

#GIDSresearch 2 / 2023

Simon Struck

## Energieautonome Streitkräfte

Wasserstoff als Fuel für die militärische Mobilität?

#GIDSresearch | Nr. 2 / 2023 | April 2023 | ISSN 2699-4380

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

ISSN 2699-4380

Dieser Beitrag steht unter der Creative Commons Lizenz CC BY-NC-ND 4.0 International (Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitung). Weitere Informationen zur Lizenz finden Sie unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>



#GIDSresearch wird vom German Institute for Defence and Strategic Studies (GIDS) herausgegeben.

Die Beiträge sind auf der Website des GIDS kostenfrei abrufbar: [www.gids-hamburg.de](http://www.gids-hamburg.de)

#GIDSresearch gibt die Meinung der AutorInnen wieder und stellt nicht zwangsläufig den Standpunkt des GIDS dar.

Zitiervorschlag:

Simon Struck, Energieautonome Streitkräfte. Wasserstoff als Fuel für die militärische Mobilität?, #GIDSresearch 2/2023, GIDS: Hamburg.

GIDS  
German Institute for Defence and Strategic Studies  
Führungsakademie der Bundeswehr  
Manteuffelstraße 20 · 22587 Hamburg  
Tel.: +49 (0)40 8667 6801  
[buro@gids-hamburg.de](mailto:buro@gids-hamburg.de) · [www.gids-hamburg.de](http://www.gids-hamburg.de)

## Inhalt

1	Einleitung .....	1
2	Wasserstoff als Energieträger – Antriebskonzepte als Chancen für den Mobilitätssektor .....	3
2.1	Brennstoffzellen und Elektromotoren .....	3
2.1.1	Stand der Technik .....	3
2.1.2	Herausforderungen des Systems Brennstoffzelle und Elektromotor .....	5
2.2	Wasserstoffverbrennungsmotoren .....	5
2.2.1	Stand der Technik .....	5
2.2.2	Herausforderungen des Wasserstoffverbrennungsmotors .....	9
2.3	Wasserstoffverbrennungsmotoren und Brennstoffzellenantriebe im Vergleich .....	9
3	Eigenschaften des Wasserstoffes und Einsatzkriterien der Bundeswehr .....	13
3.1	Energieinhalt von Wasserstoff .....	13
3.2	Diffusion und Boil-off-Effekte .....	16
3.3	Schmierverhalten von Wasserstoff .....	16
3.4	Explosionsverhalten und Sicherheit .....	17
3.5	Transport und Erzeugung .....	18
3.6	Ansprüche an das Personal .....	19
3.7	Ersatzteilversorgung und Beschaffung .....	20
3.8	Single Fuel Policy .....	20
4	Wasserstoff als zukünftiger Energieträger für den zivilen Transport- und Verkehrssektor .....	21
4.1	Lastkraft-, Transport- und Spezialmaschinen .....	21
4.2	Schienengebundene Mobilität .....	23
4.3	Schifffahrt .....	23
4.4	Wasserstoff als Aviation Fuel .....	25
5	Bisherige Wasserstoffnutzung in der militärischen Mobilität .....	26
6	Möglichkeiten der zukünftigen Nutzung von Wasserstoff für die Mobilität der Bundeswehr .....	28

6.1 Heer.....	30
6.1.1 Geschützte Fahrzeuge.....	30
6.1.2 Pilotprojekt Dingo .....	31
6.1.3 Wasserstoffversorgung für das Heer .....	33
6.2 Marine.....	34
6.2.1 Pilotprojekt Hafenbetrieb und Hafenschlepper.....	35
6.2.3 Pilotprojekt Minenjagdboote.....	36
6.3 Luftwaffe .....	37
6.3.1 Turboprop-Anwendungen .....	37
6.3.2 Jets .....	38
6.3.3 Pilotprojekt Fliegerhorstbetrieb .....	38
6.3.4 Drohnen .....	38
7 Schlussbetrachtung und Ausblick .....	39
Literaturverzeichnis .....	42

# Energieautonome Streitkräfte

## Wasserstoff als Fuel für die militärische Mobilität

### 1 Einleitung

Die Energieversorgung Europas befindet sich in einem großen Veränderungsprozess. Ziel ist die massive Reduzierung der Treibhausgasemission bis 2050. Die Mobilität ist davon ebenfalls betroffen. Aufgrund der Veränderung des Klimas wird eine Transformation der Energiesysteme erforderlich. Regenerative Energiesysteme sollen die zukünftige Energieversorgung bestimmen.

Die Verfügbarkeit fossiler Rohstoffe wird in der Zukunft weiter abnehmen. Die weltweit gefallenen Ausgaben der Industrie für die Exploration und Produktion von Erdöl und Erdgas haben bis heute nicht mehr das Niveau von vor dem Preisverfall von 2014 erreicht.<sup>1</sup> Zusätzlich zeigt das Beispiel von Russland im Zusammenhang mit dem Ukraine-Krieg, dass fossile Rohstoffe auch als politische Waffe genutzt werden.

Die Versorgungssicherheit der Bundeswehr ist direkt mit diesen Entwicklungen verknüpft und gefährdet. Es besteht eine große Dringlichkeit zur Lösung dieses Problems. Inwieweit der Einsatz regenerativ erzeugter Energieträger für die militärische Mobilität erreicht werden kann, soll im vorliegenden Papier untersucht werden. Dies könnte eine Energieautonomie der Bundeswehr der Zukunft bedeuten.

Bereits 2019 auf dem G20-Gipfel in Osaka wurde auf Basis einer Studie der International Energy Agency (IEA) Wasserstoff als ein möglicher Schlüsselbaustein für eine nachhaltige Energiewirtschaft identifiziert. Die IEA schlug dabei die Zusammenarbeit in sogenannten *Coastal Industrial Clustern* vor, zu denen auch die Nordseeregion mit ihren Anrainern und deren Industrien gehört. Auf dem Gipfel selbst wurde Wasserstoff eine zunehmende Rolle auch im Mobilitätssektor zugeordnet.<sup>2</sup> Dieses Ergebnis führte in verschiedenen Staaten zu nationalen Wasserstoffstrategien.

Die deutsche nationale Wasserstoffstrategie wurde von der Bundesregierung im Jahr 2020 vorgelegt: Es wird eine umfangreiche Transformation des Energiemarktes angestrebt, in der auch die Rolle von Wasserstoff und seinen Derivaten für die Einsatzfahrzeuge der Bundeswehr betont wird.<sup>3</sup> Jüngst hat die Bundesregierung zudem die Bedeutung von Wasserstoff für Gaskraftwerke und den Wärmemarkt hervorgehoben und macht damit deutlich, wie weitreichend Wasserstoff in den Energiemarkt integriert werden soll.<sup>4</sup>

Im Rahmen der deutschen Wasserstoffstrategie werden öffentliche Finanzmittel von etwa 9,5 Mrd. Euro für Forschungs- und Pilotprojekte zur Verfügung gestellt. Ziel ist es, die Weiterentwicklung von Wasserstoff als Energieträger voranzubringen, um eine

---

1 IEA 2022.

2 IEA 2019.

3 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020: 6.

4 Bundesregierung 2022.

breite Nutzung in der Zukunft zu ermöglichen. Damit soll eine Substitution fossiler Energieträger eingeleitet und ein Wasserstoffmarkthochlauf unterstützt werden.<sup>5</sup>

Der zivile Verkehrssektor steht vor der Herausforderung, nachhaltigere Antriebssysteme integrieren zu müssen. Um eine nachhaltige Mobilität realisieren zu können, wird eine Vielzahl von verschiedenen Antriebssystemen und Treibstoffen erforderlich werden. Der Einsatz der E-Mobilität konzentriert sich derzeit noch auf die urbanen Räume. Im Schwerlastverkehr wurden auf der Langstrecke Limitationen durch erhebliche Gewichte der Batteriesysteme deutlich. Damit verbunden sind Einschränkungen bei Zuladung und Reichweiten. Auch Batterieladezeiten sind bisher kritisch.<sup>6</sup>

Neuerdings werden zwar von einigen Herstellern (Tesla und Daimler) Entwicklungsinitiativen für batterieelektrische Systeme im Bereich des Langstreckenschwerlastverkehrs vorgestellt und Tesla hat die kurzfristige Auslieferung erster Lkws angekündigt. Es bleibt jedoch derzeit noch offen, inwieweit ein wirtschaftlicher Betrieb vor dem Hintergrund der noch vorhandenen Einschränkungen realisiert werden kann.<sup>7</sup>

Mit reinem Wasserstoff betriebene Systeme befinden sich bei verschiedenen Herstellern in der Entwicklung.<sup>8</sup> Dabei sind grundsätzlich zwei Systeme zu betrachten. Sowohl der Brennstoffzellenantrieb als auch der Wasserstoffverbrennungsmotor sind in ihrer Entwicklung weit vorangeschritten. Erste Systeme sind bereits im Markt oder werden in naher Zukunft eingeführt. Die Entwicklungen zeigen auf, dass die Einsatzfelder dieser Antriebssysteme aufgrund ihrer unterschiedlichen Motorencharakteristika sehr stark von den technischen Anforderungen abhängig sein werden. Abseits von diesen Antriebssystemen ist die Nutzung von sogenannten synthetischen Fuels in herkömmlichen Motoren denkbar. Die Erzeugung solcher Kraftstoffe basiert jedoch ebenfalls auf reinem Wasserstoff, ist verfahrenstechnisch aufwendiger und benötigt zusätzliche Energie. Die bessere Handhabbarkeit, der leichtere Transport und die einfachere Lagerung sowie die höhere volumetrische Energiedichte werden durch den Aufwand bei der Herstellung erkauft.

Grundsätzlich sind die heutigen Logistikkonzepte für die Bereitstellung von Kraftstoffen für den militärischen Einsatz anfällig für Feindwirkung, wie bestehende Statistiken der US-Streitkräfte während des Irak- und Afghanistaneinsatzes aufzeigen. So verzeichnete das US Department of Defense zwischen 2003 und 2007 3.000 Tote und Verwundete durch Angriffe bei Wasser- und Treibstofftransporten.<sup>9</sup> Auch die aktuelle Ukraine-Krise mit Bildern von langen, wegen Treibstoffmangel liegengelassenen Fahrzeugkonvois der russischen Armee unterstreicht diesen Punkt. Eine dezentrale Erzeugung von reinem Wasserstoff auf Basis regenerativer Energieerzeugung könnte eine erhebliche Verbesserung der Kraftstoffversorgung und damit eine Energieautonomie der Streitkräfte ermöglichen. Eine Wasserstoffherzeugung auf Liegenschaften könnte einen signifikanten militärischen Vorteil erzeugen.

Grundlage für eine Energieautonomie ist allerdings, dass die technischen Voraussetzungen zur Nutzung von H<sub>2</sub> in der Mobilität vorhanden sind. Gegenstand dieses Papiers ist deshalb zunächst die Untersuchung der Nutzungsmöglichkeiten von reinem

---

5 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020: 3.

6 Klell/Eichlseder/Trattner 2018: 13.

7 Ohnsman 2022.

8 Hosseini/Butler 2020: 30; Mandaiker 2022.

9 US DoD 2011: 4 f.

Wasserstoff in der militärischen Mobilität der Zukunft. Die Studie soll die Vor- und Nachteile sowie die Grenzen und Möglichkeiten des Energieträgers in militärischen Anwendungsfeldern aufzeigen.

Für das Thema Wasserstoffherzeugung selbst bedarf es einer komplexen und differenzierten zusätzlichen Betrachtung der technischen Möglichkeiten, die im Rahmen dieses Beitrags noch nicht vorgesehen ist.

Die laufenden und erwarteten Entwicklungen von Antriebskonzepten in Industrie und Forschung werden auf ihre strategische Perspektive für die Mobilität der Bundeswehr nach 2050 hin untersucht. Diese Entwicklungen unterliegen dabei einer hohen Dynamik. Die Untersuchung repräsentiert den Stand bis Ende 2022.

Lange Nutzungsdauern von militärischen Systemen und der Zeitbedarf von Beschaffungsprozessen machen es erforderlich, dieses Thema bereits heute zu betrachten.<sup>10</sup>

Der Fahrzeugpark der Bundeswehr mit mehr als 50.000 Fahrzeugen (inklusive Bw-Fuhrparkservice) wird von einer solchen Entwicklung betroffen sein.<sup>11</sup> Deshalb erscheint die Beteiligung an ausgesuchten Projekten wichtig, um Stärken und Schwächen der mit reinem Wasserstoff betriebenen Systeme zu erkennen. Vor diesem Hintergrund wird die Untersuchung anhand von Pilotprojektvorschlägen Handlungsempfehlungen geben. Auf eine Beantwortung der Frage, welche militärischen Systeme 2050 noch von Relevanz sein werden, wird dabei verzichtet.

## 2 Wasserstoff als Energieträger – Antriebskonzepte als Chancen für den Mobilitätssektor

### 2.1 Brennstoffzellen und Elektromotoren

Die Brennstoffzellentechnologie findet sich bereits in Anwendungen der Mobilität, hat jedoch mit rund 15.500 Fahrzeugen global<sup>12</sup> in 2021 bisher keine großen Stückzahlen erreicht.

#### 2.1.1 Stand der Technik

Die Brennstoffzellentechnologie ist ein elektrochemischer Energiewandler. Die elektrische Energie wird direkt durch die chemische Reaktionsenergie zwischen einem Brennstoff (z. B. H<sub>2</sub>) und einem Oxidationsmittel (Sauerstoff) erzeugt. Dabei setzen die Brennstoffzellen chemische Energie mittels einer Redoxreaktion eines Brennstoffes und Sauerstoff in elektrische Energie um und versorgen damit einen Elektroantrieb oder

---

<sup>10</sup> Rappuhn/Struck 2021.

<sup>11</sup> BwFuhrparkService 2020; Bundeswehr 2019.

<sup>12</sup> Munoz 2022.

**Tab. 1:** Brennstoffzellentypen.

Typ	Elektrolyt	Anode	Zell-reaktion	Kathode	Arbeitstemperatur	Elektr. Wirkungsgrad	Merkmale	Anwendungen
PEMFC	Protonenleitende Membran	H <sub>2</sub>	→	O <sub>2</sub> Luft	80 °C	50–70 %	Hohe Leistungsdichte Flexibles Betriebsverhalten	Fahrzeuge, Raumfahrt, Militär, Stromerzeugung
DMFC	Protonenleitende Membran	Methanol	→	O <sub>2</sub> Luft	80–120 °C	20–30 %	Diffusion von Methanol	Portable Stromerzeugung, Batterieersatz
AFC	Wässrige Kalilauge	Reinst-H <sub>2</sub>	←	Reinst-O <sub>2</sub>	60–80 °C	60–70 %	Reines O <sub>2</sub> Reines H <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> -empfindlich	Raumfahrt, Militär
PAFC	Phosphorsäure	Erdgas H <sub>2</sub>	→	Luft O <sub>2</sub>	200 °C	40–55 %	Korrosionsprobleme	Stromerzeugung, Blockheizkraftwerk
SOFC	Zirkonoxid	Erdgas CO H <sub>2</sub>	←	Luft	650–1000 °C	45–65 %	Hochtemperaturkeramik Korrosionsprobleme	Stromerzeugung, Blockheizkraftwerk
MCFC	Alkali-karbonat-schmelze	Erdgas H <sub>2</sub>	←	Luft O <sub>2</sub> CO <sub>2</sub>	650 °C	45–55 %	Komplexe Prozessführung Korrosionsprobleme	Stromerzeugung, Blockheizkraftwerk

laden eine Batterie. Je nach Ausgestaltung der Brennstoffzelle können dabei verschiedene Brennstoffe bzw. Energieträger wie etwa Wasserstoff Verwendung finden.

Bei Mobilitätsanwendung wird die so gewonnene elektrische Energie durch einen oder mehrere Elektromotoren nutzbar gemacht. Innerhalb der Fahrzeugtechnik wird die Brennstoffzelle daher in einer hybriden Konfiguration in einem Antriebssystem integriert. Als Energiespeicher werden neben dem Brennstofftank wie bereits erwähnt auch Batterien genutzt. Die zusätzliche Energie der Batterie kann bei hohem Energiebedarf etwa für die Beschleunigung oder bei Steigungen eingesetzt werden.<sup>13</sup>

Für mobile Anwendungen werden verschiedene Brennstoffzellentechnologien innerhalb der Literatur und in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht (siehe Tabelle 1). Obgleich in Forschungsbeiträgen die hohe Leistungsfähigkeit anderer Brennstoffzellentechnologien wie etwa der Hochtemperatur-SOFCs (Solid Oxide Fuel Cells) hervorgehoben wird, stellt die PEM-Technologie (Polymer Electrolyte Membrane) bislang die präferierte Option für mobile Systeme dar.<sup>14</sup> Daher konzentriert sich diese Ausarbeitung auf die PEM-Brennstoffzellentechnologie.

Der Betrieb der Brennstoffzelle erzeugt keine Schadstoffemissionen. Zudem sind Brennstoffzellen für mobile Anwendungen im direkten Vergleich zumeist effizienter als konventionelle Verbrennungsmotoren.<sup>15</sup>

Wie weit die Entwicklungen bereits fortgeschritten sind, zeigt die Marktreife der brennstoffzellenbasierten Pkw-Modelle „Mirai“ und „Nexo“ der Hersteller Toyota bzw. Hyundai.<sup>16</sup>

<sup>13</sup> Wind 2019.

<sup>14</sup> Wehrle et al. 2022; Ma et al. 2021.

<sup>15</sup> Luo et al. 2021.

<sup>16</sup> Tanaka 2016; Sery/Leduc 2021.

### 2.1.2 Herausforderungen des Systems Brennstoffzelle und Elektromotor

Das System Brennstoffzelle besitzt verschiedene grundsätzliche Vorteile. Brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge sind deutlich leiser als mit konventionellen Verbrennungsmotoren betriebene Fahrzeuge. Das System kommt nahezu ohne bewegliche Teile aus. Dies bedeutet jedoch nicht zwangsläufig eine Erhöhung der Lebensdauer, da diese je nach Aufbau, Größe und Anforderungsprofil der Brennstoffzelle variiert. Während des Betriebes stellt sich insbesondere im oberen Leistungsbereich bei starken Lastwechseln eine Degradation der Leistung ein. Ursache ist eine beschleunigte Alterung der eingesetzten Elektroden und Membranen. Dies führt zu höheren Temperaturen des Systems und wird zu einer Herausforderung für das Kühlsystem, das dafür ausgelegt sein muss und das bisher für Erschütterungen sensibel ist.<sup>17</sup>

Die Lebensdauieranforderungen in LKW-Anwendungen liegen mit 25.000 bis 30.000 Betriebsstunden um ein Vielfaches höher als im Pkw-Bereich. Innerhalb von Bus-Prototypen konnten Brennstoffzellenanwendungen bislang eine maximale Betriebsdauer von 30.000 Stunden erreichen. Die durchschnittliche Lebensdauer bei derartigen Anwendungen lag jedoch bei rund 13.000 Stunden.<sup>18</sup> Die Pkw-Nutzung fordert dagegen eine Lebensdauer von 5.000–8.000 Betriebsstunden.<sup>19</sup> Dies erklärt, dass Produkte wie der Toyota Mirai bereits auf dem Markt sein können.<sup>20</sup>

Eine weitere Herausforderung stellt der benötigte hohe Reinheitsgrad des zuzuführenden Wasserstoffs innerhalb der PEM-Brennstoffzellentechnologie dar.<sup>21</sup> Diese hohe Anforderung ließe sich im Feldebetrieb voraussichtlich nur bedingt erfüllen. Auch wenn bei Schwerlastkraftwagen die Entwicklungen einen positiven Verlauf nähmen, wären insbesondere für den Offroad-Bereich signifikante Optimierungen erforderlich, um die Zuverlässigkeit des Systems zu verbessern.

Aufgrund der bisher nur geringen Stückzahl von Brennstoffzellen sind die Herstellungskosten hoch.<sup>22</sup> Hier sind zwar Kostensenkungseffekte möglich, dennoch müssen weitere Entwicklungen der Industrie abgewartet werden.

## 2.2 Wasserstoffverbrennungsmotoren

### 2.2.1 Stand der Technik

Nach ersten kommerziellen Forschungs- und Entwicklungsprozessen, die maßgeblich durch das Programm von BMW bis 2007 vorangetrieben wurden,<sup>23</sup> waren Wasserstoffverbrennungsmotoren in den vergangenen Jahren aus dem Fokus der Öffentlichkeit geraten. Namhafte Hersteller (etwa Hyundai, Deutz, MAN und Daimler), Startups und Forschungseinrichtungen sind allerdings weiterhin aktiv<sup>24</sup> und verstärken zum Teil ihre Bemühungen, diese Technologie weiterzuentwickeln.

<sup>17</sup> Luo et al. 2021: 5 f.; Wind 2019: 109 f.; Klell/Eichlseder/Trattner 2018: 153; Klepatz et al. 2021: 184.

<sup>18</sup> Cullen et al. 2021.

<sup>19</sup> Klell/Eichlseder/Trattner 2018: 176.

<sup>20</sup> Tanaka 2016.

<sup>21</sup> Du et al. 2021: 2 f.

<sup>22</sup> Thompson et al. 2018.

<sup>23</sup> Enke et al. 2007.

<sup>24</sup> Mandaiker 20.09.2022; Hyundai Trucks and Busses 2022; Deutz AG 12021; Schwarz 2022;

Das Prinzip des Wasserstoffverbrennungsmotors beruht auf einem konventionellen Verbrennungsmotor [...], der durch Änderungen am Gemischbildungssystem, Brennverfahren etc. für ausschließlichen oder bivalenten Betrieb mit Wasserstoff adaptiert und mit Wasserstoff oder wasserstofffreien Gasen als Kraftstoff betrieben werden kann. Neben den erforderlichen Änderungen an der Motorsteuerung ist natürlich sicher zu stellen, dass alle Materialien und Komponenten, die mit Wasserstoff in Kontakt kommen, dafür geeignet sind.<sup>25</sup>

Im Bereich der Mobilität basieren die Systeme weitgehend auf dem Ottomotorprinzip. Hier lassen sich Verbrennungsmotoren ausschließlich mit Wasserstoff betreiben. Der bivalente Betrieb (Dual Fuel) solcher Ottomotoren mit Wasserstoff und Benzin ist innerhalb des BMW-Programms bis 2007<sup>26</sup> und in einzelnen Forschungsprogrammen<sup>27</sup> erfolgreich verfolgt worden. Aktuelle Entwicklungen innerhalb der Industrie fokussieren auf Ottomotoren, die ausschließlich mit Wasserstoff betrieben werden.

