

# #GIDSstatement 12/2021

Thomas Rappuhn und Simon Struck

## **Streitkräfte der Zukunft**

Energieautonomie durch Wasserstoff und Beitrag für die Entwicklung eines neuen Energiemarktes?

#GIDSstatement | Nr. 12/2021 | Dezember 2021 | ISSN 2699-4372

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

ISSN 2699-4372

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>



#GIDSstatement 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)

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

Zitiervorschlag:

Thomas Rappuhn / Simon Struck, Streitkräfte der Zukunft. Energieautonomie durch Wasserstoff und Beitrag für die Entwicklung eines neuen Energiemarktes? , #GIDSstatement 12/2021, Hamburg.

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

---

Thomas Rappuhn und Simon Struck

# Streitkräfte der Zukunft

## Energieautonomie durch Wasserstoff und Beitrag für die Entwicklung eines neuen Energiemarktes?

### Einleitung<sup>1</sup>

Die nationalen und europäischen Ziele einer klimaneutralen Wirtschaft bis 2045 bzw. 2050 führen zu grundsätzlichen Veränderungen der Energieversorgung. Weltweit wird an der Substitution fossiler Energieträger geforscht.

Die Frage der Energieautonomie der Bundeswehr der Zukunft besitzt vor dem Hintergrund erwartbarer Veränderungen der Energieinfrastruktur sowie der Antriebssysteme für die Mobilität eine große Bedeutung. Das Militär ist als Anwender ebenfalls abhängig von diesen Entwicklungen und muss die Implikationen für Strategien und Beschaffungswesen kontinuierlich betrachten. Ein zentraler Kristallisationspunkt ist im deutschen Kontext die nationale Wasserstoffstrategie.

In der vorliegenden Studie wird der Frage der Nutzbarkeit alternativer Energieträger mit dem Fokus auf Wasserstoff (H<sub>2</sub>) für die Bundeswehr nachgegangen. Dabei gilt es, den gesamten Bereich militärischer Mobilität bis hin zur Energieinfrastruktur zu analysieren und Anwendungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Darüber hinaus soll die Frage beantwortet werden, welchen Beitrag Streitkräfte für den Einsatz und den Markthochlauf regenerativer Energien insbesondere in Hinblick auf Wasserstoff leisten können. Ziel ist es, auf Basis einer Analyse der laufenden und erwarteten Entwicklungen in Industrie und Forschung aufbauend auf den europäischen Klimazielen eine strategische Perspektive für die Energieautonomie der Bundeswehr nach 2050 zu entwickeln.

Lange Nutzungsdauern von militärischen Systemen und der Zeitbedarf von Beschaffungsprozessen machen es sinnvoll, die Transformation des zivilen Energiemarktes frühzeitig in den Blick zu nehmen. Dafür ist zusätzlich zu diesem ersten Beitrag eine Reihe von weiteren Artikeln des GIDS geplant, die sich neben einer Analyse der technologischen Entwicklungen auch mit möglichen Anwendungen für die Bundeswehr bezogen auf Einsatzbedingungen, militärische Logistik, Interoperabilität sowie die Sicherheit im Handling befassen.

Bei der Gestaltung von Streitkräften der Zukunft müssen zwangsläufig aus militärisch-operativer Sicht auch die adressierten energetischen Fragen beantwortet werden.

---

<sup>1</sup> Die Autoren bedanken sich für die Anmerkungen und Hinweise der Gutachter.

## Die Ausgangslage – Ein sich verändernder Energiemarkt

Erdöl und Erdgas gelten bis heute als die zentralen Rohstoffe globaler Wirtschaftskreisläufe. Auch das Militär ist Bestandteil dieser Kreisläufe. Insbesondere die fortschreitende Technisierung der Streitkräfte macht energieintensive Systeme notwendig, die bisher vorrangig von eben jenen fossilen Energieträgern angetrieben werden. Die Fähigkeit, erfolgreiche militärische Operationen zu planen und durchzuführen, ist daher zunehmend auch an das Energiemanagement von Streitkräften selbst geknüpft.<sup>2</sup> Folglich macht eine solche volkswirtschaftliche und militärische Abhängigkeit von Öl den Zugang zu diesem Energieträger und die Stabilisierung der Ölmärkte bekanntermaßen zu einer strategischen und sicherheitspolitischen Notwendigkeit.<sup>3</sup>

Dieser Umstand entfaltet vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen des fossilen Energiemarktes eine besondere Relevanz. So führte der Ölpreisverfall nach 2014 zu rückläufigen Investitionen in diesem Marktsegment. Obgleich sich der Kapitaleinsatz langsam stabilisiert hat und bis 2019 leicht stieg, wurde das Niveau von 2014 bisher nicht wieder erreicht.<sup>4</sup> Damit soll die Bedeutung dieser Energieträger hier nicht in Frage gestellt werden, da die Versorgung mit ihnen noch für einen längeren Zeitraum unbedingt sichergestellt bleiben muss. Vor allem die Nutzung von Erdgas ist als längerfristige Brückentechnologie zu sehen.

Insbesondere in Europa geht die Förderung von Rohöl und Erdgas absehbar auch wegen der fortschreitenden Ausschöpfung bestehender Lagerstätten zurück. Damit wird die Abhängigkeit gerade von Erdöl aus Krisenregionen steigen. Aber auch Erdgasimporte werden zukünftig weniger aus Westeuropa erfolgen können. Diese Entwicklung wird seit vielen Jahren erwartet, beschleunigt sich aber bei Annahme steigenden Verbrauchs wegen der geringeren Investitionen insbesondere auch in Exploration zunehmend. Gerade die langen Zeiten für Exploration und Entwicklung der Fundigkeiten von zehn bis zu zwanzig Jahren lassen hier Engpässe aber vor allem Preisvolatilität bzw. höhere Preise in der Zukunft erwarten.<sup>5</sup>

Auf der anderen Seite steht die weltweite Einigung auf das Pariser Klimaabkommen, welches die grundlegenden energiepolitischen Rahmenbedingungen verschiebt und voraussichtlich zu einer Veränderung der zuvor beschriebenen Logik führt. Auffallend ist in diesem Zusammenhang die Position der International Energy Agency (IEA) aus dem Mai 2021. Danach wird auf Basis der Ziele des Pariser Klimaabkommens für 2050 sogar die Notwendigkeit einer zukünftigen Exploration auf neue Öl- und Gasfelder in Frage gestellt.<sup>6</sup> Ein Erreichen der Zie-

---

<sup>2</sup> Saritas/Burmaoglu 2016: 331–333.

<sup>3</sup> Bayer/Struck 2021: 4; Saritas/Burmaoglu 2016: 334.

<sup>4</sup> IEA 2018: 156–163; IEA 2020b: 44; IEA 2021b: 277 f.

