



# Die Rolle von H<sub>2</sub> im deutschen Energiesystem unter besonderer Beachtung des Verkehrssektors

---

SYSTÖK – Policy Brief

## Policy Brief

# Die Rolle von H2 im deutschen Energiesystem unter besonderer Beachtung des Verkehrssektors

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Vernetzte Energiesysteme  
Jonas Eschmann, Patrick Jochem

Institut für Verkehrsforschung  
Martin Winter, Daniil Lang, Gunnar Knitschky, Klaus Jäkel

Institut für Luftverkehr  
Klaus Lütjens

Institut für Fahrzeugkonzepte  
Samuel Hasselwander

Erstellt im Rahmen des Impulsprojektes:  
Strategische Optionen für Energieträger im Verkehr (SYSTÖK)

Die Transformation der Antriebstechnologie leistet einen integralen Beitrag für eine zukunftssichere und klimaverträgliche Wirtschaft. Das DLR-Projekt SYSTÖK analysiert diese Transformation aus techno-ökonomischer Sicht. Das DLR gibt in acht Policy Briefs einen kompakten Überblick über die aktuelle und zukünftige Rolle von wasserstoff-basierten Antrieben und geeigneter Substitute im Straßen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr. Die

Policy Briefs führen die Erkenntnisse aus zahlreichen DLR-Forschungsprojekten und weiteren wissenschaftlichen Quellen zusammen. Die Policy Briefs richten sich an die Politik, Verbände und Unternehmen. Auch der interessierten Öffentlichkeit geben sie in aller Kürze Orientierung zu aktuellen techno-ökonomischen Fragen der klimaverträglichen Mobilität von morgen.

## Inhaltsverzeichnis

Management Summary	3
1. Einleitung	4
2. Das zukünftige Wasserstoffangebot	4
3. Die Nachfrage aus dem Mobilitätssektor	7
4. Implikationen eines Wasserstoffmarktes für den Mobilitätssektor	9
5. Die Nachfrage aus anderen Sektoren	11
6. Handlungsempfehlungen	12
Literaturverzeichnis	13

## Management Summary

Grüner Wasserstoff hat das Potenzial, entscheidend zur Dekarbonisierung des Verkehrs und anderer Sektoren beizutragen. Die Angebotsmenge und die Kosten von grünem Wasserstoff werden maßgeblich durch das regionale Wind- und Solarpotenzial beeinflusst. Dies führt dazu, dass die attraktivsten Regionen für die Erzeugung von grünem Wasserstoff außerhalb Deutschlands liegen. Die Bundesregierung geht von einem Importanteil von 50 bis 70 Prozent im Jahr 2030 aus, insbesondere in Form von Wasserstoffderivaten.

In Europa wird durch die Initiative „European Hydrogen Backbone“ ein europäisches Pipelinenetzwerk aufgebaut. Es soll den Transport von Wasserstoff innerhalb Europas zu vergleichsweise geringen Kosten ermöglichen. Der Überseetransport von reinem Wasserstoff hingegen stellt eine große Herausforderung dar. Denn dafür muss der Wasserstoff energie- und kostenintensiv verflüssigt werden. Deshalb wird erwartet, dass vor allem Wasserstoffderivate wie synthetische Kohlenwasserstoffe (zum Beispiel E-Kerosin, E-Methanol) oder Ammoniak per Schiff nach Deutschland importiert werden.

Für den Einsatz von Wasserstoff im Verkehrsbe-  
reich wird entscheidend sein, zu welchen Preisen  
und Mengen er künftig angeboten werden kann.  
Dies ist noch mit hohen Unsicherheiten behaftet.  
Denn bislang existiert kein Markt für grünen  
Wasserstoff. Für einige Verkehrsträger wie die  
Schiene und die Straße stellt die Elektrifizierung  
durch Batterien oder Oberleitungen potenziell  
eine geeignete Alternative zur Nutzung von  
Wasserstoff in Brennstoffzellen dar. In der Schiff-  
fahrt ist der Einsatz von flüssigen oder gas-  
förmigen Wasserstoffderivaten aufgrund der über-  
legenen volumetrischen Energiedichte wahr-  
scheinlicher als der direkte Einsatz grünen Wasser-  
stoffs. In der Luftfahrt sind die Klimaverträglichkeit  
und das geringe Gewicht von Wasserstoff grund-  
sätzlich vorteilhaft für den effizienten Einsatz in  
Flugzeugen. Die Integration von Systemen zur  
Speicherung und Nutzung von flüssigem Wasser-

stoff unter Einhaltung der hohen Sicherheits-  
standards der Luftfahrt ist jedoch technisch  
anspruchsvoll und könnte diesen Gewichtsvorteil  
weitgehend kompensieren. Insgesamt ist zu  
erwarten, dass die nachgefragte Menge nach  
grünem Wasserstoff als Energieträger im Verkehr  
im Vergleich zu anderen Sektoren mit schlechter-  
en Substitutionsmöglichkeiten deutlich geringer  
ausfällt.

Der zukünftige Wasserstoffbedarf für Nicht-  
Mobilitätssektoren in Deutschland wird maß-  
geblich durch die Dekarbonisierung der Industrie  
und die Ausgestaltung des Strom- und Wärme-  
sektors geprägt sein. Die energieintensiven  
Industrien wie Stahl und Chemie werden dabei  
eine zentrale Rolle spielen. Wasserstoff wird als  
solcher jedoch nur in bestimmten Bereichen, wie  
der Stahlproduktion, benötigt. Für diese energie-  
intensiven Industrien kann es betriebswirtschaft-  
lich sinnvoll sein, Teile der Produktionsprozesse  
oder sogar die gesamte Fertigung in Regionen zu  
verlagern, in denen der Wasserstoff kosten-  
günstiger hergestellt wird („Renewable Pull“-  
Effekt). Der Einsatz von Wasserstoff in Gaskraft-  
werken zur Stromerzeugung birgt ein großes  
Potenzial, um die inländischen Schwankungen von  
Wind- und Solarenergie in sogenannten Dunkel-  
flauten auszugleichen. Diese Kraftwerke könnten  
als flexible Reserve dienen, wenn keine ausrei-  
chende Stromproduktion aus erneuerbaren  
Quellen zur Verfügung steht.

### Handlungsempfehlungen

- Ein wesentlicher Anteil der Wasserstoffderivate wie E-Methanol oder E-Kerosin (e-SAF) sollten bevorzugt aus kostengünstigen Ursprungsregionen direkt importiert werden. Dabei sollte vor dem Hintergrund der Resilienz auf eine Diversifizierung der Importländer geachtet und auf langfristige strategische Partnerschaften gesetzt werden.
- Reiner Wasserstoff sollte zunächst vorrangig in Sektoren eingesetzt werden, die aufgrund fehlender Alternativen besonders darauf angewiesen sind (Stahlproduktion, Stromerzeugung mit Wasserstoff-Gaskraftwerken).