Die erforderlichen Anpassungen eines solchen Verbrennungsmotors für die Wasserstoffnutzung konzentrieren sich auf Fragen des Zündverfahrens, der äußeren (Saugrohrinblasung) oder inneren (Direkteinblasung) Gemischbildung, der Motorsteuerung und der werkstofftechnischen Herausforderungen einer Wasserstoffverbrennung.<sup>28</sup>

Neben dem Ottomotorprinzip lässt sich ein Wasserstoffverbrennungsmotor auch auf der Grundlage des Dieselmotorprinzips konzipieren.<sup>29</sup> Derartige Motoren besitzen eine Mehrstofftauglichkeit und lassen sich als Dual Fuel-System betreiben. Hier wird Wasserstoff anteilig mit Diesel genutzt. Der Diesel sorgt für die effiziente Entzündung des Gemischs. Dadurch entsteht eine Kraftstoffflexibilität, da der Anteil des Diesels variabel sein kann. Der Motor kann auch mit reinem Diesel betrieben werden.<sup>30</sup>

Allerdings zeigen solche auf dem Dieselmotorprinzip basierende Dual Fuel-Motoren bisher nur eine gute Einsatzfähigkeit im quasi-stationären Bereich wie zum Beispiel bei Schiffsantrieben, Eisenbahnantrieben oder Stromerzeugern, die im Gegensatz zu LKW-Anwendungen mit konstanteren Anforderungen gefahren werden.<sup>31</sup>

Wasserstoffverbrennungsmotoren können maßgeblich an Forschung, Entwicklung und Produktionsverfahren konventioneller Verbrennungsmotoren anknüpfen. Darüber hinaus sind bereits Technologien wie Messsysteme und Analysetools am Markt etabliert, um Wasserstoffverbrennungsmotoren weiter zu optimieren.<sup>32</sup>

Abbildung 1<sup>33</sup> zeigt, wie die Wirkungsgrade von Wasserstoffverbrennungsmotoren mittlerweile denen von Benzin- und Dieselmotoren gleichkommen. Bei optimierter

Brezonick 2021; Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren 2020.

**25** Klell/Eichlseder/Trattner 2018: 199.

**26** Enke et al. 2007.

**27** Luef et al. 2013.

**28** Shadidi/Najafi/Yusaf 2021.

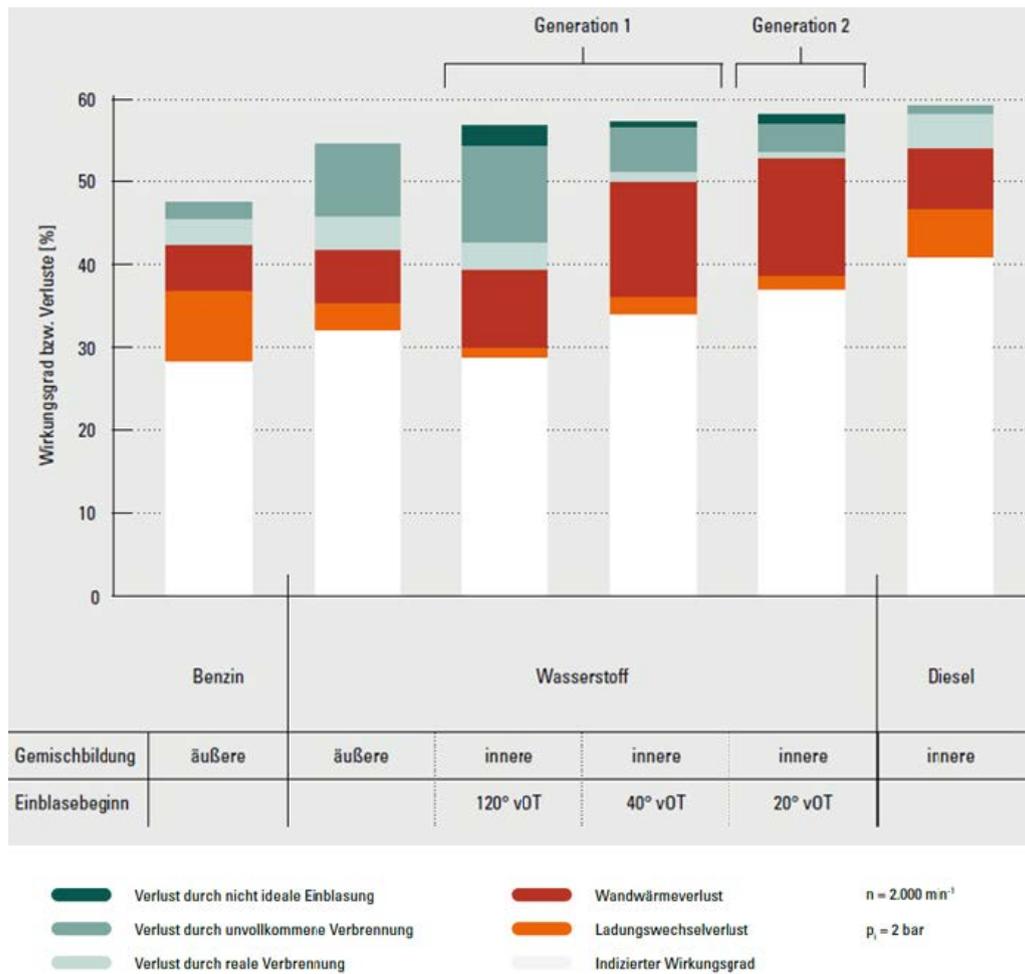
**29** Lott et al. 2022.

**30** Stępień 2021: 8; Arnberger et al. 2021: 11–15.

**31** BeH<sub>2</sub>hydro 2021.

**32** Lott et al. 2022: 225.

**33** In der vorliegenden Grafik werden die Wirkungsgrade bzw. Verluste von Wasserstoffverbrennungsmotoren mit herkömmlichen Motoren verglichen. Dabei kann zwischen zwei wesentlichen Gemischbildungskonzepten des Wasserstoffverbrennungsmotors unterschieden werden: Innerhalb der sogenannten äußeren Gemischbildung wird der Kraftstoff (H<sub>2</sub>) mit Sauerstoff gemischt, bevor ein solches Gemisch in den Brennraum eingeblasen wird. Bei der inneren Gemischbildung hingegen wird das Kraftstoffsauerstoffgemisch erst im Brennraum erzeugt. Darüber hinaus



**Abb. 1:** Wirkungsgrad bzw. Verluste von Wasserstoffverbrennungsmotoren und herkömmlichen Aggregaten (Schrank/Langer/Jacobson 2021: 29).

Gemischbildung und Injektion können nahezu die Werte von Dieselmotoren erreicht werden. Dabei treten Wirkungsgradverluste aus bekannten Ursachen wie bei Otto- und Dieselmotoren, wenn auch in unterschiedlicher Größe, auf.

Weiterhin fallen bei allen Wasserstoffmotoren die hohen Wandwärmeverluste auf. Sie treten verstärkt bei der Direkteinblasung auf, da die Ladung des Zylinders stark bewegt ist und die Wasserstoffverbrennung bis an die Brennraumwand heranreicht. So entsteht ein höherer Energieverlust durch die Kühlung der Brennraumwände. Bei Otto- und Dieselmotoren kann sich hingegen eine Sperrschicht bilden, in der keine Verbrennung stattfindet. Die Gaswechselverluste, als letzte aufgeführte Werte, sind bei Wasserstoffmotoren geringer, da die Luftzufuhr nicht gedrosselt werden muss, um eine stabile Verbrennung zu ermöglichen. Resultierend aus dem

verweist die Abbildung auch auf die verschiedenen Einblasebeginne des Gemisches. Dieser Einblasebeginn lässt sich anhand des Grades des Kurbelwinkels vor dem oberen Totpunkt (vOT) definieren. Der obere Totpunkt bezeichnet den höchsten Punkt, den ein Kolben in seiner Auf- und Abbewegung im Zylinder durchlaufen kann (siehe Reif 2014: 10–15).

thermodynamischen Wirkungsgrad und den Verlusten folgt der indizierte Wirkungsgrad, der [...] besser ist als beim Ottomotor.<sup>34</sup>

Wasserstoffverbrennungsmotoren weisen ähnliche Lebensdauern auf wie konventionelle Aggregate und werden auch für Bereiche des Bau-, Land- und Spezialmaschinen-sektors konzipiert, die eine hohe Robustheit und Geländefähigkeit benötigen.<sup>35</sup>

Dual Fuel-Konzepte ermöglichen grundsätzlich eine Anwendung auch in einer frühen Phase eines Wasserstoffmarktes im Verkehrssektor und letztlich auch beim Militär, da bei fehlender Wasserstoffinfrastruktur ebenfalls auf fossile Energieträger zurückgegriffen werden kann.

Anders als bei einer Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle ist die Wasserstoffverbrennung nicht komplett schadstofffrei. So fallen aufgrund der hohen Temperaturen bei der Verbrennung Stickoxidemissionen an. Insbesondere bei hohen Leistungen und ab einem ausgeglichenen Kraftstoff-Luftgemisch treten NO<sub>x</sub>-Abgase zunehmend auf,<sup>36</sup> wenn auch in geringerem Umfang als bei der Dieselverbrennung. Diesen Emissionen kann jedoch mit Abgasreinigungssystemen und abgestimmter Motorsteuerung begegnet werden.<sup>37</sup> Somit können Wasserstoffverbrennungsmotoren auch die gesetzlichen Vorgaben der Europäischen Union nach 2035 voraussichtlich erfüllen, die CO<sub>2</sub>-freie Antriebssysteme für Pkws und Lieferwagen („Vans“) vorsehen.<sup>38</sup>

Zum Erreichen geringer NO<sub>x</sub>-Emissionen lassen sich Betriebszustände definieren, die eine magere Gemischbildung bei niedrigen Lasten und bei Leerlauf ermöglichen, dann aber durch einen geringeren Wirkungsgrad gekennzeichnet sind.

Bei mittleren und höheren Lastbereichen wird durch stöchiometrische Gemischbildung ein höherer Wirkungsgrad erzielt. Die größere NO<sub>x</sub>-Bildung kann durch Abgasnachbehandlung optimiert werden.<sup>39</sup> Die Autoren Verhelst und Wallner sehen sogar die Möglichkeit, mit verstärkter Aufladung bei gleichzeitiger magerer Gemischbildung auf eine Abgasnachbehandlung verzichten zu können.<sup>40</sup> Inwieweit ein solches Konzept Betriebszustände in verschiedensten Anwendungen sicherstellen kann, ist zu prüfen. In jedem Fall zeigen Ergebnisse verschiedener Untersuchungen, dass Stickoxidemissionen mit Abgasnachbehandlung und optimierter Gemischbildung begegnet werden kann:

<sup>34</sup> Schrank/Langer/Jacobson 2021: 31.

<sup>35</sup> Schrank/Langer/Jacobson 2021: 90.

<sup>36</sup> „Die Entstehung von Stickoxiden während der Verbrennung ist [...] auf hohe Temperaturen während der Verbrennung und einen Überschuss an Sauerstoff zurückzuführen. Nach Fouquet beginnt die Stickoxidbildung ab Temperaturen von 1.800 K. [Dabei wird deutlich], dass bei Luftverhältnissen zwischen  $\lambda = 1$  und  $\lambda = 2,2$  die NO<sub>x</sub>-Entstehung während der Verbrennung deutlich zunimmt. Ausgehend vom mageren Betrieb steigen ab Verbrennungstemperaturen von 2.200 K bei einem Luftverhältnis von  $\lambda = 2,2$  die Stickoxidemissionen bis zu einem Maximalwert bei  $\lambda = 1,2$  an. Danach sinken die Emissionen bis hin zum stöchiometrischen Betrieb ( $\lambda = 1$ ), da der verfügbare Sauerstoff für die Reaktion sinkt.“ (Schrank/Langer/Jacobson 2021: S. 25). Lambda ( $\lambda$ ) beschreibt in diesem Zusammenhang das Verhältnis von Luft zu Brennstoff im Verbrennungsraum (siehe Reif 2014: 12 f.). „Die Verbrennung wird als stöchiometrisch bezeichnet, wenn hierfür genau die Menge an Sauerstoff zugeführt wird, die rechnerisch für eine vollständige Verbrennung nötig ist. Es bleibt dann im Idealfall keinerlei Sauerstoff im Abgas zurück. Das sogenannte Verbrennungsluftverhältnis (der  $\lambda$ -Wert = Lambda-Wert) liegt dann bei 1“ (Paschotta 2021a).

<sup>37</sup> Stepień 2021: 7–14.

<sup>38</sup> European Commission 2022.

<sup>39</sup> Lott et al. 2022: 221 f.

<sup>40</sup> Verhelst/Wallner 2009.

In der technischen Umsetzung hat sich der saugrohreinblasende Motor als einfach und leicht umsetzbar mit Emissions- und Wirkungsgradvorteilen im mageren bis sehr mageren Betrieb herausgestellt. Der direkteinblasende Motor erreicht eine deutlich höhere Leistungsdichte bei gleichzeitig geringen Emissionen.<sup>41</sup>

### 2.2.2 Herausforderungen des Wasserstoffverbrennungsmotors

Schwerpunkte der Entwicklungsforschung liegen im Bereich der Motorelemente, insbesondere bei den Injektoren für die Direkteinblasung (Injektorlage, Düsengeometrie, Einblasdruck usw.) mit dem Ziel der Optimierung von Durchflussraten und auch von Haltbarkeit.<sup>42</sup>

Dabei ist die Verbrennung des Wasserstoffgemisches ein Hauptaugenmerk. In diesem Zusammenhang wird das Risiko von Glüh- und Rückzündungen an Hotspots im Verbrennungsraum als eine wesentliche Herausforderung gesehen. Dies führt bei Auftreten zu erheblichen Störungen im Betrieb.<sup>43</sup>

Ein weiteres Entwicklungsfeld ist die Optimierung der Wasserstoffverbrennung selbst. Bei Magerbetrieb kann zum Beispiel eine Optimierung des NO<sub>x</sub>-Ausstoßes erreicht werden.<sup>44</sup> In Abbildung 1 werden die Möglichkeiten der Gemischbildung in ihrer Auswirkung auf den Wirkungsgrad aufgezeigt. Es zeigt sich, dass mit Wasserstoff durchaus relevante Wirkungsgrade im Vergleich zu Benzin und Diesel erreicht werden können. Angelehnt an diese Forschungsschwerpunkte laufen Betrachtungen zur Verbesserung der Aufladesysteme, Haltbarkeit und Funktionalität der wasserstoffspezifischen Komponenten sowie der Abgasnachbehandlungssysteme.<sup>45</sup>

## 2.3 Wasserstoffverbrennungsmotoren und Brennstoffzellenantriebe im Vergleich

Der Vergleich der beiden Antriebssysteme dient der Einschätzung, inwieweit mit Blick auf das Jahr 2050 beide Technologien eine Chance auf eine Markteinführung besitzen. Ziel ist es, die wesentlichen Vor- und Nachteile des jeweiligen Antriebssystems bezogen auf seine Nutzbarkeit in militärischen Anwendungsszenarien stärker in den Blick zu nehmen.

Erste direkte Systemvergleiche wie sie etwa in der Studie „Wasserstoffverbrennungsmotor als alternativer Antrieb“ zwischen einem Wasserstoffverbrennungsmotor (350 kW) mit einem Brennstoffzellensystem (180 kW) mit Batterie (70 kWh) vorgenommen wurden, geben dabei einen wichtigen Aufschluss über die Einsatzmöglichkeiten.<sup>46</sup>

Der direkte Vergleich zeigt einen Gewichtsvorteil für den Verbrennungsmotor von rund 500 kg (Motor: 1.480 kg) bei nahezu gleichem genutztem Bauraum. Dies gilt insbesondere für größere Leistungsbereiche. Beim Wirkungsgradvergleich werden

<sup>41</sup> Schrank/Langer/Jacobson 2021: 3.

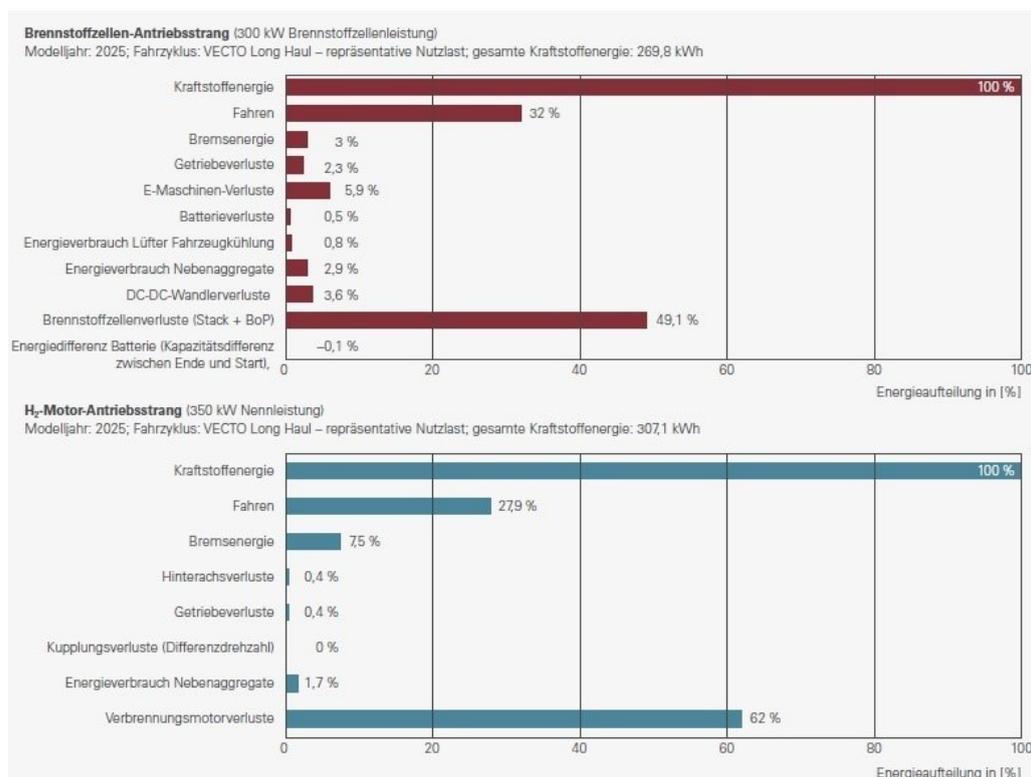
<sup>42</sup> Verhelst/Wallner 2009; Schrank/Langer/Jacobson 2021: 42.

<sup>43</sup> Klepatz et al. 2019: 398.

<sup>44</sup> Lott et al. 2022.

<sup>45</sup> Schrank/Langer/Jacobson 2021: 41 f.

<sup>46</sup> Schrank/Langer/Jacobson 2021: 48 f.



**Abb. 2:** Vergleich der Energieaufteilung im Antriebsstrang eines Brennstoffzellensystems und eines Wasserstoffverbrennungsmotor (AVL/ZSW 2021: 23).

unterschiedliche Werte angegeben. Innerhalb der Studie „Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle in schweren Nutzfahrzeugen“ des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) und der Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List (AVL) wird dabei ein mittlerer Wirkungsgrad von 37 % für den Wasserstoffverbrennungsmotor errechnet. Für den mittleren Wirkungsgrad der Brennstoffzellen-/Batteriesysteme werden 44 % angegeben.<sup>47</sup> Dies ist naheliegend, da die Energieverlusten von Brennstoffzellensystemen niedriger sind und damit die zur Verfügung stehende Energie für den Fahrbetrieb höher ausfällt, wie etwa die Studie der ZSW und AVL aufzeigen konnte.<sup>48</sup>

Jedoch zeigt die Studie auch in einer differenzierten Betrachtung der Energieaufteilung für den gesamten Antriebsstrang auf, wie die Wirkungsgrade unter Berücksichtigung aller Elemente des jeweiligen Antriebsstranges ausfallen. Abbildung 2 zeigt diesen Vergleich der beiden Systeme und deren Energieaufteilung im Antriebsstrang. Dabei ergibt sich, dass bei dem Brennstoffzellenantriebsstrang 32 % der Kraftstoffenergie für das Fahren des Fahrzeugs nutzbar sind, während dieser Wert bei einem Wasserstoffverbrennungsmotor bei rund 28 % liegt. Ursache hierfür sind systemspezifische Energieverluste, die durch die verschiedenen Elemente des Antriebsstranges auftreten. Auch wenn die Verluste in der Brennstoffzelle selbst erheblich geringer sind als im Motor, fallen beim System Brennstoffzelle weitere erhebliche Verluste durch Nebenaggregate

<sup>47</sup> Schrank/Langer/Jacobson 2021: 50.

<sup>48</sup> AVL/ZSW 2021: 23.

und Kühlung an, die die verbleibenden Wirkungsgrade für den eigentlichen Fahrbetrieb mit Brennstoffzelle oder Wasserstoffverbrennungsmotor stark annähern.<sup>49</sup>

Es ist anzumerken, dass diese Werte jedoch sehr vom Anwendungsfall der Systeme abhängen.

Die Kombination aus Brennstoffzellen und Batteriesystem zeigt dabei Vorteile für den eigentlichen Fahrbetrieb auf, da die Leistungsübertragung durch einen elektrischen Motor erfolgt, der eine dynamischere Fahrleistung ermöglicht und die akustische Signatur des Systems auf einem besonders niedrigen Niveau hält.

Trotz des höheren Wirkungsgrades und des dynamischeren Fahrbetriebs gilt es, das Antriebssystem in seiner Gänze zu betrachten. Insbesondere das Management der Abwärme gestaltet sich innerhalb eines Brennstoffzellensystems als Herausforderung, da diese Systeme ein deutlich größeres Kühlsystem benötigen als vergleichbare Wasserstoffverbrennungsmotoren, die ihre Abwärme neben einem Kühlsystem auch über die Abgase abführen können. Grundsätzlich liegt dabei ein Vorteil bei der Brennstoffzelle, deren Kühlsystem die Abwärme besser vor Detektion schützen kann. Die Wärmesignatur ist im Vergleich zu Verbrennungsmotoren geringer.<sup>50</sup>

Dennoch darf nicht aus den Augen verloren werden, dass bei vielen Lastwechseln im oberen Leistungsbereich das Brennstoffzellensystem eine frühzeitige Leistungsdegradation verbunden mit einer frühzeitigen Alterung der Brennstoffzellenmembran erfährt. Der Verschleiß der Membran führt zu einer Wärmeentwicklung, die über die Zeit ansteigt und das Kühlsystem stärker belastet.

Im technischen Vergleich der Antriebssysteme mit dem Brennstoffzellen-Hybridantrieb haben sich Vorteile des Wasserstoffmotors bei Größe und Gewicht ab Leistungen von 350 kW, bei der Robustheit gegen Verschmutzung und im Thermomanagement herausgestellt.<sup>51</sup>

Anders als bei der Brennstoffzelle entstehen bei dem Verbrennungsprozess von Wasserstoff zudem NO<sub>x</sub>-Emissionen. Durch eine entsprechende Motorsteuerung im Magerbetrieb lassen sich diese Emissionen reduzieren. Allerdings wird eine Abgasnachbehandlung weiterhin erforderlich bleiben. Die spezifischen Herausforderungen und Lösungsansätze für solche Systeme wurden bereits in Kapitel 2.2.2 näher dargelegt.

