Möglichkeit diese zu beziehen.

Ameisensäure kann, wie die anderen Brennstoffe, mittels Reformer in den meisten Brennstoffzellen genutzt werden.⁸⁹ Auch hier resultiert dieser Betrieb in einem geringeren Wirkungsgrad verglichen mit dem reinen Wasserstoffbetrieb. Davon abgesehen gibt es auch eine Ameisensäure-Brennstoffzelle (FAFC von englisch: Formic acid fuel cell).⁹⁰ Diese ist eine Brennstoffzelle, bei welcher Ameisensäure direkt als Brennstoff benutzt wird. Außerdem wird in dieser Reaktion Lauge verbraucht. Wegen ihrer geringen Leistungsdichte ist sie hauptsächlich zum Einsatz in kleinen elektronischen Geräten wie Mobiltelefonen geeignet. Im Gegenzug ist sie resistent gegenüber CO₂.

4.6. Propanol (C₃H₈O)

Propanol, auch bekannt als Propylalkohol, ist eine organische Verbindung aus der Stoffklasse der Alkohole.⁹¹ Es gibt zwei Isomere von Propanol: 1-Propanol und 2-Propanol. Beide sind leicht entzündlich, flüchtig, farblos, riechen nach Alkohol, schwach wassergefährdend und gelten als gering giftig. Die Gefährdungshinweise entstanden außerdem hauptsächlich aus Tierversuchen. Der Unterschied ist der Ort an dem die Hydroxylgruppe (OH) angebunden ist.⁹² Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, ist dies bei 1-Propanol am Ende der Methylidengruppe (CH₂) während die Hydroxylgruppe bei 2-Propanol in der Mitte an der Methingruppe (CH) angebunden ist. Daraus resultieren leicht unterschiedliche Energiedichten.⁹³ Für 1-Propanol liegt die gravimetrische Energiedichte bei $33,6 \frac{MJ}{kg}$ und die volumetrische bei $26,9 \frac{MJ}{l}$. Für 2-Propanol liegt die gravimetrische Energiedichte bei $33,4 \frac{MJ}{kg}$ und die volumetrische bei $26,1 \frac{MJ}{l}$. Aufgrund der nahe liegenden Werte wird nachfolgend mit dem arithmetischen Mittel weiter gerechnet.

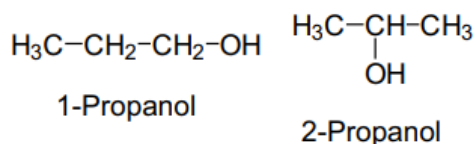


Abbildung 4: Unterschied 1-Propanol zu 2-Propanol⁹⁴

⁸⁹ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 124

⁹⁰ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 9

⁹¹ vgl. (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), kein Datum) & (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), kein Datum)

⁹² vgl. (Latscha, Kazmaier, & Klein, 2016) S. 153

⁹³ vgl. (Native Dynamics, 2014)

⁹⁴ vgl. (Latscha, Kazmaier, & Klein, 2016) S. 153

Auch haben beide unterschiedliche herkömmliche Herstellungsverfahren:

Die Herstellung von 1-Propanol im industriellen Maßstab erfolgt durch den Prozess der katalytischen Hydrierung, bei dem Propionaldehyd verwendet wird. Dieser Vorgang wird bei Temperaturen zwischen 110 und 150 Grad Celsius und unter einem Druck von 1,5 bis 10 bar durchgeführt. Dabei kommen verschiedene Katalysatoren zum Einsatz, darunter Kupfer, Nickel, Zink und Chrom. Diese Katalysatoren werden auf Trägermaterialien wie Aluminiumoxid (Al_2O_3) oder Kieselgur aufgebracht.⁹⁵

Es gibt zwei Hauptverfahren zur Herstellung von 2-Propanol: indirekte und direkte Hydratisierung von Propen. Eine kleinere Menge wird durch die Hydrierung von Aceton hergestellt. Die indirekte Methode umfasst zwei Schritte mit Schwefelsäure und kann bei unterschiedlichen Reinheitsgraden von Propen durchgeführt werden. Die direkte Methode verwendet einen sauren Katalysator und hohe Drücke. Die Hydrierung von Aceton ist eine weitere Option. Die Wahl hängt von Rohstoffen und Anforderungen ab.⁹⁶

Die grüne Herstellung von Propanol ist, zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit, ein aktives Forschungsgebiet. Ein Beispiel ist dabei ein Herstellungsprozess mit dem Namen „C123“.⁹⁷ Dieser Prozess ist derzeit auf dem Technology Readiness Level 4. Der Prozess umfasst die Umwandlung von Methan in Ethylen durch oxidative Methanumwandlung, gefolgt von der Umwandlung von Ethylen in Propanol durch Hydroformylierung und Hydrierung. Dazu werden mehrere Reaktionen durchgeführt, um das optimale Verhältnis von Ethylen, CO und H_2 für die Hydroformylierung zu erreichen. Währenddessen entsteht Wasser als Nebenprodukt. Vor der Hydroformylierung muss dieses Wasser entfernt werden, und es ist eine mehrstufige Kompression erforderlich, da die Hydroformylierung idealerweise bei 20 bar stattfindet. Während der Hydroformylierung wird Propanal gebildet, und es werden nicht alle Ethylenmengen umgewandelt. Die nicht umgesetzten Ethylenmengen werden durch extraktive Destillation getrennt und zurückgeführt. Propanal wird dann durch Hydrierung in Propanol umgewandelt. Kühlung ist für verschiedene Reaktionsschritte erforderlich, und ein Kühlwasserkreislauf wird verwendet. Der Energieverbrauch hängt von dem angewendeten Szenario und dessen Umgebungsvariablen ab. Das Szenario in Deutschland benötigt $102,9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{Propanol}}}$ und emittiert dabei trotz allem $6 \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2}}{\text{kg}_{\text{Propanol}}}$ aufgrund der Biogasproduktion. Für ein Kilogramm Propanol wird

⁹⁵ vgl. (Klabunde, Bischoff, & Papa, 2018) S. 4 ff.

⁹⁶ vgl. ebd. S. 6 ff.

⁹⁷ vgl. (Motte, et al., 2022)

3,57 kg Biogas, und dafür wiederum 16,9 kg Biomasse, benötigt.⁹⁸ Daraus resultiert, dass der benötigte Flächenbedarf bei $22,5 \frac{m^2}{kg_{Propanol}}$ liegt.⁹⁹

Die Kosten für 1-Propanol betragen mindestens $5,6 \frac{€}{l}$ ¹⁰⁰ und für 2-Propanol $2 \frac{€}{l}$.¹⁰¹ Dies entspricht umgerechnet für 1-Propanol $4,8 \frac{MJ}{€}$ und für 2-Propanol $13,05 \frac{MJ}{€}$. Das so beschaffbare Propanol ist jedoch nicht grün hergestellt, da sich diese Herstellungsart wie oben beschrieben noch in der Forschung befindet.

Aufgrund der ähnlichen Eigenschaften zwischen Ethanol/Methanol und Propanol, kann dieser als alternativer Kraftstoff in Verbrennungsmotoren verwendet werden. Allerdings sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Auswirkungen auf den Motor und die Emissionen zu bewerten.¹⁰²

Propanol kann auch in Brennstoffzellen verwendet werden.¹⁰³ Es kann als Trägermaterial für den Wasserstoff genutzt werden oder direkt als Brennstoff. Bei ersterem wird zu Beginn der Wasserstoff aus dem Propanol extrahiert und in einer regulären Wasserstoffbrennstoffzelle genutzt. In der Direktbrennstoffzelle wird 2-Propanol zu Aceton oxidiert, wobei Elektrizität erzeugt wird. Diese Technologie befindet sich noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase und hat bisher noch einen geringeren Wirkungsgrad als erstere Methode.

4.7. Glycerin (C₃H₈O₃)

Glycerin, auch unter den Namen Glycerol oder Glyzerin bekannt, ist ein grundlegender dreiwertiger Alkohol und gehört zur Gruppe der Zuckeralkohole.¹⁰⁴ Es findet sich in natürlichen Fetten und Ölen, beispielsweise in Pflanzenölen, in welchen es chemisch in Form von Fettsäureestern (Triglyceride) gebunden ist, weshalb die Herstellung mittels Erhitzung des Fetts mit Asche zur Seifenherstellung, schon 2800 vor Christus entdeckt und durchgeführt wurde.¹⁰⁵ Glycerin spielt eine bedeutende Rolle als Zwischenprodukt in verschiedensten Anwendungen. Dazu zählen beispielsweise Nahrungsmittel, Körperpflegeprodukte oder auch Pharmaka. Reines Glycerin hat eine gravimetrische Energiedichte von $18 \frac{MJ}{kg}$ und eine volumetrische

⁹⁸ vgl. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2008) S.3

⁹⁹ vgl. (Biedermann, 2009) S. 56

¹⁰⁰ vgl. (S3 Chemicals, kein Datum)

¹⁰¹ vgl. (Höfer Chemie GmbH, kein Datum)

¹⁰² vgl. (Kohse-Höinghaus, et al., 2010)

¹⁰³ vgl. (Braun, et al., 2022)

¹⁰⁴ vgl. (Latscha, Kazmaier, & Klein, 2016) S. 157

¹⁰⁵ vgl. (Pagliaro, Ciriminna, Kimura, Rossi, & Pina, 2007)

Energiedichte von $22,7 \frac{MJ}{l}$.¹⁰⁶ Es gilt als nicht giftig, schwach wassergefährdend und schwer entzündbar.¹⁰⁷

Die herkömmliche Herstellung von Glycerin erfolgt petrochemisch aus Propen, das beim Cracken langkettiger Alkane entsteht.¹⁰⁸ Hierbei wird das Propen zunächst zu Allylchlorid (3-Chlorpropen) chloriert und dieses anschließend in mehreren Zwischenschritten in Glycerin umgewandelt. Eine andere Methode zur Herstellung von Glycerin ist die Verarbeitung von Tierfett.¹⁰⁹

Eine grüne oder nachhaltige Methode zur Herstellung von Glycerin ist die Umesterung von meist pflanzlichen Ölen mit Methanol.¹¹⁰ Bei diesem Prozess wird ein Fettmolekül (Triacylglycerid) mit drei Methanolmolekülen zu Glycerin und drei Fettsäuremethylestern (FAME) umgesetzt. Eine biotechnologische Herstellung des Glycerins durch Fermentation ist ebenfalls möglich. Bei der Herstellung von 100 Liter Biodiesel entsteht ebenfalls 17 Liter Glycerin als Koppelprodukt.¹¹¹ Auch über Vergärung, wie bei der Ethanolherstellung, kann grünes Glycerin hergestellt werden.¹¹² Dementsprechend wird im Idealfall nicht mehr Energie benötigt als bei der Ethanol Produktion und diese liegt bei $20,82 \frac{MJ}{kg}$. Im Internet liegt der Preis Stand September 2023 für reines Glycerin bei ungefähr $1,6 \frac{€}{kg}$, was umgerechnet $11,25 \frac{MJ}{€}$ entspricht.¹¹³

Glycerin kann in Verbrennungsmotoren als Kraftstoff eingesetzt werden.¹¹⁴ Durch einen Veresterungsprozess, bei dem Pflanzenöl mit Methanol zu Monoalkoholestern und wirtschaftlich nutzbarem Glycerin umgewandelt wird, wird die Viskosität des Glycerins reduziert. Dies führt zu verbesserten thermischen Eigenschaften, die eine direkte Verwendung in Dieselmotoren ermöglichen. Beispielsweise nutzt die Formel E zur Stromproduktion auf den Betrieb mit Glycerin angepasste Dieselgeneratoren.¹¹⁵

Brennstoffzellen mit Glycerin als Brennstoff befinden sich bisher noch in der Entwicklungsphase und gelten als eine der neuesten Brennstoffzellentypen.¹¹⁶ Es wird davon ausgegangen, dass diese eine hohe Energiedichte erreichen könnten, jedoch sind dies bisher nur theoretische Erkenntnisse ohne praktische Anwendungen. Eine weitere Möglichkeit ist das Glycerin

¹⁰⁶ vgl. (Lide, 2003) S. 926

¹⁰⁷ vgl. (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), kein Datum)

¹⁰⁸ vgl. (Latscha, Kazmaier, & Klein, 2016) S. 157

¹⁰⁹ vgl. ebd. S. 458

¹¹⁰ vgl. (Türk, 2014) S. 460

¹¹¹ vgl. ebd. S. 77

¹¹² vgl. (Soares, Simonetti, & Dumesic, 2006)

¹¹³ vgl. (JOQORA GmbH, kein Datum)

¹¹⁴ vgl. (Eckert, Eichlseder, Rakowski, & Tschöke, 2019) S. 567

¹¹⁵ vgl. (Walz, 2017) S. 3 & 9

¹¹⁶ vgl. (Ong, Kamarudin, & Basri, 2017)

zu Synthesegas weiterzuverarbeiten und damit über ein Reformier übliche Brennstoffzellen mit Wasserstoff zu betreiben.¹¹⁷ Auch diese Technik befindet sich noch in der Forschung.

4.8. Synthetische Kraftstoffe

Synthetische Kraftstoffe sind bestimmte Kraftstoffe, die sich von konventionellen Kraftstoffen (Diesel, Benzin, Kerosin etc.) durch das Herstellungsverfahren unterscheiden.¹¹⁸ Sie werden nicht aus fossilem Erdöl, sondern aus erneuerbarem Strom und CO₂ gewonnen. Porsche, Siemens Energy und weitere internationale Firmen produzieren im „Haru Oni“-Projekt zuerst mit einem Elektrolyseur Wasserstoff, welches mit durch Direct Air Capturing gewonnenen CO₂ zu Methanol kombiniert wird.¹¹⁹ Dieses wird danach im Methanol-to-gasoline-Prozess zu Benzin weiter verarbeitet, welches vergleichbare Eigenschaften wie herkömmliches Benzin besitzt.¹²⁰ Beim Dieseleratz wird vermehrt Biodiesel eingesetzt welches streng genommen ein Biokraftstoff und kein synthetischer ist.¹²¹ Da in dieser Arbeit nicht gesondert auf Biokraftstoffe eingegangen wird, wird es hier mit aufgezählt. Es wird meistens aus Raps hergestellt.¹²² Der Prozess ist chemisch gesehen der gleiche wie beim Glycerin (FAME). Die Eigenschaften des Biodiesels sind vergleichbar mit denen des herkömmlichen Diesels. Eine weitere Möglichkeit ist die Herstellung von Polyoxymethylendimethylether (OME) mit unterschiedlichen Kettenlängen.¹²³ In Abbildung 5 kann man die Struktur des OME2 im Vergleich zur Struktur von Ethanol sehen. Der Vorteil dieser Technik besteht darin, dass die Verbrennung rußfrei stattfindet. Nachteilig ist die deutlich geringere Energiedichte, welche in etwa auf dem Niveau von Methanol liegt.¹²⁴

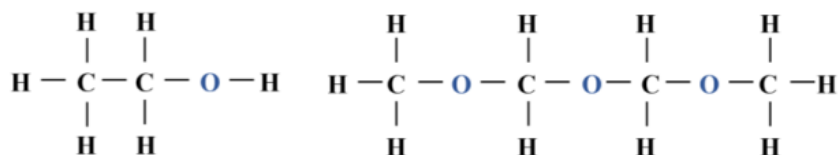


Abbildung 5: Strukturvergleich von Ethanol (links) und OME2 (rechts)¹²⁵

Da viele unterschiedliche Arten von synthetischem Kraftstoff existieren, werden die Eigenschaften von herkömmlichen Diesel und Benzin genommen. Für die gravimetrische und volumetrische Energiedichte der arithmetische Mittelwert von herkömmlichen Diesel und Benzin

¹¹⁷ vgl. (Behr & Seidensticker, 2018) S. 85 ff.

¹¹⁸ vgl. (Stan, 2020) S. 290

¹¹⁹ vgl. (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, kein Datum)

¹²⁰ vgl. (Villforth, 2023) S. 8

¹²¹ vgl. (Watter, 2022) S. 287

¹²² vgl. ebd. S. 264

¹²³ vgl. (Stan, 2020) S.290

¹²⁴ vgl. (Härtl, Pélerin, Gaukel, Dworschak, & Wachtmeister, 2019) S. 801

¹²⁵ vgl. (Stan, 2020) S. 290

herangezogen. Dieses liegt bei $43 \frac{MJ}{kg}$ und $34 \frac{MJ}{l}$.¹²⁶ Benzin gilt als stark und Diesel als deutlich wassergefährdend.¹²⁷ Aufgrund des niedrigeren Flammpunkts von unter -35 °C zu über 56 °C von Benzin zu Diesel gilt ersteres als gefährlicher im Umgang. Außerdem zählen beide als giftig für den Menschen. Aufgrund der vielen unterschiedlichen Herstellungsmöglichkeiten ist auch der Energiebedarf zur Erstellung nicht klar definierbar. Die Firma Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH benötigte 2020 58 MJ zur Erzeugung von einem Liter Benzin.¹²⁸ Sie nutzen dabei den Methanol-to-gasoline-Prozess. Studien gehen von einem Marktpreis im Bereich zwischen $2,2 \frac{€}{l}$ und $4,8 \frac{€}{l}$ aus.¹²⁹ Der Marktpreis fossiler Kraftstoffe liegt dagegen zwischen $0,60 \frac{€}{l}$ und $0,70 \frac{€}{l}$. Umgerechnet liegen die Kosten zwischen $7,08 \frac{MJ}{€}$ und $15,5 \frac{MJ}{€}$.

Synthetische Kraftstoffe können regulär in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden.¹³⁰ Da die synthetischen Kraftstoffe in begrenzten Maßen angepasst werden können, kann man mit diesen Leistungs- beziehungsweise Effizienzsteigerungen erreichen. Dies wird beispielsweise damit erreicht, indem die Oktanzahl des Kraftstoffs erhöht wird, wodurch die Klopfestigkeit höher wird.¹³¹ Damit kann die Leistung durch Anpassung des Zündzeitpunkts oder die Effizienz und Leistung durch höhere Verdichtung erhöht werden. Zweiteres ist jedoch aufwändiger, da in diesem Fall der Motor umgebaut werden müsste. Wie zuvor bei der rußfreien Verbrennung erwähnt, kann auch das Emissionsverhalten durch Anpassungen verbessert werden.¹³²

Mittels Reformer könnten synthetische Kraftstoffe auch in Brennstoffzellen genutzt werden.¹³³ Aufgrund der molekularen Struktur gilt es jedoch nicht als optimal. Es werden hohe Reformertemperaturen bis 900 °C benötigt, wodurch der Wirkungsgrad relativ niedrig ist, Werkstoffprobleme auftreten, eine schlechte Kaltstartfähigkeit gegeben ist und die Fahrdynamik beeinflusst wird.¹³⁴

4.9. Ammoniak (NH₃)

Ammoniak ist eine chemische Verbindung, die aus Stickstoff und Wasserstoff besteht und durch die Summenformel NH₃ dargestellt wird. Es handelt sich um ein stark riechendes, farbloses, wasserlösliches Gas, das einen intensiven Geruch aufweist und reizend für die Augen

¹²⁶ vgl. (Eckert, Eichlseder, Rakowski, & Tschöke, 2019) S. 552

¹²⁷ vgl. (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), kein Datum) & (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), kein Datum)

¹²⁸ vgl. (Schwarzer, 2020)

¹²⁹ vgl. (Wietschel, et al., 2023) S. 6

¹³⁰ vgl. (Eckert, Eichlseder, Rakowski, & Tschöke, 2019) S. 551

¹³¹ vgl. (Härtl, Pélerin, Gaukel, Dworschak, & Wachtmeister, 2019) S. 752 f.

¹³² vgl. ebd. S. 801

¹³³ vgl. (Stan, 2020) S. 291

¹³⁴ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 120

ist.¹³⁵ Ammoniak ist eine der am häufigsten hergestellten Chemikalien und dient als Ausgangsstoff für die Produktion einer Vielzahl von Stickstoffverbindungen. Außerdem ist es deutlich wassergefährdend, jedoch nur schwer entzündlich. Es hat eine gravimetrische Energiedichte von $22,5 \frac{MJ}{kg}$ und eine volumetrische Energiedichte von $15,3 \frac{MJ}{l}$.¹³⁶ Die Preise für grünen Ammoniak liegen je nach Strompreisen zwischen $735 \frac{€}{t}$ bis $800 \frac{€}{t}$ bei einem Strompreis von $50 \frac{€}{MWh}$ und $255 \frac{€}{t}$ bis $380 \frac{€}{t}$ bei einem Strompreis von $10 \frac{€}{MWh}$.¹³⁷ Umgerechnet entspricht dies zwischen $28,13 \frac{MJ}{€}$ und $88,24 \frac{MJ}{€}$.

Die Herstellung von Ammoniak erfolgt großindustriell fast ausschließlich über das Haber-Bosch-Verfahren.¹³⁸ Es ist nach den deutschen Chemikern Fritz Haber und Carl Bosch benannt, die es anfangs des 20. Jahrhunderts entwickelten. Der zentrale Schritt des Verfahrens, die Ammoniaksynthese aus atmosphärischem Stickstoff und Wasserstoff, wird an einem eisenhaltigen Katalysator bei Drücken von etwa 15 MPa bis 35 MPa und Temperaturen von etwa 400 bis 500 °C durchgeführt. Dabei wird das Synthesegas aus Erdgas reformiert.

Grünes Ammoniak wird ebenfalls künstlich mittels Haber-Bosch-Verfahren hergestellt.¹³⁹ In diesem Fall wird statt aus Erdgas reformiertes Synthesegas CO₂-neutraler Wasserstoff und Stickstoff genutzt. Der Wasserstoff wird, wie weiter oben beschrieben, mit einem Elektrolyseur und 100 % erneuerbaren Energiequellen produziert, während der Stickstoff mithilfe eines Luftzerlegers aus der Umgebungsluft gewonnen wird. Für diese Prozesse wird insgesamt $45,1 \frac{MJ}{kg}$ benötigt. Die Firma thyssenkrupp bietet dafür 5 MW Anlagen an, welche einen geringen Flächenbedarf von unter 200 m² haben.¹⁴⁰

Ammoniak kann als Treibstoff für Verbrennungsmotoren und Turbinen verwendet werden.¹⁴¹ Allerdings ist Ammoniak schwer zu zünden und brennt deutlich langsamer als herkömmlicher Kraftstoff. Deshalb müssen im Motor umfangreiche Anpassungen vorgenommen werden, um einerseits hohe Wirkungsgrade zu erreichen und andererseits unerwünschte Verbrennungsprodukte zu vermeiden. Aufgrund des fehlenden Kohlenstoffs ist der Vorteil von Ammoniak der CO₂-freie Betrieb. Dem gegenüber steht der Nachteil, dass schädliche Emissionen in Form von Stickoxiden (NO_x), Distickstoffoxiden (Lachgas N₂O) und unverbrannten Ammoniak entstehen.

¹³⁵ vgl. (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), kein Datum)

¹³⁶ vgl. (Salewski, 2022) S. 5

¹³⁷ vgl. (Bazzanella & Ausfelder, 2017) S. 58 f.

¹³⁸ vgl. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018) S. 260

¹³⁹ vgl. (Bazzanella & Ausfelder, 2017) S. 56 f.

¹⁴⁰ vgl. (thyssenkrupp Industrial Solutions AG, kein Datum)

¹⁴¹ vgl. (Härtl, Emissionsfreie Mobilität und Energiewende, 2023) S. 44

Die Direkt-Ammoniak-Brennstoffzelle setzt Ammoniak und Sauerstoff bzw. Luft zu Wasser und Stickstoff um.¹⁴² Wie alle Brennstoffzellen gewinnt sie dabei elektrische Energie aus der chemischen Energie der eingesetzten Stoffe (durch „kalte Verbrennung“). Bisher ist die Leistungsdichte dieser Brennstoffzellenart gering, da Ammoniak durch unerwünschte Wanderung durch das Membran giftige Stickstoffoxide an der Kathode bildet. Eine bessere Variante ist der Betrieb mittels Reformier, welcher den Wasserstoff aus dem Ammoniak vor dem eigentlichen Betrieb extrahiert.

4.10. Hydrazin (N₂H₄)

Hydrazin ist eine stark toxische anorganische Verbindung, die aus Stickstoff und Wasserstoff besteht und durch die chemische Formel N₂H₄ repräsentiert wird.¹⁴³ Es handelt sich um eine farblose, ölige Flüssigkeit, die einen Geruch aufweist, der dem von Ammoniak ähnlich ist, und die an der Luft zu rauchen beginnt. Hydrazin verbrennt mit einer nahezu unsichtbaren Flamme und ist stark wassergefährdend. Es hat einen niedrigen Flammpunkt von 40 °C und eine Zündtemperatur von 270 °C. Aufgrund der Dichte von nahezu $1 \frac{g}{cm^3}$ ist die gravimetrische und volumetrische Energiedichte mit $20,82 \frac{MJ}{kg}$ bzw. $\frac{MJ}{l}$ identisch.¹⁴⁴

Technisch gibt es mehrere Wege zur Synthese von Hydrazin aber nur wenige Verfahren haben eine technische Bedeutung.¹⁴⁵ Eins davon ist die Raschig-Synthese, bei der Ammoniak (NH₃) mit Natriumhypochlorit (NaClO) oxidiert wird. Dabei reagieren Ammoniaklösung und Hypochloritionen rasch zu Chloramin und Hydroxidionen. Inzwischen wird dieses Verfahren jedoch nur noch in einigen Kleinanlagen des ehemaligen Ostblocks und Japan genutzt. Weitere Verfahren sind das Bayer-Verfahren, welches in Gegenwart von Ketonen arbeitet und das Harnstoffverfahren, welches ähnlich der Raschig-Synthese ist, mit der Ausnahme dass Harnstoff anstelle des Ammoniaks genutzt wird. All diese Verfahren sollten CO₂-frei ablaufen können, sofern die Grundstoffe schon CO₂-frei produziert wurden. Der Energieaufwand beträgt in diesem Fall mehr als dem der Grundstoffe, welches bei Ammoniak schon bei $45,1 \frac{MJ}{kg}$ liegt. Die Produktion von Natriumhypochlorit benötigte im Jahr 1993 zwischen $18,7 \frac{MJ}{kg}$ und $20,5 \frac{MJ}{kg}$.¹⁴⁶ Dementsprechend liegt der benötigte Energiebedarf für Hydrazin über $65,6 \frac{MJ}{kg}$. Der Flächenbedarf dürfte ähnlich dem der Ammoniakproduktion sein. Die Kosten für Hydrazin sind schwer abzuschätzen, da nur Kleinstmengen beschaffbar sind. Bei diesen betragen die Kosten 101,2

¹⁴² vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 73 f.

¹⁴³ vgl. (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), kein Datum)

¹⁴⁴ vgl. (Lide, 2003) S. 589

¹⁴⁵ vgl. (Bertau, Müller, Fröhlich, & Katzberg, 2013) S. 46 f.

¹⁴⁶ vgl. (Palanisamy, Rengarajan, Sozhen, & Narasimham, 1993) S. 46

$\frac{\text{€}}{\text{kg}}$ was umgerechnet $0,21 \frac{\text{MJ}}{\text{€}}$ entspricht.¹⁴⁷ Es ist außerdem davon auszugehen, dass die Produktion in dem Fall nicht CO₂-frei erfolgt.

Hydrazin könnte wie Ammoniak im Verbrennungsmotor genutzt werden, jedoch gibt es bisher keine dokumentierten Einsätze hiervon. Dies ist vermutlich auf die hohe Toxizität und Kosten des Brennstoffes zurückzuführen.

Für Brennstoffzellen dagegen gibt es schon früh dokumentierte Einsätze. Beispielsweise fuhr im Jahr 1966 Karl Kordesch ein mit Hydrazin und einer Hydrazin-Brennstoffzelle betriebenes Motorrad.¹⁴⁸ Prinzipiell wäre Hydrazin als direkter Brennstoff sehr gut, jedoch zersetzt es sich mit Lauge und bildet so Wasserstoff. Anstelle von einer theoretischen Energiedichte von $13,86 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ liegt es so bei $3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}$. Dadurch ließe sich Hydrazin jedoch auch in jeder Wasserstoffbrennstoffzelle nutzen. Der Vorteil wäre die einfache Lagerung als Flüssigkeit in Tanks wogegen jedoch die hohe Toxizität und Kosten dagegen sprechen.

¹⁴⁷ vgl. (Fisher Scientific GmbH, kein Datum)

¹⁴⁸ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 74

5. Speicher

Der am schwierigsten zu speichernde Brennstoff ist der Wasserstoff. Aus diesem Grund sind die nachfolgenden Speichertechnologien zum großen Teil nur für diesen Brennstoff. Für die normalen oder einfach zu speichernden Brennstoffe wird ein regulärer Metalltank heran gezogen.

Sämtliche Speichertechnologien werden beschrieben und zusätzlich folgende Eigenschaften deklariert:

- Gewicht
- Volumen
- Energieaufwand/Wirkungsgrad
- Speicherflüchtigkeit
- Beschaffungsmöglichkeit
- Tankaufwand
- Lebensdauer
- Anschaffungskosten
- Skalierbarkeit
- Technology Readiness
- Allgemeine Gefahr
- Gefahr bei der Betankung

Für jede dieser Eigenschaften ist eine Gewichtung in der Bewertungsmatrix vorgesehen. Die Eigenschaften Speicherflüchtigkeit, Beschaffungsmöglichkeit, Tankaufwand und Technology Readiness haben dabei die höchste Priorität, während das Gewicht, Volumen, die Lebensdauer, Skalierbarkeit und der Wirkungsgrad die geringste Priorität besitzen, da diese Eigenschaften bei dem Fährschiff vernachlässigbar sind.