## 1. Einleitung

Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen hat das Potenzial entscheidend zur Dekarbonisierung des Verkehrs und anderer Sektoren beizutragen. Dieser sogenannte grüne Wasserstoff wird über Elektrolyse mithilfe von regenerativem Strom aus Wasser-, Solar- oder Windkraft und Wasser hergestellt. Der wesentliche Vorteil von Wasserstoff ist die Vielfalt seiner Verwendungsmöglichkeiten: Er kann in gasförmiger oder verflüssigter Form direkt als Brennstoff dienen, über Brennstoffzellen Elektromotoren antreiben oder zu Treibstoffen mit einer höheren Energiedichte weiterverarbeitet werden. Ebenso können synthetisch hergestellte wasserstoffbasierte Energieträger (Derivate) als Ersatz für Wasserstoff für bisher verwendete fossile Rohstoffe in der chemischen Industrie fungieren. Hinzu kommt sein Potenzial als Speichermedium für die Energiewirtschaft. Die für die Produktion und Umwandlung benötigten Prozesstechnologien sind dem Grundsatz nach bekannt und bewährt. Neuere, noch effizientere Verfahren zur Weiterverarbeitung von Wasserstoff sind in der Entwicklung.

Im vorliegenden Policy Brief wird kompakt dargestellt, welche Rolle grüner Wasserstoff in Zukunft in den Verkehrssektoren, im Energiesystem und in der Industrie spielen kann. Dabei wird zunächst auf die ökonomisch tragfähigen Erzeugungspotenziale in Deutschland und Europa eingegangen, darüber hinaus werden Importmöglichkeiten für das Wasserstoffangebot diskutiert. Anschließend wird die Nachfrageseite mit dem Schwerpunkt Verkehr analysiert.

In direkter Konkurrenz zum Wasserstoff steht die Batterietechnologie unter Verwendung von regenerativem Strom. Batterien sind aber nicht für alle Verkehrsträger gleichermaßen als Antriebsoption geeignet. In einigen Fällen können Wasserstoff und seine Derivate Alternativen darstellen. Neben einer direkten Verwendung von Wasserstoff, zum Beispiel in Brennstoffzellen, werden verkehrsträgerspezifische Substitute wie synthetisch hergestellte Sustainable Aviation Fuels

(e-SAF)/E-Kerosin im Luftverkehr und E-Methanol oder E-Ammoniak in der Schifffahrt betrachtet. Diese Substitute zeichnen sich durch bessere, dem Einsatzzweck angemessenere Eigenschaften wie einer höheren Energiedichte oder eine einfachere Handhabung gegenüber reinem Wasserstoff aus.

Das im DLR-Projekt SYSTÖK entwickelte Konsistenzanalysetool führt die Angebots- und die Nachfrageseite von grünem Wasserstoff in den Sektoren Straßen- und Luftverkehr zusammen. Es ermöglicht datenbasiert Einschätzungen über künftige Marktpreise und absetzbare Mengen von grünem Wasserstoff im Verkehr. Voraussichtlich spielt reiner Wasserstoff im Vergleich zu seinen Derivaten und anderen Substituten im Verkehr eine geringere Rolle als in anderen Sektoren mit weniger guten Substitutionsmöglichkeiten. Es schließt sich deshalb eine Betrachtung der Nachfragepotenziale der Nicht-Verkehrssektoren an. Diese haben einen Einfluss auf die insgesamt auf dem internationalen Wasserstoffmarkt zukünftig verfügbare Menge und dessen Preis. Aus den vorliegenden Erkenntnissen werden abschließend Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger abgeleitet.

## 2. Das zukünftige Wasserstoffangebot

Das potenzielle Angebot an grünem Wasserstoff in Deutschland kann in drei Ursprungsregionen unterteilt werden. Erstens können die Erzeugungspotenziale innerhalb Deutschlands genutzt werden. Die nationale Wasserstoffstrategie sieht hierfür eine Erzeugungskapazität von 10 Gigawatt Elektrolyseleistung im Jahr 2030 vor (BMWK, 2023). Zweitens könnten Erzeugungspotenziale in europäischen Partnerländern, wie Skandinavien oder die iberische Halbinsel oder im nahen außereuropäischen Ausland, wie Nordwestafrika, Aserbaidschan oder der Türkei, aufgrund der kürzeren Transportdistanzen preislich besonders attraktiv sein (Viebahn, et al., 2022). Drittens sind bei der Entwicklung eines globalen Wasserstoffmarktes mit dem Transport von verflüssigtem Wasserstoff oder Derivaten auch weiter entfernte Ursprungsregionen wie Südamerika oder

Ozeanien relevant (Raab & Dietrich, 2023). Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die genannten potenziellen Ursprungsregionen und ordnet deren Besonderheiten im Hinblick auf einen zukünftigen Wasserstoffmarkt sowie deren Bedeutung für die Deckung der Wasserstoffnachfrage in Deutschland ein.

### 2.1. Potenziale in Deutschland

Ein wesentlicher Faktor für die Berechnung des Kostenpotenzials von grünem Wasserstoff sind neben den Investitions- und den Stromkosten die möglichen Volllaststunden (Auslastung) des Elektrolyseurs, die maßgeblich durch Sonneneinstrahlung und Windpotenzial beeinflusst werden und daher geographische Unterschiede aufweisen können. Während eine Elektrolyse-Insulanlage (ohne Netzanschluss) in Deutschland auf etwa 3.500 Volllaststunden kommt, erreicht dieselbe Anlage in Chile circa 6.000 Volllaststunden und weist dadurch ein wesentlich höheres ökonomisches Potenzial auf (Pfennig, et al., 2023).

Die Annahme, dass zukünftige Elektrolyseanlagen in Deutschland ausschließlich als Inselanlagen betrieben werden, ist allerdings aus zweierlei Gründen unwahrscheinlich. Zum einen wird politisch die Systemdienlichkeit von Elektrolyseanlagen gefordert (§ 96 Nr. 9 WindSeeG) und zum anderen lassen sich durch die Interaktion mit dem Strommarkt und anderen erneuerbaren Energieträgermärkten zusätzliche Gewinne erzielen. Ebendiese Interaktion mit dem Strommarkt ist es aber, die die Abschätzung zukünftiger Wasserstoffpreise komplex werden lässt.