Hinsichtlich der Lebensdauer kann festgestellt werden, dass Wasserstoffverbrennungsmotoren die von Nutzfahrzeugen geforderten Betriebsstunden erreichen können, da diese Systeme im Wesentlichen auf altbekannter Technik beruhen. Für Brennstoffzellensysteme wird in der Literatur angenommen, dass die geforderten Ansprüche an die Lebensdauer im schweren Transportsektor perspektivisch erfüllt werden können. Dennoch braucht es weitere Fortschritte in der Robustheit und Effizienz einzelner Komponenten, um diese Antriebssysteme im schweren Transportsektor und innerhalb militärischer Anwendungen insbesondere im Geländebetrieb und unter extremen Umweltbedingungen nutzbar zu machen. Die Entwicklung gilt es daher weiterhin zu betrachten, da Brennstoffzellensysteme in diesen Anwendungen von verschiedenen Herstellern erst in der Erprobung sind.<sup>52</sup>

<sup>49</sup> AVL/ZSW 2021.

<sup>50</sup> Wind 2019: 110; Das 2017: 9.

<sup>51</sup> Schrank/Langer/Jacobson 2021: 3.

<sup>52</sup> Cullen et al. 2021.

Brennstoffzellen weisen eine geringere mechanische Komplexität als Wasserstoffverbrennungsmotoren auf. Deshalb wird das Brennstoffzellensystem von verschiedenen Quellen als zuverlässig eingestuft.<sup>53</sup> Dennoch ist festzustellen, dass die mechanische Komplexität des Wasserstoffverbrennungsmotors zum großen Teil konventionellen Verbrennungsmotoren entspricht. Die Zuverlässigkeit des Brennstoffzellensystems hängt aber entscheidend von der Reinheit des eingesetzten Wasserstoffes und der zugeführten Luft ab. Dies ist gerade vor dem Hintergrund der Einsatzkriterien der Bundeswehr insbesondere beim Heer eine wesentliche Herausforderung und kritische Voraussetzung für eine Nutzung. Im Vergleich ist der Wasserstoffverbrennungsmotor gegenüber der Qualität von Kraftstoff und angesaugter Luft robust. Die Brennstoffzelle ist sensibel und besitzt feine Zellstrukturen, die leicht beschädigt werden können. Insbesondere die eingesetzte Membrantechnologie ist sensibel (siehe Tabelle 1). Verunreinigungen können die Reaktionen in der Zelle blockieren. Der Verbrennungsmotor hat demnach Vorteile bei staubigen oder schmutzigen Umgebungsbedingungen und bei minderwertigerem Kraftstoff. Bei sehr niedrigen Temperaturen ist der Verbrennungsmotor zu bevorzugen, da in Brennstoffzellensystemen eine Eisbildung leichter möglich ist. Vorteile hat der Verbrennungsmotor somit in Wüsten und im Bereich des Polarkreises.<sup>54</sup>

Daraus folgend ergibt eine Analyse der Anwendungen, dass sich der Wasserstoffmotor vor allem in Bereichen mit hohen Leistungsanforderungen und geringem Bauraum sowie bei schwierigen und extremen Umweltbedingungen eignet. Explizit betrifft der große Leistungsbedarf schwere Transport- und Zugaufgaben. Die schwierigen Umweltbedingungen sind hauptsächlich im Baugewerbe mit staubiger und verschmutzter Luft zu finden und in Anwendungen wie Baggern, Planiertrauen oder Frontladern sind Wasserstoffmotoren vorteilhaft. Ebenso ist der Wasserstoffmotor bei extremen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt oder über 40 °C ohne Einschränkungen einsetzbar.<sup>55</sup>

Für Wasserstoffverbrennungsmotoren gilt ein weiterer Vorteil. Bei quasi-stationären Betriebsbedingungen wie bei Schiffen können auch Dual Fuel-Motoren mit Dieselprinzip eingesetzt werden. Diese Motoren könnten auch mit 100 % Diesel betrieben werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass beide Systeme mit Blick auf eine militärische Nutzung Vorteile, aber auch Herausforderungen aufweisen und damit eine anwendungsspezifische Nutzung beider Technologien für Streitkräfte nahelegen. Dennoch soll hier die Robustheit des Wasserstoffverbrennungsmotors insbesondere unter extremen Umweltbedingungen und der geringere Anspruch an den Treibstoff hervorgehoben werden. Diese Robustheit lässt die Anwendung in mobilen Systemen gerade des Heeres vorteilhafter erscheinen.

---

<sup>53</sup> Lott et al. 2022: 225.

<sup>54</sup> Seba/Weiss 2022; Schrank/Langer/Jacobson 2021: 53; Onorati et al. 2022: 530.

<sup>55</sup> Schrank/Langer/Jacobson 2021: 53.

### 3 Eigenschaften des Wasserstoffes und Einsatzkriterien der Bundeswehr

Obgleich die Antriebskonzepte weitere Optimierungsprozesse durchlaufen müssen, um ein möglichst breites Anwendungsfeld im Verkehrs- und Transportsektor zu erschließen, ist eine Markteinführung absehbar. Zentrale Fragestellungen ergeben sich vor allem aus den physikalischen Eigenschaften des Energieträgers Wasserstoff.

#### 3.1 Energieinhalt von Wasserstoff

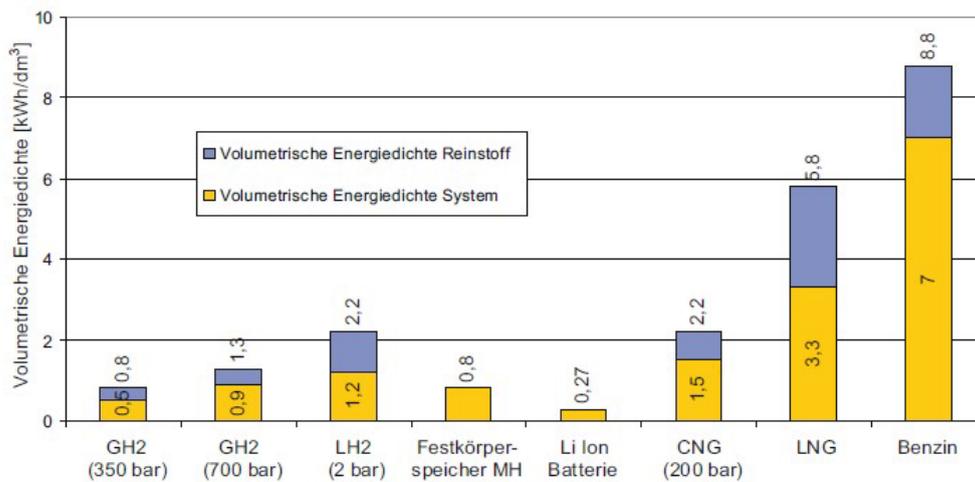
Der geringe volumetrische Energieinhalt von  $H_2$  führt zu Herausforderungen bei der Speicherung in Tanksystemen. Zwar ist der Heizwert von Wasserstoff mit 33,3 kWh pro Kilogramm etwa dreimal so hoch wie der von Diesel (11,9 kWh/kg), dennoch ist die geringe Energie pro Volumeneinheit eine maßgebliche Restriktion. Das erforderliche Tankvolumen für komprimierten Wasserstoff oder gekühlten, kryogenen (verflüssigten) Wasserstoff muss im Vergleich zu Diesel/Benzin um ein Vielfaches größer sein, um den gleichen Energieinhalt speichern zu können.

Die Speicherung von Wasserstoff in Drucktanks z. B. aus Kohlefaser ermöglicht Speicherdichten von rund 25 g pro Liter bei 350 bar bis zu rund 40 g pro Liter bei 700 bar. Kryogene Speicherung (1 bar,  $-253\text{ °C}$ ) erreicht Speicherdichten von rund 70 g pro Liter.<sup>56</sup>

In Abbildung 3 sind die erreichbaren volumetrischen Energiedichten ( $\text{kWh/dm}^3$ ) verschiedener Speichermethoden von  $H_2$  im Verhältnis zu anderen Energieträgern dargestellt. Dabei wird neben der volumetrischen Energiedichte des Reinstoffes auch die tatsächlich mit den einzelnen Systemen erreichbare Energiedichte dargestellt. Abbildung 3 vergleicht auch das Verhältnis zu Benzin. Im Vergleich zu Benzin wird bei Einsatz des Systems Drucktank (700 bar) für Wasserstoff ein ca. 7,7-faches Tankvolumen (System) benötigt, um die gleiche Energiemenge zu speichern. Diesel besitzt eine leicht höhere Energiedichte. In der Folge wird ein 8-faches Tankvolumen (System) angenommen.

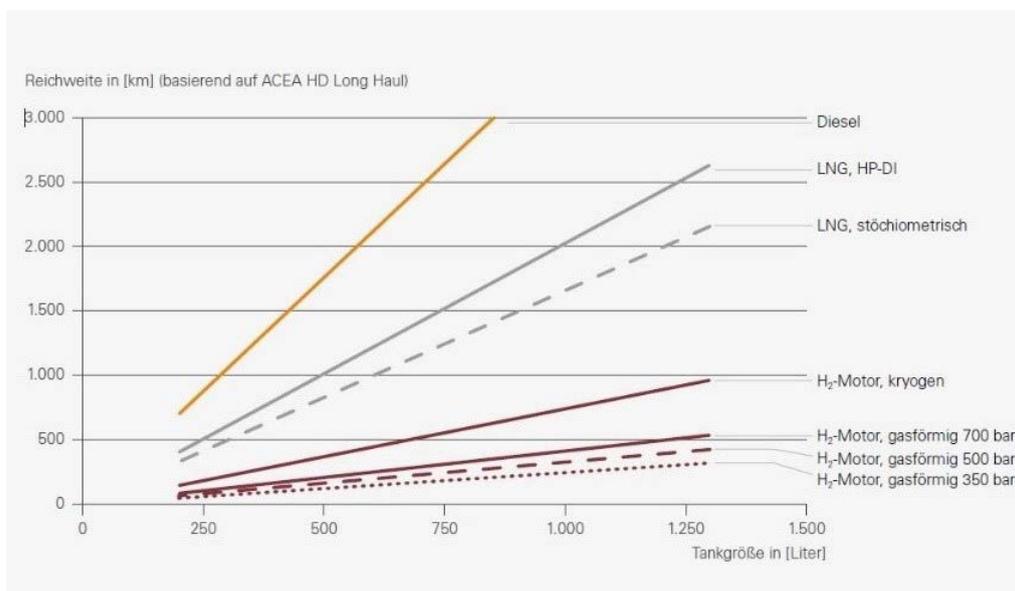
Wie in Abbildung 3 und 4 dargestellt, erlaubt die kryogene Speicherung höhere Speicherdichten, benötigt damit aber immer noch ein ca. 6-fach höheres Volumen (System) im Vergleich zu einem Benzintank. Bei den Systemwerten wirkt sich insbesondere der Energieverbrauch, der für die Kühlung benötigt wird, negativ auf das benötigte Volumen aus. Auch bei anderen Speichermethoden werden weitere verfahrenstechnische Schritte für die Speicherung und spätere Rückgewinnung erforderlich, die Energieverluste zur Folge haben. Sie sind in Abbildung 3 dargestellt.

<sup>56</sup> Adolf et al. 2017: 22.



**Abb. 3:** Energiedichte verschiedener Speichermethoden von Wasserstoff im Vergleich zu anderen Energieträgern (Klell/Eichlseder/Trattner 2018: 111).

Daraus erwachsen zentrale Herausforderungen für die Nutzung von Wasserstoff innerhalb der Mobilität. Abbildung 4 zeigt, dass aufgrund des geringeren volumetrischen Energieinhaltes die Reichweiten und damit Operationsdauern mit ähnlichen Tankvolumina nicht erreicht werden können.<sup>57</sup>



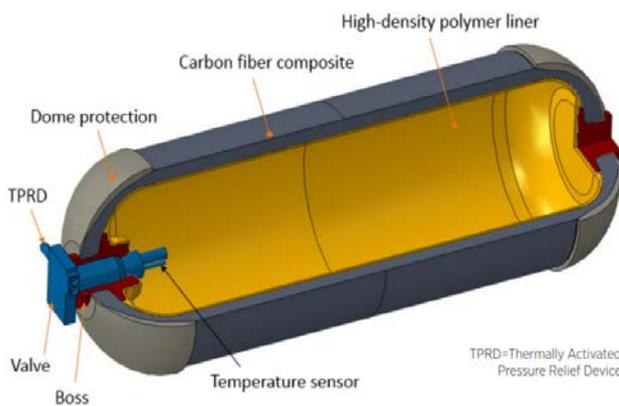
**Abb. 4:** Reichweite schwerer Nutzfahrzeuge in Abhängigkeit vom Tankvolumen (AVL/ZSW 2021: 26).

Tabelle 2 zeigt die gegenwärtig als Tanksystem untersuchten bzw. entwickelten Speichersysteme für Wasserstoff und die damit verbundenen Herausforderungen als Folge seiner geringen volumetrischen Energiedichte. Als momentaner Industriestandard ist

<sup>57</sup> Klell/Eichlseder/Trattner 2018: 109–114; Pointon/Lakeman 2007: 99 f.

**Tab. 2:** Speichermethoden von Wasserstoff (in Anlehnung an Rivard/Trudeau/Zaghib 2019: 12).

Method	Volumetric Energy Density (MJ/L)	Temperature (K)	Pressure (barg)	Remarks
Compressed	4.9	293	700	Current industry standard
Liquid	6.4	20	0	Boil-off constitutes major disadvantage
Cold/cryo compressed	4.0	40–80	300	Boil-off constitutes major disadvantage
MOF	7.2	78	20–100	Attractive densities only at very low temperatures.
Carbon nanostructures	5.0	298	100	Volumetric density based on powder density of 2.1 g/mL and 2.0 wt % storage capacity.
Metal hydrides	13.2	260–425	20	Requires thermal management system.
Metal borohydrides	9.8–17.6	130	105	Low temperature, high pressure thermal management required
Kubas-type	23.6	293	120	
LOHC	7	293	0	Highly endo/exothermal requires processing plant and catalyst. Not suitable for mobility
Chemical	11.5	298	10	Requires SOFC fuel cell.

**Abb. 5:** Wasserstoffdrucktank (Rivard/Trudeau/Zaghib 2019: 4).

das Drucktanksystem mit 700 bar zu nennen, auch wenn bei diesen Drücken zylindrische Tanks verwendet werden, die den Platzbedarf, abhängig von der Anwendung, weiter vergrößern. Bei der Druckspeicherung (700 bar) kann eine Energiemenge von 4,9 MJ/l gespeichert werden. Die Tabelle zeigt die Werte für verflüssigten Wasserstoff (6,4 MJ/l), Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC) (7 MJ/l) oder Metallhydride (13,2 MJ/l). Diese Systeme erreichen bessere Werte. Allerdings sind für ihre Nutzung weitere verfahrenstechnische Schritte bzw. bei verflüssigtem Wasserstoff eine aufwendige Kühlung erforderlich.<sup>58</sup>

Abbildung 5 zeigt den Aufbau eines Tanks aus Kohlefaserverbundstoff für eine Druckstufe von 700 bar. Mit diesem Werkstoff sind ganz erhebliche Gewichtsvorteile gegenüber herkömmlichen Stahltanks mit einer derartig hohen Druckstufe zu erzielen. Aber natürlich bieten derartige Tanksysteme auch einen Außenschutz aufgrund ihrer großen Wandstärke.<sup>59</sup>

<sup>58</sup> Energieverluste werden in Abbildung 3 deutlich.

<sup>59</sup> Kural/Ayvaz 2018.

### 3.2 Diffusion und Boil-off-Effekte

Als kleinstes Element ist das Wasserstoffatom auch als Molekül ( $H_2$ ) hoch flüchtig. Es kann auch durch moderne Stähle diffundieren. Erkenntnisse aus Pilotprojekten der Vergangenheit haben als Folge dieser Diffusion relevante Versprödungserscheinungen erkennen lassen. Weiterführende Untersuchungen der vergangenen Jahre haben allerdings bei Einsatz bestimmter Legierungen bzw. austenitischer Stähle und Beschichtungen gezeigt, dass derartige Probleme unter Kontrolle gebracht werden können.<sup>60</sup>

Der Boil-off-Effekt wird in der Literatur als weitere Herausforderung beschrieben. Er entsteht in Tanks, die mit kryogenem Wasserstoff gefüllt sind. Auch in unter Druck stehenden Tanks kann dieser Effekt entstehen, allerdings in geringerem Ausmaß. Ursache ist die Erwärmung in den Tanks. Insbesondere bei der kryogenen Speicherung entwickelt sich mit Temperaturerhöhung durch entstehenden gasförmigen Wasserstoff ein höherer Druck im Tank. Abhängig von den Außentemperaturen, der Qualität der Dämmung und dem Flächen- zu Volumenverhältnis des Tanks wurden etwa 0,4 % Boil-off-Gas pro Tag für einen  $50\text{ m}^3$  LH<sub>2</sub>-Tank gemessen.<sup>61</sup> Ähnliches gilt für Drucktanks bei Temperaturerhöhung. Das Auffangen des Boil-off-Gases wird zu einem wichtigen Faktor, um die Verlusten zu reduzieren und damit die Effizienz der Wasserstoffspeicherung zu erhöhen. Der sich aufbauende Druck muss über Überdruckventile abgelassen werden, das entweichende Gas wird bei heutigen Systemen in Behältern aufgefangen und zum Teil für eine weitere Nutzung im System verdichtet. Obgleich dem Boil-off-Effekt durch technische Lösungen Rechnung getragen werden kann, erhöht dies die Komplexität des Speichersystems.<sup>62</sup>

### 3.3 Schmierverhalten von Wasserstoff

Im Kontext von Wasserstoffverbrennungsmotoren stellen die stofflichen Eigenschaften von  $H_2$  eine Herausforderung dar, da er ein geringeres Schmierverhalten im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen hat. Bisher eingesetzte Werkstoffe, wie sie etwa in Gasmotoren für Erdgas zum Einsatz kommen, sind in diesen Zusammenhang nicht ausreichend. Folglich müssen beim Einsatz dieses Betriebsstoffes für die Motoren spezifische Werkstoffe verwendet werden, um die erforderliche Lebensdauer zu gewährleisten. Auch sind Beschichtungen zu nennen wie etwa „so genannte Hochleistungskeramiken auf oxidischer, nitridischer, carbidischer oder boridischer Basis, die besondere mechanische, elektrische, thermische und chemische Eigenschaften aufweisen.“<sup>63</sup>

Um die grundlegende Schmierung des Verbrennungsmotors zu gewährleisten, wird weiterhin in verschiedenen Bereichen auf Motoröle zurückgegriffen. Obgleich sich dadurch zwar Spuren von  $CO_2$  in den Abgasen nachweisen lassen, sind diese Mengen zu vernachlässigen.<sup>64</sup>

<sup>60</sup> Klell/Eichlseder/Trattner 2018: 271–273.

<sup>61</sup> Al Ghafri et al. 2022.

<sup>62</sup> Al Ghafri et al. 2022.

<sup>63</sup> Klell/Eichlseder/Trattner 2018: 273.

<sup>64</sup> Klell/Eichlseder/Trattner 2018: 204.

### 3.4 Explosionsverhalten und Sicherheit

Wasserstoff wird in Bezug auf Explosionsverhalten und Sicherheit generell als kritisch angesehen. Insbesondere die Einsatzkriterien von Militär wie die Funktionalität bei hohen aber auch extrem niedrigen Umgebungstemperaturen sind von großer Bedeutung. Auch die Sicherheit bei Transport, Lagerung, Betankung, Handling, Einsatz gegen Feindwirkung oder Unfallgeschehen ist von erheblichem Belang.

Wasserstoff bildet in einem breiten Konzentrationsbereich von 4,0 (untere Explosionsgrenze) bis 77 Vol. % (obere Explosionsgrenze) ein zündfähiges Gemisch mit Luft.<sup>65</sup> Auch die geringe Zündenergie von 0,017 mJ macht den Energieträger zu einem schnell entflammaren Stoff.

Das Explosionsverhalten ist im Vergleich zu anderen Kraftstoffen aber unterschiedlich. Wasserstoff besitzt als kleinstes Atom bzw. als Molekül ( $H_2$ ) eine höhere Flüchtigkeit als Erdgas, das über eine erheblich größere Masse verfügt.<sup>66</sup>

Vergleicht man Wasserstoff mit Methan, so zeigt Methan eine nahezu identische untere Explosionsgrenze, aber einen kleineren Explosionsbereich (obere Explosionsgrenze 17 Vol. %). Der Bereich bei Methan ist zwar kleiner, beginnt aber ähnlich kritisch wie bei Wasserstoff schon bei vergleichsweise geringen Anteilen von Methan in Luft. Die erforderliche Zündenergie von  $H_2$  ist mit 0,017 mJ um den Faktor 15 im Vergleich zu Methan ( $CH_4$ ) geringer. Dies ist bedeutsam, aber auch die Zündenergie von Methan ist noch sehr gering.<sup>67</sup> Die Zündenergie von Erdgas ist mit 0,29 mJ leicht höher als die von Diesel 0,24 mJ.<sup>68</sup> Die Zündtemperaturen beider Stoffe sind nahezu gleich, die Explosionsdrücke nahezu identisch.



**Abb. 6:** Simulierter Beschuss eines Wasserstoffdrucktanks durch eine RPG; von links nach rechts: (1) Vor dem Beschuss; (2) Nach dem Beschuss: Eintrittsloch; (3) Nach dem Beschuss: Austrittsloch (Paczkowski 2018: 161)

Neben diesen grundlegenden stofflichen Eigenschaften verweist die US Army auf konkrete ballistische Tests für mit Wasserstoff gefüllte Drucktanks innerhalb der eigenen Forschungsprogramme (siehe Abbildung 6). Dabei wurde durch den Beschuss mit verschiedenen Kalibern,<sup>69</sup> einer RPG und unter Nutzung von C4 das Explosionsverhalten in Kampfszenarien simuliert. Der Bericht schließt mit einem positiven Ergebnis für eine Gefechtsfähigkeit:

<sup>65</sup> Schröder et al. 2016: 7.

<sup>66</sup> Reker 2012: 24 f.; Klell/Eichlseder/Trattner 2018: 287 f.

<sup>67</sup> Schröder et al. 2016.

<sup>68</sup> AVL/ZSW 2021: 39.

<sup>69</sup> Kural/Ayvaz 2018.

Understanding the risks involved with hydrogen storage will allow for systems to be intelligently designed, mitigating most risks. While hydrogen presents several concerning properties, the risks associated with storing it are not entirely dissimilar to liquid fuels that are currently used. Storing the hydrogen at pressure will not cause any more significant safety issues than liquid fuel in the event of a ballistic penetration or explosion due to the inherently safe design of the storage systems.<sup>70</sup>

Die erforderliche Zündenergie ist bei Wasserstoff geringer. Die Untersuchung zeigt allerdings, dass das Gefährdungspotenzial bei allen betrachteten Stoffen ähnlich kritisch zu beurteilen ist.

Damit ergibt sich für die zu verbauenden Sicherheitssysteme ein hoher Anspruch wie bei bisher genutzten Kraftstoffen gerade auch in geschlossenen Räumen. Selbstverständlich sind dabei Produktspezifika und physikalische Eigenschaften bei Sensoren- und Sicherheitstechnik zu berücksichtigen, wie insbesondere bei Erdgas oder LNG auch. Bestehende Sicherheitssysteme für die chemische Kampfstoffabwehr innerhalb militärischer Anwendungen könnten hier gegebenenfalls zusätzliche Lösungsansätze liefern.