Diese Eigenschaften werden im Anhang A2: Eigenschaften der Speicher in Tabellenform zusammengefasst. Nachfolgend ist die Bewertungsmatrix in Tabelle 2 zu sehen.

| Eigenschaften | Gew. | Speicher | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------------------|------------------|--------------|-----------------|--------------|------------|------|------------|------------|--------------|
| | | Druck mit 35 MPa | Druck mit 70 MPa | Kryospeicher | Kryokomprimiert | Metallhydrid | Adsorption | LOHC | Powerpaste | Metalltank | NMC-Batterie |
| Gewicht | 1 | 5 | 7 | 3 | 4 | 1 | 2 | 6 | 8 | 9 | 1 |
| Volumen | 1 | 4 | 6 | 1 | 5 | 2 | 3 | 7 | 8 | 9 | 1 |
| Energieaufwand/ Wirkungsgrad | 1 | 7 | 4 | 1 | 4 | 3 | 5 | 1 | 1 | 10 | 9 |
| Speicherflüchtigkeit | 3 | 9 | 9 | 1 | 2 | 10 | 3 | 10 | 10 | 9 | 9 |
| Beschaffungsmöglichkeit | 3 | 10 | 10 | 10 | 1 | 10 | 1 | 1 | 2 | 10 | 10 |
| Tankaufwand | 3 | 7 | 6 | 2 | 1 | 4 | 4 | 9 | 10 | 10 | 10 |
| Lebensdauer | 1 | 6 | 6 | 7 | 5 | 3 | 1 | 10 | 10 | 10 | 4 |
| Anschaffungskosten | 2 | 6 | 4 | 5 | 7 | 3 | 1 | 10 | 9 | 8 | 2 |
| Skalierbarkeit | 1 | 8 | 7 | 2 | 1 | 5 | 3 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Technology Readiness | 3 | 10 | 10 | 9 | 2 | 10 | 5 | 6 | 6 | 10 | 10 |
| Gefahr allgemein | 2 | 9 | 9 | 2 | 2 | 5 | 3 | 4 | 8 | 10 | 9 |
| Gefahr tanken | 2 | 8 | 8 | 4 | 2 | 6 | 1 | 5 | 10 | 9 | 9 |
| Gesamt in % | | 81% | 78% | 45% | 26% | 63% | 28% | 66% | 77% | 96% | 80% |

Legende: grün = mehrere wissenschaftliche Quellen; gelb = Einzelquellen/nicht wissenschaftlich bestätigte Quellen; rot = kaum/keine wissenschaftlichen Quellen

Tabelle 2: Bewertungsmatrix Speichertechnologien

5.1. Druckspeicher

Druckspeicher werden aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte und Kompressibilität ausschließlich bei gasförmigen Brennstoffen genutzt. Der einzig gasförmige Brennstoff in dieser Arbeit ist Wasserstoff, weshalb nachfolgend nur auf Druckspeicher für diesen eingegangen wird. Diese Speicherform wird häufig mit CGH₂ abgekürzt, was für Compressed Gaseous Hydrogen steht.¹⁴⁹

Die Druckspeichertechnik wird in vier unterschiedlichen Typen aufgeteilt.¹⁵⁰ Mit dem Typ steigt die Komplexität der Technik und die Kosten, jedoch auch deren gravimetrische und volumetrische Energiedichte sowie der maximale Druck. Typ 1 Behälter sind nahtlose Stahlflaschen ohne Bewicklung. Diese halten Drücke bis 30 MPa und haben eine gravimetrische Energiedichte von maximal $1,5 \frac{MJ}{kg}$ und eine volumetrische von maximal $1,9 \frac{MJ}{l}$. Sie gelten als Standard für Erdgas. Die nächste Generation der Druckspeicher besitzen ein außen liegendes Netz aus Kohlenstoff-Fasern im zylindrischen Bereich. Dadurch lässt sich der Druck auf bis zu 100 MPa erhöhen oder Gewicht sparen indem eine geringere Wandstärke des Stahls gewählt wird.¹⁵¹ Deren Haupteinsatz liegt im stationären Bereich. Bei Typ 3 Druckbehältern liegt das Kohlenstoff-Faser-Netz vollständig um den gesamten Stahlbehälter. Dadurch kann die Wandstärke des Metalls noch weiter runter gesetzt werden und die gravimetrische Energiedichte steigt auf bis zu $6,78 \frac{MJ}{kg}$ und die volumetrische auf maximal $3 \frac{MJ}{l}$.¹⁵² In Typ 4 Behälter ist der Innenbehälter nicht mehr aus Stahl sondern aus Kunststoff. Dadurch werden sie noch leichter, jedoch auch teurer. Die gravimetrische Energiedichte beträgt bei 35 MPa maximal $10,2 \frac{MJ}{kg}$ und die volumetrische $2,88 \frac{MJ}{l}$.¹⁵³ Bei 70 MPa Druck beträgt die maximal erreichbare gravimetrische Energiedichte nur $8,84 \frac{MJ}{kg}$ und die volumetrische dagegen $4,8 \frac{MJ}{l}$.

Bei niedriger (-40 °C) und Raumtemperatur ist die Zyklfestigkeit von Typ 4 Behältern ungefähr doppelt so hoch wie bei Typ 3 Behälter.¹⁵⁴ Man geht von einer Haltbarkeit von 45.000 Lastwechsel bei Typ 4 Behältern gegenüber 22.500 Zyklen bei Typ 3 Speichern aus. Aufgrund der strengen Vorschriften und hohen Qualitätsstandards gilt die Gefahr von Druckspeicher als sehr gering.

¹⁴⁹ vgl. (Rosen, 2017) S. 22

¹⁵⁰ vgl. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018) S. 118

¹⁵¹ vgl. (Rosen, 2017) S. 22

¹⁵² vgl. (Luxfer Gas Cylinders, 2023)

¹⁵³ vgl. (Luxfer Gas Cylinders, 2023)

¹⁵⁴ vgl. (Tomioka, Kiguchi, Tamura, & Mitsuishi) S. 5

Die Kosten von 35 MPa Typ 3 Speicher liegen bei $11,11 \frac{\text{€}}{\text{MJ}}$ während bei 70 MPa Typ 4 Druckbehälter die Kosten mit $41,67 \frac{\text{€}}{\text{MJ}}$ deutlich höher liegen.¹⁵⁵ Da in Kraftfahrzeugen der Platz begrenzt ist, werden in diesen vorwiegend Typ 4 Druckspeicher genutzt. Dies ist bei dem hier behandelten Schiff nicht der Fall, weshalb hier aufgrund der Kosten auch Typ 3 Behälter in Betrachtung gezogen werden.

Aufgrund des hohen Drucks wird bei der Speicherung in Druckbehältern eine nennenswerte Menge an Energie benötigt. Diese ist physikalisch bedingt abhängig von der Höhe des Drucks, weshalb der Energieaufwand dementsprechend bei 70 MPa Druckspeicher höher ist als bei 35 MPa Speicher. Dies resultiert laut dem Fraunhofer Institut in einem Wirkungsgrad von ungefähr 80 % bei den Speichern mit höherem Druck und 90 % bei denen mit niedrigerem Druck.¹⁵⁶

Entgegen landläufiger Meinung stellt die Diffusion kein nennenswertes Problem bei Druckspeicher dar.¹⁵⁷ Jedoch kann bei falscher Materialwahl des Stahls in Typ 3 Behältern die Versprödung durch Wasserstoffeinlagerung im Metallgefüge ein Problem werden. Darum muss darauf geachtet werden, dass die Stähle austenitisch und nicht ferritisch sind. Auch Kupfer und Aluminium gelten als unproblematisch bei Wasserstoffkontakt.

Aufgrund der von der Geschwindigkeit des Tankvorgangs abhängigen einströmenden Enthalpie bei der Betankung steigt die Temperatur des Wasserstoffs und des Behälters.¹⁵⁸ Diese darf jedoch nicht über die gesetzlich vorgegebenen 85 °C steigen um die Entzündungsgefahr gering zu halten. Um eine breite Akzeptanz zu erreichen, sollte der Tankvorgang jedoch nicht zu lange dauern. Darum wird der Wasserstoff auf bis zu -40 °C vorkonditioniert. Dies ist in der Norm SAE J2601 geregelt. Sie regelt außerdem abhängig von weiteren Parametern wie der Außentemperatur, Kapazität und Ausgangsdrucks des Tanks die Druckerhöhungsrate, sowie den finalen Druck bei welchem der Tankvorgang endet. Dadurch wird eine hohe Sicherheit gewährleistet, welche jedoch mit hoher benötigter Komplexität der Steuerung des Tankvorgangs einhergeht.

5.2. Kryospeicher

Da die volumetrische Energiedichte von Wasserstoff sowohl von Druck als auch von Temperatur abhängig ist, ist eine weitere gängige Lösung die geringe Dichte zu umgehen mittels Temperaturanpassung. Die Dichte von flüssigem Wasserstoff liegt nochmals deutlich über der von komprimiertem Gas.¹⁵⁹ Die Betitelung dieser Speicherform nennt sich Liquid Hydrogen

¹⁵⁵ vgl. (Klell, Eichseder, & Trattner, 2018) S. 119

¹⁵⁶ vgl. (Röntzsch, Heubner, Schmidt, Mauermann, & Vogt, 2022) S. 15

¹⁵⁷ vgl. (Depken, 2022) S. 14

¹⁵⁸ vgl. (Mayer, 2020) S. 11 f.

¹⁵⁹ vgl. (Rosen, 2017) S. 18 f.

(LH₂). Um bei Wasserstoff den flüssigen Aggregatzustand zu erreichen wird bei Umgebungsdruck eine Temperatur von -253 °C (20 K) angestrebt. Dabei beträgt die Dichte des Wasserstoffs bis zu $71 \frac{kg}{m^3}$. Die Dichte von komprimierten Wasserstoff bei 70 MPa und Umgebungstemperatur von 15 °C liegt bei ungefähr $40 \frac{kg}{m^3}$ und ist damit deutlich niedriger. Für die gravimetrische und volumetrische Energiedichte muss jedoch noch der Speicher hinzugezählt werden. Dadurch sinkt diese auf $4,98 \frac{MJ}{kg}$ und $1,73 \frac{MJ}{l}$. Dies entspricht den besten Werten von ausgewählten Tanks einiger Firmen.¹⁶⁰

Die Lebensdauer von Kryotanks dieser Größe ist bisher noch nicht final gesichert und Teil der Forschung.¹⁶¹ Laut der niederländischen Firma „Cryoworld b.v.“ liegt die Lebensdauer über der von 70 MPa Druckspeicher.¹⁶² Durch die niedrigen Temperaturen besteht eine nicht zu vernachlässigende Gefahr.¹⁶³ Der Kontakt mit Flüssigkeiten dieser Temperaturen kann zu Gewebeschädigungen führen, die denen von Verbrennungen ähneln, weshalb es auch „Kaltverbrennung“ genannt wird. Da der Kontakt mit der Flüssigkeit technisch möglichst unmöglich gemacht wird, kommt es selten zu dieser Art Verletzung. Jedoch geht auch von den Rohren und anderen Metallteilen die Gefahr der Kaltverbrennung aus. Außerdem muss dafür gesorgt werden, dass zu keinem Zeitpunkt Verunreinigungen wie beispielsweise Luft in den Tank gelangen können. In Luft befindet sich Sauerstoff, welches bei diesen Temperaturen fest wird und explosiv mit flüssigem Wasserstoff reagiert.

Konkrete Kosten für Kryospeicher konnten im Laufe dieser Arbeit nicht ermittelt werden, da keine der Firmen die Anfragen beantwortet hat. Auch andere Quellen führten nicht zu aussagekräftigen Zahlen und zu widersprüchlichen Aussagen. So kosten Kryospeicher laut der Salzburger Aluminium Group (SAG Innovation GmbH) weniger als vergleichbare Druckspeicher.¹⁶⁴ Laut der Webseite fluessiggas1.de liegen die Kosten jedoch höher als die der vergleichbaren Druckspeicher.¹⁶⁵ Darum wird nachfolgend ein Preis zwischen Typ 3 und Typ 4 Druckspeicher angenommen.

Großanlagen benötigen zur Verflüssigung von Wasserstoff im besten Fall $40 \frac{MJ}{kg}$.¹⁶⁶ Kleinere Anlagen benötigen für diesen Prozess noch mehr Energie. Daraus folgt, dass der Wirkungsgrad im besten Fall 70 % beträgt. Dies deckt sich auch mit der Einschätzung des Fraunhofer

¹⁶⁰ vgl. (Cryo Diffusion SAS, 2017) & (Cryolor, 2023) & (Cryofab, 2019)

¹⁶¹ vgl. (Jorgensen, 2011)

¹⁶² vgl. (Derking, van der Togt, & Keezer, 2019) S. 7

¹⁶³ vgl. (Hamacher, 2017) S.47

¹⁶⁴ vgl. (Winklhofer & Stepan, 2022) S. 2

¹⁶⁵ vgl. (Bode, 2022)

¹⁶⁶ vgl. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018) S. 122

Instituts.¹⁶⁷ Aufgrund der großen Temperaturdifferenz zwischen des gekühlten Wasserstoffs und der Umgebungstemperatur erwärmt sich der Brennstoff auch mit der besten Isolierung gezwungenermaßen.¹⁶⁸ In Folge steigt der Druck innerhalb des Speichers und damit dieser nicht zu stark ansteigt, wird Wasserstoff mittels Ventil in die Umgebung ausgelassen. Dieser Effekt wird als „Boil-Off“ betitelt. In der Literatur wird ein Verlust von 0,3 % bis 3 % pro Tag genannt.¹⁶⁹ Dies deckt sich grob mit den Angaben von 0.25 % bis 4 % der Firmen die für die gravimetrische und volumetrische Energiedichten herangezogen wurden.¹⁷⁰

Aufgrund der Gefahr im Umgang mit tiefkalten Flüssigkeiten wird die Betankung durch Roboter wie in Abbildung 6 gezeigt durchgeführt.¹⁷¹ So wird vermieden, dass ein Mensch in Kontakt mit den Flüssigkeiten und flüssigkeitsgeführten Rohre kommt. Außerdem kann so besser sicher gestellt werden, dass keine Luft in das System gelangt, was sonst zu Explosionen führen könnte. Außerdem ist die Betankungsgeschwindigkeit auf $66 \frac{g}{s}$ begrenzt, um eine Funkenbildung zu vermeiden. Durch den technischen Fortschritt ist die vormalig langsame Betankung auf einem Niveau mit dem der Betankung von regulärem Treibstoff. Dies führt jedoch dazu, dass die Technik und in Folge die Betankung verhältnismäßig teuer ist.



Abbildung 6: Betankungsroboter¹⁷²

5.3. Kryodruckspeicher

Wie in den letzten beiden Unterkapiteln beschrieben, kann die volumetrische Energiedichte durch erhöhten Druck und niedriger Temperatur stark verbessert werden. Darum kam die Firma BMW (Bayerische Motoren Werke) auf die Idee einen aus beiden Techniken kombinierten Speicher zu entwickeln.¹⁷³ Diese Speicherform hat die Bezeichnung Cryo-compressed hydrogen (CCH₂).¹⁷⁴ BMW nutzte ein modifizierten Typ 3 Druckspeicher, welcher einen Druck von 35 MPa und einen Temperaturbereich von -235 °C bis 85 °C zulässt. Dadurch lässt er sich nicht nur im kombinierten Betrieb nutzen, sondern auch als reiner Druckspeicher. Wenn Wasserstoff auf 30 MPa komprimiert und -235 °C heruntergekühlt wird, erreicht es eine theoretische

¹⁶⁷ vgl. (Röntzsch, Heubner, Schmidt, Mauermann, & Vogt, 2022)

¹⁶⁸ vgl. (Mitzel & Friedrich, 2017) S.93

¹⁶⁹ vgl. (Klell, Eichseder, & Trattner, 2018) S. 126

¹⁷⁰ vgl. (Cryo Diffusion SAS, 2017) & (Cryolor, 2023) & (Cryofab, 2019)

¹⁷¹ vgl. (Geitmann, 2006) S. 111 f.

¹⁷² (DEMACO, kein Datum)

¹⁷³ vgl. (Stahl, et al., 2017) S. 1

¹⁷⁴ vgl. (Rosen, 2017) S. 20

Dichte von $80 \frac{kg}{m^3}$ und liegt damit über der von flüssigem Wasserstoff bei Umgebungsdruck. Diese Dichte ist aber aufgrund der Erwärmung beim Betankungsvorgang nicht erreichbar. Die maximal erreichbare Dichte von $72 \frac{kg}{m^3}$ wird nur mittels vorgekühlten Leitungen an der Tankstelle erreicht. Ohne Vorkonditionierung liegt damit die höchst erreichbare Speicherdichte bei $68 \frac{kg}{m^3}$. Da auch hier der restliche Speicher mit seinem kompletten Gewicht und Volumen hinzu kommt, liegt die gravimetrische Energiedichte bei $5,1 \frac{MJ}{kg}$ und die volumetrische bei $4,17 \frac{MJ}{l}$.¹⁷⁵

Da diese Art des Speichers bisher nur von wenigen Firmen genutzt wird, ist die Lebenserwartung noch nicht final gesichert. Jedoch gibt es schon Ergebnisse von BMW in welchen ermittelt wurde, dass der Speicher ungefähr 11.500 Zyklen im gemischten Betrieb aushält.¹⁷⁶ Dabei wurde der kombinierte Betrieb dreimal häufiger genutzt als der reine Druckbetrieb. Die Gefahren für den Menschen und die Umwelt sind beim kombinierten Betrieb aufgrund der niedrigen Temperaturen die gleichen wie beim reinen Kryobetrieb. Wenn ein reiner Druckbetrieb genutzt wird, liegen die gleichen Gefahren vor, wie beim normalen 35 MPa Druckspeicher.

Die Kosten für diesen Speicher können nur nach der Literatur angegeben werden, da diese noch nicht frei verkäuflich sind. Sie lagen 2011 bei $5,11 \frac{\$}{MJ}$.¹⁷⁷ Mit dem damaligen Umrechnungskurs von $1,39 \frac{\$}{\text{€}}$ entspricht dies $3,68 \frac{\text{€}}{MJ}$.¹⁷⁸ Nach dem arithmetischem Mittelwert des Umrechnungskurses von August 2022 bis August 2023 von $1,06 \frac{\$}{\text{€}}$ entspricht es $4,82 \frac{\text{€}}{MJ}$.¹⁷⁹ Für die nachfolgenden Bewertungen wird dieser als Grundlage genommen. Die Inflation wird aufgrund der mangelhaften Datenlage nicht beachtet.

Der Wirkungsgrad dieses Speichers liegt bei ungefähr 80 %.¹⁸⁰ Er liegt aufgrund der höheren Temperatur des Wasserstoffs über dem von einem reinen Kryospeicher. Durch die weitgehend Inkompressibilität von Flüssigkeiten wird folgend nur ein Bruchteil der Energie zur Erreichung des Drucks benötigt.¹⁸¹ Außer der höheren Energiedichte ist ein weiterer Vorteil des kombinierten Betriebs dass der „Boil-Off“ Effekt verringert wird. Dieser liegt bei diesem Speicher zwischen 0,9 % und 2,2 %.¹⁸²

¹⁷⁵ vgl. (Espinosa-Loza, Aceves, Ledesma-Orozco, Ross, & Weisberg, 2009) S. 8

¹⁷⁶ vgl. (Kunze & Kircher, 2012) S. 29

¹⁷⁷ vgl. (Paster, et al., 2011) S. 14539

¹⁷⁸ vgl. (Statista Research Department, 2023)

¹⁷⁹ vgl. ebd.

¹⁸⁰ vgl. (Röntzsch, Heubner, Schmidt, Mauermann, & Vogt, 2022) S. 15

¹⁸¹ vgl. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018) S. 125

¹⁸² vgl. (Kunze & Kircher, 2012) S. 11

Im kombinierten Betrieb ist die Komplexität des Tankvorgangs noch höher als bei der Kryobetankung, da zusätzlich zu den tiefen Temperaturen noch der hohe Druck kommt.¹⁸³ Es gelten hier alle Nachteile der Druckbetankung, wie die Erwärmung, zusätzlich zu denen der Kryobetankung. Durch die Temperaturerhöhung aufgrund der einströmenden Enthalpie steigt auch die Explosionsgefahr und wie vorangehend erwähnt sinkt die Dichte des Wasserstoffs. Um die Gefahr möglichst gering zu halten und den Speicher möglichst vollständig auszunutzen wird der Tankvorgang daher in mehreren Schritten durchgeführt, was dazu führt, dass die Vollbetankung vergleichsweise lange dauert.¹⁸⁴

5.4. Metallhydridspeicher

Im Metallhydridspeicher wird der Wasserstoff chemisch gespeichert.¹⁸⁵ Dies geschieht indem er sich anfangs auf der Oberfläche molekular anlagert. Im nächsten Schritt dissoziiert es, wodurch es in das Metall eindringen kann und sich in das Metallgitter einlagert. Der Vorgang findet gewöhnlich bei Drücken zwischen 0,1 MPa und 6 MPa statt. Während der Beladung wird Energie in Form von Wärme freigesetzt, während die Freisetzung des gespeicherten Wasserstoffs endotherm abläuft. Daraus folgt, dass bei der Entladung eine Wärmezufuhr benötigt wird. Je nach Material wird eine Temperatur bis 500 °C vorausgesetzt. Somit entstehen Wirkungsgradverluste bei Nutzung mit Brennstoffzellen, welche eine niedrigere Betriebstemperatur erreichen. Vorteilhaft an dieser Reaktion ist die daraus automatisch erzeugte Sicherheit, da bei einem Unfall ohne Brand kein unbeabsichtigtes entweichen des Wasserstoffs erfolgt. Ein weiterer Vorteil dieses Speichers ist der hohe Reinheitsgrad des Wasserstoffs, da mögliche Verunreinigungen im Speicher verbleiben. Aufgrund des benötigten Metalls ist das Gewicht und damit die gravimetrische Energiedichte relativ hoch. Bei käuflichen Speichern liegt diese im besten Fall bei $1,49 \frac{MJ}{kg}$.¹⁸⁶ Die volumetrische Energiedichte liegt bei diesem Speicher bei $3,68 \frac{MJ}{l}$, was nahe an dem idealen volumetrischen Speicher liegt, welcher sich bei $3,73 \frac{MJ}{l}$ befindet.¹⁸⁷ Bei diesem beträgt die gravimetrische Energiedichte $1,42 \frac{MJ}{kg}$. Trotz dessen dürfte der zweite Speicher in diesem Fall geeigneter sein, da dieser mit 2.000 Liter Wasserstoff, bei Umgebungsdruck und 0 °C, mehr als erstgenannter mit ungefähr 800 Liter Wasserstoff, bei gleichen Bedingungen, speichern kann. Jedoch entsprechen selbst 2.000 Liter nur 0,16 kg Wasserstoff. Daraus resultiert, dass viele dieser Speicher benötigt und zusammen geschlossen werden müssen.

¹⁸³ vgl. (Hamacher, 2017) S. 97

¹⁸⁴ vgl. (Kunze & Kircher, 2012) S. 14

¹⁸⁵ vgl. (Rosen, 2017) S. 13

¹⁸⁶ vgl. (Fuel Cell Store, kein Datum)

¹⁸⁷ vgl. (Fuel Cell Store, kein Datum)

Die Lebensdauer von Metallhydridspeicher wird auf 1.000 – 1.500 Zyklen beziffert.¹⁸⁸ Dies entspricht den Erkenntnissen aus der Forschung. Wie die Haltbarkeit im realen Betrieb unter ungünstigen Bedingungen sind, ist noch nicht gesichert und hängt auch vom verwendeten Material ab. Wie zuvor beschrieben ist die Gefahr ungewollten Austritts aufgrund der chemischen Voraussetzungen bei einem Unfall gering. Jedoch wird durch die benötigte Anzahl an Speichern die Komplexität erhöht und es entstehen aufgrund der Verbindungen mehr potentielle Fehlerquellen welche undicht werden könnten. Der Speicher muss außerdem gegen Hitzeeinwirkung gesichert werden, da ansonsten ungewollt Wasserstoff gelöst werden könnte, was den Druck stark ansteigen ließe, wodurch der Speicher bersten könnte.

Da auch hier keine Firma auf Anfragen bezüglich der Kosten antwortete, mussten Werte aus der Literatur für diese herangezogen werden. Für Magnesiumhydridspeicher liegen die Kosten bei 12.000 € für 2 kg Wasserstoff.¹⁸⁹ Umgerechnet ergibt dies $50 \frac{\text{€}}{\text{MJ}}$.

Der Wirkungsgrad des Speichers liegt laut dem Fraunhofer Institut zwischen 70 % und 85 %.¹⁹⁰ Dieser weite Bereich kann dadurch erklärt werden, dass der Wirkungsgrad davon abhängt mit welcher Brennstoffzelle der Speicher kombiniert wird. Je heißer die Brennstoffzelle betrieben wird, desto mehr der Abwärme kann genutzt werden und muss nicht gesondert erzeugt werden. Eine weitere Methode den Wirkungsgrad zu erhöhen ist Wärmeenergie, welche bei der Betankung auftritt, zu speichern und bei der Freisetzung zusätzlich als Heizung zu nutzen.¹⁹¹ Der „Boil-Off“ Effekt tritt bei dieser Speicherform nicht auf.

Aufgrund der chemischen Reaktion muss bei der Betankung für eine ausreichende Kühlung gesorgt werden.¹⁹² Auch die Geschwindigkeit ist aufgrund dieser chemischen Reaktion limitiert. Die durchschnittliche Geschwindigkeit beträgt $31,1 \frac{\text{gH}_2}{\text{s}}$. Gleichzeitig beträgt die abzuführende Wärmeleistung 544,25 kW, was ungefähr mit der abzuführenden Wärmeleistung eines Lamborghini Aventador S gleichgesetzt werden kann.¹⁹³

5.5. Adsorptionsspeicher

Eine weitere mögliche Speicherform ist die mittels Van-der-Waals-Kräfte den molekularen Wasserstoff an der Oberfläche zu binden.¹⁹⁴ Da diese Kräfte geringer sind als bei der chemischen Speicherung, wird weniger Energie zur Freisetzung benötigt. Dies führt jedoch auch dazu, dass die Speicherdichte bei Umgebungstemperatur gering ist. Um dem entgegen zu

¹⁸⁸ vgl. (Bolle, 2012) S. 33

¹⁸⁹ vgl. (Paukert, 2019) S. 62

¹⁹⁰ vgl. (Röntzsch, Heubner, Schmidt, Mauermann, & Vogt, 2022) S. 15

¹⁹¹ vgl. (Rosen, 2017) S. 13

¹⁹² vgl. ebd. S. 13 f.

¹⁹³ vgl. (Automobili Lamborghini S.p.A., kein Datum)

¹⁹⁴ vgl. (Rosen, 2017) S. 16

wirken wird der Speicher auf -196 °C gekühlt, was der Temperatur von flüssigem Stickstoff entspricht. Dies ist deutlich einfacher zu erreichen, als die Temperatur von flüssigem Wasserstoff. Außerdem werden Materialien mit einer möglichst großen Oberfläche genutzt. Die aussichtsreichsten Substanzen sind hochporöse Materialien auf Kunststoffbasis und metallorganische Rahmenstrukturen. Bisher befinden sich diese Speicher noch in der Entwicklungsphase, weshalb die Energiedichten auf Literaturangaben aus der Forschung basieren. Die beste gravimetrische Energiedichte wird mit einer metallorganischen Rahmenstruktur aus Zinkkomplexen mit Benzoldicarbonsäure (MOF-177) erreicht und liegt bei $9,36 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$.¹⁹⁵ Die volumetrische Energiedichte liegt bei diesem Material bei $4,08 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}$. Das volumetrisch beste Material ist ebenfalls eine metallorganische Struktur aus Benzoltricarboxylat (Cu-BTC) und hat eine volumetrische Energiedichte von $4,92 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}$. Dessen gravimetrische Energiedichte liegt dagegen deutlich niedriger bei $5,28 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$. Aufgrund der geringen Unterschiede bei der volumetrischen Energiedichte im Vergleich zu denen der gravimetrischen, werden nachfolgend die besseren Werte des MOF-177 Materials genutzt.

Da die geringfügig höhere Temperatur im Vergleich zum Kryospeicher für den Menschen kein gesteigertes Gefahrenpotential bedeutet, sind die Gefahren gleichwertig einzuschätzen. Im Bereich des Tankvorgangs muss die Gefahr jedoch höher eingeschätzt werden, da hier noch kein standardisiertes Verfahren vorliegt.

Auch die Kosten lassen sich nur aus der Literatur entnehmen. Sie hängen dabei stark von den Materialien ab. Bei Nutzung von Aktivkohle liegen sie bei sehr geringen $0,083 \frac{\text{€}}{\text{MJ}}$, während die Nutzung von Graphen zurzeit noch zu Kosten von $2.500 \frac{\text{€}}{\text{MJ}}$ führt.¹⁹⁶ Carbon Nanotubes führen zu Kosten von $166,67 \frac{\text{€}}{\text{MJ}}$ bis $666,67 \frac{\text{€}}{\text{MJ}}$. Diese Kosten könnten sich je nach Massenfertigung und Preisentwicklung der Materialien jedoch noch stark verändern.

Ein Vorteil von Adsorptionsspeicher liegt in dem relativ hohen Wirkungsgrad von 85% .¹⁹⁷ Dieser liegt wie oben beschrieben an den geringen Van-der-Waals-Kräften und der damit geringen benötigten Energie zur Freisetzung und Einspeicherung. Die größten Verluste treten aufgrund der benötigten niedrigen Temperaturen auf, welche jedoch technisch gesehen durch Nutzung von flüssigem Stickstoff einfach zu erreichen sind.

Aufgrund des geringen technologischen Reifegrads dieser Speichertechnik, gibt es auch zur Betankung noch keine umfassenden und aussagekräftigen Arbeiten. Die Werte zu den

¹⁹⁵ vgl. (Streppel, 2011) S. 105

¹⁹⁶ vgl. (Paukert, 2019) S. 63 f.

¹⁹⁷ vgl. (Röntzsch, Heubner, Schmidt, Mauermann, & Vogt, 2022) S. 15

Energiedichten wurden bei einem Druck von 2 MPa und bei -196 °C erreicht.¹⁹⁸ Dementsprechend müsste eine Tankanlage diesen Druck und diese Temperatur bereitstellen können, so dass die Komplexität der Tanktechnik leicht unterhalb der von Kryodruckspeicher liegen müsste.