Zur vereinfachten Darstellung der erwarteten Strompreisentwicklung zeigt Abbildung 1 sortierte Strompreisdauerlinien für den deutschen Strommarkt für 2023 und über modellgestützte Annahmen für 2030 und 2050. Diese Preisdauerlinien zeigen den stündlichen Strompreis (Euro/Megawattstunde) in jeder Stunde eines Jahres an. Diese Stundenpreise werden in dieser Darstellung nicht chronologisch, sondern nach Wert sortiert aufgetragen. Während im Jahr 2023 noch 300

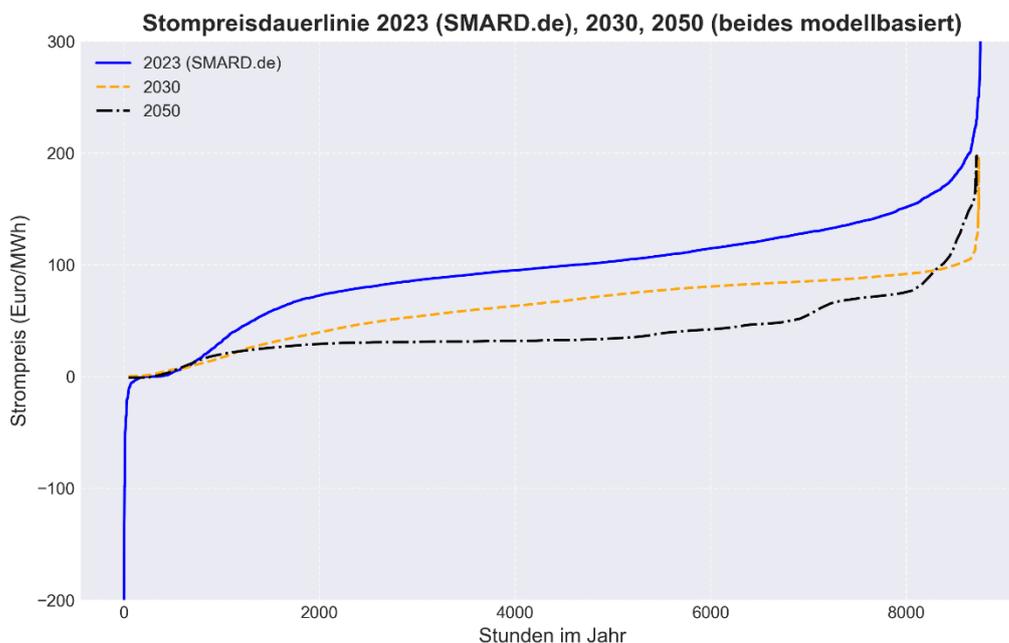


Abbildung 1: Sortierte Strompreisdauerlinien für die Jahre 2023 [SMARD.de], 2030 und 2050 (modellgestützte Annahmen DLR-VE)

Stunden mit negativen Strompreisen (durch ein Überangebot, wenn zeitlich unflexible Verbraucher auf unflexible Anbieter treffen) verzeichnet wurden, wird erwartet, dass durch die Zunahme flexibler Verbraucher wie Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen und Elektrolyseure im Jahr 2030 deutlich weniger Stunden mit negativen Preisen auftreten werden (Biber, Felder, Wieland, & Spliethoff, 2022). Auch aktuelle (geplante) regulatorische Maßnahmen tragen zu einer Verringerung von Stunden mit negativen Preisen bei. Durch die Marktprämie im Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) wird derzeit auch die erneuerbare Stromerzeugung in Stunden mit negativen Preisen gefördert (derzeit noch bis zu vier Stunden am Stück). Ab 2025 soll diese Förderung entfallen, was zu einer Senkung des Strom-Überangebots und damit zu weniger Stunden mit negativen Strompreisen führen kann (Paragraf 51 Absatz 1 EEG 2023; BMWK, 2024).

Weiterhin soll im zukünftigen deutschen Stromsystem kurzfristig Wasserstoff in Wasserstoffgaskraftwerken genutzt werden, um in sogenannten Dunkelflauten die Stromnachfrage zu erfüllen (BMWK, 2024). Die Strompreisspitzen liegen laut der modellgestützten Annahmen trotzdem unter dem heutigen Niveau, da flexible Verbraucher durch Lastverschiebung diese Spitzen ausgleichen können.

Ein zukünftiger Wasserstoffpreis, der sich in Interaktion mit dem Strommarkt bildet, ist daher derzeit schwer zu prognostizieren. Für die Abschätzung eines zukünftigen Wasserstoffangebots in diesem Policy-Brief werden, angelehnt an die nationale Wasserstoffstrategie, die marginalen Stromkosten in den ersten 4.675 Stunden (Annahme basierend auf DLR-Auswertung der nationalen Wasserstoffstrategie) der modellierten Preisdauerlinie für 2050 verwendet.

## 2.2. Zukünftiger Wasserstoffimport

Da die Angebotsmenge und die Kosten von grünem Wasserstoff maßgeblich durch das regionale Wind- und Solarpotenzial beeinflusst werden, liegen die äußerst attraktiven Wasserstoffursprungsregionen insbesondere außerhalb von Deutschland (Raab & Dietrich 2023, DLR-Berechnung) (Raab & Dietrich, 2023). Aufgrund dessen rechnet die Bundesregierung damit, dass der Anteil importierten Wasserstoffs, insbesondere in Form von Wasserstoffderivaten, bei 50 bis 70 Prozent liegen wird (BMWK, 2023). Ein zentrales Förderinstrument für den globalen Wasserstoffimport ist die Initiative H2Global. Parallel wird in Europa durch die Initiative European Hydrogen Backbone eine Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut, die ein europäisches Pipelinennetzwerk schaffen soll. Dieses Netzwerk soll den Transport von Wasserstoff innerhalb Europas bei vergleichsweise geringen Kosten ermöglichen.

Der Überseeexport von reinem Wasserstoff hingegen stellt eine große Herausforderung dar. Die Verflüssigung von Wasserstoff, die etwa ein Viertel der im Wasserstoff gespeicherten Energie zusätzlich erfordert, führt zu erheblichen Kostensteigerungen. Deshalb wird erwartet, dass vor allem Wasserstoffderivate wie synthetische Kohlenwasserstoffe (zum Beispiel SAF, Methanol) oder Ammoniak per Schiff nach Deutschland importiert werden (BMWK, 2023).

Während die Produktionskosten von Wasserstoff(derivaten) durch technoökonomische Ansätze relativ präzise berechnet werden können, herrscht bei den zukünftigen Preisen noch große Unsicherheit. Diese hängen von der Zahlungsbereitschaft auf dem globalen Markt und der Synchronisation von Angebot und Nachfrage während des Markthochlaufs sowie politischer Maßnahmen ab. Erste Untersuchungen zu einem zukünftigen Wasserstoffmarkt wurden mit Beteiligung des DLR im Rahmen der Projekte MENA-Fuels und NoRaLock-H2 durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Projekte fließen in die Annahmen des Konsistenztools zur Bewertung des globalen Wasserstoffangebots ein.

### 3. Die Nachfrage aus dem Mobilitätssektor

Für die Dekarbonisierung des **Straßenverkehrs** stehen bereits heute zwei Technologien am Markt zur Verfügung: Elektroantriebe, deren Stromzufuhr direkt aus Batterien oder indirekt aus Wasserstoff-Brennstoffzellen erfolgt.