### 3.5 Transport und Erzeugung

Die Erzeugung von Wasserstoff soll sowohl im Inland als auch im Ausland erfolgen. Dafür ist in Deutschland der Bau der benötigten Infrastruktur für den Transport erforderlich. Der Pipelinetransport ist sowohl technisch als auch wirtschaftlich grundsätzlich die beste Lösung. Ein Pipelinetransport erfordert allerdings größere Abnahmevolumina, um in der zivilen Industrie Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Der geplante Aufbau eines Wasserstoffmarktes wird diese Möglichkeiten schaffen. Für inländische Standorte der Bundeswehr wird dadurch eine Versorgungslösung geschaffen werden.

Für direkte militärische Anwendungen im Feld sind flexiblere Lösungen erforderlich. Reiner Wasserstoff ist direkt als Fuel geeignet. Grundsätzlich lässt er sich mit LKWs und Drucktanks in den Einsatz vor Ort bringen. Der Austausch im Feld könnte mit sogenannten Racks, auf denen sich mehrere kleinere Druckbehälter befinden, erfolgen.

Für den Transport zu Knotenpunkten wird ein Transportsystem benötigt, da eine Pipelineversorgung nicht möglich ist. Als ein Beispiel ist der jüngst entwickelte Trägerstoff LOHC zu sehen. LOHC ist ein Medium, in dem größere Mengen H<sub>2</sub> (siehe Tabelle 2) für den Transport gespeichert werden können. Es ermöglicht höhere Speicherdichten. Im Vergleich zum Transport in Drucktanks (700 bar) kann mehr H<sub>2</sub> in einer Größenordnung von 40 % transportiert werden. Allerdings wird für die erneute H<sub>2</sub>-Freisetzung dann vergleichsweise hohe thermische Energie benötigt, bevor H<sub>2</sub> einer Nutzung zugeführt werden kann.<sup>71</sup> „Das bedeutet, 30 % der in Form von gespeichertem Wasserstoff eingebrachten Energie wird für den Betrieb benötigt, meist zum Beheizen des

<sup>70</sup> Paczkowski 2018: 162.

<sup>71</sup> Rao/Yoon 2020.

Freisetzungsreaktors.“<sup>72</sup> Der Trägerstoff LOHC besitzt jedoch den Vorteil, dass er weder brennbar noch explosiv ist.<sup>73</sup>

In der Schifffahrt sind als zukünftige Kraftstoffe neben Wasserstoff auch Ammoniak oder Methanol in der Diskussion. Sie sollen hier allerdings nicht näher betrachtet werden.

Für Wasserstoff könnte eine lokale Erzeugungsstrategie auf inländischen Liegenschaften, im Bündnisgebiet oder bei Auslandseinsätzen eine Alternative sein. Einen kleinen Ansatz hierfür liefert das Bundeswehrcamp Niamey in Niger, wo mit Solarenergie ein Teil der Energieversorgung bereits ermöglicht wird.<sup>74</sup>

Als interessante Option eröffnen Containerlösungen für die Wasserstoffherzeugung bei zur Verfügung stehender Wasserversorgung z. B. über Brunnen die Möglichkeit zu einer lokalen H<sub>2</sub>-Erzeugung. Eine Stromversorgung ließe sich grundsätzlich ebenfalls über erneuerbare Energien realisieren. Ein deutlicher Vorteil wäre dabei der Wegfall eines erheblichen Teils des Transports via Tank-Lkw, der als potenzielles Angriffsziel bis heute ein signifikantes Risiko darstellt. So verweist auch das Army Corps of Engineers auf die mögliche Energieerzeugung von Wasserstoff im Feld, wodurch die Transportwege von Kraftstoffen innerhalb der Einsatzgebiete minimiert werden könnten.<sup>75</sup>

Allerdings bedürfen derartige Überlegungen einer qualifizierten Prüfung der erforderlichen regenerativen Stromerzeugungskapazitäten unter Berücksichtigung der Energieverbraucher. Die verlässliche Energieversorgung des Standortes muss dabei zu jedem Zeitpunkt sichergestellt sein. Dies bedarf einer zusätzlichen detaillierten Betrachtung, die im Rahmen dieser Studie nicht erfolgen kann.

### 3.6 Ansprüche an das Personal

Bei dem Einsatz von Wasserstoff entstehen im Vergleich zu herkömmlichen Systemen spezifische Anforderungen an die Ausbildung des Personals, das im Umgang mit dieser Technologie geschult werden muss. Dabei liegt der Schwerpunkt auf den stofflichen Eigenschaften und den Risiken in bestehenden verfahrenstechnischen Anlagen. Die hierfür erforderlichen sicherheitstechnischen Analysen münden in unmittelbare Vorgaben für den Umgang mit Wasserstoff. Beispielhaft seien hier Sicherheitsabstände bei Betankungen, aber auch bei Inspektionen und Instandhaltungen zu nennen.<sup>76</sup>

Bei der Sicherheit der Handhabung (fail save) wird ähnlich wie zum Beispiel bei LNG keine unbeherrschbare Herausforderung gesehen. Auch intuitive Handhabbarkeit zur Bedienung durch wenig geschultes Personal erscheint realisierbar.

<sup>72</sup> Universität Augsburg Anwenderzentrum Material- und Umweltforschung 2023.

<sup>73</sup> Rao/Yoon 2020.

<sup>74</sup> Bayer/Struck 2021: 6.

<sup>75</sup> National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2021: 9, 35–38.

<sup>76</sup> Für die sicherheitstechnischen Herausforderungen von Wasserstoff siehe Kotchourko/Jordan 2022.

### 3.7 Ersatzteilversorgung und Beschaffung

Gerade der Einsatz von Wasserstoffverbrennungsmotoren bietet die Möglichkeit zu einem nahezu unbeschränkten Rückgriff auf bestehende Strukturen und Beschaffungssysteme. Bis auf wenige Ausnahmen folgen Wasserstoffverbrennungsmotoren bestehenden Bauarten konventioneller Motoren.<sup>77</sup> Eine Ersatzteilversorgung wäre demzufolge ohne wesentliche strukturelle Veränderungen realisierbar.

Bestehende vor Ort Kompetenz im In- und Ausland im zivilen Bereich bliebe weiter nutzbar. Im Bereich von Brennstoffzellensystemen zeigt sich jedoch ein anderes Bild. Hier erfordert die Reparatur inklusive der Ersatzteilbeschaffung den Aufbau neuer qualifizierter Strukturen. Die externe Unterstützung insbesondere bei Auslandseinsätzen aus dem zivilen Sektor ist noch für einen unabsehbaren Zeitraum als äußerst eingeschränkt zu erwarten.

### 3.8 Single Fuel Policy

Für zukünftige Fuels der Bundeswehr sind unterschiedliche Kriterien zu berücksichtigen. Der heutige Standard sieht im Rahmen der Single Fuel Policy der NATO definierte Qualitäten für verschiedene Fuels vor.<sup>78</sup>

Die Entwicklungen neuer Antriebssysteme lassen für die Zukunft im zivilen Bereich eine Vielzahl von Lösungen für spezifische Anwendungsfelder erwarten. Nur so können die Vorteile dieser Systeme genutzt werden. Dementsprechend werden auch neue Treibstoffe wie reines H<sub>2</sub> im zivilen Umfeld zum Einsatz kommen.

Während die Batterietechnologie im Bereich urbaner Mobilität ihr voraussichtliches Anwendungsfeld findet, entwickelt sich gerade Wasserstoff als Fuel für den Langstreckenschwerlasttransport, also für schwere Lkw, aber auch für Baufahrzeuge, Eisenbahn und einige Bereiche von Schiffs- und Flugbetrieb. Für einen potenziellen Einsatz bei der Bundeswehr ergibt sich ebenfalls eine Orientierung am Einsatzzweck.

Die Streitkräfte greifen bereits heute auf zivile Strukturen bei der Landesverteidigung zurück. Mit Blick auf das Jahr 2050 werden sich diese zivilen Strukturen massiv verändern. Für viele Anwendungen bei der Bundeswehr, die auf ähnlichen zivilen Anwendungen wie Schwerlast-Lkw, Baumaschinen und Raupen beruhen, aber auch im Bereich der Energiespeicherung, wird auch weiterhin insbesondere bei der Landesverteidigung auf die zivilen Infrastrukturen zurückgegriffen werden. Aus logistischen Gründen ist dies unerlässlich. In diesem Rahmen wird Wasserstoff absehbar eine erhebliche Rolle spielen. Die Anwendung spezifischer Kraftstoffe wie synthetische Fuels sollte sich auf energieintensive Anwendungen beschränken, insbesondere auch weil diese im zivilen Pkw- und Lkw-Verkehr weniger Anwendung finden werden. Die entsprechenden EU-Richtlinienentwürfe sehen die Verwendung von synthetischen Fuels im Pkw-Bereich bisher nicht direkt vor.<sup>79</sup>

---

<sup>77</sup> Lott et al. 2022: 225.

<sup>78</sup> Kern et al. 2021.

<sup>79</sup> European Commission 2022.

## 4 Wasserstoff als zukünftiger Energieträger für den zivilen Transport- und Verkehrssektor

### 4.1. Lastkraft-, Transport- und Spezialmaschinen

Neuere Entwicklungen wie der sogenannte Tesla Semi-Lkw zeigen, dass auch batterieelektrische Antriebssysteme weitere Verbesserungen für Anwendungen im Transportsektor erfahren. Dabei werden inzwischen Reichweiten von 500–800 km in Aussicht gestellt. Inwieweit bestehende Einschränkungen dieser Systeme einen wirtschaftlichen Betrieb in der Langstreckenlogistik in der Zukunft erlauben werden und damit eine großflächige Nutzung möglich wird, muss weiter beobachtet werden.

Bei der Brennstoffzellentechnologie werden heute bereits Antriebssysteme für 38 Tonnen-Lkw mit einem Leistungsvermögen von bis zu 300 kW (kurzfristig über Batteriezuschaltung bis zu 400 kW) entwickelt, für die eine Reichweite von bis zu 1.000 km möglich ist.<sup>80</sup>

Der Wasserstoffverbrennungsmotor schafft mit bisher bestehendem Leistungsvermögen von 250 kW bis zu 300 kW eine Alternative zur Brennstoffzellentechnologie und natürlich auch zum klassischen Dieselmotor. Das Drehmomentverhalten ist, wie in der Abbildung 7 dokumentiert, dem von Dieselmotoren ähnlich. Für das Leistungsverhalten gilt:

„Beim Vergleich der NFZ-Motoren [Nutzfahrzeuge] erreicht der Wasserstoffmotor [...] etwa 90 % der durchschnittlichen spezifischen Leistung von 30 kW/l der Dieselmotoren. Die Publikationen enthalten auch nur wenige Angaben zu den maximalen effektiven Wirkungsgraden, die alle über 40 % liegen.“<sup>81</sup>

Es zeigt sich, dass bei leichter Anpassung der Größe des Motors das gleiche Leistungsvermögen und auch ein ähnliches Drehmomentverhalten erreicht werden könnten. Dieses Leistungsniveau entspricht den in der Bundeswehr eingesetzten neuesten Lkws.

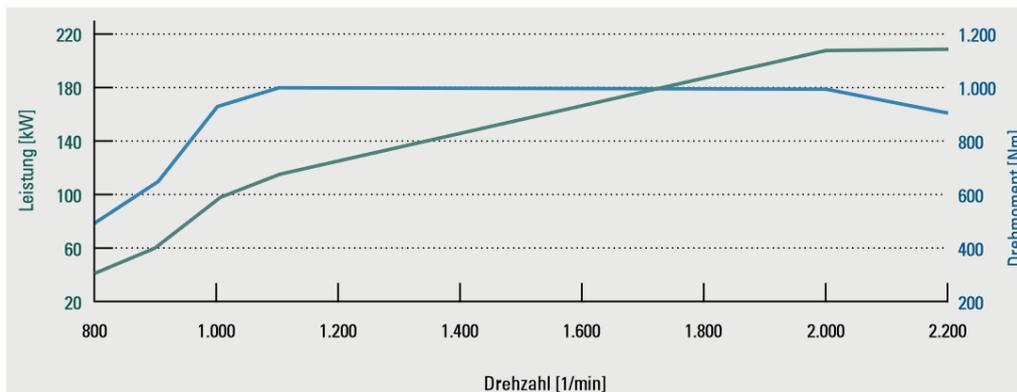
Wie bereits aufgezeigt, befinden sich Wasserstoffverbrennungsmotoren in vielen größeren Unternehmen in der Entwicklung. So steht etwa das 7.8 Liter Aggregat der Firma Deutz vor einer Markteinführung in 2024.<sup>82</sup> Darüber hinaus erprobt Daimler in

---

<sup>80</sup> Mandaiker 2022.

<sup>81</sup> Schrank/Langer/Jacobson 2021: 34.

<sup>82</sup> Deutz AG 2021.



**Abb. 7:** Motorcharakteristika eines Wasserstoffverbrennungsmotors (Schrank/Langer/Jacobson 2021: 32).

einem ersten Pilotprojekt die Nutzung von Wasserstoffverbrennungsmotoren im Unimog.<sup>83</sup>

Brennstoffzellen und Wasserstoffverbrennungsmotoren haben unterschiedliche Stärken und Schwächen. Eine Auswahl sollte sich deshalb an den Einsatzprofilen orientieren. Wasserstoffverbrennungsmotoren bieten im Bereich von Bau- und Landmaschinen erhebliche Vorteile. Häufige Lastwechsel mit hohen Drehmomenten werden von Wasserstoffverbrennungsmotoren besser abgedeckt.

Auch wenn Elektromotoren sogar höhere Drehmomente liefern können, arbeitet ein Brennstoffzellensystem effizienter im Bereich unter 50 % des Leistungsvermögens und erfährt im oberen Leistungsbereich höheren Verschleiß und damit eine beschleunigte Degradation des Leistungsvermögens.<sup>84</sup> Zur Unterstützung werden hier zusätzliche Batteriesysteme zum Erreichen von Leistungsspitzen eingesetzt. Bei Anforderungen wie geringe Lärmemissionen könnte dieses System auch als Hilfsantrieb neben den Hauptantriebsmotoren Anwendung finden.<sup>85</sup>

Eine Prognose der denkbaren Entwicklungen in der zivilen Industrie bis zum Jahr 2050 ist von erheblicher Relevanz. Dabei spielt ein weiterer Faktor eine wesentliche Rolle: Bei der Entwicklung wasserstoffbetriebener Fahrzeuge insbesondere im Lkw-Bereich ist die Existenz eines Sekundärmarktes von besonderer Bedeutung. Aus dem Leasing kommende Lkw müssen einen Abnahmemarkt haben. Dies ist eine Herausforderung für die Nutzbarkeit wasserstoffbetriebener Antriebssysteme, da bereits heute viele Lkw nach bestimmten Nutzungsdauern in das Ausland verkauft werden. Hier hilft die weitgehend bereits bestehende Technik des Wasserstoffverbrennungsmotors, da zumindest Wartung und Instandhaltung auf Basis weitgehend vorhandener Routinen erfolgen können. Trotzdem beschränkt dieser Umstand derzeit noch den wirtschaftlichen Betrieb und die Total Cost of Ownership (TCO). Dies kann die Markteinführung weiter verzögern. Es kann allerdings die Marktentwicklungen nicht infrage stellen. Bei der Brennstoffzelle entsteht durch die Neuartigkeit dieses Systems eine zusätzliche Herausforderung.

<sup>83</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie/TÜV Rheinland 2021: 56.

<sup>84</sup> AVL/ZSW 2021: 32 f.

<sup>85</sup> Dimitrova/Nader 2022.

## 4.2 Schienengebundene Mobilität

In der schienengebundenen Mobilität gibt es bereits mehrere Anwendungsfelder. Der Einsatz von Brennstoffzellen in Personenzügen läuft in begrenztem Umfang bereits seit mehreren Jahren erfolgreich und befindet sich im Ausbau.<sup>86</sup> Im Großraum Frankfurt/Main sollen 27 Züge zum Einsatz kommen. Die Wasserstoffversorgung erfolgt durch anfallendes H<sub>2</sub> der lokalen Industrie.<sup>87</sup> Auch die Deutsche Bahn AG testet zusammen mit der Siemens Mobility GmbH den Einsatz von Brennstoffzellen für die Schiene. Züge sind in mehreren Ländern Europas geplant oder bereits im Einsatz.<sup>88</sup> Hersteller wie der belgische Motorenhersteller BH<sub>2</sub>Hydro weisen zudem auch auf die Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoffverbrennungsmotoren für schienengebundene Anwendungen hin.<sup>89</sup>

Aber auch für den Transport von Wasserstoff sind schienengebundene Logistikkonzepte eine Möglichkeit; insbesondere in der Phase des Markthochlaufes, in der der Bau von Pipelines aufgrund fehlender Abnehmerstrukturen in bestimmten Gebieten noch nicht wirtschaftlich sinnvoll ist.

Diese Entwicklungen berühren die Anwendungsfälle der Bundeswehr nur indirekt. Trotzdem sind sie ein Hinweis auf die sich entwickelnde Wasserstoffinfrastruktur in Europa durch die sich auch für die Bundeswehr neue Chancen für eine Verbesserung der Versorgungssicherheit ergeben.

## 4.3 Schifffahrt

In der Schifffahrt werden als Antriebsmaschinen bislang Motoren mit 2-Takt- oder 4-Takt-System sowie Gasturbinen eingesetzt. In der Schiffsantriebstechnik werden aber, wie am Beispiel deutscher U-Boote gezeigt wird,<sup>90</sup> auch Brennstoffzellensysteme genutzt oder befinden sich in der Entwicklung.

Die Antriebssysteme in der Schifffahrt befinden sich seit mehreren Jahren in einem Aufbruch. Das über lange Zeit eingesetzte Schweröl ist bereits seit mehreren Jahren in der Kritik. Neue Abgasreinigungssysteme aber auch reinerer Treibstoff finden nicht zuletzt Einzug in diese Industrie. Aber auch LNG (Liquified Natural Gas) wird vermehrt auch in der Kreuzfahrtindustrie und eben auch beim LNG-Transport für das Transportschiff als Fuel eingesetzt. Über diese Treibstoffe hinaus wird massiv die Möglichkeit anderer klimafreundlicherer Treibstoffe untersucht. Hier stehen vor allem Ammoniak und Methanol im Fokus.<sup>91</sup>

Wasserstoff stellt in diesem Zusammenhang ebenfalls eine Alternative dar. Brennstoffzellensysteme finden allerdings bisher nur in sehr speziellen Einsatzgebieten Anwendung. Projekte wie Pa-X-ell2 (Dezentrale Energienetze auf Passagierschiffen) oder Elektra-II (hybridbetriebenes Schubschiff) dokumentieren dies.<sup>92</sup>

<sup>86</sup> Alstom/RMV/Ifraserv höchst 2020.

<sup>87</sup> Schroeder 2021.

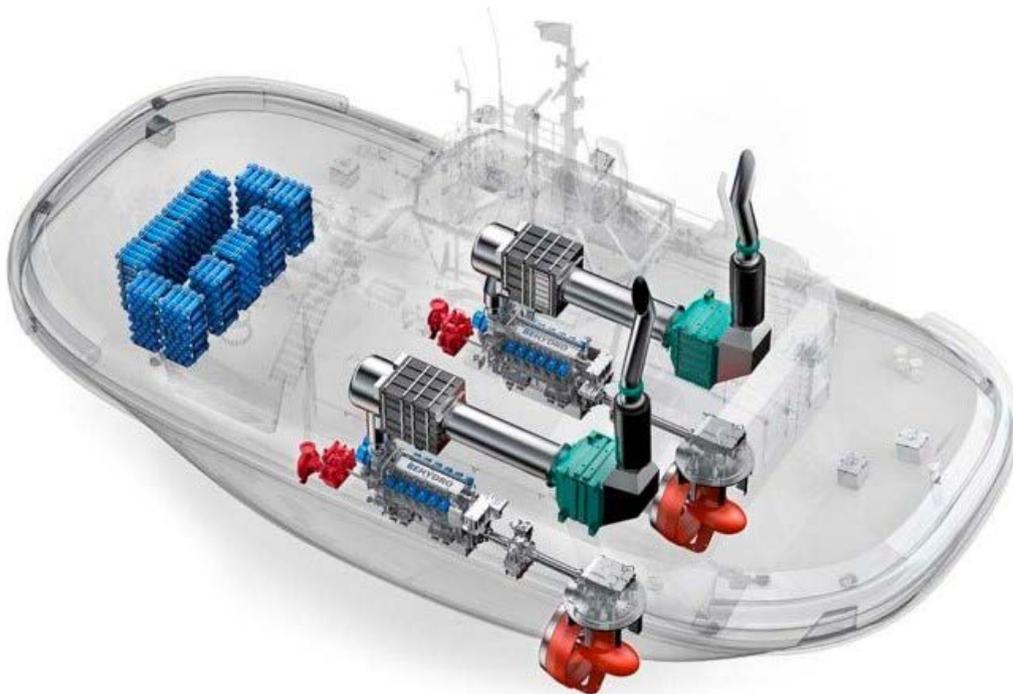
<sup>88</sup> Deutsche Bahn 2022.

<sup>89</sup> BeH<sub>2</sub>ydro 2021.

<sup>90</sup> Siehe Seite 27 in dieser Arbeit.

<sup>91</sup> Schrank/Langer/Jacobson 2021: 84.

<sup>92</sup> Müller/Stanik 2022a, 2022b.



**Abb. 8:** Grafik des weltweit ersten Hafenschleppers, der mit Wasserstoffmotoren betrieben wird (Pospiech 2020).

Eine weitere Entwicklung zeichnet sich im Bereich der Verbrennungsmotoren ab. Hier werden Wasserstoffverbrennungsmotoren nach dem Dieselmotorprinzip getestet. Damit kann eine Dual Fuel-Lösung zur Anwendung gebracht werden. In der Regel wird über die Ladeluftleitung Wasserstoff zugeführt.<sup>93</sup> Ein Rest Diesel bleibt zur Entzündung des Gemisches erforderlich. Dabei kann ein Verhältnis von bis zu 80 % Wasserstoff und 20 % Diesel erreicht werden. Verschiedene Hersteller arbeiten gegenwärtig an der Erprobung dieser Antriebsvarianten. Bei verschiedenen Anwendungen gibt es bereits Pilotprojekte; so laufen z. B. Schlepper in Antwerpen (siehe Abbildung 8) mit Wasserstoffverbrennungsmotoren oder sind für den Betrieb bestellt. Aufgrund der spezifischen Einsatzbedingungen in Häfen und entsprechenden, vergleichsweise kurzen Einsatzdauern lassen sich diese Systeme gut nutzen. In Abbildung 8 ist das Tanksystem des Schleppers und sein Platzbedarf in der Farbe Blau dargestellt.