5.6. Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)

Wasserstoff lässt sich mittels chemischer Reaktion nicht nur in Metallhydrid speichern, sondern auch in flüssige organische Verbindungen.¹⁹⁹ Diese Speicherform wird Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) genannt. Auch bei dieser Art der Speicherung wird Wärme während der Einlagerung freigesetzt und dementsprechend bei der Freisetzung des Wasserstoffs auch wieder benötigt. Im Gegensatz zum regulären flüssigen Treibstoff, wie beispielsweise Diesel oder Benzin, wird im Idealfall die Flüssigkeit nicht verbraucht und nur vom Wasserstoff getrennt. Es kann jedoch gleich wie die genannten Treibstoffe gelagert werden. Als Trägermaterial kommen viele unterschiedliche Materialien in Betracht. Beispielhaft seien die Energiedichten von vier Verbindungen in Tabelle 3 gezeigt. Wie man sieht, ist die vielversprechendste Lösung in Bezug auf die Energiedichte Decalin-Naphthalene-Hydrogen. Darum wird nachfolgend mit dessen Werten weiter gearbeitet. Bei all diesen Materialien kommt noch das Gewicht des benötigten Tanks hinzu. Dies ist aber verglichen mit dem Gewicht der Trägerflüssigkeit gering, wie in Kapitel 5.8 gezeigt wird.

| Name | Gravimetrische Energiedichte | | Volumetrische Energiedichte | |
|--|------------------------------|-----------------|-----------------------------|----------------|
| | | $\frac{MJ}{kg}$ | | $\frac{MJ}{l}$ |
| Cyclohexane-Benzene-Hydrogen ²⁰⁰ | 8,52 | $\frac{MJ}{kg}$ | 6,66 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Methylcyclohexane-Toluene-Hydrogen ²⁰¹ | 7,32 | $\frac{MJ}{kg}$ | 5,64 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Decalin-Naphthalene-Hydrogen ²⁰² | 8,64 | $\frac{MJ}{kg}$ | 7,79 | $\frac{MJ}{l}$ |
| N-Ethyldecylhydrocarbazole/N-Ethylcarbazole ²⁰³ | 6,96 | $\frac{MJ}{kg}$ | 5,69 | $\frac{MJ}{l}$ |

Tabelle 3: Energiedichten ausgewählter LOHC-Trägerstoffe

Da sich im Idealfall das Trägermaterial nicht abnutzt, gilt die Lebensdauer von LOHC als unbegrenzt.²⁰⁴ Die Gefahr ungewollten Austritts des Wasserstoffs ist sehr gering, da zu dessen

¹⁹⁸ vgl. (Streppel, 2011) S. 105

¹⁹⁹ vgl. (Sterner, et al., 2017) S. 423 f.

²⁰⁰ vgl. (Graetz, et al., 2013) S. 289

²⁰¹ vgl. ebd. S. 290

²⁰² vgl. (Graetz, et al., 2013) S. 292

²⁰³ vgl. ebd. S. 301

²⁰⁴ vgl. (Kurzweil & Dietlmeier, Elektrochemischer Speicher, 2018) S. 499

Freisetzung wie oben beschrieben genügend Wärme vorhanden sein muss.²⁰⁵ Es gilt das ähnliche Prinzip wie bei Metallhydridspeicher. Jedoch sind alle in Frage kommende Trägerstoffe sowohl für den Menschen, als auch für die Umwelt schädlich. Sie sind entweder giftig, gesundheitsgefährdend, wassergefährdend, leicht entzündlich oder sogar eine Kombination der zuvor genannten Gefahren.²⁰⁶ Die geringste Gefahr geht hierbei unter anderem von N-Ethylcarbazole aus.

Die Kosten von LOHC lassen sich nicht final ermitteln, da außer die Kosten für das Trägermaterial auch die Kosten der Befüllung mit Wasserstoff betrachtet werden müssen.²⁰⁷ Diese hängen aber von vielen Faktoren wie der Herstellung des Wasserstoffs und dem Wirkungsgrad und der Größe der Anlagen ab. Bei optimaler Auslegung liegen sie zwischen $0,033 \frac{\text{€}}{\text{MJ}}$ und $0,042 \frac{\text{€}}{\text{MJ}}$.

Der Wirkungsgrad wird vom Fraunhofer Institut auf 70 % beziffert.²⁰⁸ Dies kann aufgrund der ähnlichen chemischen Reaktion mit derselben Begründung wie beim Metallhydridspeicher erklärt werden.

Aufgrund des Aggregatzustands lassen sich LOHC ähnlich wie gängige Treibstoffe transportieren. Der Unterschied zu diesen besteht jedoch in der Notwendigkeit das leere Trägermaterial zuerst aus dem Tank zu extrahieren und dann das mit Wasserstoff versetzte Trägermaterial einzufüllen. Dies resultiert in einer geringfügig komplexeren Tankanlage im Vergleich zu Tankanlagen für Diesel oder Benzin.

²⁰⁵ vgl. (Sterner, et al., 2017) S. 424

²⁰⁶ vgl. (Paukert, 2019) S. 53

²⁰⁷ vgl. ebd. S. 61

²⁰⁸ vgl. (Röntzsch, Heubner, Schmidt, Mauermann, & Vogt, 2022) S. 15

5.7. Powerpaste

Die Powerpaste ist im Prinzip ein pastenförmiger Metallhydrid welches als Hauptbestandteil Magnesiumhydrid (MgH_2) nutzt.²⁰⁹ Dieses wird modifiziert, da herkömmliches Magnesiumhydrid bei Kontakt mit Wasser eine Passivierungsschicht bildet, welche die Reaktionsgeschwindigkeit verlangsamt. Die Powerpaste wird in Kartuschen wie in Abbildung 7 gezeigt geliefert und löst den Wasserstoff bei Kontakt mit Wasser.²¹⁰ Die gravimetrische Energiedichte liegt bei $12 \frac{MJ}{kg}$ während die volumetrische Energiedichte bei $14,25 \frac{MJ}{l}$ liegt.²¹¹



Abbildung 7: Kartusche mit PowerPaste²¹²

Das Fraunhofer Institut gibt eine Lebenserwartung von bis zu 5 Jahren an. Außerdem gilt die Powerpaste als ungiftige, nicht wassergefährdende und sichere Substanz. Einzig im ungewollten Kontakt mit Wasser besteht die Gefahr der nicht beabsichtigten Freisetzung von Wasserstoff. Dies stellt vor allem in geschlossenen Räumen eine Gefahr dar, da sich Wasserstoff im Freien schnell verflüchtigt.

Bisherige Kosten für die Powerpaste sind nicht einsehbar. Der langfristige Plan des Fraunhofer Instituts ist ein Preis von $2 \frac{€}{kg_{Powerpaste}}$ zu erreichen.²¹³ Dies ergibt umgerechnet $0,167 \frac{€}{MJ}$. Der Wirkungsgrad liegt bei 70 %.²¹⁴ Dabei sind jedoch nicht die Verluste der initialen Herstellung des Materials mit einberechnet. Wenn dieser mit einberechnet wird liegt der Wirkungsgrad zwischen 20 % und 30 %.²¹⁵

Da die Powerpaste in Kartuschen geliefert wird, umfasst der Betankungsvorgang nur ein Wechsel dieser Kartuschen. Somit wird keinerlei Tankanlage benötigt. Bei größeren Mengen könnte es sich als sinnvoll erweisen Hilfsmittel zum Transport dieser zu nutzen.

5.8. Metalltank

Ein Metalltank ist die ursprünglichste Variante einer Speicherform. Aufgrund des Materials und den Fertigungsmöglichkeiten können diese Speicher in nahezu jeder beliebigen Form und Größe gebaut werden. Allgemein kann gesagt werden, dass je größer ein Tank wird, desto besser wird das Verhältnis des Metallanteils gegenüber dem Tankvolumen. Jedoch gibt es

²⁰⁹ vgl. (Paukert, 2019) S. 30

²¹⁰ vgl. (Vogt & Heubner, 2022) S. 2

²¹¹ vgl. ebd. S. 6

²¹² ebd. S. 2

²¹³ vgl. ebd. S. 7

²¹⁴ vgl. (Röntzsch, Heubner, Schmidt, Mauermann, & Vogt, 2022) S. 15

²¹⁵ vgl. ebd. S. 34

auch hierbei Ausnahmen, wenn beispielsweise aufgrund des Eigengewicht dickeres Metall genutzt werden muss. Die Energiedichte hängt vom verwendeten Brennstoff ab, weshalb in diesem Fall anstelle der Energiedichte das Verhältnis zwischen Außenvolumen und Gewicht zum verfügbaren Tankvolumen dokumentiert wird. Die besten Werte werden bei einem 2.400 Liter Tank erreicht.²¹⁶

Die Lebensdauer hängt von der Nutzung, den Materialien und Brennstoffen ab. Bei regelmäßiger und ordnungsgemäßer Wartung bieten Metalltanks eine nahezu unbegrenzte Lebensdauer.²¹⁷ Vom Speicher selbst gehen keine besonderen Gefahren aus. Da diese Art der schon sehr lange gebaut wird, gibt es umfassende Standards und Normen, was den Umgang noch einmal sicherer gestaltet.

Kostentechnisch liegen die Tanks zwischen $2,29 \frac{\text{€}}{\text{l}_{\text{Tankvolumen}}}$ bis $12,68 \frac{\text{€}}{\text{l}_{\text{Tankvolumen}}}$.

Der einzige Verlust der bei diesen Speichern auftritt, ist der zur Beförderung des Brennstoffs zum Energiewandler. Diese Verluste hängen dementsprechend von der Energiedichte und Viskosität der Brennstoffe ab.

Die Betankung ist komplett standardisiert und unterscheidet sich nicht von herkömmlichen Tankstellen. Eine Ausnahme stellt die Betankung von LOHC dar, bei welcher zuerst das leere Trägermaterial abgepumpt werden muss.

5.9. Nickel-Mangan-Cobalt Batterie (NMC)

Zur Speicherung elektrischer Energie werden üblicherweise Batterien beziehungsweise Akkumulatoren genutzt.²¹⁸ Sie besitzen den Vorteil, der bedarfsgerechten schnellen Steuerung. Es gibt viele unterschiedliche Arten der Batterien, welche alle prinzipiell den gleichen Aufbau haben. Die Anschlüsse bestehen aus unterschiedlichen Materialien (Elektroden), welche durch einen Elektrolyten miteinander verbunden sind. Das entstehende Potenzial zwischen Elektrolyt und Elektroden entspricht dem Zellpotential. Beim Betrieb einer Batteriezelle erfolgt der Transfer von Elektronen über die Stromableiter in die Elektrodenmaterialien, sowohl ein- als auch auswärts. Während der elektrochemischen Reaktion verwandelt sich der Ladungsträger in ein Ion, das durch den Elektrolyten, der als Isolator für den elektronischen Strom fungiert, zur anderen Elektrode wandert. Dort wird in einer Gegenreaktion der Ladungsträger wieder in Form eines Elektrons freigesetzt und ausgeliefert. Um die aktiven Materialien voneinander zu isolieren, wird zwischen den Elektroden ein Separator platziert. Der Elektrolyt kann in flüssiger oder fester Form vorliegen, wobei der spezifische Widerstand des Elektrolyten in den meisten

²¹⁶ vgl. (DENIOS SE, kein Datum)

²¹⁷ vgl. (RENEWA GmbH, kein Datum)

²¹⁸ vgl. (Kowal, 2015) S. 52 f.

Batterien für den ionischen Strom deutlich größer ist als der Widerstand in den aktiven Materialien und den elektrischen Leitern für den elektronischen Strom. Daher nimmt die Leistungsfähigkeit der meisten Batterien bei sinkenden Temperaturen und damit einer verringerten Ionenleitfähigkeit ab. Eine einzelne Zelle besitzt dabei selten genügend Kapazität oder Leistung, weswegen diese untereinander zusammen geschlossen werden. Je nachdem ob die Zellen seriell oder parallel angeschlossen werden entstehen unterschiedliche Verbesserungen.

In dieser Arbeit wird besonders auf die Nickel-Mangan-Cobalt Batterie eingegangen, da für diese Art der Batterie schon ein Angebot der Firma „Torqeedo“ vorliegt und sie zu den meist genutzten Akkumulatoren zählt. Sie gehört zu den Lithiumionen-Batterien. Diese Art der Batterien wird aufgrund des Kompromisses aus Sicherheit, Energiedichte und Preis in vielen Elektroautos eingesetzt.²¹⁹ Es gibt zwar andere Lithiumionen-Speicher mit höherer Speicherdichte, spezifischer Leistung, Lebensdauer, Sicherheit oder geringerem Preis aber zum Zeitpunkt dieser Arbeit gehört sie noch zu den besten Kompromissen.²²⁰ Die maximal erreichbare gravimetrische Energiedichte liegt bei $0,65 \frac{MJ}{kg}$. Der Akkumulator des Angebots erreicht jedoch nur eine gravimetrische Energiedichte von $0,415 \frac{MJ}{kg}$.²²¹ Dies kann dadurch erklärt werden, dass manche Anbauteile dazu zählen und dass aufgrund des Packagings Kompromisse beim Gehäuse eingegangen wurde. Die volumetrische Energiedichte liegt bei $0,52 \frac{MJ}{l}$.

Bei Batterien wird in zyklischer und kalendarischer Alterung unterschieden.²²² Beide sind unabhängig voneinander. Ein großer Einflussfaktor bei beiden Altersmechanismen ist die Temperatur. Die kalendarische Alterung ist zudem abhängig vom Ladezustand während der Lagerung während die zyklische Alterung stark abhängig von der abgerufenen Leistung, der sogenannten C-Rate, ist. Ab Herstellung der Batterie beginnt diese zu altern und verliert dementsprechend sofort Kapazität. Die Lebensdauer muss dementsprechend definiert werden. Standardmäßig wird häufig zwischen 70 % und 80 % der ursprünglichen Kapazität angegeben. Im Median erreichen NMC-Batterien nach 4.000 Zyklen 80 % ihrer Kapazität.²²³ Bei ungünstigen Lagerbedingungen kann die Kapazität schon nach 30 Wochen unter 80 % fallen.²²⁴ Sofern die Temperatur während der Lagerung niedrig gehalten wird, kann aber von einer Haltbarkeit bis zu 15 Jahren ausgegangen werden.²²⁵ Torqeedo gibt im Angebot eine Garantie von 4,5 Jahre

²¹⁹ vgl. (Doppelbauer, 2020) S. 155

²²⁰ vgl. (Kurzweil, Angewandte Elektrochemie, 2020) S. 144

²²¹ vgl. (Torqeedo, 2021) S. 6

²²² vgl. (Lando, 2020) S. 23 f.

²²³ vgl. (Baumann, Peters, & Weil, 2018) S. 3

²²⁴ vgl. (Lando, 2020) S. 157

²²⁵ vgl. (Baumann, Peters, & Weil, 2018) S. 3

darauf, dass die Batterie bei jährlicher Wartung noch über 80 % der Kapazität besitzt.²²⁶ Auf ihrer Webseite werben sie sogar mit 9 Jahren Haltbarkeit bei privater Nutzung.²²⁷

NMC-Batterien haben ein relativ kleines Arbeitsfenster, welches nicht verlassen werden sollte.²²⁸ Wenn die Temperatur zu stark steigt, die Batterie überladen wird oder bei zu niedrigen Temperaturen zu schnell geladen wird, besteht die Gefahr des Überhitzens. Eine zu hohe Zelltemperatur führt zu Zersetzungsreaktionen, welche weitere Wärme freisetzen. Dieser Prozess wird als thermisches Durchgehen bezeichnet und sorgt dafür, dass ein sehr schwer zu löschender Brand mit giftigem Rauch entsteht. Darum muss mittels Lade- und Zustandsüberwachung verlässlich darauf geachtet werden dass der Arbeitsbereich nicht verlassen wird. Diese Arbeit übernimmt das Batteriemanagementsystem (BMS) und ist inzwischen Bestandteil jeder großen Batterie.

Die Preise für NMC-Akkumulatoren liegen zwischen $53,33 \frac{\text{€}}{\text{MJ}}$ und $153,89 \frac{\text{€}}{\text{MJ}}$ und im Median bei $88,33 \frac{\text{€}}{\text{MJ}}$. Das Angebot von Torqeedo liegt zwischen 330.000 € und 340.000 € bei einer Batteriekapazität von 88,88 MJ.²²⁹ Dieser Preis liegt natürlich deutlich über dem der Preise aus der Literatur, da hierbei auch alle weiteren benötigten Bauteile wie beispielsweise die Elektromotoren und Inverter dazu zählen. Der Wirkungsgrad von Lithiumionen Batterien auf Nickel-Mangan-Cobalt Basis kann von 83 % bis 97,2 % variieren.²³⁰ Im Median liegt er bei 93,8 %, was im Mittelfeld der gängigen Lithiumionen Batterien liegt.

Das Laden des Akkumulators benötigt keine aufwändige Technik und im Angebot von Torqeedo sind außerdem zwei 22 kW Ladegeräte mit eingeschlossen. Für diese wird der Anschluss an ein dreiphasigen Drehstromanschluss benötigt, welches am Anlegeplatz bereitgestellt werden muss. Das vollständige Aufladen der Batterie von 0 % bis 100 % benötigt mit diesen Ladegeräten mindestens 8 Stunden.

²²⁶ vgl. (Torqeedo, 2021) S. 14

²²⁷ vgl. (Torqeedo, kein Datum)

²²⁸ vgl. (Saupe) S. 3

²²⁹ vgl. (Torqeedo, 2021) S. 1

²³⁰ vgl. (Baumann, Peters, & Weil, 2018) S. 3

6. Energiewandler

Die Energiewandler sind unterteilt in Brennstoffzellensysteme, Verbrennungs- und Elektromotoren. Zu beachten ist, dass alle Brennstoffzellen auch einen Elektromotor benötigen.

Jeder der Energiewandler wird beschrieben und folgende Eigenschaften deklariert:

- Gewicht
- Volumen
- Leistungsspektrum
- Betriebsdynamik
- Lebensdauer
- Anschaffungskosten
- Technology Readiness
- Lokale CO₂ Emissionen
- Sonstige lokale Emissionen
- Wirkungsgrad

Für jede dieser Eigenschaften ist eine Gewichtung in der Bewertungsmatrix vorgesehen. Dem Gewicht, Volumen, Leistungsspektrum und der Betriebsdynamik werden die geringsten Prioritäten zugewiesen, während der Lebensdauer, Anschaffungskosten und Technology Readiness hohe Priorität eingeräumt werden.

Die Eigenschaften werden im Anhang A3: Eigenschaften der Energiewandler in Tabellenform zusammengefasst. Nachfolgend ist die Bewertungsmatrix in Tabelle 4 zu sehen.

| | | Energiewandler | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------------------|-----------------|-----------------------|---------------|--------|----------------------|------------------------|--------------------|-------------------|--------------|--------------|
| | | Brennstoffzellen | | | | | | | | Verbrennungsmotor | | Elektromotor |
| Eigenschaften | Gew. | LT-PEM | Alkalisch (AFC) | Direktmethanol (DMFC) | Direktethanol | HT-PEM | Phosphorsäure (PAFC) | Schmelzkarbonat (MCFC) | Oxidkeramik (SOFC) | Fremdzünder | Selbstzünder | |
| Gewicht | 1 | 9 | 10 | 1 | 1 | 8 | 3 | 2 | 6 | 5 | 4 | 7 |
| Volumen | 1 | 8 | 10 | 3 | 1 | 9 | 5 | 4 | 6 | 2 | 3 | 7 |
| Leistungsspektrum | 1 | 10 | 10 | 1 | 1 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Betriebsdynamik | 1 | 8 | 8 | 7 | 7 | 5 | 8 | 6 | 2 | 9 | 9 | 10 |
| Lebensdauer | 3 | 8 | 6 | 2 | 4 | 5 | 10 | 9 | 7 | 2 | 3 | 7 |
| Anschaffungskosten | 3 | 6 | 8 | 1 | 1 | 5 | 3 | 2 | 4 | 10 | 7 | 9 |
| Technology Readiness | 3 | 10 | 10 | 10 | 1 | 8 | 10 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 |
| Lokale CO ₂ Emissionen | 2 | 10 | 10 | 3 | 3 | 10 | 10 | 10 | 10 | 2 | 1 | 10 |
| Sonstige lokale Emissionen | 2 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 1 | 1 | 10 |
| Wirkungsgrad | 2 | 8 | 9 | 1 | 3 | 6 | 4 | 5 | 7 | 1 | 2 | 10 |
| Gesamt in % | | 86% | 88% | 42% | 32% | 72% | 75% | 68% | 66% | 53% | 49% | 91% |

Legende: grün = mehrere wissenschaftliche Quellen; gelb = Einzelquellen/nicht wissenschaftlich bestätigte Quellen; rot = kaum/keine wissenschaftlichen Quellen

Tabelle 4: Bewertungsmatrix Energiewandler

6.1. Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind vom Prinzip her umgedrehte Elektrolyseure. Dementsprechend wandeln sie die chemische Energie der Brennstoffe in elektrische Energie um.²³¹ Im Allgemeinen wird dazu Wasserstoff direkt in Elektrizität umgewandelt, was anfangs als stille oder kalte Verbrennung bezeichnet wurde. Eine Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden und einem dazwischen liegender fester oder flüssiger Elektrolyt. Im einfachsten Fall bestehen die Elektroden aus Platinblechen. Der Sauerstoff wird über die Kathode (Plus-Pol) hinzugeführt und der Wasserstoff über die Anode (Minus-Pol). Dabei findet die Reduktion (Elektronenaufnahme) an der Kathode und die Oxidation (Elektronenabgabe) an der Anode statt. Dieses grundlegende Schema ist nachfolgend in Abbildung 8 dargestellt.

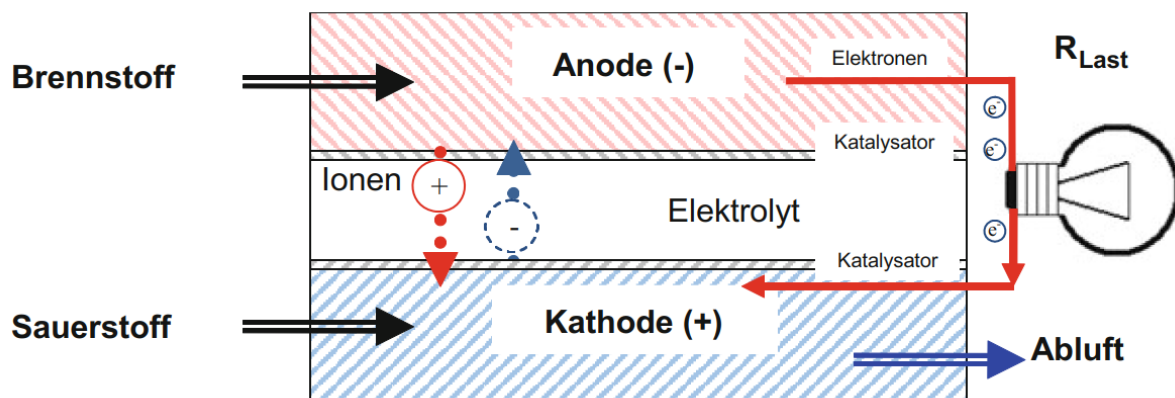


Abbildung 8: Grundlegender Ablauf Brennstoffzelle²³²

Außer Wasserstoff lassen sich auch fossile Vorstufen davon nutzen.²³³ Je nach genutztem Brennstoff werden jedoch Temperaturen über 200 °C benötigt, da die elektrochemische Oxidation zu träge sein kann. Als Oxidationsmittel wird hauptsächlich Sauerstoff genutzt. Dieser kann bei den meisten Typen aus der Luft bezogen werden. Theoretisch möglich wäre aber auch Chlor. Das freigesetzte Wasser wird je nach eingesetztem Elektrolyt an der Anode oder Kathode gebildet. Dessen Ausschleusung ist in der Praxis nicht trivial. In diesem Prozess ist ein gewisser Anteil Verlustwärme unvermeidbar.²³⁴ Elektronen- und Ionenleiter haben einen elektrischen Widerstand, und die chemische Reaktion erfordert Aktivierungsenergie an den Elektroden. Dies führt dazu, dass der chemische Energieinhalt des Brennstoffs teilweise in elektrische Energie und Wärme umgewandelt wird. Normalerweise ist der Nennarbeitspunkt einer Brennstoffzelle so ausgelegt, dass 50 % der chemischen Energie in elektrische Energie umgewandelt wird, während der Rest als Wärme abgegeben wird. Dieser Wirkungsgrad von

²³¹ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 2 f.

²³² (Lehmann & Luschtinetz, 2014) S. 27

²³³ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 6

²³⁴ vgl. (Lehmann & Luschtinetz, 2014) S. 28

50 % verbessert sich, wenn die Brennstoffzelle bei geringerer Leistung betrieben wird, beispielsweise bei Teillast. In einer Brennstoffzelle entstehen, ähnlich wie in einem Verbrennungsmotor, Abgasprodukte, die kontinuierlich abgeführt werden müssen. Bei der Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff entsteht lediglich Wasserdampf, was die sauberste Form der kraftstoffbasierten Mobilität darstellt. Bei anderen Brennstoffen wie Ethanol und Erdgas, die Kohlenstoff enthalten, fällt mindestens Kohlendioxid an. Im Vergleich zu Verbrennungsmotoren fehlen in den Abgasen von Brennstoffzellen aufgrund der niedrigeren Betriebstemperaturen normalerweise Stickoxide.

Eine einzelne Brennstoffzelle erzeugt nur wenig Leistung, weshalb sie zu Brennstoffzellenstacks geschaltet werden.²³⁵ Zusätzlich werden weitere Komponenten für den effizienten Betrieb benötigt. So muss für eine geeignete Brenngaszufuhr gesorgt werden, da beispielsweise Wasserstoff aus einem 70 MPa Speicher einen zu hohen Druck für den Betrieb aufweist. Auch die Luftversorgung muss kontrolliert erfolgen und wird mittels Kompressor zugeführt. Es wird ein Membranbefeuchter benötigt, da diese ansonsten zu trocken werden. Aufgrund der Wärmeentwicklung wird außerdem eine Kühlung benötigt. Da die manuelle Steuerung einer Brennstoffzelle sehr arbeitsaufwändig wäre, sind für diese Aufgabe ebenfalls gesonderte Systeme notwendig. Nachfolgend ist in Abbildung 9 ein gesamtes Brennstoffzellensystem schematisch dargestellt.

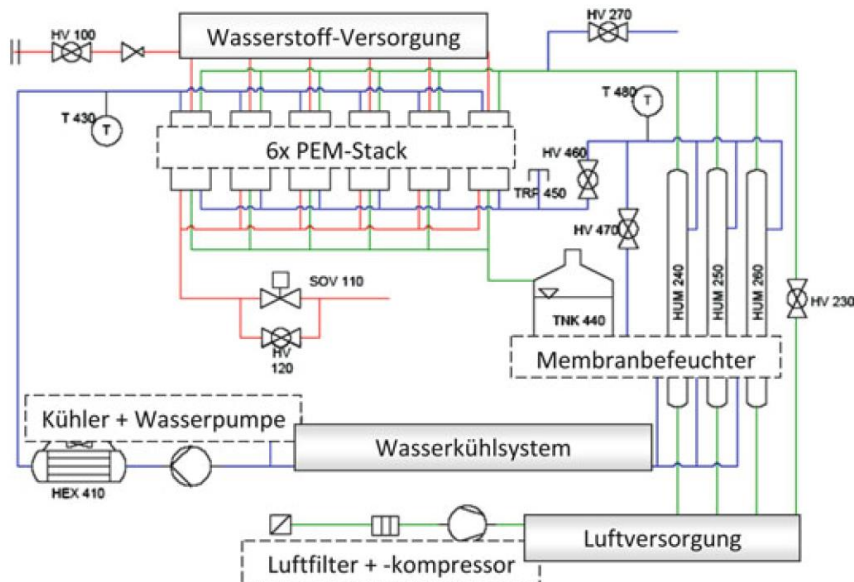


Abbildung 9: Brennstoffzellensystem mit notwendigen Zusatzkomponenten²³⁶

Um anstelle von Wasserstoff andere Brennstoffe nehmen zu können werden Reformer genutzt.²³⁷ Diese Reformierung kann mittels Dampfreformierung für leichte Kohlenwasserstoffe,

²³⁵ vgl. (Lehmann & Lushtinetz, 2014) S. 37 ff.

²³⁶ vgl. ebd. S. 38

²³⁷ vgl. (Klell, Eichseder, & Trattner, 2018) S. 91 f.

partieller Oxidation für schwere Kohlenwasserstoffe oder mittels autothermer Reformierung welche beide Techniken kombiniert durchgeführt werden. Die Dampfreformierung ist ein endothermer Prozess, welcher bei Temperaturen zwischen 700 °C und 900 °C und Drücken zwischen 2 MPa bis 4 MPa stattfindet.²³⁸ Sie erreicht Wirkungsgrade von 75 % bis 80 %. Bei der partiellen Oxidation sind Temperaturen zwischen 600 °C und 850 °C notwendig.²³⁹ Deren Prozess ist exotherm, erreicht Wirkungsgrade von bis zu 70 % und kann Wasserstoff auch aus Kohle extrahieren. Die autotherme Reformierung kombiniert beide Techniken, verläuft leicht endotherm und ist mit 850 °C bei höheren Temperaturen als die anderen Reformierungen.²⁴⁰ Aufgrund der dadurch höheren Stickoxidanzahl ist eine aufwändigere Reinigung der Abgase nötig.

Die Brennstoffzellen können nach Temperatur in Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturbrennstoffzellen eingeteilt werden.²⁴¹ Der Name der Brennstoffzellen wird vom verwendeten Elektrolyt abhängig gemacht. Auf die gängigen Typen wird nachfolgend in den Unterkapitel genauer eingegangen.