<sup>5</sup> IEA 2018: 156–163.

<sup>6</sup> IEA 2021a.

le führe zu einem fallenden Verbrauch von Rohöl und Erdgas. Dies setzt damit die Erschließung alternativer Energiequellen voraus.

Diese Entwicklungen zeigen, welchen Herausforderungen der Energiemarkt in absehbarer Zukunft unterliegen wird. Fehlende Investitionen in fossile Rohstoffe verbunden mit Verzögerungen bei der Umstellung auf regenerative Energien lassen Engpässe erwarten und machen es dringend erforderlich, die Energieautonomie von Streitkräften voranzutreiben.

## Energie in 2050 – Wasserstoff als Baustein nachhaltiger Energiewirtschaft

### Der Rahmen eines zukünftigen Wasserstoffmarktes

Einen Schlüsselbaustein im Transformationsprozess des Energiemarktes stellt Wasserstoff dar. Das wegweisende Papier der IEA *The Future of Hydrogen*, das zur Vorlage für den G20-Gipfel in Osaka 2019 entstand, kann in diesem Zusammenhang als Grundlagenpapier gelten. Dies spiegelt sich unmittelbar auch in der Abschlusserklärung der G20-Staaten wider, welche die besondere Bedeutung des Energieträgers hervorhebt: „We also recognize opportunities offered by further development of innovative, clean and efficient technologies for energy transitions, including hydrogen.“<sup>7</sup>

Mehrere G20-Staaten haben daraufhin nationale Wasserstoffstrategien entwickelt. Dabei betonen die Regierungen die wesentliche Bedeutung von Wasserstoff in der Energietransformation verschiedenster Industriebranchen, dem Wärmemarkt und vor allem der Mobilität.<sup>8</sup>

Insbesondere im Verkehrssektor verweist die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung von 2020 nicht zuletzt auch auf die besondere Bedeutung für militärische Anwendungen:

Mobilitätsanwendungen bergen großes Potenzial zur Anwendung von Wasserstoff. Der Verkehrssektor muss auf technologischen Fortschritt setzen, um die sektoralen Klima- und Erneuerbaren-Ziele zu erreichen. Die wasserstoff- und PtX-basierte Mobilität ist für solche Anwendungen eine Alternative, bei denen der direkte Einsatz von Elektrizität nicht sinnvoll oder technisch nicht machbar ist. Dazu gehören auch militärische Anwendungen, bei denen die Interoperabilität zwischen Bündnispartnern gewährleistet sein muss.<sup>9</sup>

---

<sup>7</sup> G20 2019: 11.

<sup>8</sup> Taibi/Miranda/Carmo 2020: 19–25; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020; European Commission 2020; Secretary of State for Business, Energy & Industrial Strategy 2021; Government of the Netherlands 2020.

<sup>9</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020: 11.

Eine Wasserstoffnutzung, welche die fossilen Kraftstoffe innerhalb des Mobilitätssektors substituiert, energieintensive Industriebranchen nachhaltiger gestalten und Teile des Wärmemarkts erschließen soll, stellt den Energiemarkt jedoch vor enorme Herausforderungen.

Es wird erwartet, dass es zu einer Vervielfachung des derzeitigen Bedarfs an Wasserstoff und damit auch dessen Erzeugungskapazität kommt. Innerhalb der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung wird im Vergleich zu heute ein mindestens siebenmal höherer Wasserstoffbedarf für Deutschland in 2050 angenommen.<sup>10</sup> Andere Schätzungen gehen von weit höheren Bedarfsmengen aus.<sup>11</sup>

Die Ausweitung des bestehenden Wasserstoffmarktes wird innerhalb der Industrie insbesondere für energieintensive Unternehmen erwartet, wie etwa für die Stahl- und Zementerzeugung.<sup>12</sup> Als weiterer wesentlicher Treiber ist die Mobilität zu sehen.<sup>13</sup> Dort stellen Wasserstoff und dessen Derivate bzw. Folgeprodukte für eine zentrale Alternative zu den fossilen Kraftstoffen und bei vielen Anwendungen auch zur Elektromobilität dar. Nach Schätzung der IEA könnte der Transport- und Mobilitätssektor und die damit verbundene nachhaltige Kraftstoffherstellung mehr als ein Drittel der weltweiten Verbrauchsannahmen von Wasserstoff in 2050 ausmachen. Für das Jahr 2070 prognostiziert die IEA sogar einen Wasserstoffbedarf von 520 Millionen Tonnen (2019 75 Mio. Tonnen). Dabei wird ein Anteil von 60 Prozent für die Mobilität angenommen.<sup>14</sup>

In the Sustainable Development Scenario, this situation changes, with global hydrogen demand increasing sevenfold to 520 Mt by 2070 [...]. The direct use of hydrogen in the transport sector for cars, trucks and ships accounts for 30% of hydrogen use in 2070, while around 20% of hydrogen is used in the production of synthetic kerosene from hydrogen and CO<sub>2</sub> for the aviation sector, and a further 10% is converted into ammonia as a fuel for the shipping sector, meeting almost half of all shipping fuel demand in 2070.<sup>15</sup>

Dem Wasserstoff wird also erhebliche Bedeutung für die Mobilität der Zukunft gegeben.

---

<sup>10</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020; European Commission 2020.

<sup>11</sup> Robinius et al. 2020.

<sup>12</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020: 2.

<sup>13</sup> IEA 2020a, 2019; Robinius et al. 2020; Perner/Unteutsch/Lövenich 2018; Merten et al. 2020.

<sup>14</sup> IEA 2020a: 110.

<sup>15</sup> IEA 2020a: 110.

## Herausforderung Wasserstoffmarktentwicklung

Diese umfassende Integration eines alternativen Energieträgers steht jedoch vor der Herausforderung, in einen bestehenden Energiemarkt eingebunden zu werden, in dem sich bereits (fossile) Energietechnologien etabliert haben. Eine technologieoffene Wirtschaftspolitik, wie sie häufig von Ökonominen und Ökonomen auch im Kontext der Klimapolitik vorgebracht wird, kann dabei jedoch durchaus zum Hemmnis für den Markthochlauf alternativer Energieträger werden:

Allerdings kann die Annahme, dass ein offener Wettbewerb der verschiedenen Technologien zur kostenminimalen Zielerreichung führt, nur dann gelten, wenn die Technologien unter gleichen Startbedingungen miteinander konkurrieren. Sie gilt nicht mehr, wenn bereits ausgereifte und etablierte Technologien mit solchen wettstreiten, die sich noch in relativ frühen Entwicklungsstadien befinden und hohe Kostensenkungspotenziale (z. B. durch Größen- und Lernkurveneffekte) aufweisen. Diese innovativen Technologien haben oftmals das Potenzial, in einer langfristigen Perspektive die gesetzten Klimaziele kostengünstiger zu erreichen, als dies mit den etablierten Technologien möglich wäre.<sup>16</sup>