Innerhalb der Schifffahrt werden für die Wasserstoffspeicherung neben Drucktanks auch Trägerstoffe wie LOHC als Speichermedium diskutiert. Erste Pilotprojekte erproben ab 2025 eine LOHC-Nutzung in Schiffen.<sup>94</sup> Dabei wird LOHC direkt an Bord gebunkert. Im Vergleich zur Druckspeicherung ermöglicht ein solcher Trägerstoff bisher eine höhere volumetrische Energiedichte von ca. 40 %.<sup>95</sup> Dies entspricht einem gespeicherten Wasserstoffgewicht von ca. 57 kg/m<sup>3</sup><sup>96</sup> im Vergleich zu ca. 40 kg/m<sup>3</sup><sup>97</sup> bei 700 bar Druckspeicherung. Bei Bedarf kann durch einen Katalysator der Wasserstoff aus

<sup>93</sup> Deheri et al. 2020; Santos 2022: 28688.

<sup>94</sup> Østensjø/Hydrogenious 2021.

<sup>95</sup> future:fuels 2021; siehe Tabelle 2

<sup>96</sup> Sekine/Higo 2021: 471; future:fuels 2021.

<sup>97</sup> Paschotta 2021b.

der Lösung dehydriert werden. Allerdings bedarf der Dehydrierungsprozess höherer Temperaturen und verbraucht damit einen erheblichen Teil (ca. 30 %) <sup>98</sup> der gespeicherten Menge an Wasserstoff wieder. Als Vorteil von LOHC bleibt, dass dieser Stoff flüchtig sowie drucklos transportiert werden kann und schwer entzündlich ist. <sup>99</sup> Für LOHC könnten also grundsätzlich bestehende Transportsysteme und Pipelines genutzt werden.

Auch Ammoniak wird in der zivilen Schifffahrt als Trägerstoff diskutiert. Darauf soll im Nachfolgenden jedoch nicht weiter eingegangen werden.

Neben Projekten für den eigentlichen Hafenbetrieb sind auch Fähren z. B. in Skandinavien sowie Schiffe an der deutschen Küste bereits mit Brennstoffzellenantrieben in der Planung. <sup>100</sup>

Diese Form der Anwendung zeigt natürlich die Abhängigkeit vom Einsatzbereich. Der Betrieb im Hafen oder Küstenbereich erweist sich als erreichbar. Eine Einsatzdauer von 2–3 Tagen, abhängig vom Tankvolumen, erscheint leicht möglich.

Wasserstoffverbrennungsmotoren entwickeln sich zu einer ernstzunehmenden Alternative in der Schiffsantriebstechnik. Während für Anwendungen an Land Motoren nach dem Ottomotorprinzip konzipiert werden, wird für den Schiffsbetrieb eher auf das Dieselmotorprinzip zurückgegriffen. Dabei werden mittelschnellaufende Dieselmotorkonzepte genutzt. Wasserstoffverbrennungsmotoren nach dem Dieselprinzip zeigen im Vergleich zu mittelschnellaufenden Dieselmotoren ein ähnliches Kennlinienverhalten. Das Leistungsvermögen liegt dabei bei rund 80 % gleicher Dieselmotoren. Es erreicht bei einigen Herstellern bisher Größen von bis zu 2.700 kW aus 16 Zylinder-Motoren mit rund 255 Litern Hubraum. <sup>101</sup>

Ein besonderes Augenmerk sollte hierbei auf die Dual Fuel-Nutzungsmöglichkeit gelegt werden. Sie ermöglicht einerseits eine hohe Flexibilität auch für die reine Dieselnutzung, andererseits aber auch die Nutzung von Wasserstoff, die eine massive Reduzierung des Schadstoffausstoßes möglich macht. Ein zukünftiger Verzicht auf Abgasreinigungssysteme erscheint derzeit nicht denkbar, ist aber bei weiterer Fortentwicklung der Motorensysteme nicht völlig auszuschließen. Der dadurch freiwerdende Raum könnte für zusätzliche Tankkapazität und damit für die Erhöhung des Einsatzradius derartiger Schiffseinheiten genutzt werden. Wie auch im Bereich der Landmobilität bestimmen die Einsatzgebiete und Reichweiten sowie die dabei zu betrachtenden Lastkollektive für die Motoren die Möglichkeiten der Nutzung.

Ein weiteres Element zur Leistungssteigerung in der Schiffsantriebstechnik kann der zukünftige Einsatz von Wasserstoffturbinen sein. <sup>102</sup> Hier arbeiten verschiedene Hersteller an der Entwicklung. Erste Pilotprojekte mit Turbinen beginnen bereits 2023. Erste Prototypen werden für 2030 erwartet.

#### 4.4 Wasserstoff als Aviation Fuel

Im Bereich der Luftfahrt wird sowohl der Brennstoffzellentechnologie als auch Wasserstoffverbrennungssystemen Potenzial beigemessen. Die spezifischen

<sup>98</sup> Universität Augsburg Anwenderzentrum Material- und Umweltforschung 2023.

<sup>99</sup> Esfeh et al. 2022: 13 f.

<sup>100</sup> Wingrove 2022.

<sup>101</sup> BeH2ydro 2021.

<sup>102</sup> Ammar/Alshammari 2018.

Rahmenbedingungen im Flugverkehr mit niedrigen Umgebungstemperaturen auf Reiseflughöhe sowie die geringeren Gewichte des Energieträgers Wasserstoff lassen die Hersteller zumindest ein Potenzial für den Kurz- und Mittelstreckenbereich erkennen. Überschlägig lässt sich bei Berücksichtigung des spezifischen Gewichts von flüssigem Wasserstoff mit Tanksystem im Vergleich zu Kerosin mit Tank ein Gewichtsvorteil von rund 30 % erwarten.<sup>103</sup> Folglich entwickeln verschiedene Flugzeughersteller und auch Triebwerkshersteller Konzepte für wasserstoffbetriebene Flugzeuge.

Airbus will Kurz- und Mittelstreckenpassagierjets bereits ab ca. 2030 mit solchen Systemen erproben,<sup>104</sup> während Boeing derzeit noch umfassend auf synthetische Fuels setzt.

Für die Nutzung von Wasserstoff wird sowohl die Wasserstoffturbinentechnik, als auch die Brennstoffzellentechnologie untersucht. Beide Technologien minimieren den Ausstoß von CO<sub>2</sub>, wobei die Brennstoffzellentechnologie auch ohne NO<sub>x</sub>-Emissionen auskommt.<sup>105</sup>

Die Herausforderungen im Flugzeugbau sind vielfältig. Tanks, die derzeit hauptsächlich in den Flügeln sitzen, werden sich zukünftig auch im Rumpf befinden. Generell wird der Einsatz gekühlten Wasserstoffes favorisiert. Der gekühlte Wasserstoff wird am Boden getankt und während des Fluges ohne zusätzliche Kühlung im Flugzeug verbraucht. Dabei hilft die geringe Außentemperatur auf Reiseflughöhe. Boil-off-Effekte (siehe Kapitel 3.2) beim Flugzeug sind bei einer derartigen Anwendung eher vernachlässigbar, da für die Kurz- oder Mittelstrecke vergleichsweise kurze Flugzeiten bestehen. Die Tanks selbst erhalten eine Dämmung.<sup>106</sup>

Eine weitere Nutzungsmöglichkeit von Wasserstoff besteht im Bereich der Flughafeninfrastruktur. Hier gibt es verschiedene Beispiele wie etwa den Flughafen Hamburg, der in den kommenden Jahren Klimaneutralität anstrebt. Dabei sollen Windkraftanlagen die Basis für die Herstellung von Wasserstoff über Elektrolyseure werden. Mit dem erzeugten Wasserstoff soll der Flughafenbetrieb auf einen klimaneutralen Status gebracht werden. Dabei ist auch ein Pilotprojekt für die Erzeugung von synthetischem Kerosin in Zusammenarbeit mit der Raffinerie Heide in Schleswig-Holstein geplant.<sup>107</sup>

## 5 Bisherige Wasserstoffnutzung in der militärischen Mobilität

Das Potenzial von Wasserstoff als Kraftstoff wird von den NATO-Staaten erkannt.<sup>108</sup> Das US-Department of Defense stellt sich als Technologietreiber im Bereich von Fuel Cells (Brennstoffzellen) auf. Mit den Konzeptfahrzeugen ZH2 und Silent Utility Rover Universal Superstructure (SURUS) in Kooperation mit General Motors werden Brennstoffzellen als Antriebssystem für geschützte Fahrzeuge entwickelt und auf ihre Einsatzfähigkeit hin getestet.<sup>109</sup> Zudem strebt das koreanische Unternehmen Kia Motors in

<sup>103</sup> Dincer/Acar 2016: 82.

<sup>104</sup> Airbus 2021.

<sup>105</sup> Baroutaji et al. 2019.

<sup>106</sup> Dincer/Acar 2016.

<sup>107</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt 2021.

<sup>108</sup> Mayor-Hilsem/Zimmermann 2019.

<sup>109</sup> Gross/Poche/Ennis 2011; Centeck 2020; Darling 2018; Das 2017; IMCCS Expert Group 2022: 22.

den kommenden Jahren an, sein Portfolio an militärischen Fahrzeugen bis 5 Tonnen mit Wasserstoffbrennstoffzellen auszustatten. Diese Transformation des militärischen Geschäftsfeldes soll auch die Grundlage für die Markteinführung ziviler Brennstoffzellenfahrzeuge ab 2028 bilden.<sup>110</sup>

In schwer gepanzerten Fahrzeugen lassen sich Brennstoffzellen jedoch bislang nur schwer als Substitution für das Antriebssystem einsetzen. Folglich werden in diesem Anwendungsfeld Brennstoffzellen im Verbund mit konventionellen Antrieben als Hilfsaggregate eingesetzt. Wasserstoffbetriebene Energiesysteme eignen sich für Auxiliary Power Units in besonderem Maße, um z. B. die Bordelektronik zu versorgen. Durch die verringerte thermische und akustische Signatur des Energiesystems wird der silent watch-Betrieb dieser Fahrzeuge verbessert. Erste Testläufe solcher Zusatzaggregate wurden etwa im M1 Abrams Panzer durchgeführt.<sup>111</sup>

Bei Marineanwendungen werden wasserstoffbetriebene Brennstoffzellensysteme in der U-Boottechnik als wichtige Ergänzungen zu konventionellen Antrieben identifiziert. Neben der Bundeswehr, die in den U-Booten der Klasse 212A bereits Brennstoffzellen nutzt, nahmen auch die spanischen Streitkräfte das erste U-Boot der S-80 Plus Klasse in Betrieb, das allerdings mit Bioethanol die Brennstoffzellen und das Hauptantriebsaggregat gleichermaßen versorgt. Auch die französische Naval Group legte ein Air-Independent Propulsion (AIP) System vor, das durch einen Reformer den dafür notwendigen Wasserstoff direkt an Bord bisher aus konventionellen Kraftstoffen erzeugt.<sup>112</sup>

Besondere Potenziale entfaltet die Brennstoffzelle auch innerhalb der Drohnentechnik, wie sie etwa vom US Department of Defense angestrebt wird:

Among the alternatives, fuel cells have excellent capability to provide benefits critical to the success of unmanned vehicle missions. They can deliver more power per unit weight while reducing a vehicle's heat signature and noise. A fuel cell's uninterrupted power density can reduce vehicle size and extend mission endurance. Such improved capability could justify a cost premium.<sup>113</sup>

Zusammengeführt werden diese Überlegungen in der US-Aufklärungsdrohne Hybrid Tiger, die durch ein hybrides Antriebssystem von Solar- und Brennstoffzelle lange Operationsreichweiten und Distanzen mit einer kompakten Bauweise vereint.<sup>114</sup>

Diese operativen Vorteile werden ebenfalls innerhalb der kanadischen (Rüstungs-) Industrie aufgegriffen. So lieferte das Unternehmen EnergyOr Technologies Inc. Aufklärungsdrohnen an die französischen Streitkräfte in 2017.<sup>115</sup> Verstetigt werden solche Innovationsinitiativen der französischen Streitkräfte ebenfalls durch das Projekt RA-PACE der L'École de l'air, das die Herausforderungen und Potenziale von Wasserstoffbrennstoffzellen für kleine Aufklärungsdrohnen aufzeigen soll.<sup>116</sup>

<sup>110</sup> Hydrogen Central 2021; IMCCS Expert Group 2022: 23.

<sup>111</sup> Das 2017: 12; Mayor-Hilsem/Zimmermann 2019: 28; Andrukaitis 2010.

<sup>112</sup> Mayor-Hilsem/Zimmermann 2019: 24 f.; Das 2017: 15.

<sup>113</sup> Gross/Poche/Ennis 2011: 31.

<sup>114</sup> Stroman et al. 2018.

<sup>115</sup> Mayor-Hilsem/Zimmermann 2019: 26.

<sup>116</sup> Charpentreau 2021.

Gerade das breite Anwendungsfeld der Brennstoffzellentechnologie innerhalb der militärischen Forschung zeigt das Potenzial von Wasserstoff als Energieträger für militärische Anwendungen.

Im Bereich der personenbezogenen Ausrüstung (soldier wearables) findet die Nutzung von Brennstoffzellen zunehmend Anwendung. Die US-Streitkräfte verweisen auf die Nutzungsmöglichkeit einer Wasserstofferzeugung abseits der Elektrolyse. Dabei wird  $H_2$  direkt auf dem Gefechtsfeld durch den kombinierten Einsatz von Aluminium, Gallium und Indium erzeugt.<sup>117</sup>

Jüngst entwickelte Wasserstoffverbrennungsmotoren finden in den Untersuchungen der Streitkräfte bisher nur begrenzt Berücksichtigung, obgleich diese gerade für größere Militärsysteme einen interessanten Entwicklungspfad aufzeigen können.

Bislang sind es also weitgehend Wasserstoffbrennstoffzellen, die auf ihre militärische Nutzbarkeit hin geprüft werden, da sie bezogen auf Lärmemissionen und Wärmesignatur direkte militärische Vorteile bieten können. Vor diesem Hintergrund stellen auch die (US) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine die direkten Vorteile dem mit der Nutzung des Energieträgers Wasserstoff verbundenen logistischen Aufwand gegenüber:

If the Army conducts force-on-force battlefield simulations and concludes that silent watch/mobility with a specific extended range is mandatory for at least some of their vehicles, the following options exist: PEM fuel cells. This power source requires bringing fuel to the battlefield in the form of compressed or liquid hydrogen. Recognizing that the fuel trucks will “cube out” before they “weigh out,” the disadvantage to hydrogen as fuel is that to provide an equivalent amount of energy to the field, the number of supply trucks will need to be increased.<sup>118</sup>

Hier wird klar die Herausforderung des Transportes von Wasserstoff ins Feld gesehen. Durch den geringen volumetrischen Energieinhalt ergibt sich ein höherer Logistikaufwand. Es müssten erheblich mehr Lkws eingesetzt werden. Der damit verbundene logistische Aufwand ließe sich nur mit einer Erzeugung vor Ort begrenzen.

## 6 Möglichkeiten der zukünftigen Nutzung von Wasserstoff für die Mobilität der Bundeswehr

Die Politik definiert die Rahmenbedingungen für die Mobilität der Zukunft. Fossile Kraftstoffe sollen nicht mehr zum Einsatz kommen. Der Markt wird im zivilen Bereich über die Kraftstoffe der Zukunft entscheiden. Zivile Entwicklungsinnovationen werden sich auf die marktfähigsten Technologien konzentrieren.

Neben der Elektromobilität stellt in vielen Bereichen vor allem reiner Wasserstoff eine Alternative zu Flüssigkraftstoffen dar. Auf Basis regenerativer Stromerzeugung hergestellter Wasserstoff kann direkt als Kraftstoff verwendet werden. Für den Einsatz von reinem Wasserstoff sind Brennstoffzellen sowie Wasserstoffverbrennungsmotoren relevante Antriebsoptionen.

<sup>117</sup> National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2021: 36–38.

<sup>118</sup> National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2021: 90.

Wenn reiner Wasserstoff als Kraftstoff direkt eingesetzt werden kann, so wird er auch in zukünftigen Antriebssystemen Verwendung finden, wo batterieelektrische Systeme an ihre Grenzen stoßen. Es zeichnet sich ab, dass in der Zukunft eine größere Anzahl verschiedener Arten von Antriebssystemen eingesetzt werden wird. Das für den jeweiligen Einsatzzweck beste und wirtschaftlichste System wird Anwendung finden. Es wird also nicht nur ein Antriebssystem für die Mobilität in der Zukunft geben. Eine anwendungsspezifische Nutzung verschiedenster Antriebssysteme wird die Komplexität des Mobilitätssektors erhöhen. Die Infrastruktur wird den Erfordernissen folgen und eine massive Veränderung erfahren.

Die Weiterverarbeitung des Wasserstoffs zu synthetischen Fuels ist eine Lösung für energieintensive Anwendungen. Allerdings wird die verfahrenstechnische Kette zur Erzeugung erheblich länger. Der Energiebedarf, der technische Aufwand und die Erzeugungskosten steigen. Es stellt sich auch hier die Frage, ob und wie das Vorprodukt Wasserstoff zur Vermeidung von Aufwand und Kosten bereits direkt als Treibstoff eingesetzt werden kann.

Die Festlegung auf nur einen Energieträger für die Mobilität verhindert den Zugang zu den Vorteilen der übrigen Technologien. An der Entwicklung im zivilen Bereich wird sich auch die Bundeswehr orientieren müssen, wenn weiterhin eine Nutzung ziviler Ressourcen erfolgen soll.

Rein spezifische militärische Lösungen und damit eine zukünftige Abkehr von zivilen Entwicklungen für die Mobilität können nicht empfohlen werden. So würde die ausschließliche Nutzung von synthetischen Fuels den Aufbau von zusätzlichen industriellen Strukturen im Inland bedeuten. Im Zweifel müssten sogar eigene umfangreiche Erzeugungsanlagen zusätzlich betrieben werden. Dies würde zusätzliche Kostenstrukturen bedeuten. Die Nutzung synthetischer Kraftstoffe sollte auf energieintensive Anwendungen (Panzer, Kampffjets etc.) beschränkt bleiben.

Dieser Beitrag verdeutlicht, dass in der zivilen Industrie eine Vielzahl alternativer Antriebssysteme entwickelt werden. Neue Logistik- und Tanksysteme werden sich im zivilen Sektor entwickeln. Diese Veränderungen stellen die Streitkräfte vor die Frage, inwieweit hierdurch Herausforderungen für deren Einsatzfähigkeit entstehen. Derzeit sehen die Logistikkonzepte in der Landesverteidigung den Rückgriff auf zivile Strukturen vor, die sich bis 2050 massiv verändern werden.<sup>119</sup>

Es ist von elementarer Bedeutung, Stärken und Schwächen der neuen Antriebstechnologien zu verstehen, um Rückschlüsse auf sinnvolle Veränderungen im militärischen Bereich ziehen zu können. Dabei liegt der Schwerpunkt neben der Leistung und den Motorencharakteristika auf den Reichweiten. Für alle Systeme kommt der Zuverlässigkeit unter militärischen Einsatzbedingungen eine erhebliche Bedeutung zu. Natürlich müssen die Vorteile dieser Systeme herausgearbeitet werden, um die Akzeptanz in den Streitkräften zu erhöhen. Beispielhaft soll hier auf die Vorteile der Batterietechnik und der Brennstoffzellentechnik mit ihrer geringeren Wärmesignatur und der signifikant geringeren Lärmentwicklung verwiesen werden.<sup>120</sup>

Nachteile der Technologien in der militärischen Anwendung werden erwartbar als Ultima Ratio selbstverständlich zum Einsatz synthetischer Fuels zur Wahrung der optimalen Leistung führen. Allerdings sollten dabei die bestehenden Einsatzkriterien auf

<sup>119</sup> Bruhn 2022.

<sup>120</sup> Das 2017.

den Prüfstand gestellt werden, auch um die Vorteile neuer Technologien nutzen zu können.

Um rechtzeitig Rückschlüsse aus den erwartbaren Entwicklungen im zivilen Bereich für den militärischen Beschaffungsprozess ziehen zu können, bietet sich eine Ausweitung der Beteiligung der zuständigen Stellen der Bundeswehr sowohl an zivilen Pilotprojekten als auch an internationalen militärischen Studien an. Die Durchführung neuer eigener Pilotprojekte erscheint ebenfalls überaus sinnvoll, wenn nicht sogar zwingend erforderlich.

Neben den Antriebstechnologien muss auch die Energie- und Wasserstofferzeugung für militärische Systeme näher betrachtet werden. Der Bereich Energieerzeugung ist von elementarer Bedeutung für die Bundeswehr. Für Deutschland wird neben Importen auch die eigene Erzeugung von Wasserstoff vorgesehen. Für die Bundeswehr könnte eine lokale Erzeugung von Wasserstoff Basis ihrer zukünftigen Mobilität werden. Ein solches Konzept könnte zumindest zu ihrer teilweisen Energieautonomie beitragen. Dabei ist die Frage der technischen Möglichkeiten regenerativer Stromerzeugung elementar. Sie muss zunächst in einer weiteren Untersuchung näher betrachtet werden, bevor Entscheidungen für die zukünftige Mobilität getroffen werden.

## 6.1 Heer

Gerade für die Mobilität des Heeres sind eigene Pilotprojekte oder auch die Beteiligung der zuständigen Bundeswehrstellen an bereits laufenden zivilen Projekten sehr zu empfehlen. Dabei bieten sich Pilotprojekte in der Mobilität auch in den anderen Teilstreitkräften an. Jedes Einsatzmittel, in dem Wasserstoff als Treibstoff Anwendung findet, könnte für die betroffenen Verbände mit einer hohen Energieautonomie und begrenzteren logistischen Erfordernissen einhergehen, wenn sich auch eine dezentrale Wasserstofferzeugung realisieren ließe.

Für die Betrachtung der Antriebssysteme wird bewusst nur auf öffentlich verfügbare Daten militärischer Einheiten zurückgegriffen. Die gewählten Ansätze werden dabei auf Basis dieser Daten erarbeitet. Für die konkrete Definition eines entsprechenden Pilotprojektes ist ohnehin die Durchführung einer Feasibility-Studie auf Basis detaillierterer Daten der Hersteller und Systemlieferanten sowie deren Mitwirkung erforderlich.

### 6.1.1 Geschützte Fahrzeuge

Der militärische Fahrzeugpark wird sich auch zukünftig stark an den Entwicklungen der Industrie orientieren. Batterieelektrische Antriebssysteme haben wegen geringerer Wärmesignatur und einem geräuscharmen Betrieb große Vorteile. Sie sollten Verwendung finden, wenn mindestens gleiche Zuverlässigkeit, Leistung und Geländegängigkeit im Kampfeinsatz garantiert werden können.

In der Industrie sind unterschiedliche und sich verändernde Positionen für den Langstreckenlastkraftverkehr bis ca. 38 Tonnen zu verzeichnen. Dabei stehen Brennstoffzellentechnologie und Wasserstoffverbrennungsmotoren im Fokus. Für das Militär könnten diese Anwendungen bei konventionellen und geländegängigen LKWs Anwendung finden.