6.1.1. Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEM)

Die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle ist im mobilen Antriebsbereich die am meisten genutzte Brennstoffzelle.²⁴² Diese Brennstoffzellen können sowohl bei 70 °C – 80 °C und bei 120 °C – 180 °C betrieben werden.²⁴³ Die bei höheren Temperaturen betriebene Variante wird missverständlich als Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (HT-PEM) und die Niedertemperaturbrennstoffzelle als Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (LT-PEM) bezeichnet, obwohl beide zu den Niedertemperatur-Brennstoffzellen gehören. Bei beiden besteht das Elektrolyt aus Polymermembranen, jedoch ist die genaue Zusammenstellung unter anderem abhängig von der Betriebstemperatur. Für beide Typen gilt die gleiche Zellreaktion, welche in Abbildung 10 dargestellt ist. Die LT-PEMs haben den Nachteil, dass deren Platin empfindlich auf Kohlenmonoxid (CO) reagiert, was die Lebensdauer verkürzt. Ebenfalls ist die benötigte Befeuchtung ein Nachteil, da dadurch das Gesamtsystem komplexer wird. Beide Nachteile sind bei der HT-PEM nicht vorhanden, dafür hat diese den Nachteil der geringeren Leistungsdichte und dass deren technologische Reife noch nicht auf demselben Level ist.

²³⁸ vgl. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018) S. 92 f.

²³⁹ vgl. ebd. S. 94

²⁴⁰ vgl. ebd. S. 95

²⁴¹ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 5

²⁴² vgl. ebd. S. 14

²⁴³ vgl. ebd. S. 78 ff.

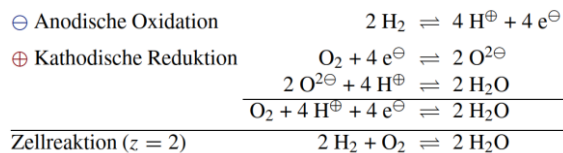


Abbildung 10: PEM Zellreaktion²⁴⁴

Die Firma Ballard bietet für eine LT-PEM eine gravimetrische Leistungsdichte von $4,7 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ und eine volumetrische Leistungsdichte von $4,3 \frac{\text{kW}}{\text{l}}$ an,²⁴⁵ während die Literatur für die gravimetrische Leistungsdichte nur Werte von $1 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ angibt.²⁴⁶ Da die Brennstoffzelle von Ballard schon verfügbar ist und deren Werte besser sind, wird mit diesen weiter gearbeitet. Für HT-PEMs wird eine gravimetrische Leistungsdichte von $0,16 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ und eine volumetrische von $0,22 \frac{\text{kW}}{\text{l}}$ angegeben.²⁴⁷ Diese Werte basieren aber auf einer kleinen Brennstoffzelle und aus dem Jahr 2008. In der Arbeit wurde davon ausgegangen, dass die Werte für größere HT-PEMs schon im Jahr 2010 mit $0,77 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ und $1,25 \frac{\text{kW}}{\text{l}}$ stark erhöht sein werden. Nachfolgend wird mit den besseren Werten weiter gearbeitet. Das Leistungsspektrum der LT-PEMs liegt zwischen 5 kW und 250 kW²⁴⁸ und HT-PEMs können bis 100 kW leisten.²⁴⁹

Der Wirkungsgrad der kühleren Brennstoffzelle liegt zwischen 50 % und 68 %, ²⁵⁰ während der der höher temperierten bei ungefähr 60 % liegt.²⁵¹ Die Lebensdauer ist noch Bestandteil aktueller Forschung. Bisher werden beim stationären Betrieb von LT-PEMs bis zu 40.000 h erreicht, während beim dynamischen Betrieb in Bussen bis zu 20.000 h erreicht werden.²⁵² Auch bei Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran Brennstoffzellen kann noch keine endgültige Aussage getroffen werden. Forschungen lassen darauf schließen, dass ebenfalls eine Lebensdauer von 20.000 h erreicht werden kann.²⁵³ Die Kosten unterscheiden sich wiederum sehr. Bei LT-PEM liegen sie bei $800 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$,²⁵⁴ während die der HT-PEM zwischen $2026 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$ und $2770 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$ liegen.²⁵⁵

²⁴⁴ vgl. ebd. S. 78

²⁴⁵ vgl. (Ballard Power Systems, Inc.)

²⁴⁶ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 78

²⁴⁷ vgl. (Reiche, et al., 2008) S. 79

²⁴⁸ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 79

²⁴⁹ vgl. (Araya, 2012) S. 5

²⁵⁰ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 79

²⁵¹ vgl. (Araya, 2012) S. 5

²⁵² vgl. (Neugebauer, 2022) (Groos, Cremers, & Nusch, 2022) S. 273

²⁵³ vgl. (Oono, Sounai, & Hori, 2013) S. 88

²⁵⁴ vgl. (Siebel, 2022)

²⁵⁵ vgl. (Mamaghani, Najafi, Casalegno, & Rinaldi, 2016)

6.1.2. Alkalische Brennstoffzelle (AFC)

Die alkalische Brennstoffzelle, auch bekannt als AFC, gehört zu den Niedertemperatur-Brennstoffzellen.²⁵⁶ Ursprünglich wurde die AFC in der Raumfahrt während der Apollo-Missionen und in den US Space-Shuttles eingesetzt. In der AFC wird üblicherweise eine wässrige Kaliumhydroxid-Lösung (KOH-Lösung) als Elektrolyt verwendet, da dieser Elektrolyt OH-Ionen leitet. Diese Ionen entstehen an der Kathode und bewegen sich durch den Elektrolyten zur Anodenseite, wo sie mit Wasserstoff Wasser und Elektronen bilden. Es gibt zwei Bauarten der AFC: die mobile und die immobile Variante. Bei der mobilen Variante liegt der Elektrolyt in flüssiger Form vor und muss in einem Kreislauf zirkulieren, wodurch gleichzeitig die Prozesswärme abgeführt werden kann. Bei der immobilen Bauweise wird die KOH-Lösung in einem saugfähigen Material (Matrix) gespeichert und zwischen den Elektroden gehalten, wobei darauf geachtet wird, dass keine KOH austritt. Wasserstoff wird als Brennstoff an die Anode geführt, während reiner Sauerstoff an die Kathode zugeführt werden muss, da der hohe CO₂-Gehalt in der Atmosphäre zur Bildung von Karbonaten führt und die Porenstruktur der Gasdiffusionsschicht und der Elektrode verstopfen kann. Ein Teil des während der Reaktion erzeugten Wassers an der Anodenseite wird zur Kathode übertragen, da diese Reaktion Wasser erfordert.

Die gravimetrische und volumetrische Leistungsdichte der alkalischen Brennstoffzelle ist die höchste aller Brennstoffzellen, kann jedoch aufgrund fehlender Informationen nicht exakt beziffert werden.²⁵⁷ Das Leistungsspektrum liegt zwischen 5 kW und 150 kW.²⁵⁸ Mit 70 % Wirkungsgrad bei reinem Sauerstoffbetrieb ist sie außerdem eine der effizientesten Brennstoffzellen.²⁵⁹ Bei Luftbetrieb liegt er jedoch nur bei 55 %. Ein weiteres Problem beim Luftbetrieb ist die drastisch verkürzte Lebensdauer von maximal einem Jahr aufgrund Korrosionsprobleme.²⁶⁰ Sollte reiner Sauerstoff genutzt werden wird die Lebensdauer auf 15.000 h beziffert. Nachfolgend werden jedoch die schlechteren Werte des Luftbetriebs genommen, da ein reiner Sauerstoffbetrieb zu aufwändig für diesen Anwendungsfall wäre. Die Kosten werden auf ungefähr $160 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$ beziffert.²⁶¹

²⁵⁶ vgl. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018) S. 155

²⁵⁷ vgl. (Noreikat, 2015) S. 112

²⁵⁸ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 55

²⁵⁹ vgl. (Mitzel & Friedrich, 2017) S. 16

²⁶⁰ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 54 f.

²⁶¹ vgl. (Tomantschger, McClusky, Oporto, & Reid, 1986)

6.1.3. Direkt Methanol Brennstoffzelle (DMFC)

Um den wirkungsgradmindernden Schritt der Reformierung zu umgehen wird seit den 1959er Jahren an einer Direktverstromung alkoholischer Brennstoffe geforscht.²⁶² Die Direkt Methanol Brennstoffzelle (DMFC) basiert dabei auf der LT-PEM-Brennstoffzelle, welche mit flüssigen oder verdampften Methanol betrieben wird. Methanol wird genutzt, da es der elektrochemisch aktivste organische Brennstoff ist, dabei eine hohe Energiedichte besitzt und relativ ungefährlich ist. Die DMFC erreicht einen geringeren Wirkungsgrad und Leistungsdichte als die Wasserstoff PEM Brennstoffzelle, benötigt im Gegensatz zu dieser jedoch keinen Reformierer, Gasbefeuchter oder Luftkühler. Nachteile sind außerdem, dass die Dosierung des Wasser-Methanol-Gemisches präzise durchgeführt werden muss und die Vergiftung des Elektrokatalysators durch Zwischenprodukte der Methanoloxidation unterbunden wird. Ebenfalls muss der Methanoltransport von der Anode zur Kathode unterbunden werden. In Abbildung 11 ist die Zellreaktion ersichtlich.

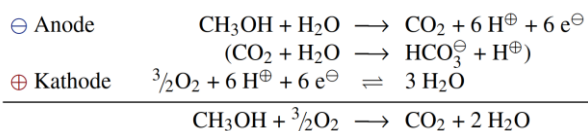


Abbildung 11: DMFC Zellreaktion²⁶³

Die gravimetrische Leistungsdichte liegt bei Forschungszellen bei bis zu $0,15 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$.²⁶⁴ Brennstoffzellen aus der Praxis erreichen dagegen maximal $0,022 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ und volumetrisch $0,015 \frac{\text{kW}}{\text{l}}$.²⁶⁵ Das Leistungsspektrum von DMFC liegt zwischen wenigen Watt im Kleingerätebereich bis hin zu 5 Kilowatt als Ersatz für herkömmliche diesel- oder benzinbetriebene Stromaggregate.²⁶⁶ Der elektrische Wirkungsgrad liegt zwischen 20 % und 30 %. Auch die geforderte Lebensdauer von 3.000 h für den mobilen und 40.000 h für den stationären Betrieb wurde bislang noch nicht erreicht.²⁶⁷ Preislich gehören DMFC zu den teuren Brennstoffzellen in Bezug auf die abgegebene Leistung. Die Literatur nennt Preise von $7.800 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$ bis $20.000 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$ je nach zu produzierender Stückzahl.²⁶⁸ Beim Onlineshop „Conrad“ ist eine 40 Watt Direkt Methanol Brennstoffzelle für ungefähr 3.200 € erhältlich.²⁶⁹ Daraus resultiert ein noch höherer Preis von $80.000 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$. Mit diesem wird nachfolgend auch weiter gearbeitet, da dieser dem aktuellen Markt entspricht.

²⁶² vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 145 f.

²⁶³ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 146

²⁶⁴ vgl. (Nölke, 2006) S. 15

²⁶⁵ vgl. ebd. S. 22

²⁶⁶ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 146

²⁶⁷ vgl. ebd. S. 158

²⁶⁸ vgl. (Werhahn, 2008) S. 146

²⁶⁹ vgl. (Conrad, kein Datum)

6.1.4. Direkt Ethanol Brennstoffzelle (DEFC)

Auch die Direkt Ethanol Brennstoffzelle (DEFC) arbeitet wie die DMFC nach dem Prinzip der LT-PEM.²⁷⁰ Die Zellreaktion ist in Abbildung 12 zu sehen. Aufgrund der trägeren Reaktion des Ethanols im Vergleich zum Methanol benötigt diese Brennstoffzelle höhere Temperaturen bis 90 °C.²⁷¹ Daraus resultiert, dass das Ethanol gasförmig zugegeben wird und dass die Leistungsdichte geringer ausfällt als bei der DMFC. An diesem Typ der Brennstoffzellen wird bisher noch geforscht und ihr technologischer Reifegrad ist dementsprechend niedrig.

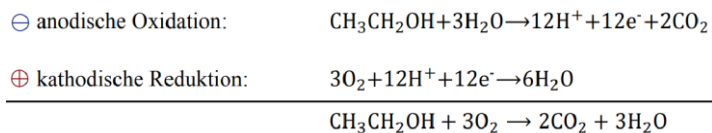


Abbildung 12: DEFC Zellreaktion²⁷²

Anhand eines Forschungskits für Schulen von der Webseite „horizonteducational.com“ kann die gravimetrische Leistungsdichte auf $0,0002 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ bis $0,001 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ geschätzt werden.²⁷³ Dabei wird von einer Leistung des Kits zwischen 1 Watt und 6 Watt ausgegangen. Die volumetrische Leistungsdichte wird hierbei aufgrund des Forschungskits auf ein ähnliches Niveau von $0,0002 \frac{\text{kW}}{\text{l}}$ bis $0,001 \frac{\text{kW}}{\text{l}}$ geschätzt. Das Leistungsspektrum der DEFCs liegt von wenigen Watt wie beispielsweise beim vorher erwähnten Kit bis zu 2 Kilowatt.²⁷⁴

Der Wirkungsgrad liegt bisher rechnerisch bei bis zu 43 %.²⁷⁵ Bei der Lebensdauer wurden Werte bis 3.700 h erreicht.²⁷⁶ Aufgrund des niedrigen technologischen Reifegrads werden Direkt Ethanol Brennstoffzellen noch nicht in Serie hergestellt, was sich auf die Preise negativ auswirkt. Der Preis wurde hier anhand des Forschungskits ermittelt. Dieser liegt bei 179 € und wenn hier ebenfalls die oben angenommene Leistung herangezogen wird, erreicht man dadurch Werte zwischen $30.000 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$ und $179.000 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$.²⁷⁷

²⁷⁰ vgl. (Araya, 2012) S. 11

²⁷¹ vgl. (Meier, 2014) S.9

²⁷² vgl. (Meier, 2014) S. 3 ff.

²⁷³ vgl. (Horizon Educational, kein Datum)

²⁷⁴ vgl. (Kamarudin, Kamarudin, Masdar, & Daud, 2013) S. 9450

²⁷⁵ vgl. (Badwal, Giddey, Kulkarni, Goel, & Basu, 2015) S. 85

²⁷⁶ vgl. (Kamarudin, Kamarudin, Masdar, & Daud, 2013) S. 9449

²⁷⁷ vgl. (Horizon Educational, kein Datum)

6.1.5. Phosphorsäure Brennstoffzelle (PAFC)

Die Phosphorsäure Brennstoffzelle (PAFC) ist ein Ergebnis aus den Versuchen mit einer schwefelsäurehaltigen Brennstoffzelle Benzin zu verstromen.²⁷⁸ Da Schwefelsäure nur bis 100 °C mit Kohlenwasserstoffen reagiert, wurde auf Phosphorsäure als Elektrolyt gewechselt. Diese ist bis 200 °C einsetzbar. Aufgrund der relativ hohen Temperatur absorbieren die platinbelegten, hochporösen Grafitelektroden Kohlenmonoxid (CO) in geringerem Maße als PEM-Brennstoffzellen. Dadurch erhalten die PAFC eine höhere CO-Toleranz als diese. Darum kann Wasserstoff aus einem Reformier ohne aufwändige Feinreinigung genutzt werden. Die resultierende Zellreaktion ist in Abbildung 13 abgebildet. Der Einsatz eines Reformier bietet sich auch aufgrund der nutzbaren Abwärme an. Als Nachteil gilt die geringe Elektrolytleitfähigkeit des Phosphors.

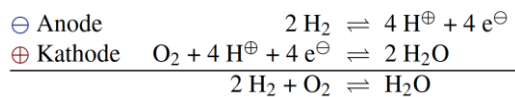


Abbildung 13: PAFC Zellreaktion

In Serie gebaute PAFC erreichen eine gravimetrische Leistungsdichte zwischen $0,0011 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ bei dem Modell „PC 25C“ von Toshiba²⁷⁹ und $0,0016 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ bei dem Modell „PureCell 400“ der Firma Doosan.²⁸⁰ Die volumetrische Leistungsdichte der genannten Modelle liegt bei ersterem bei $0,004 \frac{\text{kW}}{\text{l}}$ und bei zweiterem bei $0,006 \frac{\text{kW}}{\text{l}}$. Bei beiden Modellen ist der Reformier mit integriert und dementsprechend auch in der Berechnung der Leistungsdichten mit einbezogen. Selbst bei der Annahme, dass der Reformier die Hälfte der Masse und des Volumens ausmacht, ist die Leistungsdichte vergleichsweise gering. Außerdem ist der elektrische Wirkungsgrad mit Reformier zwar geringer, jedoch der Gesamtwirkungsgrad, bei Einbezug der thermischen Leistung, höher. Aus diesen Gründen wird nachfolgend mit der Leistungsdichte mit Reformier weiter gearbeitet. Das Leistungsspektrum der PAFC reicht von 50 kW bis 11 MW.²⁸¹

Das oben erstgenannte Modell erreicht einen elektrischen Wirkungsgrad von 40 % und einen Gesamtwirkungsgrad von 80 %.²⁸² Zweitgenanntes bei einem Betrieb mit Erdgas einen elektrischen Wirkungsgrad bis 45 % und einen Gesamtwirkungsgrad von 90 %.²⁸³ Bei Nutzung mit Wasserstoff steigt der elektrische Wirkungsgrad auf 50 % und der gesamte Wirkungsgrad sinkt

²⁷⁸ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 163

²⁷⁹ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 174

²⁸⁰ vgl. (Doosan Fuel Cell America, Inc., 2018)

²⁸¹ vgl. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018) S. 159

²⁸² vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 174

²⁸³ vgl. (Doosan Fuel Cell America, Inc., 2018)

auf 85 %.²⁸⁴ Nachfolgend wird wieder der Wert mit Reformer, also Erdgasbetrieb, des aktuelleren Modells genutzt. Langlebige, stationäre PAFC erreichen eine Lebensdauer von bis zu 65.000 h.²⁸⁵ Bei mobil genutzten Brennstoffzellen mit unterschiedlichen Lastpunkten dürfte die Lebensdauer wie bei den anderen Brennstoffzellen niedriger ausfallen. Die Kosten lagen 1991 mit Installationskosten bei $5.200 \frac{USD}{kW}$, 1995 sollen die Kosten mit $3.000 \frac{USD}{kW}$ deutlich niedriger gewesen sein.²⁸⁶ Da es keine aktuelleren Werte gibt, wird mit letzterem weiter gearbeitet. Mit dem durchschnittlichen Wechselkurs der letzten drei Jahre von $1,12 \frac{USD}{€}$ ergibt dies Kosten von $2.678,57 \frac{€}{kW}$.²⁸⁷ Es ist anzunehmen, dass die Preise im Laufe der Zeit weiter gesunken sein werden, jedoch ist dies nicht seriös nachweisbar.

6.1.6. Schmelzkarbonat Brennstoffzelle (MCFC)

Mit einer Betriebstemperatur zwischen 620 °C und 650 °C gehört die Schmelzkarbonat Brennstoffzellen (MCFC) zu den Mitteltemperatur-Brennstoffzellen.²⁸⁸ Als Elektrolyt wird schmelzflüssige Alkalicarbonate genutzt. Die Elektroden bestehen aus porösem Nickel. Da Carbonationen im Elektrolyt den Ladungstransport übernehmen, wird kathodisch Kohlenstoffdioxid (CO₂) verbraucht. Dieses muss von Seiten der Anode nachgeführt werden. Darum bietet sich als Brenngas Wasserstoff aus kohlenstoffhaltigen Verbindungen wie beispielsweise Methanol, Benzin oder Kohle an. Dieses kann mittels interner Reformierung in der Anodenkammer zerlegt werden. Die Zellreaktion ist in Abbildung 14 abgebildet. Vorteile dieser Brennstoffzelle ist die Kohlenmonoxid-Toleranz, interne Reformierung und gute Nutzbarkeit der Abwärme. Nachteilig ist, dass die CO₂ Rückführung notwendig ist, Korrosionsprobleme, Kurzschlussgefahr durch Auflösung der Kathode und Abscheidungen an der Anode sowie die Schwefelempfindlichkeit.

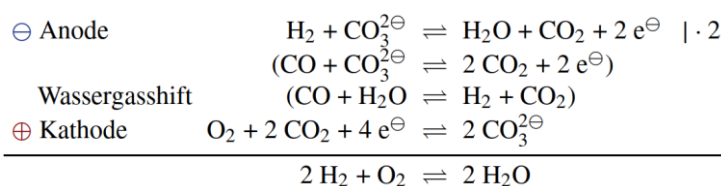


Abbildung 14: MCFC Zellreaktion

MCFC erreichen gravimetrische Leistungsdichten zwischen $0,006 \frac{kW}{kg}$ ²⁸⁹ und $0,0288 \frac{kW}{kg}$.²⁹⁰ Wo bei ersteres eine Anlage mit 250 kW und zweiteres eine Anlage mit 2,8 MW ist. In diesem Fall

²⁸⁴ vgl. (Doosan Fuel Cell America, Inc., kein Datum)

²⁸⁵ vgl. (Jörissen & Garcke, 2017) S. 307

²⁸⁶ vgl. (roads2hy, 2013) S. 10

²⁸⁷ vgl. (Statista Research Department, 2023)

²⁸⁸ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 179 ff.

²⁸⁹ vgl. (Greenhouse Gas Technology Center, 2007) S. 2

²⁹⁰ vgl. (FuelCell Energy Solutions GmbH, 2012)

werden die schlechteren Werte der kleineren Anlage genommen, da deren Leistung näher an der benötigten liegt als die der großen Brennstoffzelle. Die volumetrische Leistungsdichte liegt bei dieser bei $0,033 \frac{kW}{l}$. Das Leistungsspektrum geht bei diesem Typ Brennstoffzellen von 100 kW bis 3 MW.²⁹¹ Der Wirkungsgrad mit interner Reformierung liegt zwischen 60 % und 65 %. Da es sich bei der Schmelzkarbonat Brennstoffzelle aufgrund der benötigten CO₂ Rückführung besonders anbietet Kohlenwasserstoffe zu nutzen, wird mit diesem Wert weiter gearbeitet.

Die maximal erreichbare Betriebsdauer lag 2022 bei fünf Jahren, da das flüssige Elektrolyt eine hohe Reaktivität aufweist und dadurch hohe Degradation und Alterung auftritt.²⁹² Dabei wurde der durchgehende Betrieb als Kraftwerk angenommen. Daraus resultiert eine stationäre Lebensdauer von über 40.000 h. Die mobile Lebensdauer dürfte wie bei den anderen Brennstoffzellen deutlich darunter liegen. Derzeitige Forschung arbeitet daran, die Lebensdauer auf sieben bis zehn Jahre zu erhöhen.

Preislich liegen MCFCs zwischen $2.700 \frac{USD}{kW}$ ²⁹³ und $3.636 \frac{USD}{kW}$.²⁹⁴ Dies stimmt überein mit einer dritten Quelle, welche von $3.250 \frac{USD}{kW}$ schreibt.²⁹⁵ Bei allen wird von Brennstoffzellen mit Leistungen ab 2 MW ausgegangen. Dies liegt über den benötigten Leistungen und es ist davon auszugehen, dass Anlagen mit niedrigerer Leistung teurer sein werden. Darum wird nachfolgend mit der teuersten Annahme weiter gerechnet. Wie oben wird der durchschnittliche Wechselkurs der letzten drei Jahre von $1,12 \frac{USD}{€}$ angenommen.²⁹⁶ Mit dieser liegt der umgerechnete Preis bei $3.246,75 \frac{€}{kW}$.

6.1.7. Oxidkeramik Brennstoffzelle (SOFC)

Die theoretischen Grundlagen für die Oxidkeramik Brennstoffzelle (SOFC) wurden schon in den 1930er Jahren erkannt.²⁹⁷ Seit den 2010er Jahren steht die SOFC wieder im Interesse der Weiterentwicklung. Als Elektrolyt wird festes, 50 µm dickes yttriumstabilisiertes Zirconiumdioxid (ZrO₂ + Y₂O₃) genutzt. Dieses erreicht bei den Betriebstemperaturen von 1.000 °C nur eine um einen Zehntel geringere Leitfähigkeit als die der Carbonatschmelzen. Darum wird derzeit daran geforscht diese Temperatur auf unter 500 °C zu senken. Vorteile dieses Brennstoffzellentyps ist die mögliche interne Reformierung, was einen günstigeren Wirkungsgrad als externe Reformierung nach sich zieht, die Nutzung der Abwärme und dass keine Edelmetalle

²⁹¹ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 181

²⁹² vgl. (Groos, Cremers, & Nousch, 2022) S. 291

²⁹³ vgl. (Duan, Yue, Feng, Lu, & Bian, 2016) S. 748

²⁹⁴ vgl. (Rashidi, Berg, & Dincer, 2009) S. 4400

²⁹⁵ vgl. (roads2hy, 2013) S. 10

²⁹⁶ vgl. (Statista Research Department, 2023)

²⁹⁷ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 195 f.

benötigt werden, was zu einer Kohlenmonoxid-Toleranz und hohen Stromdichte führt. Dem gegenüber stehen Beständigkeitsprobleme bei den Materialien aufgrund der hohen Temperatur und die hohe Start-up Zeit. Die Elektrodenreaktion ist nachfolgend in Abbildung 15 zu sehen.

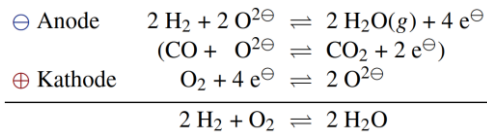


Abbildung 15: SOFC Zellreaktion

Käufliche SOFCs mit geringer Leistung bis 2 kW erreichen gravimetrische Leistungsdichten zwischen $0,006 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ ²⁹⁸ und $0,044 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$.²⁹⁹ Die volumetrische Leistungsdichte lässt sich nur für erstere ermitteln und liegt bei $0,0022 \frac{\text{kW}}{\text{l}}$. SOFCs der Firma „Bloomenergy“ mit 100 kW erreichen eine gravimetrische Leistungsdichte von $0,009 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ und eine volumetrische von $0,004 \frac{\text{kW}}{\text{l}}$,³⁰⁰ während deren 200 kW SOFC-Brennstoffzelle eine gravimetrische Leistungsdichte von $0,01 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ und volumetrisch von $0,005 \frac{\text{kW}}{\text{l}}$ besitzt.³⁰¹ Da das Fährschiff eine Stromversorgung über 2 kW benötigt, werden nachfolgend die Werte der Brennstoffzellen der Firma „Bloomenergy“ genutzt. Derzeit in Forschung ist ein Monolithkonzept des „Argonne National Laboratory“ in welchem gravimetrische Leistungsdichten von $8 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ möglich erscheinen.³⁰² Das Leistungsspektrum geht von wenigen Watt für portable Brennstoffzellen mittels Campinggas wie das Forschungsprojekt „Projekt M³-Stiftungsprojekt – Entwicklung eines portablen Brennstoffzellengeräts“ vom Fraunhofer IKTS³⁰³ bis hin zu 2 MW als Kraftwerk aus.³⁰⁴

Der Wirkungsgrad der beiden SOFCs der Firma „Bloomenergy“ werden mit einem elektrischen Wirkungsgrad über 50 % ausgeschrieben. In der Literatur wird ebenfalls angegeben, dass der Wirkungsgrad bei 100 kW-Systemen bei 50 % liegt.³⁰⁵ Dieser soll mit steigender Leistung ebenfalls steigen bis zu 68 % bei einer 100 MW-Brennstoffzelle.

Im Langzeitbetrieb von über 20.000 Stunden wurden Degradationsraten von 0,4 % bis 0,7 % pro 1.000 h erreicht.³⁰⁶ Bei Tests mit wiederholtem Starten und Stoppen wurden über 100

²⁹⁸ vgl. (SolydEra GmbH)

²⁹⁹ vgl. (Ceramic Fuel Cells Limited)

³⁰⁰ vgl. (Bloom Energy Corporation)

³⁰¹ vgl. (Bloom Energy Corporation)

³⁰² vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 208

³⁰³ vgl. (Groos, Cremers, & Nousch, 2022) S. 287 f.

³⁰⁴ vgl. (GenCell, kein Datum)

³⁰⁵ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 211

³⁰⁶ vgl. (Groos, Cremers, & Nousch, 2022) S. 290

vollständige thermische Zyklen nachgewiesen, wobei die Degradationsraten bei 0,5 % bis 0,7 % pro 10 Zyklen lagen. Für den Betrieb im Fährschiff wird zweiteres der kritischere Pfad sein. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Angaben der anderen Brennstoffzelle wird jedoch mit ersterem weiter gearbeitet. Wenn, wie bei Batterien, von einem Versagen bei 80 % und der Degradationsrate von 0,4 % bis 0,7 % alle 1000 h ausgegangen wird, liegt die Lebensdauer zwischen 28.500 h und 50.000 h. Nachfolgend wird mit dem niedrigeren Wert weiter gearbeitet.

In einer 2021 veröffentlichten Arbeit wird der Preis für ein 50 kW Oxidkeramik Brennstoffzellensystem mit Installation in Deutschland auf $10.950 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$ beziffert.³⁰⁷ Andere Quellen gehen von niedrigeren Kosten von $3.620 \frac{\text{USD}}{\text{kW}}$ bei einem 100 kW System³⁰⁸ oder ohne Angabe der Leistung von $4.800 \frac{\text{USD}}{\text{kW}}$ aus.³⁰⁹ Mit dem durchschnittlichen Wechselkurs der letzten drei Jahre von $1,12 \frac{\text{USD}}{\text{€}}$ liegen deren Kosten umgerechnet zwischen $3.232,14 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$ und $4.285,71 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$. Nachfolgend wird mit dem niedrigsten Wert weiter gearbeitet, da deren Quelle auch bei anderen Brennstoffzellen in dieser Arbeit genutzt wurden und so die Vergleichbarkeit höher ist.