Folglich verweist die IEA in ihrer Studie *The Future of Hydrogen* auf die besondere Rolle staatlicher Akteure im Kontext eines Wasserstoffmarkthochlaufes.<sup>17</sup> Durch staatliche Vorgaben bzw. Policies soll eine Entwicklung angestoßen werden, welche die Ausweitung von Wasserstoff im Energiemarkt auch betriebswirtschaftlich effizient werden lässt. Denn der schrittweise Hochlauf eines Wasserstoffmarktes im Industrie- und Verkehrssektor setzt den Ausbau von Transport-, aber vor allem auch Bedarfsstrukturen gleichermaßen voraus. Somit steht der Energiesektor vor der Herausforderung, ohne klare Marktmechanismen den Hochlauf eines Wasserstoffmarkts vollziehen zu müssen, da Infrastrukturprojekte nur dann Investoren attrahieren können, wenn gesicherte Bedarfsstrukturen vorherrschen.<sup>18</sup>

Es ist zu beachten, dass staatliche Eingriffe in den Energiemarkt auch ein substanzielles wirtschaftspolitisches Risiko mit sich führen. So können staatliche Steuerungsmechanismen dazu beitragen, dass eine Allokation von Mitteln und Investitionen in eine Technologie getätigt werden, die sich langfristig als weniger effizient und konkurrenzfähig herausstellt. Die damit einhergehende einseitige Festlegung von aufgebauten Bedarfen und Infrastrukturen kann somit negativ auf die Entwicklung des Energiesektors einwirken.<sup>19</sup>

<sup>16</sup> Kemfert/Elmer/Dross 2017: 485.

<sup>17</sup> IEA 2019.

<sup>18</sup> Schulte/Schlund 2020; Kemfert/Elmer/Dross 2017: 484–486.

<sup>19</sup> Kemfert/Elmer/Dross 2017.

Im Kontext von Wasserstoff ist ein solches Risiko dennoch gering, da H<sub>2</sub> direkt als Energieträger breit genutzt werden kann und eine Vielzahl von Anwendungsfeldern aufweist. So lässt sich Wasserstoff direkt als Treibstoff auch in geeigneten Wasserstoffverbrennungsmotoren für die Mobilität einsetzen.<sup>20</sup> Ein Einsatz von Wasserstoff in Kombination mit der Brennstoffzellentechnologie erfolgt bereits in verschiedenen Anwendungen.

Darüber hinaus ist sogenannter *grüner Wasserstoff* aus erneuerbarer Stromerzeugung einer der zentralen Grundstoffe für die verfahrenstechnisch aufwendige und teure Herstellung synthetischer Kraftstoffe (e-fuels), deren Nutzung auf Basis bestehender Transportinfrastruktur geschehen kann und für energieintensive Anwendungen voraussichtlich erforderlich werden wird. Sie benötigt allerdings wie auch die Erzeugung *grünen Wasserstoffs* noch eine erhebliche Kostendegression.<sup>21</sup>

Die Erzeugung von sogenanntem *grauem Wasserstoff* aus fossilen Energieträgern wie Erdgas könnte bedeutsam werden. Die zur Herstellung der Klimaneutralität dieses Prozesses (*blauer Wasserstoff*) notwendig werdende CO<sub>2</sub>-Speicherung über Carbon Capture Storage (CCS) ist allerdings mengenmäßig kaum als eine dauerhafte Option einzuschätzen. Die CCS Kapazitäten erscheinen, vor dem Hintergrund der zu erwartenden großen CO<sub>2</sub>-Volumina, begrenzt. Folglich muss dieser Herstellungsprozess als längerfristige Brückentechnologie gedeutet werden. Die Erreichbarkeit der Klimaziele bis 2050 und darüber hinaus durch eine breite und dauerhafte Nutzung einer solchen Technologie ist in Frage zu stellen.

*Grünem Wasserstoff* fällt nach derzeitigen Erkenntnissen somit eine zentrale Rolle in der künftigen Energieerzeugung und -nutzung zu. Bundesregierung, EU und wissenschaftliche Institutionen erwarten in den kommenden Jahrzehnten einen massiven Anstieg des Wasserstoffbedarfes.<sup>22</sup> Gegenwärtig gibt es allerdings lediglich begrenzte Erzeugungskapazitäten. Ein Ausbau zu den ins Auge gefassten Dimensionen erscheint sehr ambitioniert und erfordert massive Investitionen in derartige technische Anlagen und gerade bei den notwendig werdenden Importen zusätzlich in Infrastruktur und Transport.

Es muss klar sein, dass für eine zentrale Rolle als wesentlicher Baustein selbstverständlich die kompetitive Wirtschaftlichkeit der Wertschöpfungskette für *grünen Wasserstoff* und seine Nutzung im Vergleich zu anderen Energieerzeugungssystemen sein muss. Denn letztlich ist das Ziel nicht der Einsatz einer bestimmten Technologie, sondern die konsequente Vermeidung von Emissionen. Nur full cycle cost Betrachtungen der Wirtschaftlichkeit können Aufschluss geben, inwieweit Investoren für eine Technologie attrahierbar sein werden.

---

<sup>20</sup> Klell/Eichlseder/Trattner 2018.

<sup>21</sup> Perner/Unteutsch/Lövenich 2018.

<sup>22</sup> Dies wird durch die ins Auge gefasste Energieerzeugung aus Gaskraftwerken mit Wasserstoff weiter verstärkt, vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2022.

## Wasserstoffmarktdesign und die Rolle des Staates

Die aufgezeigten Herausforderungen weisen staatlichen Akteuren eine besondere Rolle beim Markthochlauf alternativer Energieträger zu. Dazu stellt der umfassende Ansatz der IEA eine erfolgsversprechende Option dar. So wird ein Wasserstoffmarkthochlauf zunächst in regional begrenzten *Coastal-Industrial Clustern* angenommen, um Bedarfe und Verbräuche regional aneinander anzupassen und auszuweiten. Dabei identifizierte die IEA die Nordseeregion als besonders geeignete Region für die Realisierung eines solchen Konzeptes.<sup>23</sup>

Mit der Ausweitung eines Wasserstoffmarktes gilt es dennoch zunehmend auch in einem solchen Marktdesign die Frage zu beantworten, wie Wasserstoff für Industriecluster bereitgestellt werden kann. So wird bereits in der IEA-Studie und der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung die Bedeutung von Wasserstoffimporten bei einem fortschreitenden Markthochlauf des Energieträgers hervorgehoben, da besonders in sonnen- und windreichen Regionen die erforderlichen erneuerbaren Energien in Verbindung mit Elektrolyseanlagen bereitgestellt werden können.<sup>24</sup> Eine vertiefte Zusammenarbeit mit Ländern etwa in Nordafrika oder im Nahen Osten kann in Zukunft nicht zuletzt auch eine neue *Wasserstoff-OPEC* befördern.