Im Bereich geländegängiger, geschützter Fahrzeuge zeichnet sich aufgrund von Leistungsprofil und Robustheit ein möglicher Einsatz von

Wasserstoffverbrennungsmotoren ab (siehe Kapitel 3). Hier lässt sich bezogen auf die militärischen Anforderungen eine Grenze von ca. 15 Tonnen erkennen. Der über diese Grenze hinaus erforderliche Leistungsbedarf führt zu größeren Motoren und damit zu höheren Verbräuchen. Bei Wasserstofftanksystemen wären dann erhebliche Tankdimensionen erforderlich, die die Nutzbarkeit dieser Fahrzeuge infrage stellen würden. Die Nutzung von Wasserstoff mit Brennstoffzellentechnik oder Verbrennungsmotor als Antriebsaggregat für zum Beispiel den Kampfpanzer Leopard erscheint aufgrund des erforderlichen Tankvolumens derzeit nicht realistisch.

Das bedeutet zwar eine Einschränkung, wenn schwere Kampfpanzer auch nach 2050 als Kampfmittel einen Einsatz finden werden. Bei genauerer Betrachtung des Fahrzeugparks, insbesondere für geschützte Fahrzeuge bedeutet dies aber auch, dass Dingo, Einsatzführungsfahrzeug Eagle, Fennek, Enok, Yak und Mungo für eine Änderung des Antriebssystems infrage kämen. Darüber hinaus können auch eine Vielzahl der Logistikfahrzeuge mit Wasserstoffsystemen betrieben werden, wie etwa die UTF (ungeschützte Transportfahrzeuge) und die verschiedenen Varianten des MAN Mil GL-LKWs. Damit sind gepanzerte Fahrzeuge wie der Leopard 2, Boxer, Fuchs, Puma, aber auch Fahrzeuge wie der Wiesel wegen seines Anspruchs an geringe Abmessungen und Lufttransportfähigkeit ausgeschlossen. Auch bei Logistikfahrzeugen für den Schwerlasttransport sind Wasserstoffantriebe nicht integrierbar.

Die leichter geschützten Fahrzeuge bis 15 Tonnen und ungepanzerte Logistikfahrzeuge machen aber einen erheblichen Anteil der rund 11.500 (Stand 2019) ungepanzerten und geschützten Fahrzeuge der Bundeswehr aus. Mit mehr als 500 Dingos,<sup>121</sup> über 670 Einsatzführungsfahrzeugen Eagle,<sup>122</sup> mit rund 3.200 ungeschützten Transportfahrzeugen der HX-Serie<sup>123</sup> sowie den bestehenden LKWs der Mil GL KAT I-Serie und vielen weiteren Systemen kommt somit ein beträchtlicher Teil der Fahrzeugflotte für eine Umrüstung infrage.<sup>124</sup> Eine Umrüstung wäre natürlich nur sinnvoll, wenn ausreichend Wasserstoff zum Einsatzort herangeführt oder am Einsatzort direkt hergestellt werden könnte.

### 6.1.2 Pilotprojekt Dingo

Mit einer bewusst simplifizierten Annahme auf Basis öffentlich verfügbarer Daten soll ein Ansatz für ein Pilotprojekt aufgezeigt werden, das die Nutzung eines Wasserstoffverbrennungsmotors vorsieht.

Als Grundlage wird die Annahme getroffen, dass Dieselmotor und Wasserstoffverbrennungsmotor den gleichen Energieverbrauch im Fahrbetrieb haben.<sup>125</sup> Die zentralen Herausforderungen durch den Faktor 8 für das erforderliche Tankvolumen des Drucktanks (700 bar) lassen sich hier sehr wohl lösen. So besitzt zum Beispiel der Dingo mit Haupt- und Zusatztank ein Tankvolumen von rund 250 l. Bei Annahme eines Faktors 8 wäre demzufolge ein Drucktank von ca. 2.000 l notwendig, um Reichweiten wie durch bestehende Einsatzkriterien vorgegeben zu erreichen.

---

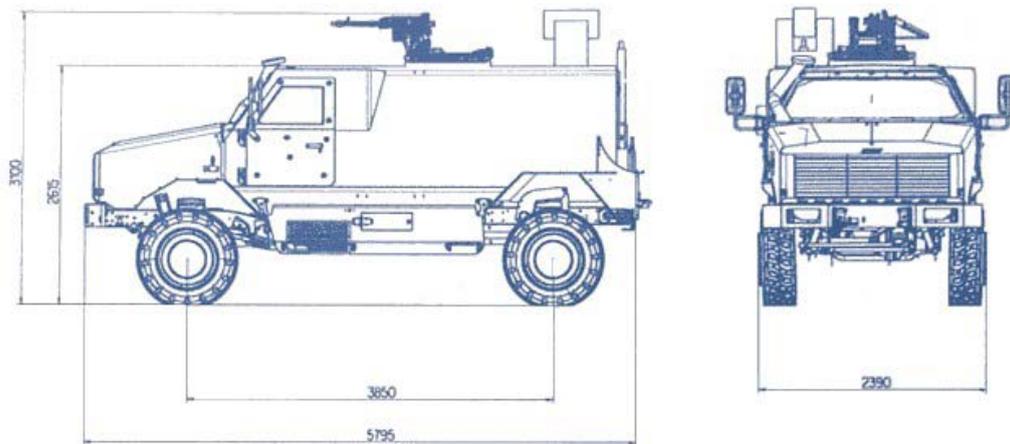
<sup>121</sup> Bundeswehr 2023a.

<sup>122</sup> Bundeswehr 2023b.

<sup>123</sup> Heiming 2021.

<sup>124</sup> Bundesministerium der Verteidigung 2021.

<sup>125</sup> Carpetis 2000: 61.



**Abb. 9:** Abmessung eines Dingos (Doppeladler 2022).

Auf dem Markt sind inzwischen von verschiedenen Herstellern Hochdrucktanksysteme verfügbar. Dabei werden mehrere zylindrische Tanks eingesetzt. Bei Annahme eines Arbeitsdruckes von 700 bar könnte ein derartiger Standardzylinder eine Höhe von ca. 2 m und einen Durchmesser von 0,6 m besitzen. Das Volumen wäre dabei 364 l.<sup>126</sup> Es würden also rund 5 bis 6 Zylinder benötigt. Das Gewicht eines Tankzylinders liegt bei ca. 190 kg plus ein Wasserstoffgewicht bei 700 bar von ca. 15 kg. Das Fahrzeug würde durch den Wegfall des Dieseltankgewichts und dessen Tank zwar entlastet, es würde aber durch das Gewicht bei sechs Tankzylindern voraussichtlich insgesamt etwa 950 kg schwerer werden.

Bei einer Breite des Dingos von ca. 2,4 m und einer Höhe von 2,6 m ließe sich ein Tankvolumen von ca. 2,4 x 2,1 x 0,6 m verbauen.<sup>127</sup> Bei Einbau eines Gestells (Racks) mit 4 Standardtankzylindern, wie oben beschrieben, ließe sich ein Tankvolumen von 1.456 l realisieren, das sicher auf das erforderliche Volumen aufgrund der größeren Höhe des Fahrzeugs vergrößert werden könnte, um 2.000 l zu erreichen. Mit vier Standardzylindern würde der Achsenabstand um ca. 70 cm verlängert werden müssen. Es ließen sich damit bereits ca. 75 % der heutigen Reichweite realisieren. Die Vergrößerung der geometrischen Abmessungen wäre unerheblich.

Der Dingo verfügt auch heute schon über mindestens zwei Versionen (5,795 m und 6,2 m).<sup>128</sup> Eine derartige Annahme wäre also technisch umsetzbar, die heutige Reichweite mit Wasserstoff wäre abhängig vom eingesetzten Wasserstoffverbrennungsmotor und dessen Verbräuchen erreichbar. Dabei ist der Wegfall des Dieseltankvolumens noch nicht einmal berücksichtigt. Die Ausführung der Drucktanks lässt darüber hinaus noch eine gewisse Beschusssicherheit erwarten.

Bei der in Abbildung 9 gezeigten Version erscheint eine Positionierung ähnlich wie bei den Planungen des Hyundai XCIENT-Brennstoffzellen-Trucks<sup>129</sup> oder auch anderer Hersteller grundsätzlich hinter der Fahrgastzelle denkbar. Allerdings müsste bei großer

<sup>126</sup> Hexagon Purus 2022.

<sup>127</sup> Bundeswehr 2023a.

<sup>128</sup> Bundesministerium der Verteidigung 2021: 33, 243.

<sup>129</sup> Hyundai Trucks and Busses 2022.



**Abb. 10:** Dingo schematische Zeichnung (Kraus-Maffei-Wegmann 2022).

Fahrgastzelle (Abbildung 10) hingegen eine differenzierte Planung erfolgen. Das in der Farbe Rot abgebildete Tanksystem befindet sich im hinteren Teil des Fahrzeugs.

Unabhängig davon lässt sich sagen, dass bei der Ausrüstung eines Testfahrzeuges mit einem Wasserstoffverbrennungsmotor, der mit seinen robusten Eigenschaften und einer entsprechenden Motorenkennlinie die Anforderungen erfüllen kann, sogar weitere wesentliche Änderungen im Bereich des Antriebsstranges zu vermeiden wären. In diesem Zusammenhang könnte auch geprüft werden, ob die Nutzung eines bivalenten Wasserstoff-/Benzinmotors denkbar wäre, um so eine Mehrstofftauglichkeit zu ermöglichen.

Ähnliches lässt sich für verschiedene Lkw-Modelle konzipieren und wird auch im zivilen Bereich in verschiedenen Projekten vorangetrieben, bei denen eine Beteiligung der Bundeswehr sinnvoll erschiene.

Diese Betrachtung zeigt, dass ein erheblicher Teil der Einsatzfahrzeuge der Bundeswehr grundsätzlich ein alternatives Antriebssystem erhalten könnte. Die mögliche Nutzung wasserstoffbetriebener Antriebssysteme könnte beispielhaft anhand des Dingos aufgezeigt werden. Dies erfordert natürlich eine gründliche Planung eines derartigen Projektes. Für einen ersten Schritt wird die Beauftragung einer dezidierten Feasibility-Studie unter Mitwirkung des Systemlieferanten und des Motorenherstellers empfohlen.

### 6.1.3 Wasserstoffversorgung für das Heer

Die Nutzung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen löst unmittelbar die Frage nach der Versorgung mit Wasserstoff und der damit verbundenen Logistik aus.

Für die Wasserstoffversorgung innerhalb des europäischen Bündnisgebietes sehen etwa die amerikanischen National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine einen Transport aus Kernländern wie Deutschland und Österreich als möglich an:

Local supply may be available as pure hydrogen fuel is rapidly making inroads in many world markets. So as just one example, if a conflict broke

out in Eastern Europe, hydrogen fuel-supply trucks from Germany or Austria could be used to supply the battlefield.<sup>130</sup>

In der Nutzung von Wasserstoff könnten Vorteile für die Logistik liegen. Dafür müssten die Logistikkonzepte allerdings neu gedacht werden. Ein Beibehalt würde erheblich mehr Lkw-Transporte als bisher erforderlich machen, um den Wasserstoff zu den Verbrauchern zu bringen. Ein Drucktanktransport mit 700 bar entspräche Faktor 8.

Eine Erzeugung von Wasserstoff vor Ort würde dieses Problem lösen. Die Vorteile eines derartigen Konzeptes liegen auf der Hand. Lange Transportwege für die Versorgung mit Fuels könnten wegfallen bzw. die Transportmengen würden sich reduzieren. Lange Transportwege wären nur noch für Fahrzeuge erforderlich, deren Antriebssysteme synthetische Fuels benötigen. Lkws und leicht geschützte Fahrzeuge bis ca. 15 t ließen sich grundsätzlich mit vor Ort erzeugtem Wasserstoff betreiben.

Dennoch würde eine solche Insellösung<sup>131</sup> durch den Aufbau erneuerbarer Energiekapazitäten auf militärischen Liegenschaften wesentliche Herausforderungen an die Energiesysteme derartiger Standorte stellen:

The expense to electrically island an entire installation might not be justified for every installation, therefore using microgrids carrying only mission-critical loads and installing backup generators in many cases might be better alternative. Many renewable energy technologies (e.g., PV, wind) generate power intermittently. Such generation is more difficult to incorporate into a microgrid than is dispatchable generation such as biomass and concentrating solar power (CSP). If long-term islanding with renewables is a high priority, then a dispatchable technology could be required.<sup>132</sup>

Dabei muss klar sein, dass bei Auslandseinsätzen Energieerzeugungssysteme erheblicher Größe benötigt würden. Vorgeschobene Camps würden dann über kürzere Distanzen bedarfsgerecht versorgt. Gerade der Einsatz erneuerbarer Energieerzeugung würde eine erhebliche Komplexität erforderlich werden lassen. Ähnliches gilt für Fragestellungen der Landesverteidigung, bei denen Liegenschaften sich allerdings am Beispiel ziviler Projekte orientieren könnten.

Dies bedarf allerdings einer weiteren differenzierten Studie und wird in dieser Analyse nicht untersucht.

## 6.2 Marine

In der Schifffahrt zeigen sich bei der Frage zur Umstellung der Containerschifffahrt auf alternative Fuels wie Ammoniak oder Methanol erhebliche Anstrengungen. Positive Entwicklungen gibt es auch bei wasserstoffbasierten Antriebstechnologien, wie in Kapitel 3 ausgeführt. Die Möglichkeit von Pilotprojekten mit dem Einsatz von zum Beispiel eines Aggregats dieser Technik sollte überprüft werden.

Kern der Herausforderungen bleibt die Reichweitenfrage. Hier sind aufgrund der geringen spezifischen Energiedichte pro Volumeneinheit klare Einschränkungen vorhanden.

<sup>130</sup> Calise et al. 2019: 90.

<sup>131</sup> Leopoldina/acatech/Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften 2020: 22 f.

<sup>132</sup> Callahan et al. 2011: 26.

Diese Thematik ist jedoch klar einsatzbezogen zu betrachten. Einheiten für küstennahe Operationen könnten sich für den Einsatz von Wasserstoffverbrennungsmotoren eignen. Auch der Betrieb von Marinebasen mit Schleppern wäre für eine Umstellung geeignet. Die Brennstoffzellentechnologie dagegen findet insbesondere bei U-Booten mit konventionellen Antrieben zunehmend Verbreitung.<sup>133</sup> Aber auch außerhalb des direkten Antriebssystems bei Stromversorgung und Hilfsaggregaten ist ihr Einsatz denkbar.

### 6.2.1 Pilotprojekt Hafенbetrieb und Hafenschlepper

Für den Containerterminal in Wilhelmshaven (Projekt „Energiedrehscheibe Wilhelmshaven 2.0“)<sup>134</sup> ist bis 2050 der Ausbau einer Wasserstoffinfrastruktur geplant. So soll der Bau der festen geplanten Erdgasimportstrukturen so ausgelegt werden, dass danach eine Nutzung für umfangreiche Wasserstoffimporte möglich ist.<sup>135</sup> Ähnliches gilt für Stade und Brunsbüttel. Für die Anmietung von schwimmenden Regasifizierungsterminals ist in der Ostsee Lubmin ausgebaut. Die angesprochenen Projekte im Hamburger Hafen und absehbar auch in Wilhelmshaven bieten sich für eine Teilnahme der Bundeswehr geradezu an. Aber auch Windparkprojekte planen inzwischen die Erzeugung von Wasserstoff offshore – hier können sich ebenfalls interessante Aspekte für eine Nutzung durch die Streitkräfte ergeben.

Das Beispiel der Hafenschlepper in Antwerpen – und absehbar auch zum Beispiel in Hamburg – zeigt klar die Möglichkeiten für die Bundeswehr auf. Zusammen mit der entstehenden Infrastruktur in Wilhelmshaven oder in einem anderen Standort könnte ein derartiges Projekt oder eine Beteiligung erwogen werden.

### 6.2.3 Pilotprojekt Minenjagdboote

Die Möglichkeit zu weiteren Projekten soll am Beispiel der Frankenthal-Klasse geprüft werden. Gerade bei Schiffen mit begrenzten Erfordernissen für Einsatzradius bzw. Einsatzdauer ist die Prüfung einer derartigen Lösung relevant; insbesondere, da sie im Rahmen der Landesverteidigung absehbare Strukturen für Wasserstoff und damit eine größere Energieautonomie vorfinden werden. Beim Einsatz von zum Beispiel Dual Fuel-Motoren könnte die Betankung auch mit Diesel alternativ erfolgen.

Die Herausforderung für das erforderliche Tankvolumen erscheint bei Schiffen zunächst einmal weniger kritisch. Die Schiffslänge wäre bei einem Neubau bis zu einem gewissen Grad ausreichend variierbar, um die Technologie und das erforderliche Tankvolumen zu integrieren. Die folgende Analyse erfolgt auf Basis öffentlich verfügbarer Daten.

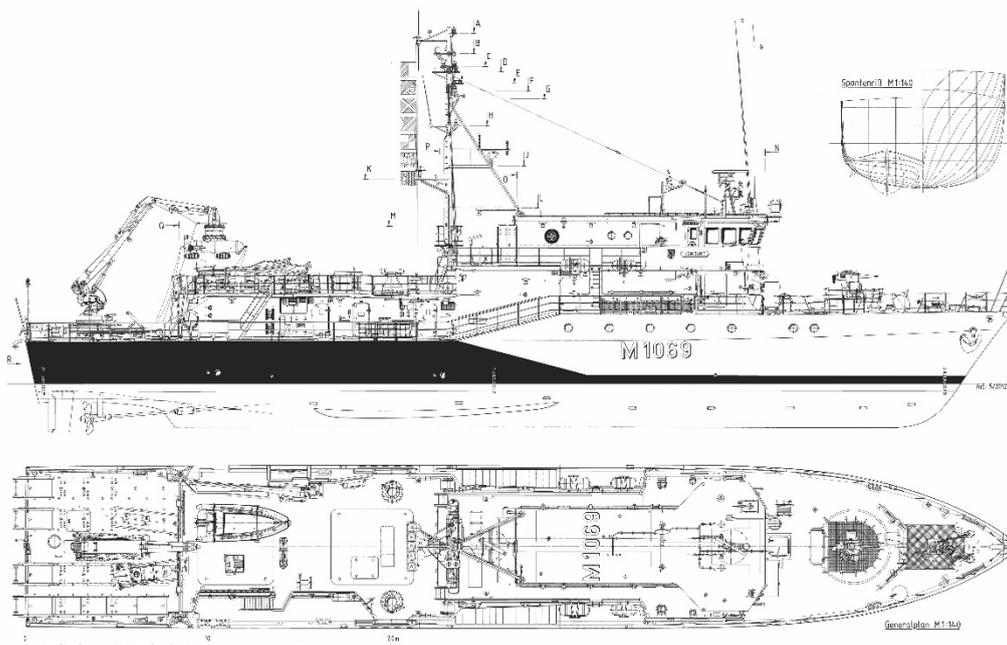
Mit einer Länge von 54 m, einer Breite von 9 m, einem Tiefgang von 2,6 m und einer Verdrängung von 650 t handelt es um vergleichsweise kleine Schiffseinheiten. Abbildung 11 zeigt einen Minensucher der Frankenthal-Klasse. Er ist mit einer Maschinenleistung von ca. 4.100 kW ausgerüstet und besitzt 2 Dieselantriebsmaschinen.<sup>136</sup>

<sup>133</sup> Siehe Seite 27 in dieser Arbeit

<sup>134</sup> Merkel Energy GmbH 2021.

<sup>135</sup> Riemer/Schreiner/Wachsmuth 2022.

<sup>136</sup> Bundesministerium der Verteidigung 2021: 128 f.



**Abb. 11:** Technische Zeichnung eines Minensuchers der Frankenthal Klasse (Drawingsdatabase 2022)

Diese Leistungsdimension für Schiffsmotoren wird am Markt bereits als Wasserstoffverbrennungsmotoren für den Dual Fuel-Einsatz ( $H_2$  und Diesel) angeboten.<sup>137</sup>

Das Tankvolumen der bestehenden Einheiten liegt allerdings bei rund  $60\text{ m}^3$ . Damit lässt sich bei den verwendeten Dieselmotoren abhängig von den Einsatzbedingungen eine erhebliche Reichweite und damit Einsatzdauer erwarten.

Das Tankvolumen von  $60\text{ m}^3$  müsste bei Einsatz eines Drucktanksystems mit 700 bar mit einer zusätzlichen Tankgröße von ca.  $420\text{ m}^3$  (Faktor 8) substituiert werden. Das gesamte Tankvolumen läge bei  $480\text{ m}^3$ . Bei Betrachtung der Abmessungen des vorliegenden Schiffes wäre bei einem neuen Schiff der Einbau mehrerer, fest installierter, horizontal liegender Drucktanks zwar denkbar. Ein solches Tanksystem würde jedoch bei Annahme gleicher Schiffsbreite tentativ eine Verlängerung von mehr als 30 m erforderlich machen. Das erscheint nicht realistisch. Die Nutzung von Standardzylindern wie bei dem in Kapitel 4.3 dargestellten Schleppersystem würde sogar noch zu größerem Platzbedarf führen. Eine Verbesserung ließe sich nach derzeitigem Stand der Technik zwar mit dem Einsatz von kryogenem Wasserstoff erreichen, sie würde das Bild aber nicht entscheidend ändern (siehe Tabelle 2).

Ähnlich verhält es sich mit LOHC.<sup>138</sup> Das nicht entzündliche und nicht explosive LOHC hat zwar einen ähnlichen Volumenbedarf wie die Druckspeicherung, kann aber drucklos gespeichert werden (siehe Kapitel 3.5). Dadurch könnte auf eine zylindrische Form der Tanks verzichtet werden. Es bliebe aber auch bei dieser Abschätzung eine erhebliche Verlängerung des Schiffes zur Aufnahme des zusätzlichen Volumens von  $420\text{ m}^3$  erforderlich.

Ohne eine signifikante Reduzierung der bestehenden Einsatzdauern und Reichweiten ließe sich der Einsatz von Wasserstoffmotoren als Hauptantrieb wegen der

<sup>137</sup> BeH2ydro 2021.

<sup>138</sup> Østensjø/Hydrogenious 2021: 1.

notwendigen Dimension für ein Drucktanksystem eindeutig nicht umsetzen. Dies scheint insbesondere auch deshalb nicht realistisch, weil bei einer derartigen Schiffsvergrößerung eine wiederum größere Maschinenleistung etc. erforderlich werden würde, die auch zu einer Erhöhung der H<sub>2</sub>-Verbräuche und so zur Notwendigkeit eines noch größeren Tankvolumens führen würde. Für LOHC kann zwar auf Drucktanks verzichtet werden, der Platzbedarf wäre trotzdem erheblich. Zusätzlich entstünden sowohl durch den Einsatz von reinem Wasserstoff als auch von LOHC erhebliche konstruktive Anpassungserfordernisse.