Im Pkw-Sektor stellen batterieelektrische Fahrzeuge durch ihre hohe Energieeffizienz die vielversprechendste Antriebsoption zur Dekarbonisierung der Fahrzeugflotte dar (Hänggi et al.). Zwar sind bereits zwei Serienmodelle mit Brennstoffzellen auf dem deutschen Fahrzeugmarkt erhältlich, demgegenüber steht aber ein Angebot von deutlich mehr als 200 batterieelektrischen Fahrzeugmodellen (e-mobil BW, 2023). Im Vergleich zu konventionellen Benzin- und Dieselmotoren liegt der Kaufpreis für die neuen Antriebstechnologien noch immer höher. Die Anschaffungskosten von batterieelektrischen Fahrzeugen fallen allerdings geringer aus als die von Brennstoffzellenfahrzeugen, sodass selbst bei zukünftig optimistischen Wasserstoffpreisen batterieelektrische Fahrzeuge die kostengünstigere Antriebsoption darstellen. Daher konzentriert sich das Marktpotenzial nach aktuellen Szenarioanalysen vorwiegend auf rein batterieelektrische Pkw. Sollte es jedoch zu einem deutlichen Rückgang der Brennstoffzellenkosten kommen, könnte auch im Pkw-Sektor für hohe Reichweitenanforderungen ein begrenztes Marktpotenzial für Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge entstehen (e-mobil BW, 2023).

Im Lkw-Sektor spielen die Investitionskosten, der Wirkungsgrad und die künftigen Preise von Wasserstoff und Ladestrom für die Kaufentscheidung eine entscheidende Rolle. Aktuell liegen die Anschaffungskosten sowohl für batterieelektrische als auch für Brennstoffzellen-Lkw gegenüber konventionellen Diesel-Lkw noch um den Faktor 2 bis 3 höher (Affeld, 2024). Brennstoffzellen-Lkw sind 10 bis 12 Prozent energieeffizienter als vergleichbare Diesel-Lkw, während batterieelektrische Lkw etwa 60 Prozent effizienter sind (Basma und Rodríguez, 2022).

Bestandsfahrzeuge können auf beide Technologien umgerüstet werden. Der gegenüber der Batterieelektrik geringere Wirkungsgrad von Brennstoffzellenfahrzeugen könnte dann kompensiert werden, wenn günstige Wasserstoff-Importe von besonders geeigneten Standorten mit preiswerter Sonnen- oder Windenergie in ausreichender Menge verfügbar wären. Zurzeit ist nur nicht regenerativ erzeugter („grauer“) Wasserstoff an Tankstellen verfügbar. Dessen Preis liegt zwischen 8 und 12 Euro pro Kilogramm (Stand Juli 2024). Erforderlich für das Erreichen einer Kostenparität mit dieselbetriebenen Fahrzeugen wären Preise von 3 bis 5 Euro pro Kilogramm Wasserstoff (Basma und Rodríguez, 2022), Daimler Truck nennt Bereiche ab 4,50 Euro „wirtschaftlich interessant“ (Schmidt, 2024). Die Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen gegenüber konventionellen Diesel-Lkw scheint – auch vor dem Hintergrund einer künftig steigenden Abgabelast für Diesel – erreichbar. Unklarer ist die Studienlage, wie Wasserstoff-Lkw hinsichtlich ihrer Gesamtkosten (Total Costs of Ownership) gegenüber batterieelektrischen Lkw abschneiden. Wichtiger Einflussfaktor auf diesen Kostenvergleich sind die künftigen Strompreise zum Laden der batterieelektrischen Lkw.

Insgesamt sind batteriebetriebene Lkw im Betrieb kostengünstiger, während Brennstoffzellen-Lkw bei längeren Fahrtstrecken durch höhere Reichweiten Vorteile haben. In den internationalen Märkten mit langen Transportdistanzen wird mittelfristig (2030/2035) eine Koexistenz beider Antriebssysteme erwartet (Plötz, 2022).

Rund 62 Prozent des deutschen **Schiennetzes** ist bereits heute elektrifiziert. Umfangreiche Investitionen in den Ausbau des Schienen- und Oberleitungsnetzes sollen den elektrifizierten Anteil bis zum Jahr 2030 auf 75 Prozent erhöhen. Auf diesen Strecken erbringt der Fernverkehr mit 98 Prozent annähernd seine vollständige Verkehrsleistung; im Nahverkehr beträgt die elektrische Betriebsleistung nur 64 Prozent. Allerdings sind Strecken ohne Elektrifizierung im Allgemeinen auch wenig frequentiert. Für ihre lokal emissionsfreie Bedienung bieten sich

batterieelektrische oder wasserstoffbasierte Antriebstechnologien an.

Neben der Energieumwandlung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle sind auch Wasserstoffverbrennungsmotoren am Markt verfügbar. Darüber hinaus stehen die wasserstoffbasierten Antriebskonzepte im technologischen Wettbewerb mit batterieelektrischen und solchen Antrieben, die mehrere Technologien kombinieren. Sowohl batterieelektrische als auch brennstoffzellenhybride Triebzüge weisen einen hohen Technologiereifegrad auf und kommen auf einer Vielzahl von Strecken zum Einsatz (Pagenkopf et al., 2020). Alle Antriebskonfigurationen bieten unterschiedliche betriebliche Vor- und Nachteile. Eine wichtige Rolle spielen dabei unter anderem Leistung, Reichweite oder Lade- beziehungsweise Tankdauer. Batterieelektrische Fahrzeuge können im direkten Vergleich zwar keine Reichweiten wasserstoffbetriebener Fahrzeuge erreichen, da die meisten der mit Dieselfahrzeugen betriebenen Strecken jedoch nicht länger als 60 Kilometer lang sind, können sie dennoch ein breites Spektrum betrieblicher Anforderungen erfüllen (TU Berlin, 2022). Auch sind infrastrukturelle Anpassungen, beispielsweise durch „Oberleitungsinseln“, im Vergleich zu wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen finanziell weniger umfangreich. Dies hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Antriebssysteme (Pagenkopf et al., 2020; TU Berlin, 2022).

In den aktuellen SPNV-Vergaben dominieren batterieelektrische Antriebsvarianten gegenüber Brennstoffzellenhybriden. Für den Großteil der neu zu verhandelnden Verkehrsverträgen ist die zukünftige Antriebsart noch nicht entschieden. Eine genaue Benennung des Marktpotenzials zum aktuellen Zeitpunkt ist deshalb nicht möglich. Abhängig von den Technologieentscheidungen der Aufgabenträger im SPNV ergibt eine DLR-Abschätzung bis 2038 ein Einsatzpotenzial von 1.700 bis 2.500 Zügen mit alternativen Antrieben (Pagenkopf et al., 2020). Dabei ist davon auszugehen, dass bestehende Elektrifizierungslücken vor allem durch batterieelektrische Fahrzeuge geschlossen werden. Dies schränkt die

Wasserstoffnachfrage im Schienenverkehr erheblich ein.