Diese Überlegungen weisen dabei auch zentrale volkswirtschaftliche und strategische Implikationen auf: So bleibt eine Importlogik von Energieträgern weiterhin bestehen und verschärft sich sogar noch. Anders als bei Rohöl würde mit H<sub>2</sub> bereits ein divers und direkt einsetzbarer Energieträger importiert. Wertschöpfungsketten entlang verfahrenstechnischer Prozesse in Europa, wie sie bei der Rohölindustrie im Raffinerieprozess vorherrschen, würden somit zu einem erheblichen Teil entfallen.

Neben der Erzeugung ist die Transportinfrastruktur bei der Entwicklung eines Marktdesigns von wesentlicher Bedeutung. Aus Sicht der Verfasser kommt in diesem Zusammenhang dem Straßentransport, der Eisenbahn, aber auch der Binnenschifffahrt eine besondere Rolle zu,<sup>25</sup> da sich steigende Bedarfe mit gebotener Flexibilität entwickeln lassen, ohne in der Anlaufphase betriebswirtschaftlich nicht zu rechtfertigende Großinvestitionen vornehmen zu müssen. Der umfassende Ausbau von Wasserstoffpipelinesystemen oder die Umwidmung bestehender Erdgaspipelines und -speicher für Wasserstoff<sup>26</sup> kann dabei erst erfolgen, wenn sich gesicherte Bedarfe innerhalb der angestrebten Wasserstoff-Industrie-Cluster abbilden lassen.

Für den Aufbau von Wasserstoffbedarfsstrukturen hebt die IEA neben der technologieneutralen Pönalisierung fossiler Energieträger etwa durch die CO<sub>2</sub> Bepreisung vor allem spezifische wirtschaftspolitische Instrumente hervor: Neben der Bereitstellung von Fördermitteln und Incentivierungen, wie sie etwa

<sup>23</sup> IEA 2019: 177–182.

<sup>24</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020: 4; IEA 2019: 191 f.

<sup>25</sup> IEA 2019: 191.

<sup>26</sup> Wang et al. 2020: 6.

innerhalb der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung vorzufinden sind,<sup>27</sup> stellt die gezielte Nachfrageentwicklung durch staatliche Akteure und öffentliche Projekte ein zentrales Instrument dar.<sup>28</sup> Hierbei könnten auch die Streitkräfte eine relevante Rolle spielen.

## Potenzial der Bundeswehr für den Aufbau eines Wasserstoffmarktes

Dass Streitkräfte auch innerhalb des Energiesektors bereits wichtige Beiträge leisten konnten, zeigt die militärische (Grundlagen-)Forschung in den Bereichen der Kernenergie und Gasturbinentechnik, die maßgeblich auch den zivilen Sektor prägten. Innerhalb der erneuerbaren Energien sind es jedoch zu meist zivile Innovationen, die von Streitkräften übernommen werden.<sup>29</sup>

Dennoch können durch Effekte zweiter Ordnung (Energie-)Technologien und die sich daran anschließenden Marktsektoren durch Streitkräfte auch abseits direkter Innovationen des Verteidigungssektors vorangetrieben werden:<sup>30</sup> Als Konsument (ziviler) Technologien entfaltet das militärische Beschaffungswesen wichtige Impulse insbesondere in der Frühphase einer technologischen Entwicklung. Als *Lead-* und *First-Purchaser* von Technologien implementieren etwa die US-Streitkräfte Produkte in frühen Entwicklungsstadien, von denen eine Verbesserung der militärischen Fähigkeiten angenommen wird. Diese Impulse für die Nachfrage in der frühen Phase der Produktentwicklung werden so zum Instrument der Anreizsteuerung, da eine Incentivierung für die beteiligten Unternehmen erfolgt, strategische Investitionen in die Weiterentwicklung der Technologie zu tätigen. Die damit verbundene Marktetablierung einer Technologie bzw. eines Energieträgers kann so zunehmend auch zu einer betriebswirtschaftlich vorteilhaften Option für zivile Unternehmen werden.<sup>31</sup>

Aufgrund des weitreichenden Netzwerks aus Liegenschaften und einem großen zivilen und militärischen Fuhrpark mit über 30.000 Fahrzeugen (inklusive Bw-FuhrparkService) ist die Bundeswehr der größte Kraftstoffverbraucher unter den Bundesbehörden (z. B. Bundespolizei: ca. 7.000 Fahrzeuge). Folglich sind hohe Verbrauchspotenziale für Wasserstoff durch die Streitkräfte erwartbar. Obgleich sich der Kraftstoffverbrauch der Bundeswehr in 2018 auf nur etwa drei Terrawattstunden belief,<sup>32</sup> sind die potenziellen Verbräuche je nach Einsatzszenarien deutlich höher anzusetzen. Zusammen mit rund 1.450 Liegenschaften und mehr als 33.000 Gebäuden<sup>33</sup> könnte die Bundeswehr somit bei

---

<sup>27</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020.

<sup>28</sup> IEA 2019: 175–177, 181 f.

<sup>29</sup> Bayer/Struck 2021: 8.

<sup>30</sup> Sempere 2018: 229; Soni 2020: 128; Bayer/Struck 2021.

<sup>31</sup> Mowery 2010: 1236 f.; Schmid 2018: 597; Bayer/Struck 2021.

<sup>32</sup> Deutscher Bundestag 2019: 7.

<sup>33</sup> BMVg 2021.

einer Einbindung von Wasserstoff in das eigene Energiemanagement zu einem wichtigen gesamtstaatlichen Instrument für eine Nachfragentwicklung des zuvor skizzierten Marktdesigns werden.

Die Einsatzmöglichkeiten zukünftiger militärischer Energieträger müssen daher mit Blick auf eine gesamtstaatliche Transformation des Energiesektors analysiert werden, um so Synergien zwischen der zivilen Marktentwicklung und militärischen Anwendungen nutzbar zu machen.