6.2. Verbrennungsmotor

Die meist genutzte Antriebsart bei Schiffen ist mit großem Abstand der Verbrennungsmotor.³¹⁰ Für die Schifffahrt kommen dabei hauptsächlich Hubkolbenmotoren in Betracht. Diese können anhand ihrer Zündungsart und Taktzahl unterschieden werden. Es gibt sie als Fremd- oder Selbstzünder und diese jeweils im 2-Takt oder 4-Taktbetrieb. Mechanisch gesehen, sind sie sich jedoch weitgehend ähnlich.

Beim Hubkolbenmotor wird die chemisch gespeicherte Energie in mechanische Energie umgewandelt.³¹¹ Durch die Verbrennung des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Zylinder sorgt die Wärmeenergie, dass der Kolben nach unten gedrückt wird. Diese Hubbewegung wird durch die Pleuellstange in eine Drehbewegung umgewandelt, welche nicht nur für den Vortrieb sondern auch für die Steuerung des Prozesses genutzt wird. Dazu werden die Ein- und Auslassventile über eine Pleuellstange gesteuert welche mit der Pleuellstange verbunden ist. Eine halbe Umdrehung der Pleuellstange entspricht dabei einem Takt. Wenn der Pleuellstange den obersten Punkt erreicht hat wird vom oberen Totpunkt (OT) gesprochen und wenn er am untersten Punkt ist vom unteren Totpunkt (UT).

³⁰⁷ vgl. (Accurso, et al., 2021) S. 11

³⁰⁸ vgl. (roads2hy, 2013) S. 9 f.

³⁰⁹ vgl. (Kurzweil, Brennstoffzellentechnik, 2016) S. 196

³¹⁰ vgl. (Hezel & Keller) S. 43

³¹¹ vgl. (Adomeit, et al., 2013) S. 222

Beim 2-Takt-Verfahren findet am unteren Totpunkt der Ladungswechsel statt.³¹² Dazu wird der Zylinderraum mit frischer Ladung ausgespült. Durch dieses Verfahren steht für die Verdichtung und Ausdehnung nicht der volle Hub zur Verfügung. Motoren mit diesem Verfahren werden hauptsächlich in Kleinantrieben wie Motorrollern und Großdieselmotoren in der Schifffahrt eingesetzt. Dies liegt an der einfacheren Wartbarkeit und kostengünstigen Fertigung.

Ein 4-Takt-Motor saugt der Motor auf dem Weg vom oberen zum unteren Totpunkt frische Ladung an.³¹³ Durch die darauf folgende Aufwärtsbewegung wird das Gemisch verdichtet. Dieses verdichtete Gemisch wird kurz vor dem oberen Totpunkt gezündet. Die daraus entstehende Verbrennung drückt den Kolben wieder nach unten und nach dem Wendepunkt beim erneuten steigen des Kolbens werden die Abgase aus dem Zylinder gedrückt. Das 4-Takt-Verfahren ist inzwischen das meistgenutzte und auch in diesem Anwendungsfall die bessere Wahl.

Der thermodynamische Prozess bei Verbrennungsmotoren ist der Seiliger-Prozess. Dieser ist ein kombinierter Prozess aus dem Gleichraum- und Gleichdruckprozess. Jene Prozesse sind Idealprozesse, welche in der Realität nicht stattfinden können. Beim Gleichraumprozess müsste die Verbrennung unendlich schnell am oberen Totpunkt stattfinden und beim Gleichdruckprozess müsste die Verbrennung schlagartig enden und dies ist beides nicht möglich. Zur einfachen Berechnung wird häufig angenommen, dass beim Ottomotor der Gleichraumprozess und beim Dieselmotor der Gleichdruckprozess gilt, da die Verbrennung beim benzinbetriebenen Motor schneller abläuft, während beim dieselbetriebenen Motor der Druck im Brennraum höher ist.³¹⁴ Zur Anschauung werden alle drei Prozesse in einem p - V -Diagramm in Abbildung 16 dargestellt.

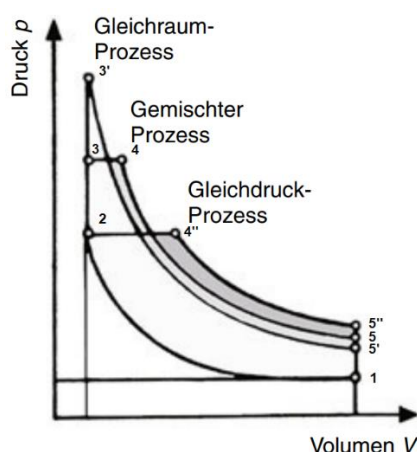


Abbildung 16: Gleichraum-, Gleichdruck- und Seiligerprozess³¹⁵

³¹² vgl. (Tschöke & Mollenhauer, 2020) S. 70

³¹³ vgl. (Adomeit, et al., 2013) S. 223.

³¹⁴ vgl. (Schreiner, 2011) S.67 f.

³¹⁵ vgl. (Basshuysen & Schäfer, 2014) S.38

Zwischen Punkt 1 und 2 findet eine isentrope Kompression statt. Das heißt, dass die Kompression ohne Reibung und Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet. Der Übergang von Punkt 2 zu 3 beschreibt die Verbrennung. In diesem Kontext wird der Unterschied zwischen dem Gleichraum-, Gleichdruck- und Seilingerprozess deutlich. Beim Gleichraumprozess steigt der Druck ohne Volumenänderung schlagartig an, da die Verbrennung unendlich schnell stattfindet. Der Gleichdruckprozess sorgt für einen gleichbleibenden Druck durch eine langsam immer stärker werdende Verbrennung während der Kolben wieder nach unten fährt und dadurch das Volumen dementsprechend größer wird. Punkt 4 ist das Ende der Verbrennungsphase. Im Gleichraumprozess entspricht dies Punkt 3, da die Verbrennung unendlich schnell ist. Der Ablauf von Punkt 4 zu 5 entspricht einer isentropen Expansion und die letzte Phase von Punkt 5 zu 1 ist die Ladungswechselschleife. Der zweite Takt entspricht hier der Phase von Punkt 1 zu 2, der dritte Takt die Phase zwischen Punkt 3/4 und Punkt 5 und der vierte sowie erste Takt wird zwischen Punkt 5 und 1 abgearbeitet.³¹⁶

Die Fläche innerhalb des Diagramms entspricht der Arbeit mit welcher ein Kolben nach unten gedrückt wird. Hier muss die Ladungswechselschleife abgezogen werden, da sie keine Arbeit erzeugt, sondern benötigt. Wenn man diese unregelmäßige Fläche in ein flächengleiches Rechteck mit der waagrechten Abmessung des Hubvolumens eines Zylinders umwandelt, ist die senkrechte Komponente der Mitteldruck p_e .³¹⁹

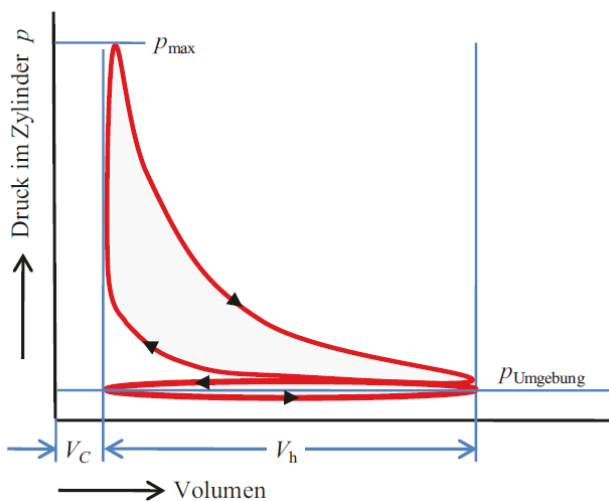


Abbildung 17: Reale Ladungswechselschleife³¹⁷

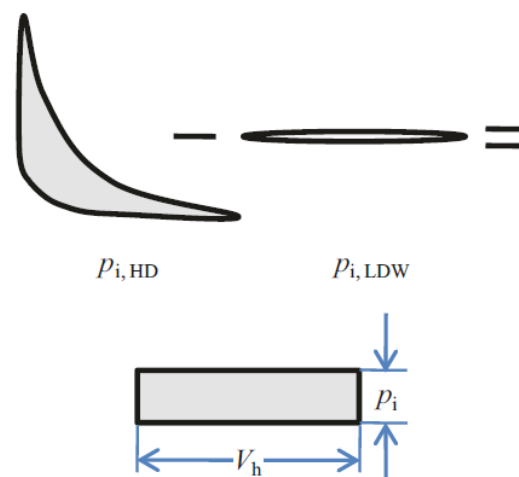


Abbildung 18: Mitteldruckherleitung durch Ladungswechselschleife³¹⁸

³¹⁶ vgl. (Schreiner, 2011) S.60 f.

³¹⁷ vgl. ebd. S.74

³¹⁸ vgl. ebd. S.74

³¹⁹ vgl. ebd. S.74 f.

Fremdzünder benötigen im Gegensatz zu Selbstzündern zur Verbrennung des Kraftstoff-Luft-Gemisches einen Zündfunken.³²⁰ Außerdem benötigen sie eine Drosselklappe, welche die Luftzufuhr kontrolliert. Dies liegt daran, dass Fremdzünder ein homogenes Gemisch aus Kraftstoff und Luft benötigen. Durch den Druckverlust an der Drosselklappe im Schwachlastbetrieb entstehen so Wirkungsgradeinbußen. Selbstzündern können dagegen auch bei Luftüberschuss betrieben werden. Darum sind diese im Schwachlastbetrieb effizienter als Fremdzünder. Bei Vollast hat ein Fremdzünder dagegen mehr Leistung als ein vergleichbarer Selbstzünder. Dies liegt daran, dass das Mischungsverhältnis Kraftstoff zu Luft bei mit 1 niedriger liegt als das der Selbstzündern mit 1,4. Ein Verbrennungsmotor benötigt im allgemeinen keine Anlaufzeit und reagiert im Vergleich zu Brennstoffzellen schnell auf Lastwechsel.

6.2.1. Fremdzünder

Die gravimetrische Leistungsdichte bei Fremdzünder liegt zwischen $2 \frac{kg}{kW}$ und $3 \frac{kg}{kW}$.³²¹ Dies entspricht umgerechnet $0,33 \frac{kW}{kg}$ bis $0,5 \frac{kW}{kg}$. Die volumetrische Leistungsdichte wird bei Verbrennungsmotoren in gängiger Literatur nur in Abhängigkeit zum Arbeitsvolumen und nicht Gesamtvolumen angegeben. Um die gesamte volumetrische Leistungsdichte abzuleiten wird die durchschnittliche Motorleistung aus dem Jahr 2021 genommen und ein Motorvolumen von $1 m^3$ angenommen. Mit diesen Werten kommt man auf ein Wert von $0,12 \frac{kW}{l}$.³²² Fremdzünder können Leistungen von wenigen Kilowatt in beispielsweise Motorroller bis hin zu fast 64 Megawatt in Schiffsmotoren.³²³

Der typische effektive Wirkungsgrad dieser Motorart liegt zwischen 25 % und 30 %.³²⁴ Bei Vollast kann von einer Lebensdauer bis 3.000 h für Ottomotoren ausgehen.³²⁵ Um möglichst anwendungsbezogene Kosten zu ermitteln, wurden die durchschnittlichen Kosten für Bootsmotoren mit Leistungen zwischen 200 kW und 300 kW auf einer auf Bootsmotoren spezialisierten Webseite ermittelt.³²⁶ Dadurch wurden Kosten von $90 \frac{€}{kW}$ bis $115 \frac{€}{kW}$ ermittelt.

³²⁰ vgl. (Schreiner, 2020) S. 20

³²¹ vgl. (Basshuysen & Schäfer, 2014) S. 18

³²² vgl. (Statista Research Department, 2023)

³²³ vgl. (WinGD, kein Datum)

³²⁴ vgl. (Gaulhofer, 2015) S.61

³²⁵ vgl. (Lindhjem & Beardsley, 1998) S.3

³²⁶ vgl. (Marine Classified Media AG, kein Datum)

6.2.2. Selbstzünder

Die Werte für den Selbstzünder basieren hauptsächlich auf denen der vorhandenen Motoren, da diese aufgrund des Vorhandenseins bedeutende Kostenvorteile haben. Deren gravimetrische Leistungsdichte liegt bei $0,2 \frac{kW}{kg}$ und die volumetrische Leistungsdichte bei $0,13 \frac{kW}{l}$.³²⁷

Generell können Selbstzünder ein Leistungsspektrum von wenigen Kilowatt³²⁸ bis über 87 Megawatt abdecken.³²⁹

Wie oben schon angesprochen besitzen Selbstzünder einen höheren effektiven Wirkungsgrad als Fremdzünder. Dieser liegt bei diesem Motortyp zwischen 30 % und 45 %.³³⁰ Die Lebensdauer beim verwendeten Motor liegt bei 1.500 h, sofern über 90 % der maximalen Leistung abgerufen wird. Wird weniger Leistung benötigt steigt die Lebensdauer auf 3.000 h.³³¹ Da die Motoren schon genutzt wurden, muss diese Betriebszeit abgezogen werden. Aufgrund dessen, können die Kosten jedoch auf null Euro gesetzt werden, da sie schon vorhanden sind.

6.3. Elektromotor

Elektromotoren gibt es schon seit fast 200 Jahren und wurden schon sehr früh in der Schifffahrt eingesetzt.³³² Sie können in viele unterschiedliche Varianten aufgegliedert werden. Als Gleich- und Drehstrommotoren, zweiteres als Asynchron- und Synchronmotoren und hiervon zweiteres mit natürlichen oder elektrischen Magneten oder als Reluktanzmotor ohne Magnete.³³³ Im Angebot von Torqeedo ist ein Permanent-Magnet-Synchronmotor (PMSM) enthalten, weshalb nachfolgend besonders auf diesen eingegangen wird.³³⁴

Alle Drehstrommotoren bestehen aus einem Stator und Rotor. Der Stator ist das feststehende Teil und der Rotor das rotierende. Der Stator unterscheidet sich bei allen Drehstrommotoren prinzipiell nicht. In ihm werden die Drahtwicklungen paarweise gegenüber angebracht, als Hin- und Rückleiter. Diese Wicklungen sind nichts anderes als Spulen welche ein Magnetfeld erzeugen. Bei Drehstrommotoren mit drei Phasen wird für jede Phase mindestens eine Spule räumlich um 120° versetzt angebracht. Da die Ströme in einem Drehstromsystem um 120° zeitlich verzögert fließen, entsteht ein gleichmäßig drehendes Magnetfeld mit der Frequenz des Stromes. Dies ist der einfachste Aufbau und wird als Urwicklung bezeichnet.³³⁵

³²⁷ vgl. (DEUTZ AG)

³²⁸ vgl. (Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG, kein Datum)

³²⁹ vgl. (MAN Diesel & Turbo, 2014) S. 20

³³⁰ vgl. (Gaulhofer, 2015) S. 61

³³¹ vgl. (DEUTZ AG)

³³² vgl. (Doppelbauer P. , kein Datum)

³³³ vgl. (Stan, 2020) S 296 f.

³³⁴ vgl. (Torqeedo, 2021) S. 4

³³⁵ vgl. (Doppelbauer, 2020) S.187 f.

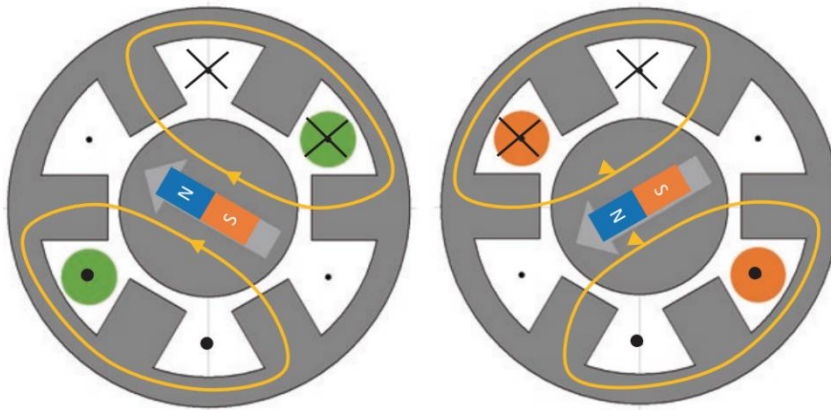


Abbildung 19: Grundkonfiguration eines Drehstrommotors links $\varphi = 60^\circ$ & rechts $\varphi = 120^\circ$ ³³⁶

Im Rotor des permanentenerregten Synchronmotors werden Permanentmagnete verbaut, welche ein Erregerfeld zur Verfügung stellen. Die Polanzahl steigt mit der Anzahl der eingebauten Magnete. Typisch sind hierbei sechs oder acht, jedoch ist es auch möglich, dass deutlich mehr eingebaut sind. Dabei werden die Magnete so vormagnetisiert, dass die Süd- und Nordpole in die vorgegebene Richtung wirken. Wenn nun im Betrieb durch die Wicklungen im Stator ein Strom fließt, bildet sich ein äußeres Magnetfeld, welches auf das Erregerfeld des Rotors wirkt. Dieser ist drehbar gelagert und wird sich nach dem äußeren Feld ausrichten.³³⁷ Da sich das äußere Feld wie oben beschrieben mit der Frequenz des Drehstromsystems dreht, dreht sich der Rotor mit diesem Feld mit. Wenn nun eine Last an dem Rotor angebracht wird, folgt dieser dem äußeren Magnetfeld in einem lastabhängigen Polradwinkel. Dieser Winkel darf bei Motoren mit 3 Polpaaren nicht größer als 90° werden, da der Rotor dann dem Statorfeld nicht mehr folgen kann.³³⁸

Bei PMSM muss beachtet werden, dass bei einem zu großen Stromeintrag die Permanentmagnete entmagnetisiert werden könnten. Der Maximalstrom ist dabei abhängig von der Temperatur, dem Luftspalt, dem Magnetmaterial und der Höhe der Magnete. Die Entmagnetisierung ist dabei zwar reversibel, wird in der Praxis aber nicht durchgeführt, da dieser Prozess sehr aufwändig ist.³³⁹

Nachfolgend ist der konstruktive Aufbau typischer Rotoren abgebildet. Typ I ist der einfachste und kostengünstigste Aufbau, jedoch weniger effizient. Typ V und U werden bei leistungsstarken Antrieben genutzt. Zur Verstärkung des Reluktanzmoments können einige Taschen auch frei gelassen werden. Je nach Konstruktionstyp unterscheidet sich der Drehmomentverlauf

³³⁶ vgl. (Doppelbauer, 2020) S.187 f.

³³⁷ vgl. ebd. S.190 ff.

³³⁸ vgl. (Babiel, 2020) S.118

³³⁹ vgl. (Bolte, 2017) S.159 ff.

über die Drehzahl voneinander. Außerdem werden auch Kurzschlussverhalten, induzierte Spannung, Phasenwinkel und Strombedarf vom Rotortyp beeinflusst.³⁴⁰

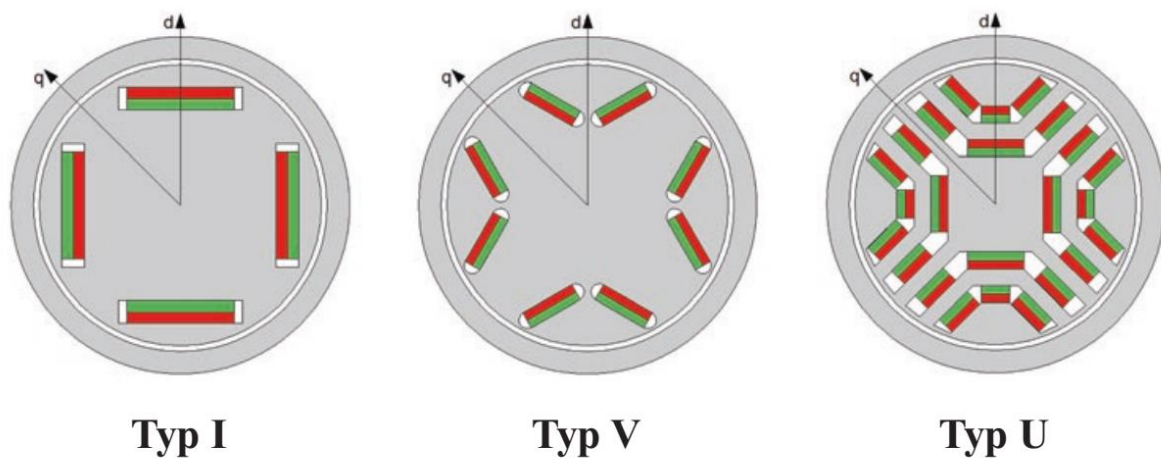


Abbildung 20: unterschiedliche Rotortypen³⁴¹

Die typische Leistungsdichte dieser Motorenart liegt gravimetrisch zwischen $0,3 \frac{kW}{kg}$ und $0,6 \frac{kW}{kg}$ während die volumetrische Leistungsdichte zwischen $2,1 \frac{kW}{l}$ und $3,6 \frac{kW}{l}$ liegt.³⁴² Beim Torqeedo Motor liegt die gravimetrische Leistungsdichte bei $0,51 \frac{kW}{kg}$.³⁴³ Die volumetrische Leistungsdichte kann nur grob an den Außenmaßen ermittelt werden. Sie liegt bei $0,46 \frac{kW}{l}$. Der Grund für den relativ geringen Wert liegt daran, dass bei diesen Maßen auch der Inverter, die Kühlung und weitere Anbauteile mit einberechnet werden. Generell können PMSM Leistungen zwischen wenigen Watt bis mindestens 70 Megawatt abdecken.³⁴⁴

Der Wirkungsgrad ist bei elektrischen Maschinen generell hoch und bei Permanent-Magnet-Synchronmotoren mit 95 % besonders hoch.³⁴⁵ Industriemotoren sind auf eine Lebensdauer von 20.000 h ausgelegt, während bei Antrieben für Kraftfahrzeuge aufgrund der geringeren Anforderungen meist eine Lebensdauer von 8.000 h angestrebt wird.³⁴⁶ Die Kosten eines Elektromotors liegen zwischen einem Drittel und einem Viertel niedriger als das der Verbrennungsmotoren.³⁴⁷ Das heißt es werden Werte zwischen $22,5 \frac{€}{kW}$ und $38,3 \frac{€}{kW}$ erreicht.

³⁴⁰ vgl. (Doppelbauer, 2020) S.205

³⁴¹ vgl. ebd. S.205

³⁴² vgl. (Heckele, Tesar, Igelspacher, Brunner, & Gratzfeld, 2022) S. 192

³⁴³ vgl. (Torqeedo, 2021) S. 4

³⁴⁴ vgl. (Hofmann, 2010) S. 86

³⁴⁵ vgl. (Sauer, 2015) S. 38

³⁴⁶ vgl. (Doppelbauer M. , 2020) S. 45

³⁴⁷ vgl. (Weigelt, Mayr, Böhm, Kühl, & Franke, 2018) S. 62

7. Kombinierte Auswertung

Die Energiewandler sind unterteilt in Brennstoffzellensysteme, Verbrennungs- und Elektromotoren. Zu beachten ist, dass alle Brennstoffzellen auch einen Elektromotor benötigen. Jeder der Energiewandler wird beschrieben und folgende Eigenschaften deklariert:

- Gravimetrische Energiedichte \emptyset
- Volumetrische Energiedichte \emptyset
- Technology Readiness/Verfügbarkeit \emptyset
- Wartbarkeit
- Wirkungsgrad \emptyset
- Tankaufwand
- Lebensdauer \emptyset
- Lokale CO₂ Emissionen
- CO₂ Emissionen bei der Herstellung
- Sonstige lokale Emissionen
- Zulassungsfähigkeit
- Gefahr für die Umwelt bei der Betankung
- Gefahr für Personen bei der Betankung
- Gefahr für die Umwelt im Betrieb \emptyset
- Gefahr für Personen im Betrieb \emptyset
- Kosten der Beschaffung \emptyset
- Kosten der Betankung
- Kosten der Wartung

Wenn hinter der jeweiligen Eigenschaft das Durchschnittszeichen „ \emptyset “ zu sehen ist heißt dies, dass für deren Bewertung der Durchschnitt aus den Einzelbewertungen berechnet wird. Die Werte für die Zulassungsfähigkeit und Kosten der Betankung werden aus der Einzelbewertung der Brennstoffe genutzt, mit Ausnahme der letzten Lösung. Der Wert für die Gefahr für Personen und die Umwelt während der Betankung und der des Tankaufwands entspricht dem der Einzelbewertung bei der Speichertechnologie. Auf diese Eigenschaften wird darum in den nachfolgenden Unterkapitel nicht weiter eingegangen. Für jede Eigenschaft ist eine Gewichtung in der Bewertungsmatrix vorgesehen. Die Kosten der Beschaffung, Betankung und Wartung, Technology Readiness/Verfügbarkeit, Tankaufwand, Lebensdauer, lokale CO₂ Emissionen, Zulassungsfähigkeit und die Gefahr für die Umwelt im Betrieb und der Betankung erhalten die höchste Priorität, die Energiedichten, der Wirkungsgrad sowie die Gefahren für Personen während der Betankung und des Betriebs erhalten dagegen die niedrigste Priorität.

Nachfolgend ist die Bewertungsmatrix in Tabelle 5 zu sehen.

| Eigenschaften | | Gew. | Lösungen | | | | | | | | |
|--------------------|--|---------------------|--|---|-------------------------------------|---|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|----|
| | | | Wasserstoff 35 MPa Druckspeicher AFC | Wasserstoff 35 MPa Druckspeicher LT-PEM | Wasserstoff Powerpaste LT-PEM | Wasserstoff 35 MPa Druckspeicher HT-PEM | Methanol Metalltank HT-PEM | E-Fuel Metalltank Selbstzünder | Methanol Metalltank Fremdzünder | NMC-Batterie E-Motor | |
| Technisch | Gravimetrische Energiedichte | 1 | 8,33 | 8 | 9 | 7,67 | 7 | 7,33 | 6 | 4 | |
| | Volumetrische Energiedichte | 1 | 5 | 4,33 | 5,67 | 4,67 | 7,33 | 7 | 5 | 4 | |
| | Technology Readiness/ Verfügbarkeit | 3 | 10 | 10 | 8,67 | 9,33 | 9 | 8 | 9,67 | 10 | |
| | Wartbarkeit | 2 | 4 | 4 | 6 | 3 | 6 | 3 | 2 | 8 | |
| | Wirkungsgrad | 1 | 6,83 | 8 | 6 | 7,33 | 6,33 | 6 | 4,67 | 9,5 | |
| | Tankaufwand | 3 | 7 | 7 | 10 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | Lebensdauer | 3 | 4 | 7 | 9 | 5,5 | 7,5 | 6,5 | 6 | 5,5 | |
| Zulas- sung | | CO2 lokal | 3 | 10 | 10 | 10 | 10 | 4 | 1 | 2 | 10 |
| | | CO2 Herstellung | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 5 | 10 | 7 | 1 |
| | | sonstige Emission | 2 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 1 | 4 | 10 |
| | | Zulassungsfähigkeit | 3 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 9 | 10 |
| | Betan- kung | Gefahr für Umwelt | 3 | 9 | 9 | 8 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 |
| | | Gefahr für Person | 1 | 8 | 8 | 10 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| | | Betrieb | Gefahr für Umwelt | 3 | 9,5 | 9,5 | 9 | 9,5 | 8 | 7 | 8 |
| Gefahr für Person | 1 | | 9 | 9 | 8,5 | 9 | 7,5 | 6 | 7,5 | 9 | |
| Kosten | Beschaffung | 3 | 7 | 6 | 7 | 5,5 | 6,5 | 10 | 9 | 5,5 | |
| | Betankung | 3 | 10 | 10 | 9 | 10 | 7 | 4 | 7 | 10 | |
| | Wartung | 3 | 1 | 7 | 5 | 5 | 5 | 3 | 2 | 9 | |
| Gesamt in % | | | 77% | 83% | 85% | 79% | 78% | 69% | 70% | 86% | |

Legende: grün = mehrere wissenschaftliche Quellen; gelb = Einzelquellen/nicht wissenschaftlich bestätigte Quellen; rot = kaum/keine wissenschaftlichen Quellen

Tabelle 5: Bewertungsmatrix kombinierte Lösungen

7.1. Morphologischer Kasten

Mittels des morphologischen Kastens werden sieben Lösungen ausgewählt.

Die Auswahl der Brennstoffe wird auf die zwei Brennstoffe mit der höchsten Prozentzahl in der Einzelwertung, Wasserstoff und Methanol begrenzt. Zusätzlich wird synthetischer Kraftstoff hinzugezogen, da dieser mit dem vorhandenen Motor betrieben werden könnte.

Bei den Speichertechnologien wird auf die drei höchstbewerteten Technologien in der Einzelbewertung gesetzt. Dies umfasst den Metalltank, die 35 MPa Druckspeichertechnologie und die Powerpaste des Fraunhofer Instituts. Dabei wird der 70 MPa Speicher ignoriert, da aufgrund der besseren Bewertung schon der 35 MPa Druckspeicher berücksichtigt wird und zwei Druckspeicher den Aufwand massiv erhöhen würden ohne dass ein besseres Ergebnis erwartet werden kann.

Für die Energiewandler werden die drei bestbewerteten Brennstoffzellen berücksichtigt. Dazu zählen beide Polymerelektrolytmembran Brennstoffzellen (LT-PEM und HT-PEM) sowie die alkalische Brennstoffzelle (AFC). Außerdem wird der Selbstzünder trotz der niedrigen Bewertung in den morphologischen Kasten mit einbezogen, da dieser schon verbaut ist. Weiterhin kommt der Fremdzünder in Betracht, da die lokale Firma „Obrist Group“ diesen erfolgreich mit grünem Methanol in Betrieb genommen hat und als Sponsor in Frage käme.³⁴⁸

Aus dieser Auswahl kamen die nachfolgenden Lösungen zustande, welche außerdem in Tabelle 6 zu sehen sind:

- Wasserstoff mit 35 MPa Druckspeicher und AFC (grün)
- Wasserstoff mit 35 MPa Druckspeicher und LT-PEM (gelb)
- Wasserstoff mit Powerpaste und LT-PEM (rot)
- Wasserstoff mit 35 MPa Druckspeicher und HT-PEM (blau)
- Methanol mit Metalltank und HT-PEM (orange)
- E-Fuel mit Metalltank und Selbstzünder (lila)
- Methanol mit Metalltank und Fremdzünder (schwarz)

Zusätzlich zu diesen sieben Lösungen wird der Betrieb rein mit Elektromotor und Batterie berücksichtigt und mit den anderen Lösungen verglichen.