Im **Luftverkehr** kann Wasserstoff langfristig ein attraktiver Energieträger besonders für den Regional- und Kurzstreckenbereich werden (DLR 2024). Dies folgt aus der geringen Klimawirkung seiner Verbrennungsprodukte und seiner hohen gewichtsbezogenen Energiedichte. Die Integration von Systemen zur Speicherung und Nutzung von flüssigem Wasserstoff unter Einhaltung der hohen Sicherheitsstandards der Luftfahrt ist jedoch technisch anspruchsvoll und könnte diesen Gewichtsvorteil weitgehend kompensieren. Nachteilig ist zudem die niedrige volumenbezogene Energiedichte selbst von verflüssigtem Wasserstoff, wodurch in den Flugzeugen und auf den Flughäfen größere und kryogene Tanks benötigt werden. Dadurch sind die technischen und finanziellen Herausforderungen für Flugzeughersteller, Airlines und Flughafenbetreiber hoch und ermöglichen den Einsatz von Wasserstoff im Luftverkehr erst langfristig nach entsprechender Technologie- und Flugzeugentwicklung.

Als geeignete Dekarbonisierungsstrategie des Luftverkehrs wird neben der direkten Verwendung von Wasserstoff als Energieträger in Gasturbinentriebwerken und Brennstoffzellen insbesondere aus Wasserstoff synthetisch hergestelltes E-Kerosin gesehen (vgl. ATAG 2021). Wie alle nachhaltigen Kraftstoffe in der Luftfahrt (Sustainable Aviation Fuels, SAF) besitzt E-Kerosin (e-SAF) zwei entscheidende Vorteile:

es ist erstens weitestgehend kompatibel mit der bestehenden Flughafeninfrastruktur sowie der bestehenden Flugzeugflotte und kann zweitens als nachhaltiger Drop-in-Kraftstoff sukzessive bis zur vollständigen Deckung der Kerosinnachfrage in den Kraftstoffmarkt eingeführt werden (vgl. Mitzel et al. 2022). Allerdings ist derzeit noch unklar, zu welchen Kosten der für die Kraftstoffsynthese von E-Kerosin benötigte Kohlenstoff bereitgestellt werden kann. Aus organischen Abfällen und Energiepflanzen hergestelltes SAF kann durch die begrenzte Verfügbarkeit geeigneter Reststoffe und Anbauflächen für eine

globale Lösung bei weiterwachsendem Luftverkehr nur einen begrenzten Beitrag leisten.

Der Einsatz von Wasserstoff in der **Schifffahrt** war lange Zeit vor allem auf militärische Anwendungen, wie etwa U-Boote mit Brennstoffzellensystemen, beschränkt. Mit dem „Green Deal“ der EU-Kommission wurde die Schifffahrt seit 2024 in das europäische Emissionshandlungssystem integriert. Über die im „Green Deal“ enthaltene „FuelEU Maritime“-Verordnung soll die Branche bis zum Jahr 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 Prozent im Vergleich zu 2020 erreichen, insbesondere durch den Einsatz klimaneutraler Kraftstoffe.

Grüner Wasserstoff rückt somit auch als potenzieller Schiffskraftstoff zunehmend in den Fokus. Ähnlich wie in der Luftfahrt erfordert jedoch die geringe volumetrische Energiedichte von Wasserstoff eine aufwendige Verflüssigung und Speicherung in schweren Flüssigwasserstofftanks. Dies führt dazu, dass die gravimetrische Energiedichte des Wasserstoffsystems erheblich sinkt, sobald das nötige kryogene Tanksystem berücksichtigt wird. Besonders in der Hochseeschifffahrt zur Überbrückung großer Distanzen könnte die reine Wasserstofftechnologie daher an technoökonomische Grenzen stoßen.“

Wasserstoffderivate wie E-Methanol, E-Diesel oder Ammoniak bieten hier Vorteile: sie haben eine höhere volumetrische Energiedichte als reiner Wasserstoff und können bei Umgebungstemperatur gelagert werden, wodurch das schwere kryogene Tanksystem entfällt. Reedereien wie Maersk setzen daher zunehmend auf Dual-Fuel-Motoren, die sowohl herkömmlichen Schiffsdiesel als auch Methanol verbrennen können. Die Bestellungen von solchen methanolbetriebenen Schiffen steigt kontinuierlich an und lag im Juni 2024 auf einem neuen Höchststand von 225 Schiffen (BNEF, 2024).

Dennoch stellt die langfristige Sicherung einer nachhaltigen Kohlenstoffquelle für die Produktion von E-Methanol eine Herausforderung dar. Dies könnte kohlenstofffreie Kraftstoffe wie Ammoniak

oder reinen Wasserstoff, aber auch Konzepte zur Kohlenstoffabscheidung an Bord mit dem Ziel der Wiederverwendung in den Mittelpunkt der zukünftigen Entwicklung rücken (Eschmann, Zink, & Pfennig, 2022).

In der Binnenschifffahrt, die sich auf kleinere Schiffe sowie kürzere Strecken auf Flüssen und Kanälen beschränkt, kann der Einsatz von wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen realistischer sein, da hier der Energiebedarf deutlich geringer ist (Kazemi Esfeh, et al., 2022).

#### 4. Implikationen eines Wasserstoffmarktes für den Mobilitätssektor

Zur Einschätzung der möglichen künftigen Rolle von grünem Wasserstoff als Energieträger im Verkehr wurde ein Tool entwickelt, welches auf dem klassischen Marktmodell aus preisabhängigen Angebots- und Nachfragekurven aufbaut (DLR-Konsistenzanalysetool). Die Ergebnisse liefern Informationen für Investitionsentscheidungen von Unternehmen auf dem Wasserstoffmarkt der Zukunft und erleichtern die Ausgestaltung politischer Rahmenbedingungen für diese Märkte. Für den Aufbau des Tools wurden im DLR entwickelte Modelle und erarbeitete Modellergebnisse mit dem Zeithorizont 2050 und dem Bezugsraum Deutschland verwendet. Zur Bestimmung der Wasserstoffnachfrage des Straßenverkehrs wurden preisabhängige Simulationen mit dem DLR-Modell VECTOR21 (<https://vector21.de/>) auf Grundlage der Szenarien der Begleitforschung Energiewende im Verkehr (BEniVer) gerechnet (Aigner et al., 2023). Die Nachfrage des Luftverkehrs nach Wasserstoff wurde mit Ergebnissen des EXACT-Basisszenarios 2050 bestimmt (Grimme & Braun, 2022). Das Wasserstoffangebot basiert auf Daten aus dem BEniVer-Wasserstoff-Szenario (Aigner et al., 2023).

