

#GIDSstatement 7 / 2023

Simon Struck

Energieautonome Streitkräfte

Wasserstoff als Fuel für die militärische Mobilität?
Zusammenfassung der Studie

#GIDSstatement | Nr. 7/2023 | April 2023 | 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

#GIDSstatement 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? Zusammenfassung der Studie, #GIDSstatement 7/2023, 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 · www.gids-hamburg.de

Energieautonome Streitkräfte

Wasserstoff als Fuel für die militärische Mobilität?

Zusammenfassung der Studie

1 Einleitung

Der Energiesektor Europas befindet sich in einem großen Veränderungsprozess. Ziel ist die massive Reduzierung der Treibhausgasemissionen bis 2050, wovon die Mobilität ebenfalls betroffen ist. Aufgrund der Veränderung des Klimas wird eine Transformation der Energiesysteme erforderlich. Regenerative Energiesysteme sollen die künftige Energieversorgung bestimmen.

Die Verfügbarkeit fossiler Rohstoffe wird in der Zukunft weiter abnehmen. Die weltweit gefallen 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.¹ Wie das Beispiel von Russland zeigt, werden fossile Rohstoffe auch als politische Waffe genutzt.

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 möglich wäre, wird in dem Research Paper des GIDS „Energieautonome Streitkräfte. Wasserstoff als Fuel für die militärische Mobilität?“ mit Blick auf einen Einsatz nach 2050 untersucht.²

Bereits 2019 auf dem G20 Gipfel in Osaka wurde auf Basis einer Studie der International Energy Agency (IEA) Wasserstoff als ein Schlüsselbaustein für eine nachhaltige Energiewirtschaft identifiziert. Die IEA schlug dabei die Zusammenarbeit in *Coastal Industrial Clusters* vor, zu denen die Nordseeregion mit ihren Anrainern und deren Industrien gehört. Auf dem Gipfel selbst wurde Wasserstoff eine zunehmende Rolle auch im Mobilitätssektor zugeordnet.³ Das Ergebnis führte in verschiedenen Staaten zu nationalen Wasserstoffstrategien.

Die deutsche nationale Wasserstoffstrategie wurde von der Bundesregierung im Jahr 2020 vorgelegt. Mit dieser Wasserstoffstrategie wird eine umfangreiche Transformation des Energiemarktes angestrebt. Dabei wird auch die Rolle von H₂ und seinen Derivaten für die Einsatzfahrzeuge der Bundeswehr betont.⁴ Die aktuelle Bundesregierung hat ebenfalls die Bedeutung von Wasserstoff für Gaskraftwerke und den Wärmemarkt hervorgehoben und macht damit deutlich, wie weitreichend Wasserstoff in den Energiemarkt integriert werden soll.⁵ Im Rahmen der deutschen Wasserstoffstrategie werden öffentliche Finanzmittel von etwa 9,5 Mrd. Euro für Forschungs- und Pilotprojekte zur Verfügung gestellt. Das Ziel besteht darin, die Weiterentwicklung von

¹ IEA 2022.

² Struck 2023.

³ IEA 2019.

⁴ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020: 6.

⁵ Bundesregierung 2022.

Wasserstoff als Energieträger voranzubringen, um eine breite Nutzung in der Zukunft zu ermöglichen. Damit sollen eine Substitution fossiler Energieträger eingeleitet und ein Wasserstoffmarkthochlauf unterstützt werden.⁶

2 Die Ausgangslage

Der zivile Verkehrssektor

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.⁷ 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.⁸

Mit reinem H₂ betriebene Systeme befinden sich in der Entwicklung.⁹ 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.

Es gilt zu berücksichtigen, dass reiner Wasserstoff eine sehr geringe volumetrische Energiedichte besitzt. Die gegenwärtige Industrielösung für Fahrzeuge zur Speicherung in Drucktranks (700 bar) benötigt das ca. achtfache Tankvolumen im Vergleich zu herkömmlichen Kraftstoffen, um gleiche Reichweiten zu erzielen.

Neben weiteren in der Studie betrachteten Konzepten für den Transport von Wasserstoff bieten die flüssigen Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC) eine Alternative. Sie benötigen unter Berücksichtigung verfahrenstechnischer Erfordernisse zwar ähnlich hohe Volumina, können aber herkömmliche Transportsysteme nutzen.

Abseits von den H₂-Antriebssystemen ist die Nutzung von sogenannten synthetischen Fuels in herkömmlichen Motoren denkbar. Die Erzeugung solcher Kraftstoffe basiert jedoch ebenfalls auf reinem H₂, 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 erkaufte.

⁶ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020: 3.

⁷ Klell/Eichlseder/Trattner 2018: 13.

⁸ Ohnsman 2022.

⁹ Hosseini/Butler 2020: 30; Mandaiker 2022.

Streitkräfte und Wasserstoff

Die heutigen Logistikkonzepte für die Bereitstellung von Kraftstoffen für den militärischen Einsatz sind anfällig für Feindwirkung, wie 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.¹⁰ Auch die Bilder aus der Ukraine von langen, wegen Treibstoffmangel liegengelassenen Konvois der russischen Armee unterstreichen diesen Punkt. Eine dezentrale Erzeugung von reinem H₂ auf Basis regenerativer Energieerzeugung könnte eine erhebliche Verbesserung der Kraftstoffversorgung und damit eine Energieautonomie der Streitkräfte ermöglichen. Eine H₂-Erzeugung auf Liegenschaften könnte einen wesentlichen militärischen Vorteil bedeuten.

Das Research Paper

Grundlage für eine Energieautonomie ist allerdings, dass die technischen Voraussetzungen zur Nutzung von H₂ in der Mobilität vorhanden sind. Das #GIDSresearch 2/2023 untersucht deshalb zunächst die Nutzungsmöglichkeiten von reinem Wasserstoff in der militärischen Mobilität der Zukunft. Die Studie zeigt die Vor- und Nachteile sowie die Grenzen und Möglichkeiten des Energieträgers in militärischen Anwendungsfeldern auf.

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

Die laufenden und erwarteten Entwicklungen von Antriebskonzepten in Industrie und Forschung wurden dafür auf ihre strategische Perspektive für die Mobilität der Bundeswehr nach 2050 untersucht. Sie unterliegen einer hohen Dynamik. Die Untersuchung repräsentiert den Stand bis Ende 2022. Lange Nutzungsdauern von militärischen Systemen und der Zeitbedarf für die Beschaffung machen es notwendig, das Thema schon heute zu betrachten.¹¹

Die Bundeswehr mit mehr als 50.000 Fahrzeugen (inklusive Bw-Fuhrparkservice) wird von einer solchen Entwicklung betroffen sein.¹² Deshalb erscheint die Beteiligung an ausgesuchten Projekten wichtig, um Stärken und Schwächen der mit reinem Wasserstoff betriebenen Systeme zu erkennen. Vor diesem Hintergrund gibt die Untersuchung anhand von Pilotprojektvorschlägen Handlungsempfehlungen. Auf eine Beantwortung der Frage, welche militärischen Systeme 2050 noch von Relevanz sein werden, wird dabei verzichtet.

3 Möglichkeiten der zukünftigen Nutzung von H₂ 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

¹⁰ US DoD 2011: 4 f.

¹¹ Rappuhn/Struck 2021.

¹² BwFuhrparkService 2020; Bundeswehr 2019.

über die Kraftstoffe der Zukunft entscheiden. Zivile Entwicklungsinnovationen werden sich auf die marktfähigsten Technologien konzentrieren.

Die Abhängigkeit der Bundeswehr von der zivilen Infrastruktur

Neben der Elektromobilität stellt in vielen Bereichen vor allem reiner H₂ eine Alternative zu Flüssigkraftstoffen dar. Auf Basis regenerativer Stromerzeugung hergestellter Wasserstoff kann direkt als Kraftstoff verwendet werden. Für den Einsatz von reinem H₂ sind Brennstoffzellen sowie Wasserstoffverbrennungsmotoren relevante Antriebsoptionen.

Wenn reiner H₂ als Kraftstoff direkt eingesetzt werden kann, so wird er auch in zukünftigen Antriebssystemen Verwendung finden, in denen batterieelektrische Systeme an ihre Grenzen stoßen. Es zeichnet sich ab, dass in der Zukunft viele verschiedene Antriebssysteme eingesetzt werden. Das für den jeweiligen Einsatzzweck beste und wirtschaftlichste System wird Anwendung finden. Es wird also nicht nur ein Antriebssystem der Zukunft für die Mobilität 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 von H₂ 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 also 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 militärische Mobilität, wie sie bislang durch die NATO Single Fuel Policy besteht,¹³ verhindert den Zugang zu den Vorteilen der übrigen neuen Technologien und steht absehbar vor der Herausforderung völlig neuer, ziviler Versorgungsinfrastrukturen. 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 Erzeugungsanlagen, aber in jedem Fall eigene Tanklager betrieben werden. Dies würde zusätzliche Kostenstrukturen bedeuten. Die Nutzung synthetischer Kraftstoffe sollte auf energieintensive Anwendungen (Panzer, Kampffjets etc.) beschränkt bleiben.

Das #GIDSresearch 2/2023 zeigt detailliert, dass in der Industrie eine Vielzahl alternativer Antriebssysteme entwickelt wird und im zivilen Sektor neue Logistik- und Tanksysteme entstehen. Die Streitkräfte sind vor die Frage gestellt, inwieweit hierdurch Herausforderungen für die Einsatzfähigkeit resultieren. Derzeit sehen die Logistikkonzepte in der Landesverteidigung den Rückgriff auf zivile Strukturen vor, die sich bis 2050 massiv verändern werden.¹⁴

¹³ Kern et al. 2021.

¹⁴ Bruhn 2022.

Antriebstechnologien für militärische Mobilität

Es ist von elementarer Bedeutung, Stärken und Schwächen der neuen Antriebstechnologien zu verstehen, um Rückschlüsse auf sinnvolle Veränderungen im militärischen Bereich ziehen zu können. Schwerpunkt der Betrachtung sind Leistung, Motorencharakteristika und 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. Beispielfhaft soll hier auf die Vorteile der Batterietechnik und der Brennstoffzellentechnik mit ihrer geringeren Wärmesignatur sowie der geringeren Lärmentwicklung verwiesen werden.¹⁵

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

Herausforderungen der regenerativen Erzeugung von Wasserstoff als Kraftstoff

Neben den Antriebstechnologien muss die Energie- und Wasserstofferzeugung für militärische Systeme näher betrachtet werden. Die 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 in einer weiteren Untersuchung näher betrachtet werden, bevor Entscheidungen für die zukünftige Mobilität getroffen werden.

4 Ergebnisse

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.

Imperative für die Streitkräfte

Daraus ergeben sich für diesen Zeithorizont klare Imperative auch für die militärische Mobilität. Das Militär nutzt im Rahmen der Landesverteidigung für die Mobilität und

¹⁵ Das 2017.

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. Die Interoperabilität mit zivilen Akteuren, aber auch zwischen den Streitkräften der NATO muss gewährleistet bleiben.

Einsatzmöglichkeiten

Die volumetrische Energiedichte von reinem H₂ ist äußerst gering. Trotzdem lassen sich in vielen Fahrzeugen erforderliche Tankvolumina integrieren. Reines H₂ ist für einen großen Anteil des Fahrzeugparks nutzbar.

Das #GIDSresearch 2/2023 zeigt, dass reiner H₂ in ausgewählten Anwendungen des Heeres integriert werden könnte. Die Nutzung von reinem H₂ könnte einen relevanten Teil der benötigten flüssigen Kraftstoffe ersetzen. Dies würde eben auch den Bedarf an Flüssigkraftstoffen substantiell reduzieren. Es zeigen sich 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, da ab dieser Größenordnung ein zu großes Tankvolumen für den geringen zur Verfügung stehenden Platz benötigt würde. Grundsätzlich besteht bei dieser Frage zusätzlich 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. Diese Kraftstoffe ermöglichen den Beibehalt heutiger Tankvolumina, was für energieintensive Anwendungen unerlässlich sein wird.

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 H₂-betriebene Antriebssysteme.

Bei der direkten Nutzung von reinem H₂ entwickelt sich der Verbrennungsmotor als eine Alternative zum Brennstoffzellensystem. Gerade 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. Der Wasserstoffmotor stellt 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 in Verbrennungsmotoren werden im Research Paper ebenfalls näher untersucht. Dabei werden auch in der Optimierung befindliche Themen wie Wasserstoffdiffusion, Schmierverhalten von H₂ und weitere Aspekte analysiert. Bei einem Betrachtungshorizont bis 2050 sind klare Lösungen zu erwarten. Bezüglich der Brennstoffzelle bestehen Herausforderungen bei Membransystem und Kühlung. Die Leistungsdegradation des Systems bei großen

Lastwechseln im oberen Leistungsbereich bedarf weiterer Optimierungen zur Verlängerung der Lebensdauer gerade im Lkw-Bereich. Bis 2050 ist mit weiteren Verbesserungen zu rechnen.

Ersatzteilversorgung und Beschaffung sind bei Wasserstoffverbrennungsmotoren als unkritisch zu sehen, da weitgehend auf bestehende Systeme zurückgegriffen werden kann. Dies gilt auch für Reparaturen und die dafür bestehenden Strukturen. Im Fall von Brennstoffzellen bedarf es der Einführung neuer Systeme und Strukturen. Die Handhabbarkeit von H₂ 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.

Pilotprojekte

Die Überprüfung der Nutzungsmöglichkeiten von reinem H₂ hat Optionen aufgezeigt, die auch für die militärische Mobilität von Bedeutung sein können; es erscheint daher unerlässlich, dass sich die Bundeswehr an entsprechenden Pilotprojekten beteiligt oder diese selbst aufsetzt. Nur so lässt sich das Know-how aufbauen, um Entwicklungen verfolgen und beurteilen zu können. Für die Betrachtung der Antriebssysteme wurde in der Langfassung der Studie bewusst nur auf öffentlich verfügbare Daten militärischer Einheiten zurückgegriffen. Die Ansätze sind auf Basis dieser Daten erarbeitet worden. Für die konkrete Definition von Pilotprojekten ist die Durchführung von Feasibility-Studien auf Basis detaillierterer Daten von Herstellern und Systemlieferanten sowie deren Mitwirkung im Vorfeld erforderlich. 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 ca. 15 Tonnen Ansätze. Es wird empfohlen ein Pilotprojekt mit Wasserstoff-verbrennungsmotor für das Allschutz-Transport-Fahrzeug (ATF) Dingo aufzusetzen.
- Im Hafenbetrieb könnte sich die Marine an einem oder mehreren der im Research Paper 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 Nutzungsmöglichkeiten von reinem H₂ 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 H₂-Tankvolumen erforderlich und es ließen sich erhebliche militärische Vorteile durch geräuscharmen Betrieb realisieren.
- Im Fliegerhorstbetrieb der Luftwaffe sind aktuelle Entwicklungen von besonderem Interesse. Hier sollten die im Research Paper 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.

5 Ausblick

Das #GIDSresearch 2/2023 befasst sich mit der Frage der Energieautonomie der Bundeswehr nach 2050. Es ist von besonderer Bedeutung, bestehende Fahrzeuge und Waffensysteme auch kritisch auf ihre Zukunftsrelevanz zu prüfen. Im Sinne des technischen Know-how-Gewinns erscheint es dringend angezeigt, die Entwicklungen näher in den Blick zu nehmen: Auch das Militär wird seine Einsatzkriterien und Leistungsanforderungen auf den Prüfstand stellen müssen.

Die Studie hat gezeigt, dass die zukünftige Einsatzfähigkeit von H₂-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 derart 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 H₂-Volumina auch in der militärischen Logistik ein erheblich höheren Aufwand bedeuten, auch wenn sich das Militär auf die dann zur Verfügung stehende zivile H₂-Infrastruktur im Bündnisgebiet stützen könnte.

Im Kontext der Landes- und Bündnisverteidigung sehen auch die amerikanischen National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine in ihrer Studie „Powering the US Army of the Future“¹⁶ 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 größeren militärischen Logistikerfordernissen führen würde.

Die logistischen Herausforderungen könnten durch die Nutzung einer eigenen Wasserstoffherzeugung 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 Wasserstoffherzeugung liefern kann. Die komplexen Anforderungen von Streitkräften an die Erzeugungskapazitäten, an ein stabiles Stromnetz und die zur Verfügung zu stellende

¹⁶ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2021: 90.

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 reduzierten Emissionen wären die Vorteile selbst von partieller Energieautonomie elementar.

Literaturverzeichnis

- 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, zuletzt aufgerufen am 04.04.2023.
- 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, zuletzt aufgerufen am 22.06.2020.
- 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.
- BwFuhrparkService (2020): Unternehmen. Zahlen und Fakten, <https://www.bwfuhrpark.de/p/unternehmen>, zuletzt aufgerufen am 04.04.2023.
- Das, J. Narayana (2017): Fuel Cell Technologies for Defence Applications, n: K. V. Raghavan, und Purnendu Ghosh (Hrsg.): Energy Engineering. Proceedings of CAETS 2015 Convocation Pathways to Sustainability. Singapore: Springer Nature, S. 9–18.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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/Eichlseder, Helmut/Trattner, Alexander (2018): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Springer Fachmedien: Wiesbaden.
- 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.
- 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.
- 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_Rappuhn_Struck_220225.pdf, zuletzt aufgerufen am 05.04.2023.
- Struck, Simon (2023): Energieautonome Streitkräfte. Wasserstoff als Fuel für die militärische Mobilität? (#GIDSresearch 2/2023), https://gids-hamburg.de/wp-content/uploads/2023/05/GIDSresearch2023_02_Struck20230426.pdf, zuletzt aufgerufen am 02.05.2023.
- 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.