³⁴⁸ (Beyers, 2021)

| Morphologischer Kasten | | | | | |
|------------------------|------------------|-----|------------|-------------|--------------------------|
| Teilfunktionen | Einzellösungen | | | | |
| Brennstoff | Wasserstoff | | Methanol | | synthetischer Kraftstoff |
| Speicher | Druck mit 35 MPa | | Powerpaste | | Metalltank |
| Energiewandler | LT-PEM | AFC | HT-PEM | Fremdzünder | Selbstzünder |

Tabelle 6: Morphologischer Kasten zur Lösungsfindung

7.2. Wasserstoff mit 35 MPa Druckspeicher & AFC

Dieses System ist eines der klassischen Brennstoffzellensystem und wird mit reinem Sauerstoff bevorzugt in der Raumfahrt oder in U-Booten eingesetzt. Aufgrund dessen, dass in diesem Projekt kein Betrieb mit reinem Sauerstoff umgesetzt wird, liegen die Wartungskosten relativ hoch. Dies liegt daran, dass alkalische Brennstoffzellen mit Luftbetrieb eine deutlich verringerte Lebenszeit haben und dementsprechend häufig gewartet beziehungsweise ausgewechselt werden müssen.³⁴⁹ Wenn die Brennstoffzelle mit Rücksicht auf den notwendigen häufige Austausch ausgelegt wird, sollte die Wartbarkeit einfacher möglich sein. Eine mögliche Lösung wäre, die einzelnen Stacks separat austauschbar zu gestalten.

Bei einer mit reinem Wasserstoff betriebenen Brennstoffzelle kommt es zu keinen lokalen Emissionen. Bei der Produktion wird jedoch relativ viel CO₂ freigesetzt.³⁵⁰ Dies ist unter anderem dem Umstand zu verdanken, dass bei dieser Lösung ebenfalls ein Elektromotor und eine kleinere Pufferbatterie benötigt wird. Eine Brennstoffzelle alleine setzt weniger CO₂ um als ein Verbrennungsmotor, welche ansonsten am wenigsten CO₂ freisetzt. Bei der angegeben Quelle wird von einer Polymerelektrolyt Brennstoffzelle ausgegangen. Mangels Alternativen wird dieser Wert auch für die Alkalische Brennstoffzelle genutzt.

³⁴⁹ vgl. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018) S. 155

³⁵⁰ vgl. (Brait, 2020) S. 43

7.3. Wasserstoff mit 35 MPa Druckspeicher & LT-PEM

Der einzige Unterschied zur vorherigen Lösung ist hier die Brennstoffzelle. Diese gelten als einfach wartbar³⁵¹ bei gleichzeitig hohen Wartungsintervallen.³⁵² Durch ein hohes Intervall sinken dementsprechend auch die Kosten.

Wie bei der ersten Lösung kommen auch bei dieser keine lokalen Emissionen zustande. Ebenso sind die CO₂ Emissionen bei der Herstellung mit denen der Lösung mit der alkalischen Brennstoffzelle gleichzusetzen.

7.4. Wasserstoff mit Powerpaste & LT-PEM

Aufgrund des fehlenden Druckspeichers kann angenommen werden, dass dieses System noch etwas einfacher und günstiger zu warten ist als die vorhergehende Lösung. Dies liegt daran, dass Druckspeicher regelmäßig geprüft werden müssen, während das Gefäß der Powerpaste bei jedem Befüllen mit gewechselt wird und dadurch dessen Wartung von dem Verkäufer übernommen wird.³⁵³

Auch hier kommen keinerlei schädliche lokale Emissionen zustande. Da wie oben erwähnt kein aufwändig zu herstellender Druckspeicher benötigt wird, wird angenommen, dass weniger CO₂ bei der Herstellung emittiert wird. Aufgrund fehlender Informationen ist nicht bekannt wie groß die CO₂ Emissionen bei der Herstellung der Powerpaste sind.

7.5. Wasserstoff mit 35 MPa Druckspeicher & HT-PEM

Für diese Lösung wird bei der Wartbarkeit das gleiche angenommen wie bei der zweiten Lösung, da anstelle einer LT-PEM nun eine HT-PEM genutzt wird. Einzig die geringere Lebensdauer könnte zu höheren Wartungskosten führen. Die Firma „Advent Technologies“ gibt für ihre HT-PEM dagegen geringe Wartungsintervalle an.³⁵⁴

Da bei dieser Lösung ebenfalls ein Betrieb ausschließlich mit Wasserstoff angenommen wird, wird auch hier lokal nichts emittiert. Bei der Herstellung dagegen wird gleich viel CO₂ umgesetzt wie bei der zweiten und ersten Lösung.

7.6. Methanol mit Metalltank & HT-PEM

Aufgrund des fehlenden Druckspeichers wird bei dieser Lösung ein höherer Wartungsintervall als bei der vorherigen angenommen. Dadurch sinken dementsprechend auch die Wartungskosten. Da die Wartung eines Metalltanks deutlich einfacher durchzuführen ist als bei einem

³⁵¹ vgl. (Kaur, Krishnasamy, Muthusamy, & Chinnamuthan, 2017) S. 174

³⁵² vgl. ebd. S. 176

³⁵³ vgl. (Vogt & Heubner, 2022) S. 2

³⁵⁴ vgl. (Advent Technologies, kein Datum)

Druckspeicher, gilt die Wartbarkeit auch als geringer. Dies deckt sich auch mit der Angabe der oben genannten Firma „Advent Technologies“.

Da bei dieser Lösung ein kohlenstoffbasierter Brennstoff genutzt wird, entstehen lokal CO₂ Emissionen. Aufgrund des deutlich höheren Wirkungsgrades einer HT-PEM im Gegensatz zum Verbrennungsmotor liegen diese deutlich niedriger als beim Methanolbetrieb von Verbrennungsmotoren. Andere lokale Emissionen wurden bei Versuchsbetrieben nicht ermittelt.³⁵⁵ Wie bei der dritten Lösung mit der Powerpaste wird auch hier kein aufwändiger Druckspeicher benötigt, wodurch die CO₂ Emissionen bei der Herstellung vergleichbar mit denen der dritten Lösung sind.

7.7. E-Fuel mit Metalltank & Selbstzünder

Ein Selbstzünder hat generell ein niedrigeres Wartungsintervall als Brennstoffzellensysteme, da deutlich mehr bewegte Teile verbaut sind. Unter anderem müssen die Zahnriemen und das Öl regelmäßig ausgetauscht werden. Dadurch entstehen höhere Wartungskosten. Da die Technik möglichst kompakt verbaut wird ist die Wartbarkeit relativ gering. Hilfreich dagegen ist, dass die Technik schon lange in Nutzung ist und dementsprechend viele Spezialisten vorhanden sind.

Durch die Nutzung von E-Fuels entstehen lokal sowohl CO₂- als auch weitere Emissionen wie Stickoxide und Feinstaub. Dagegen steht keine zusätzliche CO₂ Belastung aufgrund der Herstellung, da dieses System schon verbaut ist und dementsprechend keine Herstellung berücksichtigt werden muss.

7.8. Methanol mit Metalltank & Fremdzünder

Die Wartung des Metalltanks bedarf keiner besonderen Aufmerksamkeit. Der Fremdzünder dagegen hat die geringsten Wartungsintervalle und meisten Teile, welche ausgetauscht werden müssen. Dazu zählen Zahnriemen, Öl, Luftfilter und Zündkerzen. Auch hier ist die Wartbarkeit aufgrund des kompakten Bauens gering wogegen es zahlreiche Mechaniker gibt die sich mit dieser Technik auskennen.

Bei der Nutzung mit Methanol in Verbindung mit einem Fremdzünder entstehen aufgrund des geringeren Wirkungsgrades mehr CO₂ Emissionen als mit der HT-PEM Brennstoffzelle. Trotz dessen, dass ein methanolbetriebener Fremdzünder um den Faktor 0,93 weniger CO₂ emittiert als einer mit herkömmlichen Benzin³⁵⁶, wird durch diesen weiterhin mehr CO₂ freigesetzt als bei einem vergleichbaren Selbstzünder.³⁵⁷ Dies kann durch die höhere Energiedichte des

³⁵⁵ vgl. (The Maritime Executive, 2017)

³⁵⁶ vgl. (Verhelst, Turner, Sileghem, & Vancoillie, 2019) S. 47

³⁵⁷ vgl. (Statista Research Department, 2023)

Diesels in Kombination mit dem höheren Wirkungsgrad des Selbstzünders erklärt werden. In diesem Fall muss außerdem die freigesetzte Menge CO₂ bei der Herstellung beachtet werden. Diese ist jedoch geringer als vergleichbare Brennstoffzellensystem und aufgrund der Batterie auch niedriger als bei der nachfolgenden Lösung.³⁵⁸

7.9. NMC-Batterie mit Elektromotor

Die Wartbarkeit dieses Systems kann als hoch angesehen werden, da die Intervalle hoch sind und Fernwartungen möglich sind. Aufgrund dessen sollten die Kosten auch dementsprechend niedrig sein. Einzig, dass Fachpersonal nötig ist, verhindert die Bestwertung. Da aber zumindest bei den Brennstoffzellensystemen ebenfalls der Elektromotor und ein kleiner Akku benötigt wird, ist die Wartung verglichen mit diesen einfacher.

Lokal werden mit diesem System keinerlei Emissionen freigesetzt. Da die Herstellung von Batterien als CO₂ lastig gilt³⁵⁹ und in diesem Projekt ein vergleichsweise großes Batteriepaket benötigt wird, werden bei dieser Lösung trotz einfachem System am meisten CO₂ emittiert.

Die Zulassung dieser Lösung sollte keine besonderen Probleme darstellen, da die Bodensee-Schiffsbetriebe (BSB) schon das Schiff „MS Mainau“ auf dem Bodensee mit Passagierbetrieb zugelassen und in Betrieb genommen hat.³⁶⁰ Aufgrund der großen benötigten Batterie entstehen hohe Kosten bei der Beschaffung für diese Lösung. Da die Kosten der Batterie die des Elektromotors weit übersteigen, kann der Vorteil vernachlässigt werden, dass der Elektromotor bei jeder Lösung mit Brennstoffzellen ebenfalls benötigt wird. Dagegen sind die Kosten für die Betankung sehr niedrig, da diese nur den Kosten des Stroms entsprechen und diese Lösung mit Abstand den höchsten Wirkungsgrad haben. Bei dem lokalen Anbieter „Stadtwerk am See“ kostet eine kWh grün hergestellter Strom zum Zeitpunkt dieser Arbeit netto 41,75 Cent.³⁶¹

³⁵⁸ vgl. (Brait, 2020) S. 43

³⁵⁹ vgl. (Verhelst, Turner, Sileghem, & Vancoillie, 2019) S. 47

³⁶⁰ vgl. (SWR, 2022)

³⁶¹ vgl. (Stadtwerk am See GmbH & Co. KG, kein Datum)

8. Diskussion

Wie in der Bewertungsmatrix in Tabelle 5 zu sehen ist, erreicht die Vergleichslösung aus NMC-Batterie und Elektromotor knapp die höchste Wertung. Die Lösung mit der LT-PEM Brennstoffzelle und in der Powerpaste gespeichertem Wasserstoff folgt mit einem Abstand von einem Prozentpunkt. Weit abgeschlagen sind beide Lösungen mit den Verbrennungsmotoren. Dies ist auf deren schlechtes Ergebnis in der Einzelbewertung zurück zu führen.

Da das Ziel des Umbaus nicht nur ein Wechsel auf ein mindestens CO₂ neutralen Antrieb ist sondern auch als Forschungsplattform für alternative Antriebe genutzt werden soll, wurde sich gegen die höchstbewertete Lösung entschieden. Diese Antriebslösung wird wie oben erklärt schon auf der „MS Mainau“ auf dem Bodensee genutzt und hätte dementsprechend keinen Mehrwert für die Forschung. Die Lösung mit der zweithöchsten Bewertung fällt vorläufig ebenfalls aus dem Raster, da die Powerpaste in den nächsten Jahren nicht in der erforderlichen Menge verfügbar sein wird. Auch die drittbestbewertete Antriebslösung mit Wasserstoff in einem 35 MPa Druckspeicher wird schon in einigen Schiffen und Autos betrieben, weshalb auch hier die Forschungsanforderung nicht erfüllt wird.

Aufgrund der oben genannten Argumente entschied sich der Auftraggeber gegen die bestbewerteten Lösungen. Die Entscheidung fiel auf die Lösung mit der HT-PEM Brennstoffzelle, welche mit grünem Methanol betrieben wird. Da bei dieser Lösung die Kosten, der Wirkungsgrad und die Wartbarkeit schlecht abschnitten und ohnehin ein Elektromotor mit Pufferbatterie benötigt wird, wird diese möglichst groß gewählt. Dadurch spielt der Wirkungsgrad eine geringere Rolle und ein Ausfall aufgrund schlechter Wartbarkeit hat geringere Auswirkungen. Ebenfalls sinken die Betriebskosten, da der Strom günstiger als das grüne Methanol ist. Zeitgleich kann der Betrieb einer Brennstoffzelle auf einem Passagierschiff auf dem Bodensee untersucht werden. Das System soll außerdem so ausgelegt werden, dass zukünftig die Powerpaste als Brennstoff eingesetzt werden kann, sobald diese in ausreichenden Mengen verfügbar ist. Dadurch lässt sich das Projekt auch nachhaltig als Forschungsplattform nutzen.

9. Fazit

Das Ziel dieser Masterarbeit ist, durch die Verwendung qualitativer Methoden herauszufinden, welches Antriebssystem mit welchem Brennstoff und welchem Speichersystem am besten geeignet ist, um das historische Fährschiff „Meersburg ex Konstanz“ auf dem Bodensee zukünftig mindestens CO₂ neutral zu betreiben.

Dazu wurden die Eigenschaften der Brennstoffe, Speichersysteme und Energiewandler betrachtet und miteinander verglichen. Die bestbewerteten Einzelobjekte wurden danach mittels morphologischem Kasten kombiniert. Daraufhin wurden die Eigenschaften jeder Kombination noch einmal analysiert und miteinander verglichen. Zusätzlich wurde als Vergleichssystem das batterieelektrische System hinzugezogen.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass der batterieelektrische Antrieb derzeit am besten abschneidet. Es ist jedoch zu sehen, dass zwischen diesem Antrieb und dem der Brennstoffzellen nur noch ein geringer Abstand ist. Sobald die Powerpaste in größeren Mengen und zu günstigeren Preisen verfügbar ist, kann diese Lösung sinnvoller werden als der batterieelektrische Antrieb. Aus diesem Grund wurde sich gegen diese Lösung entschieden und die weiteren Arbeiten werden um die zukunftsträgigere Antriebseinheit mit einer Brennstoffzelle handeln.

Da bei einigen Brennstoffen die grüne Herstellung noch in der Forschung steckt, sind zu diesen nur begrenzt oder auch widersprüchliche Informationen verfügbar. Dasselbe gilt für einen Teil der Speichersysteme und Energiewandler wie beispielsweise die Powerpaste oder LOHC und manche Brennstoffzellen oder dem Ammoniakverbrennungsmotor. Sollten einige der Forschungen Durchbrüche gelingen, kann sich das Ergebnis dieser Arbeit signifikant ändern. Darum liefert sie nur eine Momentaufnahme.

Literaturverzeichnis

- Accurso, F., Gandiglio, M., Santarelli, M., Buunk, J., Hakala, T., Kiviaho, J., . . . Varkaraki, E. (1. 07 2021). Installation of fuel cell-based cogeneration systems in the commercial and retail sector: Assessment in the framework of the COMSOS project. *Energy Conversion and Management*, S. 114202. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114202>
- Adomeit, D., Baar, D., Beck, D., Bönner, D., Dorenkamp, R., Drescher, D., . . . Steinel, K. (2013). *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. (H.-H. Braess, & U. Seiffert, Hrsg.) Grünwald: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-658-01691-3
- Advent Technologies. (kein Datum). *advent.energy*. Abgerufen am 10. 10 2023 von [advent.energy](https://www.advent.energy/marine/): <https://www.advent.energy/marine/>
- Araya, S. S. (2012). *High Temperature PEM Fuel Cells - Degradation and Durability*. Dissertation, Aalborg, Denmark. Abgerufen am 09. 10 2023 von https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/549531032/samuel_simon_araya.pdf
- Arndt, J.-D., Freyer, S., Geier, R., Machhammer, O., Schwartze, J., Volland, M., & Diercks, R. (01. 03 2007). Rohstoffwandel in der chemischen Industrie. *Chemie Ingenieur Technik*, S. 521 - 528. doi:10.1002/cite.200700025
- Auner, P. (2004). *Silicon as an intermediary between renewable energy and hydrogen*. Johann Wolfgang Goethe-University, Institute of Inorganic Chemistry. Frankfurt am Main: Deutsche Bank AG.
- Automobili Lamborghini S.p.A. (kein Datum). *lamborghini.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [lamborghini.com](https://www.lamborghini.com/de-en/geschichte/aventador-s): <https://www.lamborghini.com/de-en/geschichte/aventador-s>
- Babiel, G. (2020). *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik*. Kamp-Lintfort: Springer Vieweg.
- Badwal, S., Giddey, S., Kulkarni, A., Goel, J., & Basu, S. (01. 05 2015). Direct ethanol fuel cells for transport and stationary applications – A comprehensive review. *Applied Energy*, S. 80 - 103. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.002>
- Ballard Power Systems, Inc. (kein Datum). *ballard.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [ballard.com](https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcgen-hps.pdf?sfvrsn=704ddd80_6): https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcgen-hps.pdf?sfvrsn=704ddd80_6
- Basshuysen, R., & Schäfer, F. (2014). *Handbuch Verbrennungsmotor*. Bad Wimpfen/Hamm: Springer Vieweg.

- Baumann, M., Peters, J., & Weil, M. (2018). *ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE PERFORMANCE STATIONÄRER LI-ION-BATTERIESPEICHER*. Conference Paper. doi:10.3217/978-3-85125-586-7
- Bazzanella, D. M., & Ausfelder, D. (05 2017). *dechema.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *dechema.de*:
https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry.pdf
- Behr, A., & Seidensticker, T. (2018). *Einführung in die Chemie nachwachsender Rohstoffe*. Dortmund: Springer Spektrum. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-55255-1>
- Bergins, C., Fox, E. L., Tran, K., & Wuebben, P. (02 2016). Kommerzialisierung von Methanol mit niedriger CO₂-Intensität. *ATZ Extra*, S. 22-25. doi:<https://doi.org/10.1007/s35778-015-0110-1>
- Bertau, P., Müller, P., Fröhlich, D.-C., & Katzberg, D.-C. (2013). *Industrielle Anorganische Chemie*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi:10.1002/9783527649563
- Beyers, B. (30. 03 2021). *obrist.at*. Abgerufen am 10. 10 2023 von *obrist.at*:
https://www.obrist.at/wp-content/uploads/2021/05/300321_Interview_Obrist_Frank_DE.pdf
- Biedermann, G. (2009). *Kumulierter Energieaufwand (KEA) der Weizenproduktion bei verschiedenen Produktionssystemen (konventionell und ökologisch) und verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen (Pflug, Mulchsaat, Direktsaat)*. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, Department für Nachhaltige Agrarsysteme Institut für Landtechnik, Wien.
- Bloom Energy Corporation. (kein Datum). *goldenstateenergy.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *goldenstateenergy.com*:
<https://www.goldenstateenergy.com/files/Boomenergy%20DataSheet%20ES-5400.pdf>
- Bloom Energy Corporation. (kein Datum). *goldenstateenergy.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *goldenstateenergy.com*:
<https://www.goldenstateenergy.com/files/Bloomenergy%20DataSheet%20ES-5700.pdf>
- Bode, M. (03. 01 2022). *fluessiggas1.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *fluessiggas1.de*:
<https://www.fluessiggas1.de/wasserstoffspeicher/>

- Böhmer, R. (24. 08 2023). *utopia.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [utopia.de: https://utopia.de/ratgeber/ameisensaere-eigenschaften-anwendung-und-besonderheiten/](https://utopia.de/ratgeber/ameisensaere-eigenschaften-anwendung-und-besonderheiten/)
- Bolle, D.-W. (2012). *WaStraK NRW „Einsatz der Wasserstofftechnologie in der Abwasserbeseitigung“ - Phase I*. Abschlussbericht, Aachen. Abgerufen am 09. 10 2023 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/abwasser/forschung/pdf/WaStraK_Abschlussbericht_Teil%201.pdf
- Bolte, E. (2017). *Elektrische Maschinen*. Hamburg: Springer Vieweg.
- Börner, A., & Zeidler, J. (2022). *Chemie der Biologie*. Rostock: Springer Spektrum. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-64701-1>
- Brait, A. (2020). *Energieeffizienz und CO2-Bilanz konventioneller und alternativer Antriebstechnologien*. Masterarbeit, Wien. Abgerufen am 10. 10 2023 von https://evang.at/wp-content/uploads/2022/03/energieeffizienz-und-co2-bilanz-konventioneller-und-alternativer-antriebstechnologien_-masterarbeit-andreas-brait.pdf
- Braun, K., Wolf, M., Oliveira, A., Preuster, P., Wasserscheid, P., Thiele, S., . . . Wensing, M. (13. 06 2022). Energetics of Technical Integration of 2-Propanol Fuel Cells: Thermodynamic and Current and Future Technical Feasibility. *Energy Technology*. doi:<https://doi.org/10.1002/ente.202200343>
- Brodüffel, H. P. (18. 04 2023). *rheinische-anzeigenblaetter.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [rheinische-anzeigenblaetter.de: https://www.rheinische-anzeigenblaetter.de/bruehl/c-nachrichten/erste-mobile-wasserstofftankstelle-am-eisenwerk_a276169](https://www.rheinische-anzeigenblaetter.de/bruehl/c-nachrichten/erste-mobile-wasserstofftankstelle-am-eisenwerk_a276169)
- Bullis, K. (02. 02 2009). *technologyreview.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [technologyreview.com: https://www.technologyreview.com/2009/02/02/216190/efficient-ethanol-fuel-cells/](https://www.technologyreview.com/2009/02/02/216190/efficient-ethanol-fuel-cells/)
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. (07. 07 2023). *praxis-agrar.de*. Von [praxis-agrar.de: https://www.praxis-agrar.de/pflanze/ackerbau/pflanzenkohle#:~:text=Neben%20der%20Landwirtschaft%20fragen%20auch,500%20Euro%20pro%20Tonne%20Pflanzenkohle](https://www.praxis-agrar.de/pflanze/ackerbau/pflanzenkohle#:~:text=Neben%20der%20Landwirtschaft%20fragen%20auch,500%20Euro%20pro%20Tonne%20Pflanzenkohle) abgerufen
- Ceramic Fuel Cells Limited. (kein Datum). *yumpu.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [yumpu.com: https://www.yumpu.com/en/document/read/20894071/gennex-brochure-fuel-cell-markets](https://www.yumpu.com/en/document/read/20894071/gennex-brochure-fuel-cell-markets)

chemieshop24.de. (kein Datum). *chemieshop24.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von chemieshop24.de: <https://www.chemieshop24.de/ameisensaeeure-75-1100kg-container/1003654701000>

Conrad. (kein Datum). *conrad.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von conrad.de: <https://www.conrad.de/de/p/efoy-80-bt-brennstoffzelle-3-8-a-12-v-24-v-2305877.html>

Cooper, J., & Selman, R. (2009). *iopscience.iop.org*. doi:10.1149/1.3220176

Cryo Diffusion SAS. (07 2017). *files.chartindustries.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von files.chartindustries.com: <https://files.chartindustries.com/NMH.pdf>

Cryofab. (2019). *cryofab.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von cryofab.com: https://www.cryofab.com/wp-content/uploads/2019/08/Cryofab_CLH_Series_Specs_400.pdf

Cryolor. (03 2023). *cryolor.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von cryolor.com: <https://www.cryolor.com/sites/cryolor/files/2023-03/cryolor-lh2-brochure-03.23-sd.pdf>

DEMACO. (kein Datum). *demaco-cryogenics.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von demaco-cryogenics.com: <https://demaco-cryogenics.com/de/produkte/loading-arm/>

DENIOS SE. (kein Datum). *denios.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von denios.de: <https://www.denios.de/multitank-fuer-wassergefaehrdende-fluessigkeiten-mit-einem-flammpunkt-unter-55c-lackiert-2-400-liter-254349/254349>

Depken, J. (02. 05 2022). *elib.dlr.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von elib.dlr.de: https://elib.dlr.de/188226/1/2022-03-28_Pr%C3%A4si.pdf

Derking, H., van der Togt, L., & Keezer, M. (2019). *Liquid Hydrogen Storage: Status and Future Perspectives*. Enschede, The Netherlands: cryoworld advanced cryogenics. Abgerufen am 09. 10 2023 von <https://www.utwente.nl/en/tnw/ems/research/ats/Events/chmt/m13-hendrie-derking-cryoworld-chmt-2019.pdf>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). (kein Datum). *gestis.dguv.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [gestis.dguv.de: https://gestis.dguv.de/data?name=008040](https://gestis.dguv.de/data?name=008040)

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). (kein Datum). *gestis.dguv.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [gestis.dguv.de: https://gestis.dguv.de/data?name=011240](https://gestis.dguv.de/data?name=011240)

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). (kein Datum). *gestis.dguv.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von *gestis.dguv.de*:
<https://gestis.dguv.de/data?name=010420>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). (kein Datum). *gestis.dguv.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von *gestis.dguv.de*:
<https://gestis.dguv.de/data?name=011490>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). (kein Datum). *gestis.dguv.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von *gestis.dguv.de*:
<https://gestis.dguv.de/data?name=013580>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). (kein Datum). *gestis.dguv.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von *gestis.dguv.de*:
<https://gestis.dguv.de/data?name=011190>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). (kein Datum). *gestis.dguv.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von *gestis.dguv.de*:
<https://gestis.dguv.de/data?name=011980>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). (kein Datum). *gestis.dguv.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von *gestis.dguv.de*:
<https://gestis.dguv.de/data?name=536303>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). (kein Datum). *gestis.dguv.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von *gestis.dguv.de*:
<https://gestis.dguv.de/data?name=531390>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). (kein Datum). *gestis.dguv.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von *gestis.dguv.de*:
<https://gestis.dguv.de/data?name=001100>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). (kein Datum). *gestis.dguv.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von *gestis.dguv.de*:
<https://gestis.dguv.de/data?name=002010>

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR); Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST); Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE; KBB Underground Technologies GmbH. (28. 11 2014). *elib.dlr.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *elib.dlr.de*: https://elib.dlr.de/94979/1/2014_DLR_ISE_KBB_LBST_PlanDelyKaD.pdf

- DEUTZ AG. (kein Datum). *deutz.com*. Abgerufen am 10. 10 2023 von deutz.com:
https://www.deutz.com/fileadmin/contents/com/engines/marine/de/BFM_1013M_Marine_DE.pdf
- Doosan Fuel Cell America, Inc. (2018). *doosanfuelcellpower.com*. Abgerufen am 09. 10 2023
von [doosanfuelcellpower.com:](https://www.doosanfuelcellpower.com/download/pdf/catalog/pafc-400kw_en.pdf)
https://www.doosanfuelcellpower.com/download/pdf/catalog/pafc-400kw_en.pdf
- Doosan Fuel Cell America, Inc. (kein Datum). *doosanfuelcell.com*. Abgerufen am 09. 10 2023
von doosanfuelcell.com: <https://www.doosanfuelcell.com/en/prod/prod-0102/>
- Doppelbauer, M. (2020). *Grundlagen der Elektromobilität*. Karlsruhe: Springer Vieweg.
doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-29730-5>
- Doppelbauer, P. (kein Datum). *eti.kit.edu*. Abgerufen am 10. 10 2023 von eti.kit.edu:
[https://www.eti.kit.edu/1376.php#:~:text=1835%20bauten%20die%20beiden%20Holl%3%A4nder,Elektromotor%20erteilt%20\(Thomas%20Davenport\)](https://www.eti.kit.edu/1376.php#:~:text=1835%20bauten%20die%20beiden%20Holl%3%A4nder,Elektromotor%20erteilt%20(Thomas%20Davenport))
- Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. (kein Datum). *media.porsche.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von
media.porsche.com: <https://media.porsche.com/mediakit/innovation-sustainability-performance/de/innovation-sustainability-performance/synthetic-fuels>
- Duan, L., Yue, L., Feng, T., Lu, H., & Bian, J. (15. 08 2016). Study on a novel pressurized MCFC hybrid system with CO₂ capture. *Energy*, S. 737 - 750.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.074>
- Eckert, P., Eichseder, H., Rakowski, S., & Tschöke, H. (2019). *Grundlagen Verbrennungsmotoren*. (G. Merker, & R. Teichmann, Hrsg.) Tettnang; Graz: Springer Vieweg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-23557-4>
- EnBW. (kein Datum). *enbw.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von enbw.com:
<https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/forschung/erneuerbare-energien/biokohle.html>
- Espinosa-Loza, F., Aceves, S., Ledesma-Orozco, E., Ross, T., & Weisberg, A. (2009). High Density Automotive Hydrogen Storage with Cryogenic Capable Pressure Vessels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1219-1226. Abgerufen am 09. 10 2023 von
<https://www.osti.gov/biblio/1213633>
- Europäische Kommission. (2020). *climate.ec.europa.eu*. Abgerufen am 09. 10 2023 von
climate.ec.europa.eu: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_de#:~:text=Die%20Verbrennung%20fossiler%20Brennstoffe%2C%20die,Treibhauseffekt%20und%20die%20Erderw%3%A4rmung%20verst%3%A4rkt

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). (10 2008). *bosy-online.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von bosy-online.de: <http://www.bosy-online.de/biogas/basisdaten-biogas-fnr.pdf>

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). (kein Datum). *biokraftstoffe.fnr.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von biokraftstoffe.fnr.de: <https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/bioethanol>

Fisher Scientific GmbH. (kein Datum). *fishersci.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von fishersci.de: <https://www.fishersci.de/shop/products/200lt-formic-acid-98-100-specified-re/11981794>

Fisher Scientific GmbH. (kein Datum). *fishersci.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von fishersci.de: <https://www.fishersci.de/shop/products/hydrazine-hydrate-100-hydrazine-64-thermo-scientific/10276440>

Fraunhofer IGB. (08. 03 2023). *igb.fraunhofer.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von igb.fraunhofer.de: <https://www.igb.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/2023/gruenes-gold-torrefizierte-biomasse-ersetzt-kohle-und-oel.html>

Fraunhofer IGB. (kein Datum). *Trocknung mit überhitztem Wasserdampf bei Atmosphärendruck*. Stuttgart.