Mit dem Konsistenzanalysetool lassen sich die durch die Sektoren Straßenverkehr (Pkw, Lkw) und Luftverkehr nachgefragten Mengen an regenerativ erzeugtem Wasserstoff bei einem

gegebenen Angebot berechnen und analysieren. Diese beziehen sich stets auf reinen Wasserstoff (in gasförmiger oder verflüssigter Form) als Energieträger, für zum Beispiel Brennstoffzellen. Etwaige Wasserstoff-Derivate für Antriebe wie E-Kerosin, E-Methanol oder Ammoniak sind nicht explizit im Tool abgebildet. Denkbare sektorale Nachfragen aus dem Schienen- und Schiffsverkehr werden aufgrund sehr geringer erwarteter Mengen und einer fehlenden Datenbasis nicht berücksichtigt; sie können aber prinzipiell ebenfalls integriert werden.

Im DLR-Konsistenztool werden über den Schnittpunkt von Angebot und (horizontal aggregierter) Gesamtnachfrage über die Sektoren Marktpreise und -mengen für grünen Wasserstoff im Verkehrssektor des Jahres 2050 ermittelt. Hierdurch können Vorhersagen über absetzbare Mengen an Wasserstoff und damit Gewinnpotenziale abgeleitet werden. Abbildung 2 zeigt diese Struktur und die Ergebnisse exemplarisch auf.

Deutlich wird, dass im Preisband 6 bis 8 Euro pro Kilogramm Wasserstoff kaum Perspektiven für die Verwendung von Wasserstoff als Energieträger für die betrachteten Teilmärkte bestehen; ein Nischenmarkt für Fahrzeuge mit besonderem Einsatzprofil (zum Beispiel permanente Einsatzbereitschaft) erscheint plausibel. Unter den

zugrunde gelegten Annahmen der Analyse ist zwischen 4 und 6 Euro eine Ausweitung der Nachfrage zu erwarten, die bei einem Angebotspreis von 4 Euro zu relevanten Nachfragemengen von mehr als 2 Millionen Tonnen Wasserstoff pro Jahr führt. Das deckt sich mit Aussagen aus der Lkw-Branche, die 3 bis 5 Euro als wettbewerbsfähig gegenüber Substituten ansehen.

Entscheidend für Einsatz im Verkehrsbereich wird also sein, zu welchen Preisen Wasserstoff künftig in großem Maßstab angeboten werden kann. Dies ist noch mit hohen Unsicherheiten behaftet, da bislang noch kein Markt für grünen Wasserstoff existiert. Für einige Verkehrsträger wie die Schiene und die Straße stellt die Elektrifizierung durch Batterien oder Oberleitungen potenziell eine geeignete Alternative zu Wasserstoff dar. Bei anderen Sektoren, insbesondere in der Luft- und Schifffahrt, ist der Einsatz von flüssigen oder gasförmigen Wasserstoffderivaten aufgrund der überlegenen gravimetrischen Energiedichte wahrscheinlicher als der direkte Einsatz grünen Wasserstoffs. Insgesamt ist zu erwarten, dass die nachgefragte Menge nach grünem Wasserstoff als Energieträger im Verkehr im Vergleich zur Wasserstoffnachfrage anderer (Nichtmobilitäts-)Sektoren mit schlechteren Substitutionsmöglichkeiten deutlich geringer ausfällt.

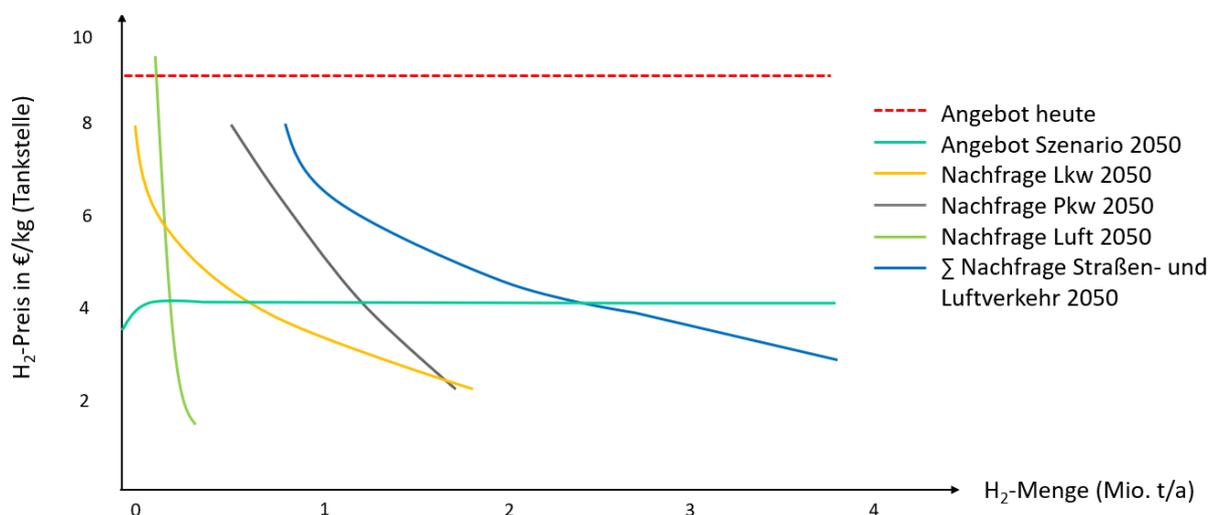


Abbildung 2: Wasserstoff-Angebot und Wasserstoff-Nachfrage im deutschen Straßen- und Luftverkehr 2050 (Berechnung DLR)

## 5. Die Nachfrage aus anderen Sektoren

Der zukünftige Wasserstoffbedarf in Deutschland für Nicht-Mobilitätssektoren wird maßgeblich durch die Dekarbonisierung der Industrie und die Ausgestaltung des Strom- und Wärmesektors geprägt sein. Besonders die energieintensiven Industrien wie Stahl und Chemie werden dabei eine zentrale Rolle spielen. Allerdings ist zu beachten, dass reiner Wasserstoff nur in bestimmten Bereichen, wie der **Stahlproduktion**, benötigt wird. Hier wird Wasserstoff vor allem für das Verfahren der Direkten Reduktion von Eisenerz (DRI) verwendet, um die konventionelle Kohle-basierte Stahlerzeugung zu ersetzen (Deutscher Bundestag, 2023).

Im **Chemiesektor** wird grauer Wasserstoff derzeit zur Produktion von Ammoniak und Methanol eingesetzt (stoffliche Nutzung, Prozesswärme wird dem Wärmesektor zugeordnet). Es wird erwartet, dass die Nachfrage nach grünem Ammoniak zukünftig durch Direktimporte gedeckt werden kann, insbesondere weil der Transport von Ammoniak oder Methanol aufgrund der höheren volumetrischen Energiedichte deutlich einfacher ist als von reinem Wasserstoff.