## Wasserstoff als Fuel für die militärische Mobilität

Die Rahmenbedingungen der Streitkräfte insbesondere in der militärischen Mobilität stellen die Integration alternativer Energieträger vor Herausforderungen. Durch die Single Fuel Policy der US-Streitkräfte und ihrer NATO-Bündnispartner sind Energiediversifikationsmöglichkeiten nur scheinbar beschränkt:<sup>34</sup>

restricting military users to a single fuel and thereby disincentivizing experimentation with alternatives, it has helped to create the mentality that petroleum fuels are the exclusive energy source in a forward environment. The Department of Defense [and its allies] needs to look past the single fuel concept and fully embrace the recommendations in its 2016 Operational Energy Strategy report to reduce the risks associated with the future operating environment through „innovation“ and „diversification“ of operational energy.<sup>35</sup>

Folglich wird auch im amerikanischen Department of Defense zu neuer Innovation und Diversifikation der Energieträger aufgerufen. Deshalb sind in den amerikanischen Streitkräften bereits Anwendungen wie z. B. wasserstoff- bzw. brennstoffzellenangetriebene Drohnen, auxillary power units (APU), Pkws und geschützte Fahrzeuge in der Erprobung.<sup>36</sup>

Solche Diversifizierungsstrategien gilt es jedoch, nicht nur durch einzelne NATO-Staaten, voranzutreiben. Die Interoperabilität der Streitkräfte macht es notwendig, die Entwicklung und Implementierung von nachhaltigen Energiesystemen wie etwa Wasserstoff auch im gesamten NATO-Kontext voranzubringen. Ein solch ganzheitlicher Ansatz hätte dabei ebenfalls positive Effekte auf die weltweite Verfügbarkeit solcher Energieträger im militärspezifischen Kontext. Es gilt demnach, eine Zusammenarbeit der NATO-Staaten in diesem Kontext weiter zu vertiefen. Derartige Initiativen bestehen zwischen europäischen Bündnispartnern im Bereich von Infrastrukturen bereits.<sup>37</sup>

<sup>34</sup> National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2021.

<sup>35</sup> Kern et al. 2021; siehe auch US Department of Defense 2016: 13 f.

<sup>36</sup> Gross/Poche/Ennis 2011; Stroman et al. 2018; Zhou et al. 2021; Mayor-Hilsem/Zimmermann 2019.

<sup>37</sup> European Defence Agency 2020.

Die zukünftige direkte Nutzung von Wasserstoff als Energieträger für die Bundeswehr muss daher als langfristiger Prozess gesehen werden, weshalb der Betrachtungszeitraum bis 2050 gewählt wurde. Die lange Nutzungsdauer militärischer Systeme und der Zeitbedarf im Beschaffungsprozess machen es erforderlich, die Möglichkeiten zur Einführung alternativer Energie- und Antriebssysteme frühzeitig in den Blick zu nehmen. Der Beschaffungsprozess muss sich demnach bereits früh an einem sich ändernden Energie- und Treibstoffmarkt orientieren und anpassen.

Insbesondere vor dem Hintergrund neuer Entwicklungen im Mobilitätssektor könnte Wasserstoff als Option zunehmend auch durch militärische Akteure erschlossen werden, da sich bereits heute innerhalb der Antriebssysteme Entwicklungspfade erkennen lassen, die Anwendungen im militärischen Kontext mit substanziellen Vorteilen nahelegen:

Die militärischen Potenziale von Wasserstoff als Energieträger sind dabei nicht grundlegend neu, sondern wurden von den US-Streitkräften bereits frühzeitig etwa im Zusammenhang mit Brennstoffzellenapplikationen bereits 2011 erkannt.<sup>38</sup> Auch innerhalb der Bundeswehr findet Wasserstoff etwa im Kontext von U-Booten bereits Verwendung.<sup>39</sup> Insbesondere aus Brennstoffzellen lassen sich direkte operative Vorteile ableiten, da diese im Vergleich zu konventionellen Antriebssystemen eine verringerte akustische, visuelle und thermische Signatur aufweisen.<sup>40</sup>

Sicherlich gilt es, bei einer umfassenden Nutzung von Wasserstoff in den Streitkräften nicht ausschließlich die operativen Vorteile innerhalb der Waffensysteme im engeren Sinne aufzuzeigen. Vielmehr sind auch die Implikationen für die militärischen Energiesysteme und die damit verbundene Logistik im In- und Einsatzland zu berücksichtigen – etwa in Hinblick auf Erzeugung, Speicherung und Transport des Energieträgers.

Vor allem aber zivile Entwicklungen zeigen dabei bereits, wie weitreichend Wasserstoff auch für militärische Anwendungen erschlossen werden kann. So sind bereits innerhalb des zivilen Marinesektors Dual Fuel Verbrennungsmotoren am Markt, um Schlepper und Fähren mit Wasserstoff und konventionellem Diesel flexibel zu betreiben.<sup>41</sup> Solche Konzepte könnten gerade in der Frühphase militärischer Integration neuer Energieträger ein Schlüsselkonzept darstellen, da Wasserstoff hier sogar genutzt werden kann, ohne die Interoperabilität im Kontext der NATO Single Fuel Policy zunächst aufgeben zu müssen.

Insbesondere innerhalb des Lastkraftverkehrs und bei Spezialmaschinen des Land- und Baumaschinensektors sind wasserstoffbasierte Antriebssysteme fester Bestandteil der Motorenentwicklung verschiedener deutscher Hersteller. Hier erreicht die Batterietechnologie der E-Mobilität derzeit ihre Gren-

---

<sup>38</sup> Gross/Poche/Ennis 2011.

<sup>39</sup> Krummrich/Hammerschmidt 2016.

<sup>40</sup> Das 2017.

<sup>41</sup> BeH<sub>2</sub>ydro 2021; CMB.Tech 2021.

zen. Wasserstoffverbrennungsmotoren verfügen bereits über ein ähnliches Leistungsniveau wie konventionelle mit Benzin oder Diesel betriebene Aggregate. Die Leistungsdifferenz liegt dabei derzeit bei etwa 20 Prozent und besitzt Optimierungspotenzial.<sup>42</sup> Innerhalb dieser Sektoren stellt neben dem weiter zu entwickelnden Wasserstoffverbrennungsmotor aber auch die Brennstoffzelle eine weitere wichtige Option wasserstoffbasierter Antriebe dar.

In der zivilen Luftfahrt hat jüngst ein großer Flugzeughersteller Wasserstoff als Energieträger für den klimaneutralen Flugverkehr im Rahmen von Kurz- bis Mittelstrecken Anwendungen hervorgehoben.<sup>43</sup> Auch innerhalb der Triebwerkstechnik sind Hersteller sicher, dass sich für diese Anwendungen wasserstoffbasierte Antriebsysteme erfolgreich implementieren lassen.<sup>44</sup> Aber natürlich muss klar sein, dass alle diese vielversprechenden Entwicklungen erst noch auf ihre Einsatzfähigkeit und die erforderlichen Fähigkeits- und Leistungsprofile der Bundeswehr detaillierter untersucht werden müssen.