Fuel Cell Store. (kein Datum). *fuelcellstore.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von fuelcellstore.com: <https://www.fuelcellstore.com/hydrogen-equipment/hydrogen-storage/bl-740-metal-hydride?sort=p.price&order=DESC>

Fuel Cell Store. (kein Datum). *fuelcellstore.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von fuelcellstore.com: <https://www.fuelcellstore.com/hydrogen-equipment/hydrogen-storage/my-h2-2000-hydrogen-storage?sort=p.price&order=DESC>

FuelCell Energy Solutions GmbH. (12 2012). *energy-saxony.net*. Abgerufen am 09. 10 2023 von energy-saxony.net: https://www.energy-saxony.net/fileadmin/Inhalte/Downloads/Pressemitteilungen/Pressefaecher/FCES/alt/FuelCell_product_sheet_DFC3000EU_en.pdf

Gaulhofer, H. (2015). *Ottomotor und Dieselmotor im Vergleich Mögliche Einsparpotentiale*. Diplomarbeit, Mittweide. Abgerufen am 10. 10 2023 von https://monami.hs-mittweida.de/frontdoor/deliver/index/docId/5568/file/Ottomotor+und+Dieselmotor+im+Vergleich++M%C3%B6gliche+Einsparungspotentiale+_+Harald+Gaulhofer.pdf

- Geitmann, S. (2006). *Wasserstoff und Brennstoffzellen: Die Technik von morgen*. Hydrogeit Verlag.
- GenCell. (kein Datum). *gencellenergy.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *gencellenergy.com*: <https://www.gencellenergy.com/news/comparing-fuel-cell-technologies/>
- Gericke, K., Bender, B., Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (2020). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Rostock, Bochum: Springer Vieweg.
- Graetz, J., Wolstenholme, D., Pez, G., Klebanoff, L., McGrady, S., & Cooper, A. (2013). *Hydrogen Storage Technology Materials and Applications*. Boca Raton, United States: CRC Press.
- Greenhouse Gas Technology Center. (2007). *FuelCell Energy, Inc. - DFC 300A Molten Carbonate Fuel Cell Combined Heat and Power System*. Danbury, United States: Southern Research Institute.
- Groos, U., Cremers, C., & Nusch, L. (2022). *Wasserstofftechnologien*. (R. Neugebauer, Hrsg.) München: Springer Vieweg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-64939-8>
- H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG. (2023). *h2.live*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *h2.live*: <https://h2.live/>
- Haag, C., Schuh, G., Kreysa, J., & Schmelter, K. (2011). *Technologiemanagement*. (G. Schuh, & S. Klappert, Hrsg.) Heidelberg: Springer.
- Hamacher, T. (2017). *Wasserstoff und Brennstoffzelle*. (J. Töpler, & J. Lehmann, Hrsg.) Berlin: Springer Vieweg.
- Härtl, M. (2023). *Emissionsfreie Mobilität und Energiewende*. München: Springer Vieweg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-67425-3>
- Härtl, M., Pélerin, D., Gaukel, K., Dworschak, P., & Wachtmeister, G. (2019). *Zukünftige Kraftstoffe*. (W. Maus, Hrsg.) Bergisch Gladbach: Springer Vieweg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58006-6>
- Heckele, L., Tesar, M., Igelspacher, J., Brunner, J., & Gratzfeld, P. (16. 03 2022). Steigerung der Leistungsdichte und des Wirkungsgrades von Straßenbahnantrieben durch den Einsatz hochdrehender Maschinen. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, S. 186 - 194. doi:<https://doi.org/10.1007/s00502-022-01011-6>
- Hezel, P., & Keller, S. (kein Datum). *Mobilität im Wandel Statista Dossierplus zu den Verkehrstrends der Zukunft*. Statista.

- Höfer Chemie GmbH. (kein Datum). *hoefer-shop.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von hoefer-shop.de: <https://hoefer-shop.de/ibc-isopropanol-99>
- Hofmann, P. (2010). *Jahresbericht 2010*. Technische Universität Dresden. Abgerufen am 10. 10 2023 von <https://link.springer.com/article/10.1007/s00502-022-01011-6>
- Horizon Educational. (kein Datum). *horizoneducational.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von horizoneducational.com: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1174681/1174681.pdf>
- Irena and methanol institute. (2021). *irena.org*. Abgerufen am 09. 10 2023 von irena.org: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf?rev=ca7ec52e824041e8b20407ab2e6c7341
- Joachim Herz Stiftung. (kein Datum). *leifichemie.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von leifichemie.de: <https://www.leifichemie.de/grundlagen-der-organischen-chemie/alkohole/grundwissen/herstellung-von-ethanol>
- JOQORA GmbH. (kein Datum). *joqora.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von joqora.de: <https://www.joqora.de/glycerin-geprueft-nach-ph.-eur.-99-5/4260452040122>
- Jorgensen, S. (04 2011). Hydrogen storage tanks for vehicles: Recent progress and current status. *Current Opinion in Solid State and Materials Science, Volume 15*(Issue 2), S. 39 - 43. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cossms.2010.09.004>
- Jörissen, L., & Garcke, J. (2017). *Wasserstoff und Brennstoffzelle*. (J. Töpler, & J. Lehmann, Hrsg.) Berlin: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-662-53360-4
- Kamarudin, M., Kamarudin, S., Masdar, M., & Daud, W. (26. 07 2013). Review: Direct ethanol fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, S. 9438 - 9453. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.059>
- Kaur, R., Krishnasamy, V., Muthusamy, K., & Chinnamuthan, P. (15. 03 2017). A novel proton exchange membrane fuel cell based power conversion system for telecom supply with genetic algorithm assisted intelligent interfacing converter. *Energy Conversion and Management*, S. 173 - 183. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.014>
- Klabunde, J., Bischoff, C., & Papa, A. (2018). Propanols. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, S. 1 - 14. doi:https://doi.org/10.1002/14356007.a22_173.pub3open_in_newISBN
- Klell, M., Eichseder, H., & Trattner, A. (2018). *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*. Graz, Österreich: Springer Vieweg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-20447-1>

- Kohse-Höinghaus, P., Oßwald, D., Cool, P., Kasper, D., Hansen, D., Qi, P., . . . Westmoreland, P. (06. 05 2010). Verbrennungschemie der Biokraftstoffe: von Ethanol bis Biodiesel. *Angewandte Chemie*, S. 3652 - 3679. doi:<https://doi.org/10.1002/ange.200905335>
- Konstanzer Gemeinderat. (02. 05 2019). *konstanz.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [konstanz.de: https://www.konstanz.de/site/Konstanz/get/params_E-1749585963_Dattachment/118773/Klimanotstand_Ratsbeschluss%20und%20verabschiedete%20Resolution%20%20vom%202.%20Mai%202019.pdf](https://www.konstanz.de/site/Konstanz/get/params_E-1749585963_Dattachment/118773/Klimanotstand_Ratsbeschluss%20und%20verabschiedete%20Resolution%20%20vom%202.%20Mai%202019.pdf)
- Kowal, D. (2015). *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs*. (P. Tschöke, Hrsg.) Magdeburg: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-658-04644-6
- Kunze, D., & Kircher, D. (28. 09 2012). *yumpu.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [yumpu.com: https://www.yumpu.com/en/document/read/26741293/cryo-compressed-hydrogen-storage](https://www.yumpu.com/en/document/read/26741293/cryo-compressed-hydrogen-storage)
- Kurzweil, P. (2016). *Brennstoffzellentechnik*. Amberg: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-658-14935-2
- Kurzweil, P. (2020). *Angewandte Elektrochemie*. Amberg: Springer Vieweg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-32421-6>
- Kurzweil, P., & Dietlmeier, O. (2018). *Elektrochemischer Speicher*. Amberg: Springer Vieweg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-21829-4>
- Lando, E. T. (2020). *Entwicklung eines ereignisbasierten Lebensdauermodells und Validierung der linearen Schadensakkumulationshypothese für NMC/Graphit Lithium-Ionen Zellen*. Göttingen. Abgerufen am 09. 10 2023 von https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/clausthal_derivate_00001594/Db114987.pdf
- Latscha, H. P., Kazmaier, U., & Klein, H. A. (2016). *Organische Chemie*. Heidelberg; Saarbrücken; Bonn: Springer Spektrum. doi:10.1007/978-3-662-46180-8
- Lehmann, J., & Luschtinetz, T. (2014). *Wasserstoff und Brennstoffzellen*. Stralsund: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-642-34668-2
- Lide, D. R. (2003). *Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press.
- Liebeck, M. (18. 03 2014). *tuprints.ulb.tu-darmstadt.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [tuprints.ulb-tu-darmstadt.de: https://tuprints.ulb-tu-darmstadt.de/4380/1/Dissertation%20Miriam%20Liebeck_2015.pdf](https://tuprints.ulb-tu-darmstadt.de/4380/1/Dissertation%20Miriam%20Liebeck_2015.pdf)

- Lindhjem, C., & Beardsley, M. (1998). *Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling*. Report. Abgerufen am 10. 10 2023 von <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=34dc5d00f479eb8d54629e6a0c3a16d58c8837b1>
- LUMITOS AG. (kein Datum). *chemie.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *chemie.de*: <https://www.chemie.de/lexikon/Methanol.html>
- LUMITOS AG. (kein Datum). *chemie.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *chemie.de*: <https://www.chemie.de/lexikon/Ethanol.html>
- Luxfer Gas Cylinders. (03. 05 2023). *luxfercylinders.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *luxfercylinders.com*: <https://www.luxfercylinders.com/support/luxfer-g-stor-go-h2-spec-sheet>
- Luxfer Gas Cylinders. (03. 05 2023). *luxfercylinders.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *luxfercylinders.com*: <https://www.luxfercylinders.com/support/luxfer-g-stor-pro-h2-spec-sheet>
- Mamaghani, A. H., Najafi, B., Casalegno, A., & Rinaldi, F. (25. 04 2016). Long-term economic analysis and optimization of an HT-PEM fuel cell based micro combined heat and power plant. *Applied Thermal Engineering*, S. 1201 - 1211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.021>
- MAN Diesel & Turbo. (04 2014). *man-es.com*. Abgerufen am 10. 10 2023 von *man-es.com*: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/K98ME7_1.pdf
- Mardini, N., & Bicer, Y. (06. 04 2021). Direct synthesis of formic acid as hydrogen carrier from CO₂ for cleaner power generation through direct formic acid fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46(Issue 24), S. 13050 - 13060. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.124>
- Mareis, C. (24. 01 2018). *edoc.unibas.ch*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *edoc.unibas.ch*: <https://edoc.unibas.ch/48012/1/%5BMaske%20und%20Kothurn%5D%20Quadratisch%20praktisch%20gut.pdf>
- Marine Classified Media AG. (kein Datum). *boat24.com*. Abgerufen am 10. 10 2023 von *boat24.com*: https://www.boat24.com/en/engines/?src=&mode=AND&exc=&cat=8&typ%5B%5D=1313&whr=EUR&prs_min=&prs_max=&jhr_min=2020&jhr_max=&lei_min=&lei_max=&fue%5B%5D=2109&fue%5B%5D=2112&gew_min=&gew_max=&search=&sort=chfdesc

- Matthes, D. C., Heinemann, C., Hesse, D., Kasten, P., Mendelevitch, D., Seebach, D., . . . Cook, V. (04. 09 2020). *oeko.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *oeko.de*: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Wasserstoff-und-wasserstoffbasierte-Brennstoffe.pdf>
- Mayer, T. (17. 06 2020). *mediatum.ub.tum.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *mediatum.ub.tum.de*: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1548391/1548391.pdf>
- Meier, J. (2014). *Entwicklung und Anwendung hydrodynamischer Methoden zur Untersuchung von Massentransporteffekten in der Elektrooxidation von Ethanol*. Dissertation, München. Abgerufen am 09. 10 2023 von <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1174681/1174681.pdf>
- Mitzel, D., & Friedrich, P. (2017). Wasserstoff und Brennstoffzellen. *BWK Das Energie-Fachmagazin*, 69(Nr. 5), S. 124 - 134. Abgerufen am 09. 10 2023 von <https://elib.dlr.de/112632/1/2017%20BWK%205%20Wasserstoff.pdf>
- Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG. (kein Datum). *hatz-diesel.com*. Abgerufen am 10. 10 2023 von *hatz-diesel.com*: <https://www.hatz-diesel.com/d-serie/1d42/>
- Motte, J., Mahmoud, M., Nieder-Heitmann, M., Vleeming, H., Thybaut, J., Poissonnier, J., . . . Dewulf, J. (12. 07 2022). Environmental Performance Assessment of a Novel Process Concept for Propanol Production from Widely Available and Wasted Methane Sources. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. doi:<https://doi.org/10.1021%2Facs.iecr.2c00808>
- Native Dynamics. (26. 03 2014). *neutrium.net*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *neutrium.net*: <https://neutrium.net/properties/specific-energy-and-energy-density-of-fuels/>
- Neugebauer, R. (2022). *Wasserstofftechnologien*. (R. Neugebauer, Hrsg.) München: Springer Vieweg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-64939-8>
- Nölke, M. (2006). *Entwicklung eines Direkt-Methanol-Brennstoffzellensystems der Leistungsklasse kleiner 5 kW*. Dissertation, Hameln. Abgerufen am 09. 10 2023 von <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20903018>
- Noreikat, H.-P. (2015). *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs*. Magdeburg: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-658-04644-6
- Ong, B., Kamarudin, S., & Basri, S. (13. 04 2017). Direct liquid fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, S. 10142 - 10157. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.117>

- Oono, Y., Sounai, A., & Hori, M. (01. 11 2013). Prolongation of lifetime of high temperature proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, S. 87 - 93. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.122>
- Otto, A. (2015). *juser.fz-juelich.de*. (F. J. GmbH, Hrsg.) Abgerufen am 09. 10 2023 von [juser.fz-juelich.de](https://juser.fz-juelich.de/record/202664/files/Energie_Umwelt_268.pdf): https://juser.fz-juelich.de/record/202664/files/Energie_Umwelt_268.pdf
- Pagliaro, M., Ciriminna, R., Kimura, H., Rossi, M., & Pina, C. D. (31. 05 2007). Von Glycerin zu höherwertigen Produkten. *Angewandte Chemie*, S. 4516 - 4522. doi:<https://doi.org/10.1002/anie.200604694>
- Palanisamy, R., Rengarajan, V., Sozhen, G., & Narasimham, K. (02. 04 1993). *ippta.co*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [ippta.co](https://ippta.co/wp-content/uploads/2021/01/IPPTA-52-45-48-Electrolytic-Production-of.pdf): <https://ippta.co/wp-content/uploads/2021/01/IPPTA-52-45-48-Electrolytic-Production-of.pdf>
- Paster, M., Ahluwalia, R., Berry, G., Elgowainy, A., Lasher, S., McKenney, K., & Gardiner, M. (03. 09 2011). Hydrogen storage technology options for fuel cell vehicles: Well-to-wheel costs, energy efficiencies, and greenhouse gas emissions. *International Journal of Hydrogen Energy*, S. 14534 - 14551. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.056>
- Paukert, E. (2019). *Einsatzmöglichkeiten innovativer Wasserstoffspeicher*. Masterarbeit, Pinkafeld, Österreich.
- Pawlik, V. (04. 09 2023). *statista.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [statista.com](https://de.statista.com/statistik/daten/studie/730823/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-methanol-auf-dem-europaeischen-markt/): <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/730823/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-methanol-auf-dem-europaeischen-markt/>
- Pérez-Fortes, M., & Tzimas, E. (2016). *Techno-economic and environmental evaluation of CO2 utilisation for fuel production*. Luxembourg: Joint Research Centr. doi:10.2790/981669
- Rashidi, R., Berg, P., & Dincer, I. (05 2009). Performance investigation of a combined MCFC system. *International Journal of Hydrogen Energy*, S. 4395 - 4405. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.038>
- Reiche, A., Haufe, S., Weisshaar, S., Bandarapu, B., Gronwald, O., & Kiel, S. (2008). *Hochtemperatur-Polymer-elektrolyt-Brennstoffzellentechnologie (HT-PEM-FC)*. Technologiereport. Abgerufen am 09. 10 2023 von https://www.researchgate.net/profile/Annette-Reiche/publication/351687365_Hochtemperatur-Polymer-elektrolyt-Brennstoffzellentechnologie_HT-PEM-

FC/links/60a4bc5292851ccc66b81568/Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-
Brennstoffzellentechnologie-HT-PEM-FC.pdf

RENEWA GmbH. (kein Datum). *energieheld.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von
energieheld.de: <https://www.energieheld.de/heizung/oelheizung/heizoeltank>

Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V. (kein Datum). *historische-faehre-konstanz.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von historische-faehre-konstanz.de: <http://www.historische-faehre-konstanz.de/Die%20F%C3%A4hre.html>

Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V. (kein Datum). *historische-faehre-konstanz.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von historische-faehre-konstanz.de: <http://www.historische-faehre-konstanz.de/Die%20F%C3%A4hre/Zur%20Entstehung%20der%20ersten%20Boden-seef%C3%A4hre.html>

Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V. (kein Datum). *historische-faehre-konstanz.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von historische-faehre-konstanz.de: <http://www.historische-faehre-konstanz.de/Chronik/Die%20erste%20aktive%20Zeit.html>

Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V. (kein Datum). *historische-faehre-konstanz.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von historische-faehre-konstanz.de: <http://www.historische-faehre-konstanz.de/Chronik/Arbeitsschiff%20LUKAS.html>

Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V. (kein Datum). *historische-faehre-konstanz.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von historische-faehre-konstanz.de: <http://www.historische-faehre-konstanz.de/Chronik/Gutachten%201992.html>

Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V. (kein Datum). *historische-faehre-konstanz.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von historische-faehre-konstanz.de: <http://www.historische-faehre-konstanz.de/Chronik/Chronologie%20der%20Restaurierung.html#a3>

Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V. (kein Datum). *historische-faehre-konstanz.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von historische-faehre-konstanz.de: <http://www.historische-faehre-konstanz.de/Die%20F%C3%A4hre/Der%20alte%20Antrieb.html>

Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V. (kein Datum). *historische-faehre-konstanz.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von historische-faehre-konstanz.de: <http://www.historische-faehre-konstanz.de/Chronik/1998.html>

Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V. (kein Datum). *historische-faehre-konstanz.de*.
Abgerufen am 09. 10 2023 von historische-faehre-konstanz.de: <http://www.historische-faehre-konstanz.de/Die%20F%C3%A4hre/Der%20alte%20Antrieb.html#a5>

- Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V. (kein Datum). *historische-faehre-konstanz.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *historische-faehre-konstanz.de*: <http://www.historische-faehre-konstanz.de/Chronik/2002.html#a7>
- Rettet die Meersburg ex Konstanz e.V. (kein Datum). *historische-faehre-konstanz.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *historische-faehre-konstanz.de*: <http://www.historische-faehre-konstanz.de/Die%20F%C3%A4hre/Der%20neue%20Antrieb.html>
- roads2hy. (25. 12 2013). *de.scribd.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *de.scribd.com*: <https://de.scribd.com/document/193613436/Hydrogen-Pathway-Cost-Analysis>
- Röntzsch, L., Heubner, F., Schmidt, F., Mauermann, S., & Vogt, M. (2022). *POWERPASTE-Technologie: Bedarfsgerechte Wasserstoffherzeugung für Brennstoffzellen*. Karlsruher Bezirksverein: VDI .
- Rosen, P. A. (2017). *Beitrag zur Optimierung von Wasserstoffdruckbehälter*. (V. A. AutoUni, Hrsg.) Wolfsburg: Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978>
- S3 Chemicals. (kein Datum). *shop.es-drei.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *shop.es-drei.de*: <https://shop.es-drei.de/alkohole/217/1-propanol-min.-99-5?number=S10036425>
- Salewski, K. (2022). *Konzepte zur praktischen Umsetzung der Energiewende*. (J. Schettel, Hrsg.) Krefeld: LIT Verlag Dr. W. Hopf Berlin.
- Sauer, P. U. (2015). *Die Elektrifizierung des Antriebstrangs*. (P. Tschöke, Hrsg.) Magdeburg: Springer Vieweg. doi:[10.1007/978-3-658-04644-6](https://doi.org/10.1007/978-3-658-04644-6)
- Saupe, A. (kein Datum). *genius-group.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *genius-group.de*: <https://www.genius-group.de/wp-content/uploads/Gefaehrdungspotential-von-Batteriespeicherkraftwerken.pdf>
- Schack, D., & Sundmacher, K. (kein Datum). *pure.mpg.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *pure.mpg.de*: https://pure.mpg.de/rest/items/item_2564825/component/file_2642778/content
- Schreiner, K. (2011). *Basiswissen Verbrennungsmotor*. Bermatingen: Vieweg+Teubner Verlag.
- Schreiner, K. (2020). *Basiswissen Verbrennungsmotor*. Konstanz: Springer Vieweg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-29226-3>
- Schwaderlapp, M., Adomeit, P., Kolbeck, A., & Thewes, M. (2012). Ethanol und sein Potenzial für Downsizing-Motorenkonzepte. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 73, S. 120 - 125. doi:<https://doi.org/10.1365/s35146-012-0246-0>

- Schwarzer, C. (01. 09 2020). *heise.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von heise.de:
<https://www.heise.de/hintergrund/Synthetisches-Benzin-Wenig-effizient-aber-sinnvoll-4882635.html>
- Senn, P., & Lucà, D.-I. (11. 12 2002). *projekte.uni-hohenheim.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von projekte.uni-hohenheim.de:
<https://projekte.uni-hohenheim.de/gaerung/dateien/Gesamtstudie%20120503.pdf>
- Siebel, T. (28. 04 2022). *springerprofessional.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [springerprofessional.de](https://www.springerprofessional.de):
<https://www.springerprofessional.de/brennstoffzelle/wasserstoff/wie-brennstoffzellen-wirtschaftlich-produziert-werden-koennen/20352222#:~:text=Die%20Kosten%20eines%20Brennstoffzellen%2DStacks,auf%20etwa%20800%20Euro%2FkW>
- Soares, R., Simonetti, D., & Dumesic, J. (01. 06 2006). Glycerol as a source for fuels and chemicals by low-temperature catalytic processing. *Angewandte Chemie International Edition*, S. 3982 - 3985. doi:<https://doi.org/10.1002/anie.200600212>
- SolydEra GmbH. (kein Datum). *bluegen.eu*. Abgerufen am 09. 10 2023 von bluegen.eu:
https://bluegen.eu/wp-content/uploads/2022/09/Brochure_Bluegen_DEU_2022-09_v3_acc.pdf
- Stadtwerk am See GmbH & Co. KG. (kein Datum). *stadtwerk-am-see.de*. Abgerufen am 10. 10 2023 von [stadtwerk-am-see.de](https://www.stadtwerk-am-see.de):
<https://www.stadtwerk-am-see.de/de/Wohnen/Strom/Oeko-BASIS-STROM/?ConsentReferrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F#preise>
- Stahl, D.-U., Burtscher, J., Greim, G., Gissibl, G., Baber, D., & Franke, L. (2017). *Kryodruck Tanksystem und Betankung - Validierung bis zum Normierungsvorschlag*. München: BMW GROUP.
- Stan, C. (2020). *Alternative Antriebe für Automobile*. Zwickau: Springer Vieweg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61758-8>
- Statista Research Department. (18. 05 2016). *statista.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von [statista.com](https://de.statista.com):
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/555520/umfrage/schaeden-einer-klimaerwaermung-nach-grad-der-erderwaermung/>
- Statista Research Department. (06. 10 2023). *de.statista.com*. Abgerufen am 10. 10 2023 von de.statista.com:
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/249880/umfrage/ps-zahl-verkaufter-neuwagen-in-deutschland/>

- Statista Research Department. (12. 04 2023). *de.statista.com*. Abgerufen am 10. 10 2023 von *de.statista.com*: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/820898/umfrage/co2-ausstoss-von-kompaktwagen-nach-antriebsart-in-deutschland/>
- Statista Research Department. (24. 08 2023). *statista.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *statista.com*: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1073559/umfrage/durchschnittliche-temperaturschwankungen-land-meer/>
- Statista Research Department. (04. 10 2023). *statista.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *statista.com*: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/214878/umfrage/wechselkurs-des-euro-gegenueber-dem-us-dollar-monatliche-entwicklung/>
- Sterner, P., Bauer, F., Crotogino, F., Eckert, F., van Olshausen, C., Teichmann, D., & Thema, M. (2017). *Energiespeicher*. (M. Sterner, & I. Stadler, Hrsg.) Regensburg, Köln: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-662-48893-5
- Streppel, B. (2011). *Hydrogen Adsorption on Metal-Organic Frameworks*. Dissertation, Kirchheim unter Teck.
- SWR. (19. 09 2022). *swr.de*. Abgerufen am 10. 10 2023 von *swr.de*: <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/friedrichshafen/e-schiff-auf-dem-bodensee-100.html>
- The Maritime Executive. (28. 08 2017). *maritime-executive.com*. Abgerufen am 10. 10 2023 von *maritime-executive.com*: <https://www.maritime-executive.com/article/methanol-fuel-cell-powered-passenger-ferry-sets-sail>
- thyssenkrupp Industrial Solutions AG. (kein Datum). *insights.thyssenkrupp-uhde.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *insights.thyssenkrupp-uhde.com*: <https://insights.thyssenkrupp-uhde.com/de/story/gruene-ammoniak-kleinanlagen-eroeffnen-neue-speichermoeglichkeiten-fuer-wind-und-sonnenenergie/>
- Tomantschger, K., McClusky, F., Oporto, L., & Reid, A. (11 1986). Development of low cost alkaline fuel cells. *Journal of Power Sources*, S. 317 - 335. doi:[https://doi.org/10.1016/0378-7753\(86\)80089-1](https://doi.org/10.1016/0378-7753(86)80089-1)
- Tomioka, J.-i., Kiguchi, K., Tamura, Y., & Mitsubishi, H. (kein Datum). *h2tools.org*. Abgerufen am 09. 10 2023 von *h2tools.org*: <https://h2tools.org/sites/default/files/2019-08/Influence%20of%20Temperature%20on%20the%20Fatigue%20Strength%20of%20Compressed%20Hydrogen%20Tanks%20for%20Vehicles.pdf>

- Torqueedo. (2021). *Technische Beschreibung für ein Torqueedo Antriebssystem*. Angebot.
- Torqueedo. (kein Datum). *torqueedo.com*. Abgerufen am 09. 10 2023 von torqueedo.com:
<https://www.torqueedo.com/de/produkte/innenborder/deep-blue-100i-900/000-01059.html>
- Tschöke, H., & Mollenhauer, K. (2020). *Dubbel* (Bd. 3). (B. Bender, & D. Göhlich, Hrsg.)
 Bochum, Berlin: Springer Vieweg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59715-6>
- Türk, O. (2014). *Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe*. Bingen: Springer Vieweg.
 doi:10.1007/978-3-8348-2199-7
- Vaidya, P., & Rodrigues, A. (15. 03 2006). Insight into steam reforming of ethanol to produce hydrogen for fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, S. 39 - 49.
 doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2005.12.008>
- Verhelst, S., Turner, J., Sileghem, L., & Vancoillie, J. (01 2019). Methanol as a fuel for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, S. 43 - 88.
 doi:<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.001>
- Villforth, J. (2023). *Bewertung der Potenziale ottomorischer Verbrennung durch den Einsatz alternativer Kraftstoffe*. Stuttgart: Springer Vieweg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-41178-7>
- Vogt, D., & Heubner, D. (2022). *Powerpaste for Off-Grid Power Supply*. Dresden: Fraunhofer IFAM.
- Walz, J. (18. 02 2017). Fact Sheet XXL Formel E Buenos Aires.
- Watter, H. (2022). *Regenerative Energiesysteme*. Tarp: Springer Vieweg.
 doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-35868-6>
- Weigelt, M., Mayr, A., Böhm, R., Kühl, A., & Franke, J. (2018). Quo vehis, Elektromobilität? *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, S. 59 - 63.
 doi:<https://doi.org/10.3139/104.111863>
- Weiler, D. (24. 11 2020). *idw-online.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von idw-online.de:
<https://idw-online.de/de/news758534>
- Wencker, T. (15. 09 2022). *asue.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von asue.de:
https://asue.de/aktuelles_presse/kosten_von_wasserstoff_hydex
- Werhahn, J. (2008). *Kosten von Brennstoffzellensystemen auf Massensbasis in Abhängigkeit von der Absatzmenge*. Forschungszentrum Jülich GmbH. Abgerufen am 09. 10 2023 von <https://core.ac.uk/download/pdf/34943275.pdf>