Eine Überprüfung der Einsatzanforderungen bei einzelnen Betriebsbedingungen wie z. B. der Minenjagd könnte aber zu Anwendungsmöglichkeiten führen. Inwieweit bei einem Neubau ein ähnliches Antriebssystem wie in der U-Boot-Klasse 212A, also ein zusätzliches Brennstoffzellensystem, Anwendung finden könnte, kann hier nicht weiter untersucht werden. In jedem Fall wäre dafür nur ein erheblich kleineres H<sub>2</sub>-Tankvolumen für einen bestimmten Betriebszustand wie z. B. die Minenjagd nötig. Vorteile wie geringe Lärmemissionen bei Brennstoffzellenbetrieb könnten auf diese Weise realisiert werden.

Es zeigt sich, dass für die Hauptantriebe bereits bei dieser Schiffsgröße nur eine Substitution fossiler Kraftstoffe durch synthetische Fuels infrage kommt.

Die eigenständige Erzeugung erforderlicher Wasserstoffmengen auf einer Marinebasis zur Versorgung eines Marineverbandes erscheint nicht realistisch. Lediglich der Bedarf für den Hafenbetrieb und für hybride Lösungen auf Schiffen ließen sich mit eigenem Wasserstoff versorgen.

Als Ergebnis dieser Betrachtung lässt sich sagen, dass bei der deutschen Marine zwar im Hafenbetrieb samt Schleppern Wasserstoff zum Einsatz kommen könnte. Aber selbst Einheiten wie Minenjagdboote mit einer Länge von rund 50 m sind aufgrund der bestehenden Einsatzkriterien und Reichweitenerfordernisse nicht für die alleinige Nutzung von reinem Wasserstoff als Treibstoff geeignet.

## 6.3 Luftwaffe

Die erwartbaren technischen Entwicklungen bis 2050 insbesondere für Kampfflugzeuge lassen keine Möglichkeiten zum Verzicht auf den Einsatz von Kerosin oder synthetischen Treibstoffen erkennen. Dies gilt auch für schwere Transportflugzeuge und Helikopter.

### 6.3.1 Turboprop-Anwendungen

Im Bereich von Turboprop-Anwendungen zeigen sich in der zivilen Luftfahrtindustrie klare positive Entwicklungen. Verschiedene Hersteller befassen sich mit Flugzeuggrößen von bis zu 100 Passagieren auf Basis von Brennstoffzellentechnologie unter Einsatz von Elektromotoren.<sup>139</sup> Da dieses Feld allerdings für die Anwendungen der Bundeswehr nur begrenzt relevant ist, soll es hier nicht weiter untersucht werden.

---

<sup>139</sup> Airbus 2021.

### 6.3.2 Jets

Wie in Kapitel 4.4 bereits ausgeführt, entwickeln verschiedene Hersteller Flugzeugturbinen für den Betrieb mit Wasserstoff. Anwendungen werden für Passagierflugzeuge bei Kurz- und Mittelstrecken gesehen.

Die Analyse der Nutzbarkeit von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen fordert ein grundsätzliches Umdenken beim technischen Design der Flugzeuge. Ein Vorteil von Wasserstoff ist definitiv das geringere Gewicht im Vergleich zu den derzeitigen Flugbetriebsstoffen, die bisher zu einem großen Teil in den Flügeln gelagert werden.<sup>140</sup> Wasserstofftanks würden in Zukunft im Bereich des Rumpfs Platz finden.<sup>141</sup> Ein erheblich positiver Umstand liegt dabei in den niedrigen Umgebungstemperaturen während des Fliegens, was günstige Lagerungsbedingungen für kryogenen Wasserstoff während der Flugphase bedeutet. Es gibt ambitionierte Ziele für die Inbetriebnahme von Pilotflugzeugen bis 2030.

Für das Militär bedeutet dies mögliche zukünftige Einsatzfelder für die Flugbereitschaft. Im Bereich von Langstrecken- und Kampffjets ist klar das Ausweichen auf synthetische Fuels erforderlich.

### 6.3.3 Pilotprojekt Fliegerhorstbetrieb

Ein weiteres Feld für die Luftwaffe ist ähnlich wie bei der Marine der Betrieb von Luftwaffenbasen. Hier ist eine umfassende Umrüstung auf regenerative Antriebssysteme denkbar.

Gerade der Fliegerhorstbetrieb würde von der Energieautonomie erheblich profitieren. Durch die Autonomie des Bodenbetriebes würde ein hoher Grad an Flexibilität gewonnen. Bei der Analyse der Möglichkeiten für Pilotprojekte sollte ein enger Kontakt zum Beispiel zum Flughafen Hamburg, seinen Planungen und Projekten gesucht werden. Kern derartiger Pilotprojekte wäre eine eigene Wasserstoffversorgung.

### 6.3.4 Drohnen

In der Drohnentechnologie werden bereits heute Brennstoffzellenantriebe eingesetzt. Im Bereich der Fluggeräte ist die Drohnentechnologie eine gewisse Ausnahme. Hier sollten spezifische Wasserstofftechnologien verfolgt werden, weil Vorteile bei Reichweiten und insbesondere durch die Brennstoffzellentechnologie auch bei der Lärm- und Wärmesignatur bestehen. Bei Aufklärungsdrohnen sind Brennstoffzellenantriebe aufgrund größerer Reichweiten und höherer Betriebsdauer besonders relevant.<sup>142</sup>

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei der Luftwaffe Vorteile durch die Energieautonomie insbesondere im Flughafenbetrieb zu erwarten sind. Die aufgezeigten Anwendungen im Flugbetrieb lassen sich derzeit im Wesentlichen auf die Flugbereitschaft applizieren. Hier können die zivilen Entwicklungen abgewartet werden, ohne eine aktive Rolle einzunehmen.

---

<sup>140</sup> Gomez/Smith 2019.

<sup>141</sup> Airbus 2021.

<sup>142</sup> Stroman et al. 2018.

## 7 Schlussbetrachtung und Ausblick

Der Mobilitätssektor soll sich entsprechend der Ziele der Europäischen Union bis 2050 erheblich verändern. Die zivile Mobilität in Europa wird durch batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Antriebssysteme geprägt sein. Daraus ergeben sich für diesen Zeithorizont klare Imperative auch für die militärische Mobilität.

Das Militär nutzt im Rahmen der Landesverteidigung für die Mobilität und die Energieversorgung in erheblichem Maße zivile Infrastrukturen. Aus logistischen Gründen ist dies unerlässlich. Allein schon deshalb muss es die Frage zukünftiger Antriebssysteme und ihrer Treibstoffe in den Blick nehmen. Zivile Strukturen werden im Jahr 2050 anders aussehen. Die Interoperabilität mit zivilen Akteuren aber auch zwischen den Streitkräften der NATO muss gewährleistet bleiben.

Diese Arbeit verdeutlicht, dass reiner Wasserstoff in verschiedenen Anwendungen des Heeres integriert werden könnte. Die Nutzung von reinem Wasserstoff könnte einen relevanten Teil der benötigten flüssigen Kraftstoffe ersetzen. Dies würde eben auch den Bedarf an Flüssigkraftstoffen substanziell reduzieren. Es zeigen sich klare Anwendungsmöglichkeiten bei LKWs auch für höhere Gewichtsklassen. Bei geländegängigen, geschützten Fahrzeugen ergeben sich ebenfalls Anwendungsmöglichkeiten. Hier ist eine Grenze bei einem Fahrzeuggewicht von rund 15 Tonnen erkennbar. Grundsätzlich besteht eine Abhängigkeit von Einsatzgebiet und -kriterien.

Als weiteres Ergebnis der Untersuchungen bleibt aber auch festzuhalten, dass Panzer und Spezialfahrzeuge mit höheren Gewichten zukünftig mit synthetischen Fuels/E-Fuels betrieben werden müssen. Die Herstellung synthetischer Kraftstoffe ist mit zusätzlichen, aufwendigen verfahrenstechnischen Schritten verbunden. Diese Kraftstoffe ermöglichen die Beibehaltung heutiger Tankvolumina, was für energieintensive Anwendungen unerlässlich bleibt.

Die Auswahl der infrage kommenden Fahrzeuge wird in erster Linie durch die Größe der eingesetzten Motoren und deren Energiebedarf bestimmt. Die Analyse konzentriert sich auf den bestehenden Fahrzeugpark und die existierenden Tankvolumina, Motoren und Einsatzbereiche sowie die technische Möglichkeit zur Substitution durch wasserstoffbetriebene Antriebssysteme.

Bei der direkten Nutzung von reinem Wasserstoff entwickelt sich der Wasserstoffverbrennungsmotor als eine Alternative zum Brennstoffzellensystem. Insbesondere bestehende militärische Einsatzkriterien und Anwendungsspezifika sowie der bisherige Entwicklungsstand der Brennstoffzelle lassen Wasserstoffverbrennungsmotoren zu einer Option für militärische Anwendungen werden. Sie bieten aufgrund ihrer Robustheit auch unter extremen Umweltbedingungen und bei schwierigem Gelände Vorteile gegenüber der Brennstoffzelle. Darüber hinaus stellt der Wasserstoffverbrennungsmotor geringere Ansprüche an die Reinheit des zu nutzenden Wasserstoffes.

Aber auch der Brennstoffzellentechnologie sollte weiterhin Aufmerksamkeit zu Teil werden. Reduzierte Wärmesignatur und geringe Lärmemissionen bieten bei entsprechenden militärischen Einsatzkriterien erhebliche Vorteile.

Die technischen Herausforderungen der Nutzung von Wasserstoff wurden näher untersucht. Die volumetrische Energiedichte von reinem H<sub>2</sub> ist äußerst gering. Bei einer Druckspeicherung von H<sub>2</sub> mit 700 bar ist das erforderliche Tankvolumen achtmal größer im Vergleich zu Flüssigkraftstofftanks. Auch bei der kryogenen Speicherung von Wasserstoff wird ein etwa sechsmal größeres Volumen benötigt. Trotzdem lassen sich

in vielen Fahrzeugen derartige Tankvolumina integrieren. Reines H<sub>2</sub> ist für einen erheblichen Anteil des Fahrzeugparks nutzbar.

Die Handhabbarkeit von H<sub>2</sub> ist sicher möglich. Bei konsequenter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften und der Nutzung der relevanten Sensorik und Sicherheitstechnik ist ein sicherer Betrieb auch in Anwendungen der Bundeswehr zu gewährleisten.

Die Überprüfung der Nutzungsmöglichkeiten von reinem Wasserstoff hat verschiedene Optionen aufgezeigt. Es erscheint unerlässlich, dass sich die Bundeswehr an entsprechenden Pilotprojekten beteiligt oder diese selbst aufsetzt. Nur so lässt sich das entsprechende Know-how aufbauen, um Entwicklungen in diesem Sektor verfolgen und beurteilen zu können. Dies setzt selbstverständlich im Vorfeld dezidierte Feasibility-Studien zusammen mit Systemlieferanten und Motorenherstellern voraus. Folgende Ansätze und Pilotprojekte werden empfohlen:

- Im Bereich der Mobilität des Heeres zeigen sich bei LKWs auch für höhere Gewichtsklassen und bei geländegängigen, geschützten Fahrzeugen bis zu einem Gewicht von rund 15 Tonnen Ansätze. Hier wird empfohlen, ein Pilotprojekt mit Wasserstoffverbrennungsmotor für das Allschutz-Transport-Fahrzeug (ATF) Dingo aufzusetzen.
- Im Hafetrieb könnte sich die Marine an einem oder mehreren der erwähnten zivilen Projekte beteiligen, auch um sich bereits frühzeitig für die Belange der Marine einzusetzen. Gleiches gilt bei Bedarf beim Thema Hafenschlepper.
- Die Analyse der Nutzungsmöglichkeit von Dual Fuel-Motoren als Hauptantrieb am Beispiel des Minenjagdbootes der Frankenthal-Klasse zeigt klar die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten von reinem Wasserstoff auf. Es macht aber auch deutlich, wie stark die gewählten Einsatzkriterien für Reichweiten und Einsatzdauer bestimmend sind. Hier sollten genau diese Kriterien überprüft werden, um gerade im küstennahen Einsatz doch Nutzungsmöglichkeiten von reinem H<sub>2</sub> oder LOHC zu schaffen. Insbesondere ein Hybridansatz mit Nutzung einer Brennstoffzelle für besondere Betriebszustände wie z. B. die Minenjagd könnte eine Option sein. Hierfür wäre nur ein entsprechend kleineres H<sub>2</sub>-Tankvolumen erforderlich und es ließen sich erhebliche militärische Vorteile durch den geräuscharmen Betrieb realisieren.
- Im Fliegerhorstbetrieb der Luftwaffe sind aktuelle Entwicklungen von besonderem Interesse. Hier sollten die erwähnten Flughafenbetreiber kontaktiert, deren Wasserstoffprojekte auf Relevanz überprüft und eine Beteiligung erwogen werden.

Die Entwicklungen bei Fluggeräten konzentrieren sich gegenwärtig auf die Kurz- und Mittelstrecke im Passagierflugzeugbereich. Sie sollten selbstverständlich verfolgt werden. Bei Drohnen lassen sich erste Anwendungsmöglichkeiten für Brennstoffzellen erkennen.

Das Militär wird seine Einsatzkriterien und Leistungsanforderungen auf den Prüfstand stellen müssen. Diese Untersuchung befasst sich mit der Frage der Energieautonomie der Bundeswehr nach 2050. Deshalb ist es von besonderer Bedeutung, auch bestehende Fahrzeuge und Waffensysteme kritisch auf ihre Zukunftsrelevanz zu prüfen. Aber auch im Sinne des technischen Know-how-Gewinns erscheint es dringend angezeigt, die weiteren Entwicklungen näher in den Blick zu nehmen.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die zukünftige technische Einsatzfähigkeit von H<sub>2</sub>-Antriebssystemen bereits heute auf Basis der vorhandenen Entwicklungen und

Systeme als realistisch eingeschätzt werden kann und in absehbarer Zeit bis spätestens 2050 erreicht werden wird.

Im Kern steht die Frage, ob derartig große Wasserstoffmengen verfügbar gemacht werden können. Der geringe volumetrische Energieinhalt macht es erforderlich, erheblich größere Volumina als bisher zur Verfügung zu stellen. Dies erfordert im Bereich der zivilen Infrastruktur beispielsweise wesentlich größere Pipelinedurchmesser, Kompressorstationen und Speicher. Zwar zeigt sich in diesem Feld eine große Anzahl von Projekten und Anstrengungen zum Aufbau entsprechender Strukturen. Dies darf jedoch nicht über die Herausforderung beim Kapitalmittelbedarf hinwegtäuschen. Natürlich würde der Faktor 8 für die zu transportierenden H<sub>2</sub>-Volumina auch in der militärischen Logistik ein erheblich höheren Aufwand bedeuten, auch wenn sich das Militär auf die dann zur Verfügung stehende zivile H<sub>2</sub>-Infrastruktur im Bündnisgebiet stützen könnte.

Im Kontext der Landes- und Bündnisverteidigung sehen nichtsdestotrotz auch die amerikanischen National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine für den europäischen Raum den Transport von Wasserstoff aus Kernländern wie Deutschland und Österreich zu östlichen Bündnispartnern als möglich an, auch wenn dies wegen größerer Volumina zu umfangreicheren militärischen Logistikerfordernissen führen würde.

Die logistischen Herausforderungen könnten durch die Nutzung einer eigenen Wasserstofferzeugung reduziert werden, wenn diese auf Liegenschaften und dezentral im Rahmen von Camp Power Supply wirkungsvoll aufgebaut werden könnte. Ein derartiger Grad an Energieautonomie würde den Zugang zu völlig neuen, weniger vulnerablen Logistikkonzepten beim Militär ermöglichen.

Es stellt sich jedoch grundsätzlich die Frage, ob regenerative Stromerzeugung vor Ort die erforderliche elektrische Energie für den lokalen Bedarf inklusive einer Wasserstofferzeugung liefern kann. Die komplexen Anforderungen von Streitkräften an die Erzeugungskapazitäten, an ein stabiles Stromnetz und die zur Verfügung zu stellende elektrische Leistung machen weitere differenzierte Studien erforderlich. Ohne die Klärung dieser Frage lässt sich eine Entscheidung für wasserstoffbetriebene Antriebssysteme in den Streitkräften nicht treffen.

Die Bundeswehr sollte derartige Fragestellungen rechtzeitig betrachten. Neben wegfallenden Emissionen wären die Vorteile selbst von partieller Energieautonomie elementar.

## Literaturverzeichnis

- Adolf, Jörg/Balzer, Christoph H./Louis, Jurgen/Schabla, Uwe (2017): Shell Wasserstoff-Studie: Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>, Hamburg: Shell Deutschland Oil GmbH, [https://epub.wupperinst.org/files/6647/6647\\_Wasserstoff-Studie.pdf](https://epub.wupperinst.org/files/6647/6647_Wasserstoff-Studie.pdf), zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Airbus (2021): Hydrogen. An Energy Carrier to Fuel the Climate-neutral Aviation of Tomorrow, [https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-07/airbus\\_hydrogen\\_future\\_aviation\\_1P%20%281%29.pdf](https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-07/airbus_hydrogen_future_aviation_1P%20%281%29.pdf), zuletzt aufgerufen am 10.03.2021.
- Al Ghafri, Saif/Swanger, Adam/Jusko, Vincent/Siahvashi, Arman/Perez, Fernando/Johns, Michael/May, Eric (2022): Modelling of Liquid Hydrogen Boil-Off, in: *Energies* 15 (3), S. 1149.
- Alstom/RMV/Ifraserv höchst (2020): Startschuss für die erste Wasserstofftankstelle für Passagierzüge in Hessen, in: Alstom Press Releases and News vom 26.10.2020, <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2020/10/startschuss-fuer-die-erste-wasserstofftankstelle-fuer-passagierzuege>, zuletzt aufgerufen am 28.03.2023. Saint-Ouen.
- Ammar, Nader R./Alshammari, NFSH (2018): Overview of the Green Hydrogen Applications in Marine Power Plants Onboard Ships, in: *Int. J. Multidiscip. Curr. Res* 6 (01).
- Andrukaitis, Ed (2010): Fuel Cells as Tactical Auxiliary Power in Military Vehicles, in: *ECS Transactions* 26 (1), S. 445–454.
- Arnberger, Anton/Eichseder, Helmut/Grabner, Peter/Raser, Bernhard (2021): Der Wasserstoffmotor im Nfz: Brückentechnologie oder langfristige Lösung?, in: Johannes Liebl, Christian Beidl und Wolfgang Maus (Hrsg.): *Internationaler Motorenkongress 2021*, Springer Fachmedien: Wiesbaden, S. 301–323.
- AVL/ZSW (2021): Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte, [https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie\\_H2-Systemvergleich.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf), zuletzt aufgerufen am 22.11.2021.
- aroutaji, Ahmad/Wilberforce, Tabbi/Ramadan, Mohamad/Olabi, Abdul Ghani (2019): Comprehensive Investigation on Hydrogen and Fuel Cell Technology in the Aviation and Aerospace Sectors, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 106, S. 31–40.
- Bayer, Stefan/Struck, Simon (2021): Trendszenario Grüne Armee: Strategische Überlegenheit durch Nachhaltigkeit?, in: *Stratos* 2021 09/2021: S. 1–13.
- BeH2ydro (2021): Information Sheet, [https://www.behydro.be/docs/Information\\_sheet\\_spreads\\_web.pdf](https://www.behydro.be/docs/Information_sheet_spreads_web.pdf), zuletzt aufgerufen am 10.03.2021.
- Brezonick, Mike (2021): Westport, Scania Cooperate on Hydrogen Engine Research, in: *Diesel Progress* vom 22.01.2021, <https://www.dieselprogress.com/news/westport-scania-cooperate-on-hydrogen-engine-research/8009850-article>, zuletzt aufgerufen am 28.03.2023.
- Bruhn, Claus-Jürgen (2022): Energieautonomie von militärischen Liegenschaften. Wasserstoff als Enabler (#GIDSstatement 9/2022), [https://gids-hamburg.de/wp-content/uploads/2022/10/GIDSstatement2022\\_09\\_Bruhn\\_221010.pdf](https://gids-hamburg.de/wp-content/uploads/2022/10/GIDSstatement2022_09_Bruhn_221010.pdf), zuletzt aufgerufen am 28.03.2023.

- Bundesministerium der Verteidigung (2021): Waffensysteme und Großgerät der Bundeswehr, <https://www.bmvg.de/resource/blob/5261462/b60dd780d41a5c5b8e03e8b8275230bd/waffensysteme-und-grossgeraet-data.pdf>, zuletzt aufgerufen am 24.11.2022.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie, [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=16](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16), zuletzt aufgerufen am 22.06.2020.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie/TÜV Rheinland (2021): Fachprogramm: Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien. Aktuelle Projekte der Programmsäule „Innovative Fahrzeuge“, [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/projektsteckbriefe-innovative-fahrzeuge.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/projektsteckbriefe-innovative-fahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile&v=8), zuletzt aufgerufen am 04.12.2022.
- Bundesregierung (2022): Wasserstoff. Energieträger der Zukunft. in: Bundesregierung vom 07.06.2022, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/wasserstoff-technologie-1732248>, zuletzt aufgerufen am 06.11.2022.
- Bundeswehr (2019): Anzahl der Liegenschaften und Materiallage der Bundeswehr, <https://www.bundeswehr.de/de/ueber-die-bundeswehr/zahlen-daten-fakten/anzahl-liegenschaften-materiallage-bundeswehr>, zuletzt aufgerufen am 05.10.2022.
- Bundeswehr (2023a): Allschutz-Transport-Fahrzeug (ATF) Dingo, <https://www.bundeswehr.de/de/ausruestung-technik-bundeswehr/landsysteme-bundeswehr/atf-dingo>, zuletzt aufgerufen am 20.04.2023.
- Bundeswehr (2023b): Geschütztes Führungs- und Funktionsfahrzeug Eagle IV, <https://www.bundeswehr.de/de/ausruestung-technik-bundeswehr/landsysteme-bundeswehr/fuehrungs-und-funktionsfahrzeug-eagle>, zuletzt aufgerufen am 20.04.2023.
- BwFuhrparkService (2020): Unternehmen. Zahlen und Fakten, <https://www.bwfuhrpark.de/p/unternehmen>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Calise, Francesco/D'Accadia, Massimo Dentice/Santarelli, Massimo/Lanzini, Andrea/Ferrero, Domenico (2019): Solar Hydrogen Production. Processes, Systems and Technologies, Academic Press.
- Callahan, Michael/Anderson, Kate/Booth, Sam/Katz, Jessica/Tetreault, Tim (2011): Lessons Learned from Net Zero Energy Assessments and Renewable Energy Projects at Military Installations, National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Inform, <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/51598.pdf>, zuletzt aufgerufen am 28.03.2023.
- Carpetis, C. (2000): Globale Umweltvorteile bei Nutzung von Elektroantrieben mit Brennstoffzellen und/oder Batterien im Vergleich zu Antrieben mit Verbrennungsmotor, <https://www.dlr.de/tt/en/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/carpetisstb22.pdf>, zuletzt aufgerufen am 20.03.2023.
- Centek, Kevin (2020): Fuel Cell and Hydrogen Technologies. Pasadena, [https://www.usarmygvsc.com/wp-content/uploads/2020/02/Presentation-4-Fuel-Cell\\_Centek.pdf](https://www.usarmygvsc.com/wp-content/uploads/2020/02/Presentation-4-Fuel-Cell_Centek.pdf), zuletzt aufgerufen am 04.03.2021
- Charpentreau, Clement (2021): France Mulls Hydrogen-powered Military Drone, in: Aerotime Hub vom 19.02.2021, <https://www.aerotime.aero/articles/27282-france-mulls-hydrogen-powered-military-drone>, zuletzt aufgerufen am 28.03.2023.