## Herausforderungen des Energieträgers H<sub>2</sub> in der militärischen Mobilität

Es bedarf jedoch auch einer differenzierten Betrachtung des Energieträgers H<sub>2</sub>. So werden gerade die zentralen Herausforderungen von Wasserstoff in militärischen Anwendungen virulent, da der geringe volumetrische Energieinhalt und die Handhabung des flüchtigen Gases Fortschritte in den Speichertechnologien erforderlich machen.<sup>45</sup>

Es erscheint allerdings vermessen, dem Ergebnis eines Forschungsprogrammes von etwa neun Milliarden Euro allein aus der nationalen Wasserstoffstrategie zum heutigen Tage vorgeifen zu wollen. Der Innovationsschub, der durch die nationale und die europäische Wasserstoffstrategie eingeleitet worden ist, sollte dabei nicht unterschätzt werden. Die Herausforderungen wie innovative Tanksysteme zur Speicherung von Wasserstoff sowie der Transport des Gases in Trägerstoffen sind durch sehr erfolgversprechende Entwicklungsansätze auf dem Weg zu einer Optimierung.<sup>46</sup> Dabei zu nennen wären neben dem bekannten verflüssigten Wasserstofftransport (LH<sub>2</sub>), die Trägerstoffe Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC) aber auch Ammoniak oder Methanol.

Die Festlegung von Grenzen für den Einsatz von Wasserstoff zum heutigen Zeitpunkt erscheint demnach als verfrüht. Daher könnte eine rein auf synthetischen Fuels basierende Strategie des BMVg<sup>47</sup> zu nachhaltigen Energiesystemen in der militärischen Mobilität nur als eine mittelfristige Strategie gedeutet wer-

---

<sup>42</sup> Schrank/Langer/Jacobson 2021.

<sup>43</sup> Airbus 2021.

<sup>44</sup> Dilba 2021.

<sup>45</sup> Aber auch umweltpolitische Überlegungen müssen dabei Berücksichtigung finden, da bei der Wasserstoffverbrennung etwa Stickoxide anfallen.

<sup>46</sup> Klell/Eichlseder/Trattner 2018: 137–139.

<sup>47</sup> BMVg/Bundesministerium des Innern 2021.

den, da eine Integration dieser Kraftstoffe aufgrund weniger infrastruktureller Anpassungen vergleichsweise schnell möglich wäre. Dabei muss klar sein, dass nach heutigem Stand insbesondere bei energieintensiven Anwendungen wie Kampfflugzeugen, schweren Kampfpanzern und bestimmten Marineschiffen synthetische Fuels als Substitution fossiler Kraftstoffe wegen des höheren Energieinhaltes voraussichtlich benötigt werden.

Nichtsdestotrotz werden auch hier zusätzliche, erhebliche Investitionen in die Erzeugungsanlagen erforderlich, um relevante Kapazitäten aufzubauen. Diese Erzeugungsinfrastruktur würde eine auf regenerative Stromerzeugung basierende Wasserstoffherstellung ebenfalls notwendig machen, da *grüner Wasserstoff* Bestandteil der Erzeugungsketten nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe (e-fuels) ist.

Wasserstoff als direkter Kraftstoff für Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen stellt bei der verfahrenstechnisch einfacheren Erzeugung eine kostengünstigere Option dar.<sup>48</sup> Zivilwirtschaftliche Akteure im Bereich des Transport-, Lastkraftverkehrs, des küstennahen Schiffsbetriebs sowie der Kurz- bis Mittelstrecken Anwendungen in der Luftfahrt könnten daher langfristig, insbesondere bei Innovationen in der Speicherungs- und Motorentechnologie, Wasserstoff als die betriebswirtschaftlich sinnfälligste Option in Betracht ziehen. Dies wird auch den Weg für die zukünftige Art von Kraftstoffen bei der Bundeswehr weisen.

## Wasserstoff im Liegenschaftsbetrieb – Bundeswehrstandorte mit einem Beitrag für den Markthochlauf?

Neben solchen Implikationen für den militärischen Mobilitätssektor bietet die Verwendung von Wasserstoff auch direkte operative Vorteile im Liegenschaftsbetrieb, wenn der Energieträger in ein Gesamtkonzept des militärischen Energiemanagements eingebunden wird. Durch verfahrenstechnisch kurze Prozesse der Elektrolyse in Verbindung mit erneuerbaren Energien lassen sich dezentrale Erzeugungsanlagen in Liegenschaften realisieren. Damit könnte der Eigenbedarf für den Liegenschaftsbetrieb und den Fahrzeugpark gedeckt werden, um energieautonome Standorte zu etablieren. Deutlich werden diese Überlegungen bereits in dem Projekt RESHUB der European Defence Agency und dem Munich Mobility Research Campus der Universität der Bundeswehr in München.<sup>49</sup>

Solche Energieautonomiekonzepte können dabei Rückwirkungen auf den Markthochlauf von Wasserstoff haben. In Ansätzen wird diese etwa im Projekt der European Defence Agency deutlich. So sollen die Standorte einen Beitrag zu einer gesamtstaatlichen Wasserstoffinfrastruktur leisten.<sup>50</sup> Insbesondere in

---

<sup>48</sup> Perner/Unteutsch/Lövenich 2018.

<sup>49</sup> European Defence Agency 2020; Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr 2020.

<sup>50</sup> European Defence Agency 2020.

Verbindung mit einem Markthochlauf innerhalb von *Coastal-Industrial Clusters* können Standorte mit ihrem Fahrzeugpark und ihren Liegenschaften in den Ländern der Nordseeregion zum wichtigen Verbraucher und Knotenpunkt eines ersten Markthochlaufes werden und Transport- sowie Tankinfrastrukturen für den Mobilitätssektor befördern.

Streitkräfte könnten somit in der ersten Phase des Markthochlaufes auch eine wichtige wirtschaftspolitische Option darstellen: Als *Early-Adopter* könnten sie neben dem Ausbau der eigenen Energieautonomie auch wichtige Impulse in der Nachfrage- und Infrastrukturentwicklung eines Wasserstoffmarktes geben. Hier bieten Konzepte, die im Sinne eines Dual-Use Ansatzes eine zivile und militärische Nutzung etwa in Friedenszeiten ermöglichen, einen wichtigen Anknüpfungspunkt. Denkbar ist in diesem Zusammenhang etwa die Integration von Wasserstofftankstellen auf den militärischen Liegenschaften in ein ziviles Tankstellennetz.

## Schlussfolgerung: Ein neues Selbstverständnis der Streitkräfte

Eine solche Zusammenführung energiepolitischer und militärischer Ziele erfordert jedoch ein neues Selbstverständnis der Bundeswehr. So müssen sich die Streitkräfte als Akteur innerhalb des Energie- und Wirtschaftssystems begreifen. Dafür gilt es, die eher passive Rolle als Konsument von Technologien und Energie zu verlassen und eine aktive Gestaltung der nationalen Energiesysteme auch von Seiten des Militärs anzustreben. Der große Fahrzeugpark mit über 30.000 Fahrzeugen (inklusive Bw-FuhrparkService) und der Liegenschaftsbetrieb machen Streitkräfte zu einem wichtigen Energieverbraucher, der besonders in der Frühphase nachhaltiger Energieinfrastrukturentwicklung gemeinsam mit anderen Bundes- und Landesorganisationen einen Beitrag für einen Markthochlauf leisten kann. Die Bundeswehr könnte somit auch ein wirtschaftspolitisches Instrument für einen Wasserstoffmarkthochlauf darstellen. Die Einbindung militärischer Akteure in Infrastrukturprojekte kann dabei auch eine Allokation zusätzlicher öffentlicher Mittel in den Verteidigungshaushalt ermöglichen und so theoretisch einen Beitrag zur Realisierung des Zwei-Prozent-Zieles der NATO leisten.

Eine solche infrastrukturelle Integration der Streitkräfte setzt jedoch zunächst eine differenzierte Betrachtung der zukünftigen Energieträger innerhalb der Bundeswehr voraus. Wasserstoff und dessen Derivate bzw. Folgeprodukte werden zukünftig einen zentralen Baustein zur Realisierung klimaneutraler Streitkräfte darstellen. Hierbei gilt es jedoch, die Direktnutzungsmöglichkeit von Wasserstoff näher zu betrachten, da sich dessen Einbindung bereits heute in der zivilen Nutzung abzeichnet.

Die heutigen Entwicklungen sind auf einem vielversprechenden Weg, Wasserstoff als militärisches Fuel nutzbar machen zu können. Dies bietet, wie auf-

gezeigt, auch militärische Vorteile. Dual Fuel Lösungen in der küstennahen Schifffahrt besitzen für bestimmte Anwendungen bereits heute ein ähnliches Leistungsniveau wie bisherige Antriebssysteme. Folglich ist eine Integration auch im militärischen Kontext in diesen Bereichen denkbar. Auch in der Luftfahrt sind Triebwerks- und Systemhersteller sicher, dass Kurz- bis Mittelstrecken Anwendungen Wasserstoff als klimaneutralen Fuel nutzen können. Führende europäische Motoren- und Systemhersteller im Sektor Spezialmaschinen für Bau- und Landwirtschaft sowie im Bereich Bus- und Lastkraftverkehr haben jüngst bereits innovative Antriebskonzepte vorgestellt, welche eine Integration in militärische Systeme auch des Heeres nahelegen.<sup>51</sup> Neben dem Transportwesen könnten somit leichte geschützte Fahrzeuge in den Fokus genommen werden – beides Bereiche mit relevantem Fahrzeugbestand. Diese Entwicklungen müssen selbstverständlich auf ihre Tauglichkeit für die Fähigkeits- und Leistungsprofile der Bundeswehr dezidiert untersucht werden. Hierfür könnten auch Pilotprojekte definiert werden.

Die dargestellten Entwicklungen sollen durch weitere Beiträge des GIDS differenziert vorgestellt werden, um ihre Nutzungsmöglichkeiten auch für militärische Anwendungen zu prüfen. Eine zukünftige Energieautonomie der Streitkräfte macht es darüber hinaus notwendig, auch Wasserstoffherzeugung und -infrastruktur näher zu untersuchen. Neben dieser Analyse soll zusätzlich auch der mögliche Beitrag der Bundeswehr für das Design eines zukünftigen Wasserstoffmarktes betrachtet werden.

## Literaturverzeichnis

- 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\\_IP%20%281%29.pdf](https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-07/airbus_hydrogen_future_aviation_IP%20%281%29.pdf), zuletzt aufgerufen am 10.03.2021.
- 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/Publicationen/Studien/e-mobilBW-Studie\\_H2-Systemvergleich.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publicationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf), zuletzt aufgerufen am 22.11.2021.
- Bayer, Stefan/Struck, Simon (2021): Trendszenario Grüne Armee. Strategische Überlegenheit durch Nachhaltigkeit? in: Stratos September 2021.
- 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.
- BMVg (2021): Anzahl der Liegenschaften und Materiallage der Bundeswehr, Stand November 2019, <https://www.bundeswehr.de/de/ueber-die-bundeswehr/zahlen-daten-fakten/anzahl-liegenschaften-materiallage-bundeswehr>, zuletzt aufgerufen am 09.11.2021.
- BMVg/Bundesministerium des Innern (24.03.2021): Positionspapier zur Notwendigkeit der Nutzung von synthetischen Kraftstoffen, zuletzt aufgerufen am 26.03.2021.

<sup>51</sup> AVL/ZSW 2021; Airbus 2021; BeH2ydro 2021.

- 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 Klimaschutz (2022): EU-Taxonomie. Statement von Bundesminister Habeck am 01.01.2022, Berlin, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Meldung/2022/20220101-atomenergie-als-nachhaltig-zu-labeln-ist-falsch.html>, zuletzt geprüft am 14.02.2022.
- Deutscher Bundestag (2019): Drucksache 19/15249 vom 15.11.2019, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sevim Dağdelen, Heike Hänsel, Christine Buchholz, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE (Drucksache 19/13708): Das Militär und der Klimawandel – Die ökologischen Kosten der Bundeswehr, <https://dserver.bundestag.de/btd/19/152/1915249.pdf>, zuletzt aufgerufen am 12.11.2021.
- CMB.Tech (2021): Hydrotug, <https://cmb.tech/hydrotug-project>, zuletzt aufgerufen am 14.10.2021.
- Das, J. Narayana (2017): Fuel cell technologies for defence applications, in: Raghavan, K. V./Ghosh, Purnendu (Hgg.), Energy Engineering. Proceedings of CAETS 2015 Convocation Pathways to Sustainability, Springer Nature: Singapore, S. 9–18.
- Dilba, Denis (2021): Integrating hydrogen propulsion into aircraft, in: AERO Report, <https://aeroreport.de/en/innovation/integrating-hydrogen-propulsion-into-aircraft>, zuletzt aufgerufen am 20.09.2021.
- European Commission (2020): A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf), zuletzt aufgerufen am 16.05.2021.
- European Defence Agency (2020): First Energy Consultation Forum project to receive EU funding, <https://eda.europa.eu/news-and-events/news/2020/03/10/first-energy-consultation-forum-project-to-receive-eu-funding>, zuletzt aufgerufen am 09.08.2021.
- G20 (2019): G20 Osaka Leaders' Declaration, <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2019/06/29/g20-osaka-leaders-declaration/>, zuletzt aufgerufen am 07.09.2021.
- Government of the Netherlands (2020): Government Strategy on Hydrogen, <https://www.government.nl/documents/publications/2020/04/06/government-strategy-on-hydrogen>, zuletzt aufgerufen am 06.09.2021.
- 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.
- IEA (2018): World Energy Outlook 2018, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>, zuletzt aufgerufen am 16.05.2021.
- 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 (2020a): Energy Technology Perspectives 2020, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>, zuletzt aufgerufen am 26.07.2021.
- IEA (2020b): World Energy Investment 2020, <https://sun-connect-news.org/fileadmin/DATEIEN/Dateien/New/WEI2020.pdf>, zuletzt aufgerufen am 24.11.2021.
- IEA (2021a): Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/0716bb9a-6138-4918-8023-cb24caa47794/NetZero-by2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector.pdf>, zuletzt aufgerufen am 18.05.2021.