- Wietschel, M., Plötz, P., Dütschke, E., Neuner, F., Tröger, J., & Gnann, T. (2023). *Diskussionsbeitrag - Eine kritische Diskussion der beschlossenen Maßnahmen zur E-Fuel-Förderung im Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung der Bundesregierung vom 28.3.2023*. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Willig, H.-P. (kein Datum). *chemie-schule.de*. Abgerufen am 09. 10 2023 von chemie-schule.de: <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Methanolherstellung>
- WinGD. (kein Datum). *wingd.com*. Abgerufen am 10. 10 2023 von wingd.com: <https://www.wingd.com/en/engines/world-record-12x92df/>
- Winklhofer, D., & Stepan, D. (2022). *sag.at*. Abgerufen am 09. 10 2023 von sag.at: https://www.sag.at/wp-content/uploads/2022/04/sag_whitepaper_lh2.pdf

Anhang

A1: Eigenschaften der Brennstoffe

| | | |
|---|--|-----------------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 120 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 0,0108 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Gefahr für die Umwelt | Nicht umweltgefährdend Nicht wassergefährdend | |
| Gefahr für Personen | Nicht giftig Explosionsgefahr | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Infrastruktur schon vorhanden | |
| Energieaufwand bei grüner Herstellung (Wirkungsgrad) | 50 – 85 | % |
| Flächenbedarf bei grüner Herstellung | 0,063 – 0,2 | $\frac{m^2}{kW}$ |
| Kreislaufpotential | Durch Elektrolyse einfach | |
| Zulassungsfähigkeit | Mit Ausnahmegenehmigung Standardverfahren in Arbeit | |
| Kosten in der grünen Beschaffung | 5,54 – 714 | $\frac{MJ}{\text{€}}$ |

Tabelle 7: Eigenschaften von Wasserstoff

| | | |
|---------------------------------------|---|-----------------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 32,8 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 74,2 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Gefahr für die Umwelt | Nicht umweltgefährdend Nicht wassergefährdend CO ₂ – Ausstoß | |
| Gefahr für Personen | Nicht giftig Keine Explosionsgefahr | |
| Beschaffungsmöglichkeit | In Form von Pflanzenkohle erhältlich Etwas niedrigere Energiedichte | |
| Energieaufwand bei grüner Herstellung | > 5,44 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Flächenbedarf bei grüner Herstellung | 3.205 | $\frac{m^2}{kW}$ |
| Kreislaufpotential | Lokale CO ₂ Belastung Hoher Flächenbedarf | |
| Zulassungsfähigkeit | Annahme der Ähnlichkeit zu Dampfschiffen | |
| Kosten in der Beschaffung | 60 – 70 | $\frac{MJ}{\text{€}}$ |

Tabelle 8: Eigenschaften von Kohlenstoff

| | | |
|---------------------------------------|--|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 19,7 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 15,6 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Gefahr für die Umwelt | Nicht umweltgefährdend Deutlich wassergefährdend CO ₂ – Ausstoß | |
| Gefahr für Personen | Stark toxisch Explosionsgefahr | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Beschaffung über Teammitglied möglich | |
| Energieaufwand bei grüner Herstellung | 44,4 - 56 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Flächenbedarf bei grüner Herstellung | Containerformat machbar | |
| Kreislaufpotential | Lokale CO ₂ Belastung Versuchsanlagen in Betrieb | |
| Zulassungsfähigkeit | Mit Ausnahmegenehmigung Methanolschiffe schon vorhanden | |
| Kosten in der Beschaffung | 9,2 – 18,4 | $\frac{MJ}{€}$ |

Tabelle 9: Eigenschaften von Methanol

| | | |
|---------------------------------------|---|-----------------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 26,8 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 21,1 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Gefahr für die Umwelt | Nicht umweltgefährdend Schwach wassergefährdend CO ₂ – Ausstoß | |
| Gefahr für Personen | Toxisch (reiner Alkohol) Explosionsgefahr | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Bioethanol regulär erhältlich | |
| Energieaufwand bei grüner Herstellung | 20,82 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Flächenbedarf bei grüner Herstellung | 5.337 | $\frac{m^2}{kW}$ |
| Kreislaufpotential | Lokale CO ₂ Belastung Sehr hoher Flächenbedarf | |
| Zulassungsfähigkeit | Mit Ausnahmegenehmigung Als Gut häufig transportiert | |
| Kosten in der Beschaffung | 14,35 | $\frac{MJ}{\text{€}}$ |

Tabelle 10: Eigenschaften von Ethanol

| | | |
|---------------------------------------|---|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 6,2 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 7,2 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Gefahr für die Umwelt | Nicht umweltgefährdend Schwach wassergefährdend CO ₂ – Ausstoß | |
| Gefahr für Personen | Toxisch und ätzend Leicht entzündlich | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Grün nicht beschaffbar TRL zwischen 3 und 5 | |
| Energieaufwand bei grüner Herstellung | 27,4 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Flächenbedarf bei grüner Herstellung | Ähnlich Methanol → Containerformat | |
| Kreislaufpotential | Lokale CO ₂ Belastung Hoher Energieaufwand | |
| Zulassungsfähigkeit | Mit Ausnahmegenehmigung Aufgrund Gefahr schwer Wird als Gut transportiert | |
| Kosten in der Beschaffung | 0,96 | $\frac{MJ}{€}$ |

Tabelle 11: Eigenschaften von Ameisensäure

| | | |
|---------------------------------------|--|------------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 33,5 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 26,5 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Gefahr für die Umwelt | Nicht umweltgefährdend Schwach wassergefährdend CO ₂ – Ausstoß | |
| Gefahr für Personen | 1-3 mal toxischer als Ethanol Ätzend Leicht entzündlich | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Grün nicht beschaffbar TRL bei 4 | |
| Energieaufwand bei grüner Herstellung | 102,9 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Flächenbedarf bei grüner Herstellung | 21.181 | $\frac{m^2}{kW}$ |
| Kreislaufpotential | Lokale CO ₂ Belastung Hoher Energieaufwand Sehr hoher Flächenbedarf | |
| Zulassungsfähigkeit | Mit Ausnahmegenehmigung | |
| Kosten in der Beschaffung | 13,05 | $\frac{MJ}{€}$ |

Tabelle 12: Eigenschaften von Propanol

| | | |
|---------------------------------------|---|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 18 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 22,7 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Gefahr für die Umwelt | Nicht umweltgefährdend Schwach wassergefährdend CO ₂ – Ausstoß | |
| Gefahr für Personen | Nicht giftig Schwer entzündbar | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Wie Bioethanol einfach beschaffbar | |
| Energieaufwand bei grüner Herstellung | 20,82 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Flächenbedarf bei grüner Herstellung | Gleich wie Ethanol | |
| Kreislaufpotential | Lokale CO ₂ Belastung Sehr hoher Flächenbedarf | |
| Zulassungsfähigkeit | Aufgrund hoher Flammpunkt wie Diesel/Benzin | |
| Kosten in der Beschaffung | 11,25 | $\frac{MJ}{€}$ |

Tabelle 13: Eigenschaften von Glycerin

| | | |
|---------------------------------------|---|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 43 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 34 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Gefahr für die Umwelt | Umweltgefährdend Stark wassergefährdend CO ₂ – Ausstoß | |
| Gefahr für Personen | Stark toxisch Leicht entzündlich/ Explosionsgefahr | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Nur in Kleinstmengen beschaffbar | |
| Energieaufwand bei grüner Herstellung | 58 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Flächenbedarf bei grüner Herstellung | Etwas größer als Methanol da gleicher Prozess mit nachfolgenden Schritten | |
| Kreislaufpotential | Lokale CO ₂ Belastung Versuchsanlagen in Betrieb | |
| Zulassungsfähigkeit | Keine Probleme, gleich normalem Antrieb | |
| Kosten in der Beschaffung | 7,08 – 15,5 | $\frac{MJ}{€}$ |

Tabelle 14: Eigenschaften von synthetischem Kraftstoff

| | | |
|---------------------------------------|--|------------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 22,5 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 15,3 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Gefahr für die Umwelt | Umweltgefährdend Deutlich wassergefährdend | |
| Gefahr für Personen | Toxisch und ätzend Schwer entzündlich | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Nur bei Eigenbetrieb der grünen Anlage machbar | |
| Energieaufwand bei grüner Herstellung | 45,1 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Flächenbedarf bei grüner Herstellung | 0,04 | $\frac{m^2}{kW}$ |
| Kreislaufpotential | NO _x und N ₂ O Emission Hoher Energiebedarf | |
| Zulassungsfähigkeit | Mit Ausnahmegenehmigung Ammoniakschiffe schon vorhanden | |
| Kosten in der Beschaffung | 28,13 – 88,24 | $\frac{MJ}{€}$ |

Tabelle 15: technische Daten von Ammoniak

| | | |
|--|--|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 20,82 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 20,82 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Gefahr für die Umwelt | Umweltgefährdend Stark wassergefährdend | |
| Gefahr für Personen | Stark toxisch und ätzend Hohe Explosionsgefahr Leicht entzündlich (unsichtbare Flamme) | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Keine grüne Beschaffung möglich und auch nicht absehbar | |
| Energieaufwand bei grüner Herstellung (Wirkungsgrad) | > 65,6 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Flächenbedarf bei grüner Herstellung | Wie Ammoniak mit Platz für zusätzliche Prozesse | |
| Kreislaufpotential | NO _x und N ₂ O Emission Sehr hoher Energiebedarf | |
| Zulassungsfähigkeit | Mit Ausnahmegenehmigung aber mit sehr hohen Auflagen aufgrund der Gefahr | |
| Kosten in der Beschaffung | 0,21 | $\frac{MJ}{€}$ |

Tabelle 16: Eigenschaften von Hydrazin

A2: Eigenschaften der Speicher

| | | |
|------------------------------|--|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 6,78 @ 35 MPa | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 3 @ 35 MPa | $\frac{MJ}{l}$ |
| Wirkungsgrad | 90 @ 35 MPa | % |
| Speicherflüchtigkeit | Diffusion vernachlässigbar Versprödungsgefahr | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Regulär erhältlich | |
| Tankaufwand | Relativ komplex Normen & Standards vorhanden | |
| Lebensdauer | 22.500 | Zyklen |
| Kosten in der Beschaffung | 11,11 | $\frac{€}{MJ}$ |
| Skalierbarkeit | Leicht erweiterbar aber komplexer als bei Metalltanks | |
| Technology Readiness | Auf dem Markt TRL 9 | |
| Gefahr allgemein | Keine besondere Gefahr aufgrund Standards & Normen | |
| Gefahr beim Tanken | Keine besondere Gefahr aufgrund Standards & Normen | |

Tabelle 17: Eigenschaften von Typ 3 Druckspeicher

| | | |
|------------------------------|--|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 10,2 @ 35 MPa 8,84 @ 70 MPa | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 2,88 @ 35 MPa 4,8 @ 70 MPa | $\frac{MJ}{l}$ |
| Wirkungsgrad | 90 @ 35 MPa 80 @ 70 MPa | % |
| Speicherflüchtigkeit | Diffusion vernachlässigbar Versprödungsgefahr | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Regulär erhältlich | |
| Tankaufwand | Relativ komplex Normen & Standards vorhanden | |
| Lebensdauer | 45.000 | Zyklen |
| Kosten in der Beschaffung | 41,67 | $\frac{€}{MJ}$ |
| Skalierbarkeit | Leicht erweiterbar aber komplexer als bei Metalltanks | |
| Technology Readiness | Auf dem Markt TRL 9 | |
| Gefahr allgemein | Keine besondere Gefahr aufgrund Standards & Normen | |
| Gefahr beim Tanken | Keine besondere Gefahr aufgrund Standards & Normen | |

Tabelle 18: Eigenschaften von Typ 4 Druckspeicher

| | | |
|------------------------------|--|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 4,98 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 1,73 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Wirkungsgrad | < 70 | % |
| Speicherflüchtigkeit | 0,25 – 4 | % |
| Beschaffungsmöglichkeit | Regulär erhältlich | |
| Tankaufwand | Noch kein Standard Verladearm notwendig | |
| Lebensdauer | > 45.000 | Zyklen |
| Kosten in der Beschaffung | 11,11 – 41,67 | $\frac{€}{MJ}$ |
| Skalierbarkeit | Ungünstigerer Wärmeeintrag als größerer Tank | |
| Technology Readiness | Tank kaufbar aber kein Standard TRL 7 – 9 | |
| Gefahr allgemein | Kälteverbrennung möglich Explosion durch Sauerstoff Blow-Off nötig → Brandgefahr | |
| Gefahr beim Tanken | Kälteverbrennung möglich Explosion durch Sauerstoff Standards in Arbeit | |

Tabelle 19: Eigenschaften des Kryospeichers

| | | |
|------------------------------|--|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 5,1 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 4,17 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Wirkungsgrad | 80 | % |
| Speicherflüchtigkeit | 0,9 – 2,2 | % |
| Beschaffungsmöglichkeit | Noch in der Entwicklung/ Forschung | |
| Tankaufwand | Durch kombinierte Betankung höhere Komplexität als Kryo | |
| Lebensdauer | 11.500 | Zyklen |
| Kosten in der Beschaffung | 3,68 | $\frac{€}{MJ}$ |
| Skalierbarkeit | Nicht bekannt, müsste noch schwieriger als bei Kryo sein | |
| Technology Readiness | Noch in der Entwicklung/ Forschung | |
| Gefahr allgemein | Kälteverbrennung möglich Explosion durch Sauerstoff Blow-Off nötig → Brandgefahr | |
| Gefahr beim Tanken | Kälteverbrennung möglich Explosion durch Sauerstoff Keinerlei Standards | |

Tabelle 20: Eigenschaften des Kryodruckspeichers

| | | |
|------------------------------|--|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 1,42 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 3,73 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Wirkungsgrad | 70 – 85 | % |
| Speicherflüchtigkeit | Nicht vorhanden außer bei Wärmeeintrag | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Regulär erhältlich jedoch nur sehr kleine Speicher | |
| Tankaufwand | Kühlung und Druck notwendig | |
| Lebensdauer | < 1.500 | Zyklen |
| Kosten in der Beschaffung | 50 | $\frac{€}{MJ}$ |
| Skalierbarkeit | Machbar aber komplex Nur bei gleichem Metallhydrid | |
| Technology Readiness | Tank kaufbar aber kein Standard | |
| Gefahr allgemein | Selbstsichernd gegen Austritt Absicherung gegen Hitze Pflicht Sonst Explosionsgefahr | |
| Gefahr beim Tanken | Exotherm → Verbrennungsgefahr | |

Tabelle 21: Eigenschaften von Metallhydridspeicher

| | | |
|------------------------------|--|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 9.36 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 4,08 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Wirkungsgrad | 85 | % |
| Speicherflüchtigkeit | Aufgrund niedriger Temperatur Blow-Off notwendig Jedoch keine Daten verfügbar | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Noch in der Entwicklung/ Forschung | |
| Tankaufwand | Langsame Speicherung Kein Standard | |
| Lebensdauer | Keine Daten verfügbar | |
| Kosten in der Beschaffung | 0,083 – 2.500 | $\frac{€}{MJ}$ |
| Skalierbarkeit | Aufgrund leicht geringerer Druck und höherer Temperatur vermutlich etwas besser als Kryodruckspeicher | |
| Technology Readiness | Noch in der Entwicklung/ Forschung | |
| Gefahr allgemein | Minimal geringere Gefahr als Kryo da niedrige Temperatur | |
| Gefahr beim Tanken | Kein Standard vorhanden Ähnlich Kryodruckspeicher | |

Tabelle 22: Eigenschaften von Adsorptionspeicher

| | | |
|------------------------------|---|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 8,64 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 7,79 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Wirkungsgrad | 70 | % |
| Speicherflüchtigkeit | Nicht vorhanden außer bei Wärmeeintrag | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Noch in der Entwicklung/ Forschung | |
| Tankaufwand | Minimal komplexer als regulär, da Austausch alt/neu notwendig | |
| Lebensdauer | Unbegrenzt | |
| Kosten in der Beschaffung | 0,033 – 0,042 | $\frac{€}{MJ}$ |
| Skalierbarkeit | Durch größeren Metalltank einfach umsetzbar | |
| Technology Readiness | Noch in der Entwicklung/ Forschung TRL 5 | |
| Gefahr allgemein | Umweltgefährdend Wassergefährdend Gesundheitsgefährdend Leicht entzündlich | |
| Gefahr beim Tanken | Gleich wie bei „Gefahr allgemein“ | |

Tabelle 23: Eigenschaften des Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)

| | | |
|------------------------------|---|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 12 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 14,25 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Wirkungsgrad | 70 | % |
| Speicherflüchtigkeit | Nicht vorhanden außer bei Kontakt mit Wasser | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Nur in Kleinmengen verfügbar | |
| Tankaufwand | Einfacher Austausch von Kartuschen | |
| Lebensdauer | < 5 | Jahre |
| Kosten in der Beschaffung | 0,167 | $\frac{€}{MJ}$ |
| Skalierbarkeit | Einfach erweiterbar durch mehr Kartuschen | |
| Technology Readiness | Noch in der Entwicklung/ Forschung TRL 5 | |
| Gefahr allgemein | Keine Gefahr außer bei Kontakt mit Wasser → Belüftung | |
| Gefahr beim Tanken | Keine Gefahr | |

Tabelle 24: Eigenschaften der Powerpaste des Fraunhofer Instituts

| | | |
|---------------------------|---|-------------------------------------|
| Gravimetrische Dichte | 5,71 | $\frac{l_{Tankvolumen}}{kg_{Tank}}$ |
| Volumetrische Dichte | 0,78 | $\frac{l_{Tankvolumen}}{l_{Tank}}$ |
| Wirkungsgrad | > 95 | % |
| Speicherflüchtigkeit | Mediumsabhängig (Verdunstung) | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Einfach beschaffbar | |
| Tankaufwand | Mediumsabhängig Flüssigkeiten einfach da Standard | |
| Lebensdauer | Bei Wartung nahezu unbegrenzt | |
| Kosten in der Beschaffung | 2,28 | $\frac{€}{l_{Tankvolumen}}$ |
| Skalierbarkeit | Einfach machbar, Komplexität abhängig vom Medium | |
| Technology Readiness | Einfach beschaffbar TRL 9 | |
| Gefahr allgemein | Mediumsabhängig Tank selbst Stan- dard ohne Gefahr | |
| Gefahr beim Tanken | Einzigste Gefahr ist überlaufen des Mediums | |

Tabelle 25: Eigenschaften des Metalltanks

| | | |
|------------------------------|---|-----------------|
| Gravimetrische Energiedichte | 0,415 | $\frac{MJ}{kg}$ |
| Volumetrische Energiedichte | 0,52 | $\frac{MJ}{l}$ |
| Wirkungsgrad | 93.8 | % |
| Speicherflüchtigkeit | Über ein Jahr gesehen nur 2 % | |
| Beschaffungsmöglichkeit | Einfach beschaffbar | |
| Tankaufwand | Über mitgelieferte 22 kW Lader einfach realisierbar sofern Zuleitungen vorhanden sind | |
| Lebensdauer | 4.000 | Zyklen |
| Kosten in der Beschaffung | 88,33 | $\frac{€}{MJ}$ |
| Skalierbarkeit | Einfach erweiterbar | |
| Technology Readiness | Einfach beschaffbar | |
| Gefahr allgemein | Brandgefahr bei Überhitzung Überwachendes BMS schützt | |
| Gefahr beim Tanken | Brandgefahr bei Überhitzung Überwachendes BMS schützt | |

Tabelle 26: Eigenschaften der Nickel-Mangan-Cobalt-Batterie

A3: Eigenschaften der Energiewandler

| | | |
|-----------------------------------|---|-----------------|
| Gravimetrische Leistungsdichte | 4,7 | $\frac{kW}{kg}$ |
| Volumetrische Leistungsdichte | 4,3 | $\frac{kW}{l}$ |
| Leistungsspektrum | 5 – 250 | kW |
| Betriebsdynamik/Start-up Zeit | Gutes dynamisches Verhalten Keine nennenswerte Start-Up Zeit | |
| Lebensdauer | 20.000 | h |
| Kosten in der Beschaffung | 800 | $\frac{€}{kW}$ |
| Technology Readiness | TRL 9 | |
| Lokale CO ₂ Emissionen | Mit Wasserstoff keine Mit Reformer mediumabhängig | |
| Sonstige lokale Emissionen | Mit Wasserstoff keine Mit Reformer mediumabhängig | |
| Wirkungsgrad | 50 – 68 | % |

Tabelle 27: Daten Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembran Brennstoffzelle

| | | |
|-----------------------------------|---|-----------------|
| Gravimetrische Leistungsdichte | 0,77 | $\frac{kW}{kg}$ |
| Volumetrische Leistungsdichte | 1,25 | $\frac{kW}{l}$ |
| Leistungsspektrum | 5 – 100 | kW |
| Betriebsdynamik/Start-up Zeit | Gutes dynamisches Verhalten Start-Up von 10 min bis 40 min | |
| Lebensdauer | 20.000 | h |
| Kosten in der Beschaffung | 2026 – 2770 | $\frac{€}{kW}$ |
| Technology Readiness | TRL 8 | |
| Lokale CO ₂ Emissionen | Mit Wasserstoff keine Mit Reformer mediumabhängig | |
| Sonstige lokale Emissionen | Mit Wasserstoff keine Mit Reformer mediumabhängig | |
| Wirkungsgrad | 60 | % |

Tabelle 28: Daten der Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran Brennstoffzelle

| | | |
|-----------------------------------|---|-----------------|
| Gravimetrische Leistungsdichte | > 4,7 | $\frac{kW}{kg}$ |
| Volumetrische Leistungsdichte | > 4,3 | $\frac{kW}{l}$ |
| Leistungsspektrum | 5 – 150 | kW |
| Betriebsdynamik/Start-up Zeit | Gutes dynamisches Verhalten Keine nennenswerte Start-Up Zeit | |
| Lebensdauer | 8.000 | h |
| Kosten in der Beschaffung | 160 | $\frac{€}{kW}$ |
| Technology Readiness | TRL 9 | |
| Lokale CO ₂ Emissionen | Mit Wasserstoff keine Mit Reformer mediumabhängig | |
| Sonstige lokale Emissionen | Mit Wasserstoff keine Mit Reformer mediumabhängig | |
| Wirkungsgrad | 55 | % |

Tabelle 29: technische Daten der Alkalischen Brennstoffzelle (AFC)

| | | |
|-----------------------------------|---|-----------------|
| Gravimetrische Leistungsdichte | 0,022 | $\frac{kW}{kg}$ |
| Volumetrische Leistungsdichte | 0,015 | $\frac{kW}{l}$ |
| Leistungsspektrum | 0,02 – 5 | kW |
| Betriebsdynamik/Start-up Zeit | Gutes dynamisches Verhalten Keine nennenswerte Start-Up Zeit | |
| Lebensdauer | < 3.000 | h |
| Kosten in der Beschaffung | 80.000 | $\frac{€}{kW}$ |
| Technology Readiness | TRL 9 | |
| Lokale CO ₂ Emissionen | 80 | $\frac{g}{km}$ |
| Sonstige lokale Emissionen | Keine Daten verfügbar Annahme dass keine auftreten | |
| Wirkungsgrad | 20 – 30 | % |

Tabelle 30: technische Daten der Direkt Methanol Brennstoffzelle (DMFC)

| | | |
|-----------------------------------|--|-----------------|
| Gravimetrische Leistungsdichte | 0,0002 – 0,001 | $\frac{kW}{kg}$ |
| Volumetrische Leistungsdichte | 0,0002 – 0,001 | $\frac{kW}{l}$ |
| Leistungsspektrum | 0,001 – 2 | kW |
| Betriebsdynamik/Start-up Zeit | Langsame kinetische Reaktion Vermutlich schlechte Dynamik | |
| Lebensdauer | 3.700 | h |
| Kosten in der Beschaffung | 30.000 – 179.000 | $\frac{€}{kW}$ |
| Technology Readiness | Noch in Forschung Ausnahme Forschungskit für Schulen | |
| Lokale CO ₂ Emissionen | Keine Daten verfügbar Vermutung ähnlich DMFC | |
| Sonstige lokale Emissionen | Keine Daten verfügbar Annahme dass keine auftreten | |
| Wirkungsgrad | 43 | % |

Tabelle 31: technische Daten der Direkt Ethanol Brennstoffzelle (DEFC)

| | | |
|-----------------------------------|---|-----------------|
| Gravimetrische Leistungsdichte | 0,0016 | $\frac{kW}{kg}$ |
| Volumetrische Leistungsdichte | 0,006 | $\frac{kW}{l}$ |
| Leistungsspektrum | 50 – 11.000 | kW |
| Betriebsdynamik/Start-up Zeit | Gutes dynamisches Verhalten Start-Up von 10 min bis 40 min | |
| Lebensdauer | < 65.000 | h |
| Kosten in der Beschaffung | < 2.678,57 | $\frac{€}{kW}$ |
| Technology Readiness | TRL 9 | |
| Lokale CO ₂ Emissionen | Mit Wasserstoff keine Mit Reformer mediumabhängig | |
| Sonstige lokale Emissionen | Mit Wasserstoff keine Mit Reformer mediumabhängig | |
| Wirkungsgrad | 45 | % |

Tabelle 32: technische Daten der Phosphorsäure Brennstoffzelle (PAFC)

| | | |
|-----------------------------------|--|-----------------|
| Gravimetrische Leistungsdichte | 0,006 | $\frac{kW}{kg}$ |
| Volumetrische Leistungsdichte | 0,033 | $\frac{kW}{l}$ |
| Leistungsspektrum | 100 – 3.000 | kW |
| Betriebsdynamik/Start-up Zeit | Start-Up von 10 min | |
| Lebensdauer | < 40.000 | h |
| Kosten in der Beschaffung | 3.246,75 | $\frac{€}{kW}$ |
| Technology Readiness | TRL 8 | |
| Lokale CO ₂ Emissionen | Mit Wasserstoff keine Mit Reformer mediumabhängig | |
| Sonstige lokale Emissionen | Mit Wasserstoff keine Mit Reformer mediumabhängig | |
| Wirkungsgrad | 60 – 65 | % |

Tabelle 33: technische Daten der Schmelzkarbonat Brennstoffzelle (MCFC)

| | | | | |
|-----------------------------------|---|-----------------|---------|------------------|
| Gravimetrische Leistungsdichte | 0,01 | $\frac{kW}{kg}$ | | |
| Volumetrische Leistungsdichte | 0,005 | $\frac{kW}{l}$ | | |
| Leistungsspektrum | 0,1 – 2.000 | kW | | |
| Betriebsdynamik/Start-up Zeit | Start-Up von 60 min | | | |
| Lebensdauer | 28.500 | h | | |
| Kosten in der Beschaffung | 3.232,14 | $\frac{€}{kW}$ | | |
| Technology Readiness | TRL 8 | | | |
| Lokale CO ₂ Emissionen | Mit Wasserstoff keine Mit Reformer mediumsabhängig | | | |
| Sonstige lokale Emissionen | Wasserstoff | NO _x | 0,005 | $\frac{kg}{MWh}$ |
| | | PM10 | 0,0001 | $\frac{kg}{MWh}$ |
| | Erdgas | NO _x | 0,005 | $\frac{kg}{MWh}$ |
| | | SO _x | 0,00005 | $\frac{kg}{MWh}$ |
| | | PM10 | 0,00001 | $\frac{kg}{MWh}$ |
| Wirkungsgrad | 50 | % | | |

Tabelle 34: technische Daten der Oxidkeramik Brennstoffzelle (SOFC)

| | | |
|-----------------------------------|---|-----------------|
| Gravimetrische Leistungsdichte | 0,33 – 0,5 | $\frac{kW}{kg}$ |
| Volumetrische Leistungsdichte | 0,12 | $\frac{kW}{l}$ |
| Leistungsspektrum | 1 – 64.000 | kW |
| Betriebsdynamik/Start-up Zeit | Hohe Betriebsdynamik Keine nennenswerte Start-Up Zeit | |
| Lebensdauer | 3.000 | h |
| Kosten in der Beschaffung | 90 – 115 | $\frac{€}{kW}$ |
| Technology Readiness | TRL 9 | |
| Lokale CO ₂ Emissionen | Mediumabhängig Bei Benzin: 116,1 – 125,5 | $\frac{g}{km}$ |
| Sonstige lokale Emissionen | Mediumabhängig Bei Benzin: NO _x : 19 – 20 HC: 3 – 5 | $\frac{g}{kWh}$ |
| Wirkungsgrad | 25 – 30 | % |

Tabelle 35: technische Daten des Fremdzünders

| | | |
|-----------------------------------|--|-----------------|
| Gravimetrische Leistungsdichte | 0,2 | $\frac{kW}{kg}$ |
| Volumetrische Leistungsdichte | 0,13 | $\frac{kW}{l}$ |
| Leistungsspektrum | 3,3 – 87.220 | kW |
| Betriebsdynamik/Start-up Zeit | Hohe Betriebsdynamik Keine nennenswerte Start-Up Zeit | |
| Lebensdauer | 3.000 | h |
| Kosten in der Beschaffung | 0 | $\frac{€}{kW}$ |
| Technology Readiness | TRL 9 | |
| Lokale CO ₂ Emissionen | Mediumabhängig Bei Diesel: 273 | $\frac{g}{kWh}$ |
| Sonstige lokale Emissionen | Mediumsabhängig Bei Diesel Stickoxide | |
| Wirkungsgrad | 30 – 45 | % |

Tabelle 36: technische Daten des Selbstzünders

| | | |
|-----------------------------------|--|-----------------|
| Gravimetrische Leistungsdichte | 0,51 | $\frac{kW}{kg}$ |
| Volumetrische Leistungsdichte | 0,46 | $\frac{kW}{l}$ |
| Leistungsspektrum | 0,1 – 70.000 | kW |
| Betriebsdynamik/Start-up Zeit | Sehr hohe Betriebsdynamik Keine Start-Up Zeit | |
| Lebensdauer | 8.000 – 20.000 | h |
| Kosten in der Beschaffung | 22,5 – 38,3 | $\frac{€}{kW}$ |
| Technology Readiness | TRL 9 | |
| Lokale CO ₂ Emissionen | Keine möglich | |
| Sonstige lokale Emissionen | Keine möglich | |
| Wirkungsgrad | 95 | % |

Tabella 37: technische Daten des Elektromotos