- Cullen, David A./Neyerlin, K. C./Ahluwalia, Rajesh K./Mukundan, Rangachary/More, Karren L./Borup, Rodney L./Weber, Adam Z./Myers, Deborah J./Kusoglu, Ahmet (2021): New Roads and Challenges for Fuel Cells in Heavy-duty Transportation, in: *Nature Energy* 6 (5), S. 462–474.
- Darling, Ruth Anne (2018): Hydrogen as Military Fuel, [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review18/ia001\\_darling\\_2018\\_o.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review18/ia001_darling_2018_o.pdf), zuletzt aufgerufen am 22.06.2020.
- Das, J. Narayana (2017): Fuel Cell Technologies for Defence Applications, in: K. V. Raghavan, K. V. und Purnendu Ghosh (Hrsg.): *Energy Engineering. Proceedings of CAETS 2015 Convocation on Pathways to Sustainability*, Springer Nature: Singapur, S. 9–18.
- Deheri, Chinmay/Acharya, Saroj Kumar/Thatoi, Dharendra Nath/Mohanty, Ambica Prasad (2020): A Review on Performance of Biogas and Hydrogen on Diesel Engine in Dual Fuel Mode, in: *Fuel* 260, S. 116337.
- Deutsche Bahn (2022): H2goesRail, in: Deutsche Bahn, <https://gruen.deutschebahn.com/en/measures/hydrogen/h2goesrail>, zuletzt aufgerufen am 20.05.2022.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2021): Erprobung der Wartungs- und Bodenprozesse zukünftiger Flugzeuggenerationen, in: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt vom 08.07.2021, [https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2021/03/20210708\\_erprobung-der-wartungs-und-bodenprozesse-neuer-flugzeuggenerationen.html](https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2021/03/20210708_erprobung-der-wartungs-und-bodenprozesse-neuer-flugzeuggenerationen.html), zuletzt aufgerufen am 28.03.2023.
- Deutz AG (2021): Der Wasserstoffmotor von DEUTZ ist reif für den Markt, in: Deutz AG Pressemitteilungen vom 12.08.2021, <https://www.deutz.com/media/pressemitteilungen/der-wasserstoffmotor-von-deutz-ist-reif-fuer-den-markt>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Dimitrova, Zlatina/Nader, Wissam Bou (2022): PEM Fuel Cell as an Auxiliary Power Unit for Range Extended Hybrid Electric Vehicles, in: *Energy* 239, S. 121933.
- Dincer, Ibrahim/Acar, Canan (2016): A Review on Potential Use of Hydrogen in Aviation Applications, in: *International Journal of Sustainable Aviation* 2 (1), S. 74–100.
- Doppeladler (2022): Das Allschutz-Transportfahrzeug Dingo 2, <http://www.doppeladler.com/oebh/dingo.htm>, zuletzt aufgerufen am 22.10.2022.
- Drawingsdatabase (2022): Frankenthal Class Minehunter Homburg M1069, [https://drawingdatabase.com/wp-content/uploads/2020/12/Frankenthal\\_class\\_minehunter\\_Homburg\\_M1069.gif](https://drawingdatabase.com/wp-content/uploads/2020/12/Frankenthal_class_minehunter_Homburg_M1069.gif), zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Du, Zhemin/Liu, Congmin/Zhai, Junxiang/Guo, Xiuying/Xiong, Yalin/Su, Wei/He, Guangli (2021): A Review of Hydrogen Purification Technologies for Fuel Cell Vehicles, in: *Catalysts* 11 (3), S. 393.
- Enke, Wolfram/Gruber, Manfred/Hecht, Ludwig/Staar, Bernhard (2007): Der bivalente V12-Motor des BMW Hydrogen 7, in: *MTZ–Motortechnische Zeitschrift* 68 (6), S. 446–453.
- Esfeh, Shaghayegh Kazemi/Monnerie, Nathalie/Masche, Sophia/Baumstark, David/Kriechbaumer, Dorottya/Neumann, Nicole/Eschmann, Jonas/Jochem, Patrick/O’Sullivan, Marlene/Camilo Gomez Trillos, Juan/Vogt, Thomas/Brand, Urte/Ansar, Syed Asif (2022): Zukünftige maritime Treibstoffe und deren mögliche Importkonzepte. Kurzstudie, <https://elib.dlr.de/186857/2/kurzstudie-maritime-treibstoffe.pdf>, zuletzt aufgerufen am 14.03.2023.
- European Commission (2022): First ‘Fit for 55’ Proposal Agreed. The EU Strengthens Targets for CO2 Emissions for New Cars and Vans, in: Council of the EU – Press Release vom 27.10.2022, <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/10/27/first-fit-for-55-proposal-agreed-the-eu-strengthens>

- targets-for-co2-emissions-for-new-cars-and-vans/, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren (2020): FEV treibt Entwicklung des Wasserstoff-Verbrennungsmotors voran, in: FEV Presse vom 20.10.2020, <https://www.fev.com/de/media-center/presse/pressemitteilungen/artikel/article/fev-is-driving-forward-hydrogen-internal-combustion-engine-development.html>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- future:fuels (05.01.2021): LOHC. Wasserstoff speichern und transportieren, in: future:fuels – Der ExpertenBlog vom 05.01.2021, <https://futurefuels.blog/in-der-praxis/wasserstoff-speichern-mit-lohc/>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Gomez, Arturo/Smith, Howard (2019): Liquid Hydrogen Fuel Tanks for Commercial Aviation: Structural Sizing and Stress Analysis, in: *Aerospace Science and Technology* 95, S. 105438.
- Gross, Thomas J./Poche, Albert J./Ennis, Kevin C. (2011): Beyond Demonstration. The Role of Fuel Cells in DoD's Energy Strategy, <https://pdfs.semanticscholar.org/cafb/db54bc93b40dbe4726a29d501e938aabc9.pdf>, zuletzt aufgerufen am 05.07.2021.
- Heiming, Gerhard (08.01.2021): Rahmenvertrag UTF-Logistikfahrzeuge stark erweitert, in: *Europäische Sicherheit und Technik*, <https://esut.de/2021/01/meldungen/25023/rahmenvertrag-utf-logistikfahrzeuge-stark-erweitert/>, zuletzt aufgerufen am 31.03.2023.
- Hexagon Purus (2022): Hydrogen Type 4 Cylinders, [https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/hexagonpurus-website/HPU\\_0222\\_12\\_HydrogenType4\\_Tabelle\\_2pages.pdf](https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/hexagonpurus-website/HPU_0222_12_HydrogenType4_Tabelle_2pages.pdf), zuletzt aufgerufen am 05.12.2022.
- Hosseini, Seyed Ehsan/Butler, Brayden (2020): An Overview of Development and Challenges in Hydrogen Powered Vehicles, in: *International Journal of Green Energy* 17 (1), S. 13–37.
- Hydrogen Central (2021): Hydrogen-powered Kia Military Vehicles May Become a Reality, in: *Hydrogen Central* vom 14.09.2021, <https://hydrogen-central.com/hydrogen-powered-kia-military-vehicles/>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Hyundai Trucks and Busses (2022): XCIENT Fuel Cell, <https://trucknbus.hyundai.com/hydrogen/ko/download/catalog-xcient-fuel-cell-en.pdf>, zuletzt aufgerufen am 05.12.2022.
- IEA (2019): The Future of Hydrogen. Seizing Today's Opportunities, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, zuletzt aufgerufen am 20.07.2021.
- IEA (2022): World Energy Investment 2022, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b0beda65-8a1d-46ae-87a2-f95947ec2714/WorldEnergyInvestment2022.pdf>, zuletzt aufgerufen am 03.11.2022.
- IMCCS Expert Group (2022): Decarbonized Defense. The Need for Clean Military Power in the Age of Climate Change, <https://imccs.org/wp-content/uploads/2022/06/Decarbonized-Defense-World-Climate-and-Security-Report-2022-Vol.-I.pdf>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2022.
- Kern, Paul J./Mills, Walker/Limpaecher, Erik/Santoli, Matt/Flanagan, Ben (2021): An Albatross Around the US Military's Neck. The Single Fuel Concept and the Future of Expeditionary Energy, <https://mwi.usma.edu/an-albatross-around-the-us-militarys-neck-the-single-fuel-concept-and-the-future-of-expeditionary-energy/>, in: *Modern War Institute* vom 29.06.2021, zuletzt aufgerufen am 13.10.2021.
- Klell, Manfred/Eichseder, Helmut/Trattner, Alexander (2018): *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, Springer Fachmedien: Wiesbaden.

- Klepatz, Kevin/Konrad, Swantje/Tempelhagen, Robin/Rottengruber, Hermann (2021): Systemvergleich CO<sub>2</sub>-freier Nutzfahrzeugantriebe, in: Karsten Berns, Klaus Dressler, Ralf Kalmar, Nicole Stephan, Roman Teutsch und Martin Thul (Hrsg.): Commercial Vehicle Technology 2020/2021. Proceedings on the 6<sup>th</sup> Commercial Vehicle Technology Symposium, Springer Fachmedien: Wiesbaden, S. 171–191.
- Klepatz, Kevin/Zeilinga, Stephan/Rottengruber, Hermann/Koch, Daniel/Prümm, Franz Werner/Sousa, Alvaro (2019): Verlustanalyse eines direkteinblasenden Wasserstoffverbrennungsmotors, in: Helmut Tschöke und Ralf Marohn (Hrsg.): 11. Tagung Einspritzung und Kraftstoffe 2018. Diesel, Benzin, Gas, Alternative Kraftstoffe, Medien für SCR, Wasser, Springer Fachmedien: Wiesbaden, S. 395–422.
- Kotchourko, Alexei/Jordan, Thomas (2022): Hydrogen Safety for Energy Applications. Engineering Design, Risk Assessment, and Codes and Standards, Butterworth-Heinemann: Oxford.
- Kraus-Maffei-Wegmann (2022): Instandsetzungstraining, <https://www.kmweg.de/systeme-produkte/training-simulation/instandsetzungsausbildung/instandsetzungstrainer/>, zuletzt aufgerufen am 22.10.2022.
- Kural, Saim/Ayvaz, Mehmet (2018): The Ballistic Behavior of Type 1 Metallic Pressurized Hydrogen Storage Tanks Against Ballistic Threats, in: International Journal of Hydrogen Energy 43, S. 20284–20292.
- Leopoldina/acatech/Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften (2020): Zentrale und dezentrale Elemente im Energiesystem. Der richtige Mix für eine stabile und nachhaltige Versorgung, Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung, hrsg. v. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina und Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften, [https://www.leopoldina.org/uploads/tx\\_leopublication/2020\\_ESYS\\_Stellungnahme\\_Energiesystem.pdf](https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2020_ESYS_Stellungnahme_Energiesystem.pdf), zuletzt aufgerufen am 05.12.2022.
- Lott, Patrick/Wagner, Uwe/Koch, Thomas/Deutschmann, Olaf (2022): Der Wasserstoffmotor – Chancen und Herausforderungen auf dem Weg zu einer dekarbonisierten Mobilität, in: Chemie Ingenieur Technik 94 (3), S. 217–229.
- Luef, Reinhard/Heher, Philipp/Hepp, Christof/Schaffer, Klaus/Sporer, Harald/Eichlseder, Helmut (2013): Konzeption und Entwicklung eines Wasserstoff-/Benzin-Motors für den Rennsport, 8. Tagung "Gasfahrzeuge", Stuttgart, Germany.
- Luo, Yang/Wu, Yinghong/Li, Bo/Mo, Tiande/Li, Yu/Feng, Shien-Ping/Qu, Jingkui/Chu, Paul K. (2021): Development and Application of Fuel Cells in the Automobile Industry, in: Journal of Energy Storage 42, S. 103124.
- Ma, Shuai/Lin, Meng/Lin, Tzu-En/Lan, Tian/Liao, Xun/Maréchal, François/van Herle, Jan/Yang, Yongping/Dong, Changqing/Wang, Ligang (2021): Fuel Cell-battery Hybrid Systems for Mobility and Off-grid Applications: A Review, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews 135, S. 110119.
- Mandaiker, Paul (2022): Daimler Truck Demonstrates Practicality of Hydrogen Trucks at the IAA Transportation 2022, in: Daimler Truck vom 20.09.2022, <https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Daimler-Truck-demonstrates-practicality-of-hydrogen-trucks-at-the-IAA-Transportation-2022.xhtml?oid=52043855>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Mayor-Hilsem, Damien/Zimmermann, Reiner (2019): A Review of Fuel Cells and Their Military Applications, in: Energy Security: Operational Highlights 2019 (12), S. 21–31.
- Merkel Energy GmbH (2021): Energiedrehscheibe Wilhelmshaven 2.0. Standortanalyse, [https://www.wilhelmshaven.de/PDF/Infomaterial/03/2021-05-03\\_Standortanalyse\\_WHV.pdf?m=1623039158&](https://www.wilhelmshaven.de/PDF/Infomaterial/03/2021-05-03_Standortanalyse_WHV.pdf?m=1623039158&), zuletzt aufgerufen am 24.11.2022.

- Müller, Martin/Stanik, Christopher (2022a): Elektra II, in: Now Gmbh, <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/elektra-ii/>, zuletzt aufgerufen am 22.10.2022.
- Müller, Martin/Stanik, Christopher (2022b): Pa-X-ell2, in: Now Gmbh, <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/elektra-ii/>, zuletzt aufgerufen am 22.10.2022.
- Munoz, Juan Felipe (2022): Wasserstoff-Autos: Starkes Wachstum beim weltweiten Absatz, in: InsideEEVs vom 17.03.2022, <https://insideevs.de/news/574056/wasserstoffautos-absatzsteigerung-zahlen/>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2021): Powering the U.S. Army of the Future, <https://www.nap.edu/catalog/26052/powering-the-us-army-of-the-future>, zuletzt aufgerufen am 15.10.2021.
- Ohnsman, Alan (2022): Tesla's Electric Semi Is Almost here, but Elon Musk Hasn't Shared some Heavy Details, in: Forbes vom 27.10.2022, <https://www.forbes.com/sites/alanohnsman/2022/10/27/teslas-electric-semi-is-almost-here-but-elon-musk-hasnt-shared-some-heavy-details/?sh=2b5805516c8d>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Onorati, A./Payri, R./Vaglieco, B. M./Agarwal, A. K./Bae, C./Bruneaux, G./Canakci, M./Gavaises, M./Günthner, M./Hasse, C./Kokjohn, S./Kong, S-C/Moriyoshi, Y./Novella, R./Pesyridis, A./Reitz, R./Ryan, T./Wagner, R./Zhao, H. (2022): The Role of Hydrogen for Future Internal Combustion Engines, in: International Journal of Engine Research 23 (4), S. 529–540.
- Østensjø/Hydrogenious (2021): Hydrogenious LOHC Technologies and Østensjø Group Join Forces and Tread a Novel Path Towards Safe Zero-emission Shipping, in: Østensjø Rederi vom 02.07.2021, <https://ostensjo.no/hydrogenious-lohc-technologies-and-ostensjo-group-join-forces-and-tread-a-novel-path-towards-safe-zero-emission-shipping/>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Paczkowski, Benjamin (2018): Ballistic Testing of Pressurized Hydrogen Storage Cylinders, in: Power Sources Conference (Hrsg.): 48th Power Sources Conference 2018. Proceedings of a Meeting Held 11–14 June 2018, Denver, Colorado, USA, S. 159–162.
- Paschotta, Rüdiger (2021a): Stöchiometrische Verbrennung, in: RP-Energie-Lexikon, [https://www.energie-lexikon.info/stoichiometrische\\_verbrennung.html](https://www.energie-lexikon.info/stoichiometrische_verbrennung.html), zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Paschotta, Rüdiger (2021b): Wasserstoffspeicher, in: RP-Energie-Lexikon, <https://www.energie-lexikon.info/wasserstoffspeicher.html>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Pointon, Kevin D./Lakeman, Barry (2007): Prospects for Hydrogen as a Military Fuel. In: John W. Sheffield und Çiğdem Sheffield (Hrsg.): Assessment of Hydrogen Energy for Sustainable Development, Springer Netherlands: Dordrecht, S. 97–106.
- Pospiech, Peter (02.10.2020): Antwerpen bringt weltweit ersten mit Wasserstoff betriebenen Hafenschlepper auf den Markt, in: Vereinigung europäischer Schifffahrtsjournalisten (VEUS) vom 02.10.2020, <https://veus-shipping.com/2020/10/antwerpen-bringt-weltweit-ersten-mit-wasserstoff-betriebenen-hafenschlepper-auf-den-markt/>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Rao, Purna/Yoon, Minyoung (2020): Potential Liquid-Organic Hydrogen Carrier (LOHC) Systems: A Review on Recent Progress, in: Energies 13 (22), S. 6040.
- Rappuhn, Thomas/Struck, Simon (2021): Streitkräfte der Zukunft. Energieautonomie durch Wasserstoff und Beitrag für die Entwicklung eines neuen Energiemarktes? (#GIDSstatement 12/2021), <https://gids-hamburg.de/wp->

- content/uploads/2022/02/GIDSStatement\_2021\_12\_Rapp-  
uhn\_Struck\_220225.pdf, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Reif, Konrad (2014): Ottomotor-Management. Steuerung, Regelung und Überwachung, Springer Fachmedien: Wiesbaden.
- Reker, Torsten (2012): Beschuss, Anspregung, Brand. Erfolgreiche Tests von Druckgasbehältern, in: HZwei 07/2012, S. 24–25.
- Riemer, Matia/Schreiner, Florian/Wachsmuth, Jakob (2022): Conversion of LNG Terminals for Liquid Hydrogen or Ammonia, Fraunhofer ISI, [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2022/Report\\_Conversion\\_of\\_LNG\\_Terminals\\_for\\_Liquid\\_Hydrogen\\_or\\_Ammonia.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2022/Report_Conversion_of_LNG_Terminals_for_Liquid_Hydrogen_or_Ammonia.pdf), zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Rivard, Etienne/Trudeau, Michel/Zaghib, Karim (2019): Hydrogen Storage for Mobility: A Review, n: Materials 12 (12), <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/12/1973>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Santos, Nuno Pessanha (2022): Hydrogen in the Portuguese Navy: A Case Study, in: International Journal of Hydrogen Energy 47 (66), S. 28684–28698.
- Schrank, Michael/Langer, Vivien/Jacobson, Benjamin (2021): Wasserstoff-verbrennungsmotor als alternativer Antrieb. Metastudie, [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/10/NOW\\_Metastudie\\_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/10/NOW_Metastudie_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf), zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Schroeder, Volkmar/Askar, Enis/Tashqin, Temir/Habib, Abdel Karim (2016): Sicherheitstechnische Eigenschaften von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen, [https://opus4.kobv.de/opus4-bam/files/37297/Schroeder\\_BAM-VH+2539.pdf](https://opus4.kobv.de/opus4-bam/files/37297/Schroeder_BAM-VH+2539.pdf), zuletzt aufgerufen am 05.10.2021.
- Schroeder, Patrick (2021): Wasserstoff-Zug: Weltweit größte Flotte entsteht in Deutschland, in: Ingenieur.de vom 13.07.2021, <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/der-weltweit-erste-wasserstoff-zug-faehrt-im-regulaeren-linienbetrieb/>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Schwarz, Anna (2022): MAN produziert Wasserstofftrucks, n: Süddeutsche Zeitung vom 07.03.2022, <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/dachau/karlsfeld-man-trucks-wasserstoff-1.5542861>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Seba, Bouzid/Weiss, Ulrich (2022): Hydrogen Combustion Engine – A Suitable Concept for Decarbonisation in Offroad Sector, in: Johannes Liebl (Hrsg.): Heavy-Duty-, On- und Off-Highway-Motoren 2021. Die Zukunft des Verbrennungsmotors und der alternativen Antriebe. Springer Fachmedien: Wiesbaden, S. 100–117.
- Sekine, Yasushi/Higo, Takuma (2021): Recent Trends on the Dehydrogenation Catalysis of Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC): A Review, in: Topics in Catalysis 64 (7–8), S. 470–480.
- Sery, Jules/Leduc, Pierre (2021): Fuel Cell Behavior and Energy Balance on Board a Hyundai Nexa, in: International Journal of Engine Research 23 (5), S. 709–720.
- Shadidi, Behdad/Najafi, Gholamhassan/Yusaf, Talal (2021): A Review of Hydrogen as a Fuel in Internal Combustion Engines, in: Energies 14 (19), S. 6209.
- Stepień, Zbigniew (2021): A Comprehensive Overview of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines: Achievements and Future Challenges, in: Energies 14 (20), S. 6504.
- Stroman, Richard O./Edwards, Daniel J./Jenkins, Phillip/Carter, Sam/Newton, Daniel/Kelly, Matthew/Heinzen, Stearns/Young, Trent/Dobrokhodov, Vladimir/Langelaan, Jack/Bird, John/Reinecke, P. Alex (2018): The Hybrid Tiger. A Long Endurance Solar/Fuel Cell/Soaring Unmanned Aerial Vehicle, in: Power Sources Conference 19, S. 317–320.
- Tanaka, Yoshikazu (2016): Development of the MIRAI Fuel Cell Vehicle, in: Kazunari

- Sasaki, Hai-Wen Li, Akari Hayashi, Junichiro Yamabe, Teppei Ogura, Stephen M. Lyth (Hrsg.): *Hydrogen Energy Engineering: A Japanese Perspective*, Springer Japan: Tokio, S. 461–475.
- Thompson, Simon T./James, Brian D./Huya-Kouadio, Jennie M./Houchins, Cassidy/DeSantis, Daniel A./Ahluwalia, Rajesh/Wilson, Adria R./Kleen, Gregory/Papageorgopoulos, Dimitrios (2018): *Direct Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle Cost Analysis: System and High-volume Manufacturing Description, Validation, and Outlook*, in: *Journal of Power Sources* 399, S. 304–313.
- Universität Augsburg Anwenderzentrum Material- und Umweltforschung (2023): LOHC, <https://www.uni-augsburg.de/de/forschung/einrichtungen/institute/amu/wasserstoff-forschung-h2-unia/h2lab/h2-sp/stoffliche-speicherung/lohc/>, zuletzt aufgerufen am 13.03.2023.
- US DoD (2011): *Energy for Warfighters. Operational Energy Strategy*, <https://www.acq.osd.mil/eie/Downloads/OE/Operational%20Energy%20Strategy,%20Jun%2011.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30.03.2023.
- Verhelst, Sebastian/Wallner, Thomas (2009): *Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines*, in: *Progress in Energy and Combustion Science* 35 (9), S. 490–527.