- IEA (2021b): World Energy Outlook 2021, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/888004cf-1a38-4716-9e0c-3b0e3fdbf609/WorldEnergyOutlook2021.pdf>, zuletzt aufgerufen am 24.11.2021.
- Kemfert, Claudia/Elmer, Carl-Friedrich/Dross, Miriam (2017): Grenzen der Technologieutralität, in: *Zeitschrift für Politikwissenschaft* 27 (4), S. 483–491.
- Kern, Paul J./Mills, Walker/Limpaecher, Erik/Santoli, Matt/Flanagan, Ben (29.06.2021): 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/>, zuletzt aufgerufen am 13.10.2021.
- Klell, Manfred/Eichseder, Helmut/Trattner, Alexander (2018): *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*, Springer Fachmedien: Wiesbaden.
- Krummrich, Stefan/Hammerschmidt, Albert (2016): Hydrogen and Fuel Cells in Submarines, in: Stolten, Detlef/Emonts, Bernd (Hgg.), *Hydrogen Science and Engineering. Materials, Processes, Systems and Technology*, Wiley-VCH: Weinheim, S. 991–1010.
- Mayor-Hilsem, Damien/Zimmermann, Reiner (2019): A Review of Fuel Cells and Their Military Applications, in: *Energy Security: Operational Highlights* 12, S. 21–31.
- Merten, Frank/Scholz, Alexander/Krüger, Christine/Heck, Simon/Girad, Yann/Mecke, Marc/Goerge, Marius (2020): *Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung*, Wuppertal Institut; DIW Econ: Wuppertal.
- Mowery, David C. (2010): Military R&D and Innovation, in: Hall, Bronwyn H. (Hg.), *Handbook of the economics of innovation. Volume 2*, Elsevier North-Holland: Amsterdam/Heidelberg, S. 1219–1256.
- 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.
- Perner, Jens/Unteutsch, Michaela/Lövenich, Andrea (2018): Die zukünftigen Kostenstrombasierter synthetischer Brennstoffe, in: *Agora Verkehrswende/Agora Energiewende*, [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Die\\_Kosten\\_synthetischer\\_Brenn-\\_und\\_Kraftstoffe\\_bis\\_2050/Agora\\_Kosten\\_strombasierter\\_Brennstoffe\\_WEB.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Die_Kosten_synthetischer_Brenn-_und_Kraftstoffe_bis_2050/Agora_Kosten_strombasierter_Brennstoffe_WEB.pdf), zuletzt aufgerufen am 16.05.2021.
- Robinius, Martin/Markewitz, Peter/Lopion, Peter/Kullmann, Felix/Heuser, Philipp-atthias/Syranidis, Konstantinos/Cerniauskas, Simonas/Schöb, Thomas/Reuß, Markus/Ryberg, Severin/Kotzur, Leander/Calayan, Dilara/Welder, Lara/Linßen, Jochen/Grube, Thomas/Heinrichs, Heidi/Stenzel, Peter/Stolte, Detlef (2020): *Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050* (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt, Bd. 499), Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag: Jülich.
- Saritas, Ozcan/Burmaoglu, Serhat (2016): Future of sustainable military operations under emerging energy and security considerations, in: *Technological Forecasting and Social Change* 102, S. 331–343.
- Schmid, Jon (2018): The Diffusion of Military Technology, in: *Defence and Peace Economics* 29 (6), S. 595–613.
- Schrank, Michael/Langer, Vivien/Jacobson, Benjamin (2021): Wasserstoffverbrennungsmotor als alternativer Antrieb. Metastudie, in: *Now GmbH Berlin*, [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 21.02.2022.

- Schulte, Simon/Schlund, David (2020): Hintergrund Nationale Wasserstoffstrategie. Technologieneutralität ermöglicht Markthochlauf und langfristige kosteneffiziente Versorgung, in: EWI Policy Brief Mai 2020.
- Secretary of State for Business, Energy & Industrial Strategy (2021): UK Hydrogen Strategy, [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1011283/UK-Hydrogen-Strategy\\_web.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1011283/UK-Hydrogen-Strategy_web.pdf), zuletzt aufgerufen am 06.09.2021.
- Sempere, Carlos Martí (2018): What Is Known About Defence Research And Development Spill-Overs?, in: Defence and Peace Economics 29 (3), S. 225–246.
- Soni, Anmol (2020): Disruptive Energy Technologies and Military Capabilities, in: Kosal, Margaret E. (Hg.), Disruptive and Game Changing Technologies in Modern Warfare. Development, Use, and Proliferation, Springer International Publishing: Cham, S. 115–134.
- 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.
- Taibi, Emanuele/Miranda, Raul/Carmo, Marcelo (2020): Green hydrogen cost reduction, <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>, zuletzt aufgerufen am 15.11.2021.
- US Department of Defense (2016): 2016 Operational Energy Strategy, [https://www.acq.osd.mil/eie/Downloads/OE/2016%20OE%20Strategy\\_WEBd.pdf](https://www.acq.osd.mil/eie/Downloads/OE/2016%20OE%20Strategy_WEBd.pdf), zuletzt aufgerufen am 13.10.2021.
- Wang, Anthony/van der Leun, Kees/Peters, Daan/Buseman, Maud (2020): European Hydrogen Backbone. How dedicated hydrogen infrastructure can be created, Guidehouse: Utrecht.
- Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr (2020): MORE – Aufbau und Forschungsbetrieb eines Modellcampus. Munich Mobility Research Campus, <https://dtecbw.de/home/forschung/unibw-m/projekt-more>, zuletzt aufgerufen am 23.08.2021.
- Zhou, Youjie/Lu, Changbo/Cheng, Jian/Xu, Wanli/Sun, Yanli/Li, Hua/Xu, Lei (2021): Development of Hydrogen Fuel Cell Technology and Prospect for Its Military Application, in: Liang, Qilian/Wang, Wei/Liu, Xin/Na, Zhenyu/Li, Xiaoxia/Zhang, Baoju (Hgg.), Communications, Signal Processing, and Systems. Springer Singapore: Singapore, S. 1722–1730.