Ein zentraler Aspekt bei der Bestimmung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs der Industrie ist aber auch der sogenannte „**Renewable Pull**“-Effekt. Damit ist gemeint, dass es zukünftig, insbesondere für energieintensive Industrien betriebswirtschaftlich sinnvoll sein kann, Teile der Produktionsprozesse oder sogar die gesamte Fertigung in Regionen zu verlagern, in denen der

Wasserstoff kostengünstiger hergestellt wird, da der Import von Wasserstoff durch den Transport oft deutlich teurer ist als am Wasserstoff-Produktionsort (Samadi, Fischer, & Lechtenbömer, 2023). Vor dem Hintergrund der volkswirtschaftlichen Resilienz ist politisch abzuwägen, in welchem Umfang und in welcher Höhe Subventionen bereitgestellt werden sollen, um die Auswirkungen des „Renewable Pull“ Effektes einzudämmen.

Der **Wärmesektor** macht derzeit mehr als die Hälfte des Endenergiebedarfs in Deutschland aus und ist zentral für die Erreichung der Klimaziele. Eine einheitliche Lösung zur Dekarbonisierung existiert jedoch nicht. Laut einem Grundlagenpapier des Nationalen Wasserstoffrats (NWR) sind mehrere Technologien notwendig, darunter Wärmepumpen, Fernwärme durch Kraftwärmekopplung in Wasserstoffgaskraftwerken und der direkte Einsatz von Wasserstoff (NWR, 2024). Dabei muss in verschiedene Temperaturbereiche unterschieden werden. Beispielsweise werden in der Prozesswärme (zum Beispiel Chemieindustrie und Glasherstellung) besonders hohe Temperaturen (über 1.000°C) benötigt. Hier kann Wasserstoff bis zu einem Anteil von 40 Prozent kostenoptimal sein (NWR, 2024). Der zukünftige Wasserstoffbedarf in der dezentralen Raumwärme wird stark von der kommunalen Wärmeplanung abhängen. Bis 2030 wird der Einsatz von Wasserstoff im Wärmesektor eher gering bleiben (0,15 bis 0,3 Millionen Tonnen pro Jahr), aber bis 2045 könnte die Nachfrage auf 3,75 bis 15 Millionen Tonnen pro Jahr steigen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Abschätzungen des Wasserstoffbedarfs der Nicht-Mobilitätssektoren des nationalen Wasserstoffrats in Millionen Tonnen (Quelle: NWR, 2024)

Sektor/Jahr	2030	2040 – 2050
Stahlindustrie	0,6 – 0,9	2,2
Chemieindustrie	1,1	6,8
Weitere Prozessindustrien	0,03 – 0,1	0
Wärmesektor	5 – 10	3,8 – 15,0
Energieversorgung	0 – 20	8,7

Der Einsatz von Wasserstoff in Wasserstoff-Gaskraftwerken zur **Stromerzeugung** birgt ein großes Potenzial, um die Schwankungen von Wind- und Solarenergie, auszugleichen. Diese Kraftwerke könnten als flexible Reserve dienen, wenn keine ausreichende Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung steht. Der zukünftige Bedarf an Wasserstoff für diese Verwendung wird auf etwa 1,5 bis 3 Millionen Tonnen pro Jahr geschätzt, wobei die genaue Menge stark von der Entwicklung alternativer Speichertechnologien (wie Batteriespeicher oder Pumpspeicherwerke) und dem Ausbau flexibler Stromverbraucher abhängt.

## 6. Handlungsempfehlungen

Zur Optimierung des Einsatzes von Wasserstoff und seinen Derivaten in Deutschland empfiehlt es sich, die dargelegten physikalischen und ökonomischen Zusammenhänge zwischen Herstellung und Transport dieser Energieträger gezielt zu berücksichtigen. Wasserstoffderivate wie E-Methanol oder E-Kerosin (e-SAF) sollten bevorzugt aus kostengünstigen Ursprungsregionen direkt importiert werden, da dies aufgrund günstigerer Produktions- und Transportkosten im Vergleich zum Import von reinem Wasserstoff und der anschließenden Synthese in Deutschland wirtschaftlich vorteilhafter ist. Während Forschungsanlagen wie die DLR Technologieplattform Power-to-Liquid-Kraftstoffe in Leuna einen großen Beitrag zur Skalierung der Technologie auf einen industriellen Maßstab leisten können, sind kommerzielle Synthesenanlagen für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen in Deutschland aufgrund der hohen Kosten für den benötigten reinen Wasserstoff weniger wirtschaftlich.

Aus Resilienzgründen kann es politisch sinnvoll sein, Kohlenwasserstoffe einzulagern, um damit in Notfallsituationen kritische Infrastruktur betreiben zu können.

Da reiner Wasserstoff in Deutschland zunächst vorrangig in Sektoren eingesetzt werden wird, die aufgrund fehlender Alternativen besonders darauf angewiesen sind – etwa in der Stahlproduktion oder in Wasserstoff-Gaskraftwerken, bleibt ungewiss, ob Wasserstoff zu attraktiven Preisen für den Verkehrssektor zur Verfügung stehen wird. Eine Wasserstoffstrategie sollte daher darauf abzielen, die inländischen Ressourcen an reinem Wasserstoff auf Sektoren mit dem höchsten Mehrwert zu konzentrieren und für die großflächige Nutzung synthetischer Kraftstoffe den Import von Wasserstoffderivaten zu priorisieren.

## Literaturverzeichnis

Aigner, M., Aliabadi, D. E., Amri-Henkel, A., Anderson, J., Becker, L., Bergfeld, M., Brand-Daniels, U., Braun-Unkhoff, M., Brinkop, S., Brosowski, A., Deniz, Ö., Dietrich, R.-U., Eisenmann, C., Ennen, D., Eschmann, J., Frieske, B., Grimme, W., Haas, S., Hasselwander, S., ... Zeck, B. (2023): Roadmap für strombasierte Kraftstoffe. Zenodo. doi: [10.5281/zenodo.10208039](https://doi.org/10.5281/zenodo.10208039)

Basma, D., Rodríguez F. (2022): The role of hydrogen in decarbonizing the heavy-duty vehicle sector in Europe. [https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/09/Webinar\\_FCET\\_TCO.pdf](https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/09/Webinar_FCET_TCO.pdf)

Biber, A., Felder, M., Wieland, C., & Spliethoff, H. (2022): Negative price spiral caused by renewables? Electricity price prediction on the German market for 2030. The Electricity Journal. doi: [10.1016/j.tej.2022.107188](https://doi.org/10.1016/j.tej.2022.107188)

BMWK (2023): Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Downloads/Fortschreibung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Downloads/Fortschreibung.pdf?__blob=publicationFile&v=4)

BMWK (2024): Kraftwerkssicherheitsgesetz – Ausschreibungen für steuerbare Kapazitäten für einen Beitrag zur Versorgungssicherheit. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/kraftwerkssicherheitsgesetz-steuerbare-kapazitaet-en-versorgungssicherheit.pdf>

BMWK (2024): Wachstumsinitiative – neue wirtschaftliche Dynamik für Deutschland. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/976020/2297962/ab6633b012bf78494426012fd616e828/2024-07-08-wachstumsinitiative-data.pdf>

Deutscher Bundestag (2023): Zukünftiger Wasserstoffbedarf in einzelnen Sektoren. Berlin: Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages. <https://www.bundestag.de/resource/blob/940168/7c5b943fdb5e9626ccc444a5bf30ff7b/WD-5-014-23-pdf-data.pdf>

DNV (2024): Maritime Forecast to 2050. Det Norske Veritas. <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast/>

e-mobil BW (2023): Strukturstudie BWe mobil 2023. Transformation der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie in Baden-Württemberg durch Elektrifizierung, Digitalisierung und Automatisierung. Stuttgart. [https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publicationen/Studien/e-mobil\\_BW\\_Strukturstudie\\_BW\\_2023.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publicationen/Studien/e-mobil_BW_Strukturstudie_BW_2023.pdf)

Eschmann, J., Zink, C., & Pfennig, M. (2022): Closing Carbon Cycles on the High Seas. 14th International Conference on Applied Energy. Bochum. Von <https://elib.dlr.de/187362/>

Grimme, W., Braun, M. (2022): Estimation of potential hydrogen demand and CO2 mitigation in global passenger air transport by the year 2050. Transportation Research Procedia, Volume 65, 2022, Pages 24-33, doi: [10.1016/j.trpro.2022.11.004](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.11.004).

Hänggi, S.; Elbert, P.; Bütler, T.; Cabalzar, U.; Teske, S.; Bach, C.; Onder, C. (2019): A review of synthetic fuels for passenger vehicles. In: Energy Reports, 5, S. 555–569. doi: [10.1016/j.egy.2019.04.007](https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.04.007).

Kazemi Esfeh, S., Monnerie, N., Mascher, S., Baumstark, D., Kriechbaumer, D., Neumann, N., Ansar, S. A. (2022): Zukünftige maritime Treibstoffe und deren mögliche Importkonzepte. DLR e.V. <https://elib.dlr.de/186857/>

NWR (2024): Update 2024: Treibhausgasemissionen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland. Nationaler Wasserstoffrat. [https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2024/2024-05-03\\_NWR-Grundlagenpapier\\_Update\\_2024\\_Wasserstoffbedarfe.pdf](https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2024/2024-05-03_NWR-Grundlagenpapier_Update_2024_Wasserstoffbedarfe.pdf)

Pfennig, M., Böttger, D., Häcker, B., Geiger, D., Zink, C., Bisevic, A., & Jansen, L. (2023): Global GIS-based potential analysis and cost assessment of Power-to-X fuels in 2050. Applied Energy. doi: [10.1016/j.apenergy.2023.121289](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121289)

Plötz, P. (2022): Hydrogen technology is unlikely to play a major role in sustainable road transport. Nat Electron 5, 8–10 (2022). doi: [10.1038/s41928-021-00706-6](https://doi.org/10.1038/s41928-021-00706-6)

Raab, M., & Dietrich, R.-U. (2023): Techno-economic assessment of different aviation fuel supply pathways including LH2 and LCH4 and the influence of the carbon source. Energy Conversion and Management. doi: [10.1016/j.enconman.2023.117483](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117483)

Samadi, S., Fischer, A., & Lechtenböhmer, S. (2023): The renewables pull effect: How regional differences in renewable energy costs could influence where industrial production is located in the future. Energy Research & Social Science(104). doi: [10.1016/j.erss.2023.103257](https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103257)

Schmidt, B. (2024): Daimler Truck übt an einer Wasserstofftankstelle. <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/elektromobilitaet/daimler-will-diesel-durch-tiefkuehlen-wasserstoff-ersetzen-19528214.html>

Viebahn, P., Kern, J., Horst, J., Rosenstiel, A., Terrapon-Pfaff, J., Dore, L., Klann, U. (2022). Ergebnisbericht des Projekts MENA-Fuels. [https://wupperinst.org/fileadmin/redaktion/downloads/projects/MENA-Fuels\\_Teilbericht\\_14\\_Synthesebericht\\_de\\_v3.pdf](https://wupperinst.org/fileadmin/redaktion/downloads/projects/MENA-Fuels_Teilbericht_14_Synthesebericht_de_v3.pdf)

## Das DLR im Überblick

Das DLR ist das deutsche Forschungs- und Technologiezentrum für Luft- und Raumfahrt. In seinen Kerngebieten entwickelt das DLR Technologien für Luft- und Raumfahrt, Energie und Verkehr, sowie Sicherheits- und Verteidigungsforschung. Ein breites Spektrum an Ergebnissen und Innovationen bringen Nutzen für Industrie und Wirtschaft, Behörden und Verwaltung sowie für öffentliche Stakeholder. Durch einen intensiven Wissensaustausch und gezielten Technologietransfer stellt sich das DLR seiner Verantwortung gegenüber der Gesellschaft. Dazu wird es mit Mitteln des Bundes gefördert. Die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR ist im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zwei DLR Projektträger arbeiten als Managementeinrichtungen für Forschungs- und Industrieförderung.

Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie. Das DLR nutzt das Know-how seiner 51 Institute und Einrichtungen, um Lösungen für die daraus resultierenden Herausforderungen zu entwickeln. Unsere 11.000 Mitarbeitenden haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall. Wir entwickeln Technologien für eine nachhaltige Zukunft und tragen durch den Technologietransfer dazu bei, den Wissens- und Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken.

## Impressum

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.  
Institut für Verkehrsforschung  
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin  
[www.dlr.de/vf](http://www.dlr.de/vf)

Autoren:

Jonas Eschmann, Patrick Jochem  
Institut für Vernetzte Energiesysteme  
Carl-von-Ossietzky-Straße 15, 26129 Oldenburg

Martin Winter, Daniil Lang,  
Gunnar Knitschky, Klaus Jäkel  
Institut für Verkehrsforschung  
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin

Klaus Lütjens  
Institut für Luftverkehr  
Linder Höhe, 51147 Köln

Samuel Hasselwander  
Institut für Fahrzeugkonzepte  
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

Stand: Dezember 2024  
Veröffentlicht 2025

## DLR.de

Bilder DLR (CC-BY 3.0),  
sofern nicht anders angegeben

<https://elib.dlr.de/215869/>



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt