

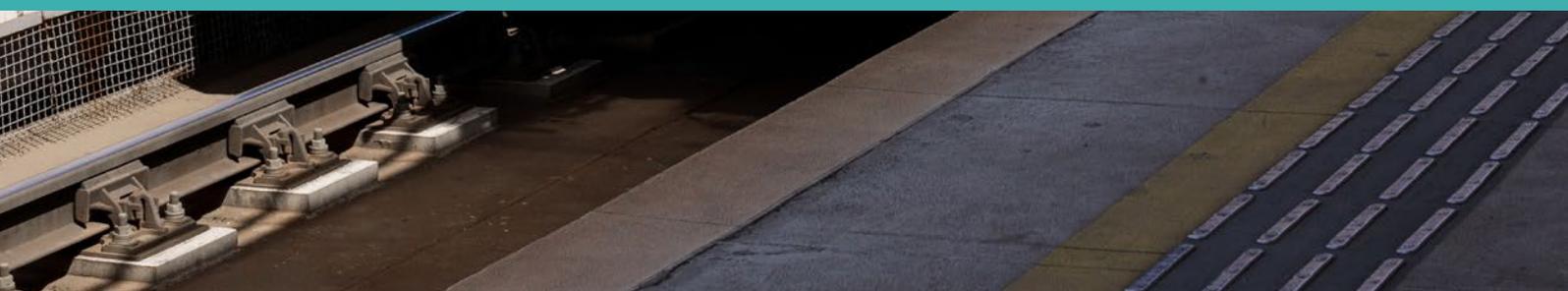
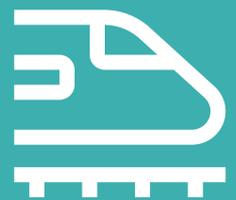


WASSERSTOFF
KOMPASS



MOBILITÄT UND TRANSPORT

Schienenverkehr





WASSERSTOFF KOMPASS

ÜBERGREIFENDE ASPEKTE

- Regulatorischer Rahmen
- Zielgerichteter H₂-Einsatz
- Fachkräftesicherung
- Akzeptanz und Sicherheit
- Klima und Ressourcen

BEREITSTELLUNG

- H₂-Erzeugung
- H₂-Import
- Infrastruktur

INDUSTRIEZWEIGE

- Stahlindustrie
- Chemische Industrie
- Raffinerien
- Zementindustrie
- Glasindustrie

MOBILITÄT UND TRANSPORT

- Kraftfahrzeuge
- Schifffahrt
- Luftverkehr

Schienenverkehr

ENERGIEVERSORGUNG

- Gebäudewärme
- Prozesswärme
- Stromsystem

GLOSSAR

1 Generelle Aspekte des Schienenverkehrs

- Alternativen zu Dieselszügen
- Ökonomische Aspekte
- Versorgungssicherheit
- Endenergiebedarf
- Treibhausgasemissionen
- Wasserstoffbedarfe

6 Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- Kapazitätserhöhung von Drucktankssystemen
- Testung der Betankung von Zügen mit LOHC
- Testung mobiler Tankstellenkonzepte
- Konzipierung von Tankstellen für mehrere Verkehrsträger
- Optimierung von Instandhaltungskosten durch verbesserte Lebensdauer von Brennstoffzellen
- Betriebsoptimierung von HEMU aus energetischer Sicht

7 Handlungsoptionen

- Brennstoffzellentriebzüge
- Batterieelektrische Triebzüge

14 Literatur

Schienenverkehr

- › Der Schienenverkehr hat seinen Endenergieverbrauch und damit verbunden seine Treibhausgasemissionen über die Jahre bereits stark verringert.
- › In Deutschland sind bereits mehr als 60 Prozent des Schienennetzes mit Oberleitungen elektrifiziert, auf denen 90 Prozent der Verkehrsleistung erbracht werden. Dieser Anteil soll weiter erhöht werden.
- › Insbesondere Strecken des Personennahverkehrs (circa 19 Prozent), aber auch des Güterverkehrs (circa 3 Prozent) werden aktuell mit Dieselszügen befahren. Hier kann Wasserstoff eine (Nischen-)Rolle bei der Defossilisierung spielen.

Generelle Aspekte des Schienenverkehrs

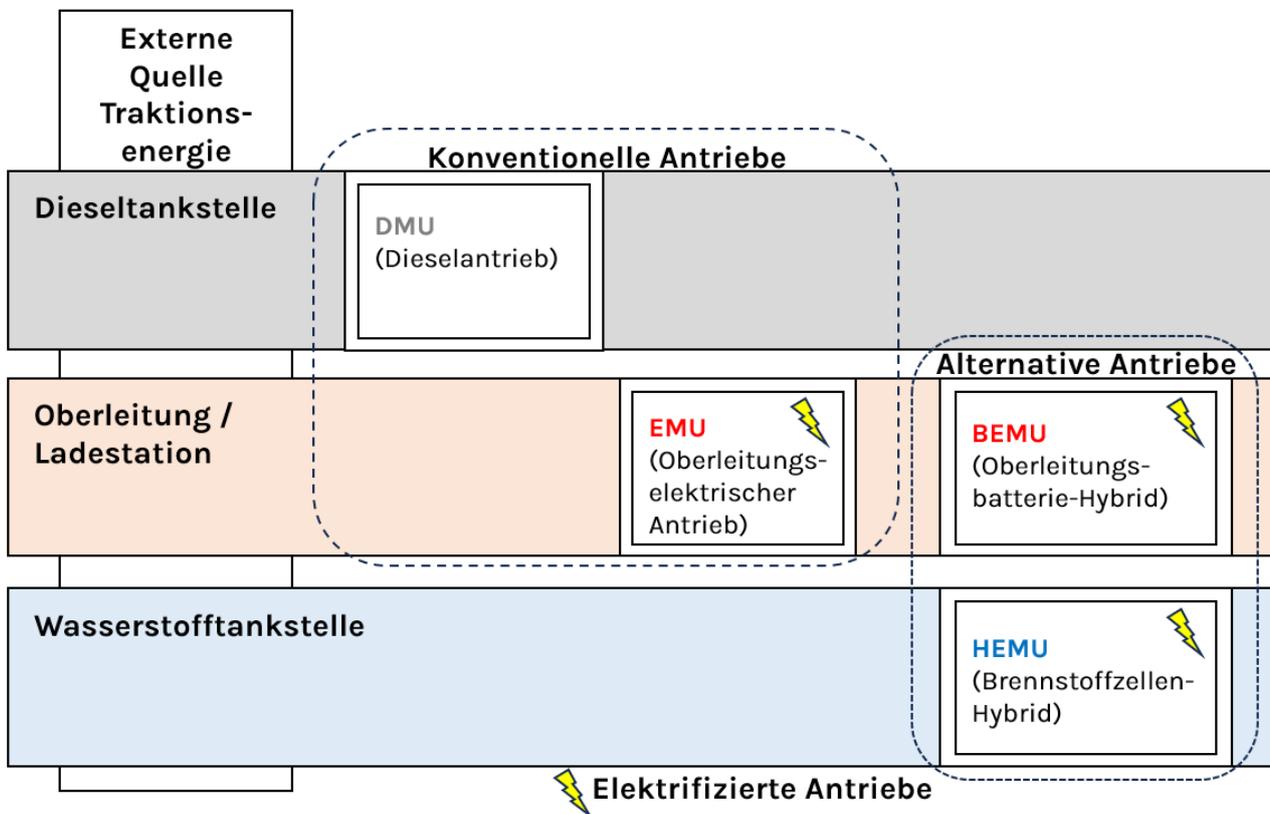
Das Gros der schienengebundenen Verkehrsleistung wird bereits per Oberleitung elektrisch erbracht und kann daher über den Strommix defossilisiert werden. Im Personennahverkehr werden aber auch noch dieselbetriebene Züge eingesetzt (19 Prozent der Verkehrsleistung), ebenso wie im Güterverkehr (3 Prozent der Verkehrsleistung).^[5] Besonders im Schienenpersonennahverkehr werden Alternativen benötigt, da eine Elektrifizierung per Oberleitung in vielen Fällen ökonomisch nicht sinnvoll erscheint.

Alternativen zu Dieselzügen

Im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) sind Batterietriebzüge (battery electric mobile units, BEMU) eine wichtige Alternative zu dieselbetriebenen Zügen. Auch der Biokraftstoff aus hydroprozessiertem Pflanzenöl (hydrotreated vegetable oils, HVO) wird bereits in mehreren Zügen der Deutschen Bahn eingesetzt.^[6]

Zu den Wasserstoffoptionen gehören unter anderem Brennstoffzellentriebzüge (hydrogen electric mobile units, HEMU) und theoretisch auch die direkte Verbrennung von Wasserstoff (H₂) beziehungsweise seines Derivats Ammoniak oder der Einsatz synthetischer Kraftstoffe (E-Fuels) in Verbrennungsmotoren.^{[2] [35] [36] [37]} Allerdings werden nachfolgend nur die Optionen BEMU und HEMU näher beschrieben, da E-Fuels und H₂- oder Ammoniak-Direktverbrennung nach aktuellem Stand nicht als breiten-taugliche Alternativen für den SPNV verfolgt werden.

BEMU und HEMU haben mit den oberleitungselektrischen Triebzügen (electric multiple unit, EMU) gemeinsam den elektrifizierten Antrieb. Sie gelten aber als Hybridantriebe, da sie ihre Energie nicht nur aus einer Quelle, sondern jeweils zusätzlich von einer Batterie beziehungsweise einer Brennstoffzelle beziehen können.



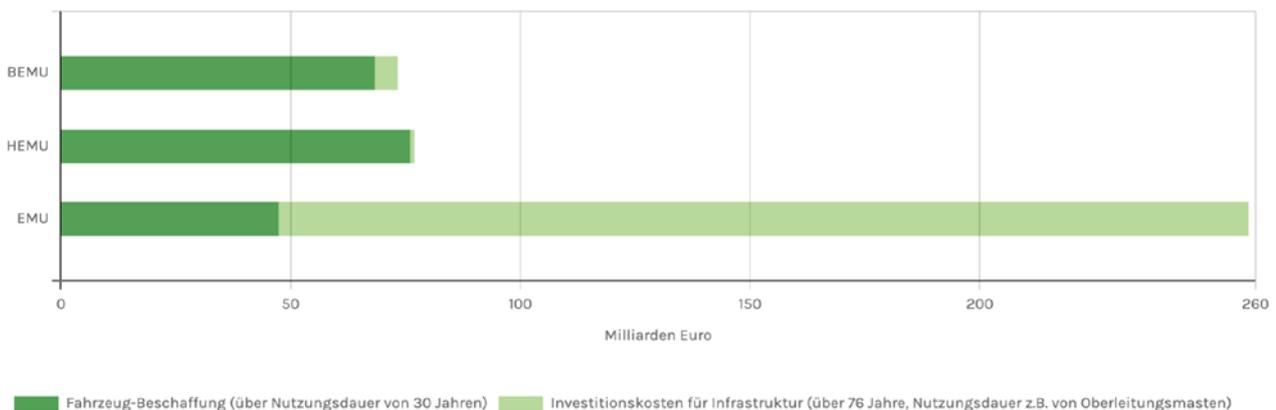
Ökonomische Aspekte

Der Einsatz der alternativen Antriebskonzepte BEMU und HEMU ist auf weniger befahrenen Strecken wirtschaftlicher als deren Elektrifizierung mit Oberleitungen (für den Einsatz von EMU). Denn Triebzüge mit alternativen Antrieben haben zwar höhere Beschaffungskosten. Unter Berücksichtigung der Infrastrukturinvestitionskosten fallen die Gesamtkosten aber im Vergleich zu EMU deutlich niedriger aus.

Zu beachten ist die strategisch wichtige Entscheidung für einen einzigen Antrieb in einer Region. Denn auch bei BEMU und HEMU sind die Investitionskosten nicht unerheblich. Der Einsatz beider alternativer Antriebe innerhalb einer Region wäre daher unwirtschaftlich.

Vergleich Beschaffungs- und Infrastrukturinvestitionskosten bei EMU, BEMU und HEMU

Der Einsatz von EMU lohnt sich nur bei ausreichender Verkehrsleistung, da die Investitionskosten für die Elektrifizierung von Strecken mit Oberleitungen vergleichsweise hoch ausfallen.^[9]



Versorgungssicherheit

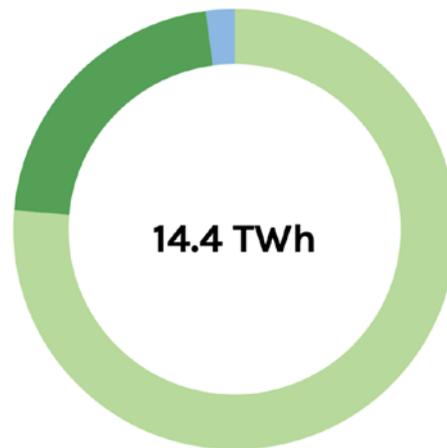
Der H₂-Bedarf im Schienenverkehr würde höchstens einen sehr kleinen Anteil der nationalen H₂-Bedarfe ausmachen. Wenn Bahnbetreiber extern erneuerbar erzeugtes H₂ beziehen würden, der dann anderen Anwendungsbereichen nicht mehr zur Verfügung stünde, könnte der H₂-Einsatz in Zügen einen leicht negativen Einfluss auf die H₂-Versorgungssicherheit ausüben.

Wenn Bahnunternehmen ihre eigene Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (EE) ausbauen und dies mit der Herstellung von erneuerbarem H₂ verknüpfen, könnte sich dies umgekehrt positiv auf die H₂-Versorgungssicherheit auswirken. Das Potenzial der eigenen EE-Stromerzeugung könnte erheblich sein. Unter anderem ist vorgesehen, dass zukünftig Flächen entlang von Bahnstrecken für Photovoltaik genutzt werden.^{[24][33]}

Endenergiebedarf

Im Jahr 2021 fiel ein Endenergiebedarf von circa 14 Terawattstunden für den Schienenverkehr an, bestehend aus den Energieträgern Strom und Diesel.^[10]

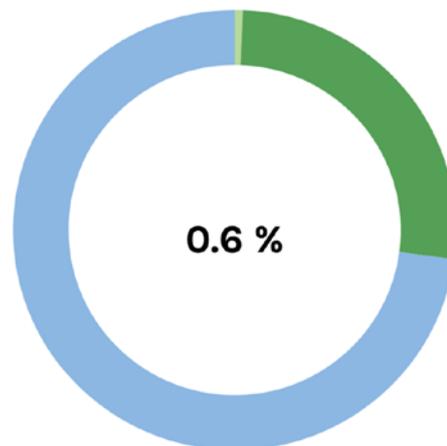
Endenergiebedarf im Schienenverkehr 2021, nach Energieträgern
in Terawattstunden.^[10]



Strom Diesel Biomasse

Endenergiebedarf in Terawattstunden

Der Endenergiebedarf des Schienenverkehrs im Jahr 2021 machte 4 Prozent des gesamten Endenergiebedarfs des Verkehrssektors und 0,6 Prozent des Gesamtendenergiebedarfs Deutschlands aus.^[26]

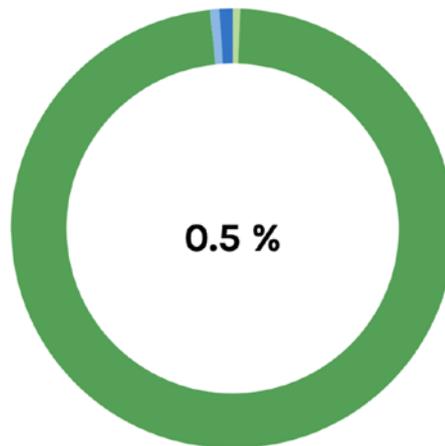


Schieneverkehr Restl. Endenergiebedarf Verkehr Restl. Endenergiebedarf

Treibhausgasemissionen

Im Schienenverkehr fielen im Jahr 2021 rund 0,8 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente an (ohne Emissionen der Energiebereitstellung), was für circa ein halbes Prozent der Emissionen des Verkehrssektors steht.^[1] Ohne den Straßenverkehr, der 98 Prozent der Treibhausgasemission im Sektor verursacht, ist der Schienenverkehr für ein Viertel der restlichen Emissionen verantwortlich.

Treibhausgasemissionen des nationalen Verkehrssektors in Megatonnen CO₂-Äquivalente
Anteil des Schienenverkehrs an den Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor 2020.^[10]



■ Schienenverkehr ■ Straßenverkehr ■ Inländischer Flugverkehr ■ Küsten- und Binnenschifffahrt

Hier ein zusammenfassender Vergleich von Endenergiebedarf, Verkehrsleistung und Treibhausgasemissionen des Schienenverkehrs gegenüber dem gesamten Verkehrssektor:

- > Der Schienenverkehr macht ungefähr vier Prozent des Endenergiebedarfs aus versus
- > 6 bis 18 Prozent der Verkehrsleistung (jeweils der Personen- und der Güterverkehr)^[25] versus
- > ein halbes Prozent der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors.

Die relativ hohe Verkehrsleistung im Vergleich zu den Treibhausgasemissionen lässt sich vor allem auf den Energieträger Strom zurückführen. Denn elektrische Antriebe haben einen Wirkungsgrad von 85 Prozent, gegenüber nur 40 Prozent bei Dieselmotoren.^[9]

Wasserstoffbedarfe

Der H₂-Bedarf im Jahr 2045 für den Schienenverkehr wird zwischen 0 und etwa 2,5 Terawattstunden beziehungsweise maximal rund 75.000 Tonnen eingeschätzt. ^{[2][11]} Der energetische H₂-Bedarf würde geringer ausfallen als der aktuelle energetische Bedarf der Dieseltriebzüge (3 bis 4 Terawattstunden), sofern das politische Ziel der Elektrifizierung von 75 Prozent der Schienennetze erreicht wird und für die restlichen Strecken neben Brennstoffzellenzügen auch batterieelektrische Züge zum Einsatz kommen. ^{[10][2][3]}

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Kapazitätserhöhung von Drucktankssystemen

- › Durch eine Erhöhung des Drucks in Druckbehältern, beispielsweise von 350 bar auf 500 bar, könnte die Speicherkapazität von H₂ erhöht werden. ^[21]
- › Durch eine andere Form (flach statt zylindrisch) könnte die Raumnutzung solcher Systeme optimiert werden. ^[13]

Testung der Betankung von Zügen mit LOHC

- › Eine weitere Alternative zum HEMU mit gasförmigem H₂ in Drucktanks sind Brennstoffzellenzüge, die über einen Tank mit flüssigen organischen Wasserstoffträgern (Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC) und entweder eine Einheit zur Rückgewinnung des Wasserstoffs oder eine Direkt-LOHC-Brennstoffzelle verfügen. HEMU mit LOHC-Tanks und insbesondere die Direkt-LOHC-Brennstoffzelle weisen noch einen geringen technologischen Reifegrad auf, sodass hier weitere F&E-Tätigkeiten benötigt würden, bevor deren Einsatz erfolgen könnte. ^[26]

Testung mobiler Tankstellenkonzepte

- › Mobile Tankstellenkonzepte könnten konzipiert und getestet werden, um die Systemkosten des HEMU und somit die Barrieren zu seiner Nutzung weiter zu senken. ^[13]

Konzipierung von Tankstellen für mehrere Verkehrsträger

› Tankstellen, die von mehreren Verkehrsträgern wie Zügen, Bussen und Lastkraftwagen gemeinsam genutzt werden, müssten noch konzipiert und erprobt werden.

Optimierung von Instandhaltungskosten durch verbesserte Lebensdauer von Brennstoffzellen

› Aufgrund der kurzen Lebensdauer von Brennstoffzellen müssen diese mehrmals im Laufe der Lebensdauer eines Triebzugs ausgetauscht werden. Eine verlängerte Einsatzdauer von Brennstoffzellen würde die Betriebskosten des HEMU deutlich senken.^{[2][18]}

Betriebsoptimierung von HEMU aus energetischer Sicht

› Durch einen verbesserten gemeinsamen Betrieb der Brennstoffzelle und der zum Anfahren benötigten Dynamikbatterie im HEMU kann deren energetische Effizienz gesteigert werden.^[2] Hier bieten sich Lösungen mit künstlicher Intelligenz an, um die vielfältigen Variationen der nicht elektrifizierten Routen bei der Betriebsoptimierung zu berücksichtigen.^{[29][30]}

Handlungsoptionen

Brennstoffzellentriebzüge

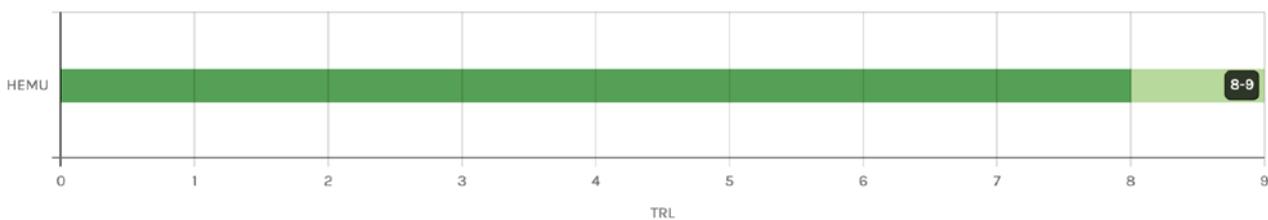
Bei diesen elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (hydrogen electric multiple units, HEMU) wird elektrische Energie sowohl in Wasserstoff (H₂) als auch in einer sogenannten Dynamikbatterie gespeichert. Die (relativ kleine) Batterie wird für die Beschleunigung des Zugs benötigt und kann Bremsenergie speichern.^[4] In Brennstoffzellen, meist Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC), reagiert H₂ mit Sauerstoff aus der Luft, um Strom zu produzieren.^{[2][9][18]}

Eine Speicherung in Gasform (und nicht in Flüssigform) ist aufgrund des niedrigeren Energiebedarfs und der geringeren Verlustrate vorteilhaft. Standard ist ein Speicherdruck von 350 bar.^[2] HEMU wiegen aufgrund der Brennstoffzelle, der Batterie sowie des H₂-Drucktanks durchschnittlich bis zu zehn Prozent mehr als Oberleitungs-Elektrotriebzüge (electric mobile units, EMU), allerdings sind sie in etwa gleich schwer wie die alternativen batterieelektrischen Triebzüge (battery electric mobile units, BEMU).^[12]

Technologiereifegrad

TRL

Der Technologiereifegrad für HEMU liegt aktuell bei 8 bis 9.^{[15] [18] [21] [23]}



Voraussetzungen

- › Wasserstoff muss in ausreichender Menge zur Verfügung stehen, beispielsweise über Importe.
- › Neue Infrastruktur (H₂-Tankstellen, Speicherlösungen, gegebenenfalls Anschluss an ein Pipelinenetz zur Versorgung mit H₂) muss aufgebaut werden.
- › H₂-Tankstellen müssen mit den nötigen Sicherheitsvorkehrungen konzipiert werden.^[20]

Vorteile

- › Luftschadstoff- und Lärmemissionen werden vermieden.^[18]
- › Durch die hohe Energiedichte sind größere Reichweiten möglich als bei batterieelektrischen Zügen – je nach Zugmodell 550 bis 1000 Kilometer.^{[2] [4] [7] [8] [9]}
- › Sowohl die Reichweite als auch die Geschwindigkeit von Brennstoffzellenzügen (maximal 140 Kilometer pro Stunde) erfüllen die Anforderungen an Fernzüge.^[20]

Nachteile

- › Die Energieeffizienz von HEMU ist geringer als bei BEMU und noch geringer als bei EMU. HEMU verlieren an Effizienz sowohl durch die Nutzung einer Batterie (beim Anfahren und beim Beschleunigen) als auch durch den Wirkungsgrad von rund sechzig Prozent der Brennstoffzelle.^{[2] [9]}

Folgen

Wenn HEMU eingesetzt werden,

- > dann könnten längere Strecken auch ohne deren Elektrifizierung zurückgelegt werden.

Wenn der Wasserstoff für HEMU in einem eigenen Elektrolyseur vor Ort erzeugt wird,

- > dann könnten an geeigneten Standorten auch andere lokale H₂-Verbraucher bedient werden.
- > dann könnte ein flexibler Betrieb des Elektrolyseurs das Management von Engpässen im Stromnetz unterstützen.^[20]

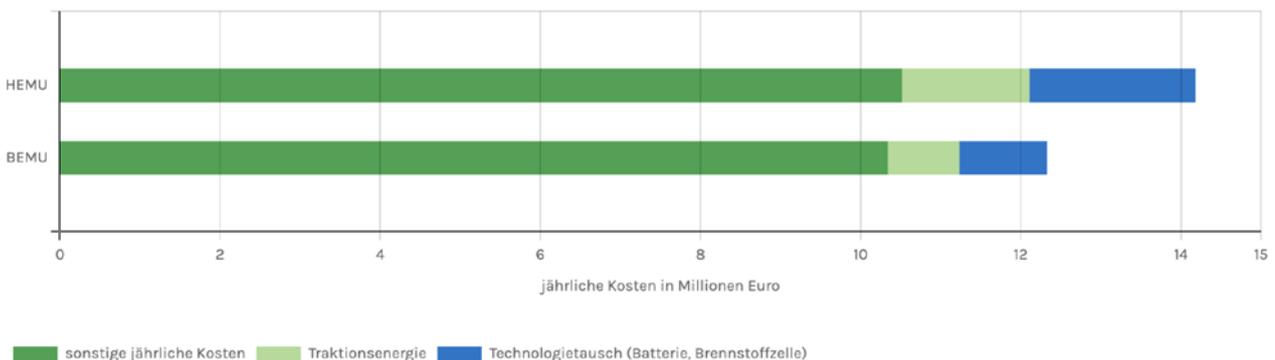
Ökonomische Aspekte

Ein Großteil der im Schienenpersonennahverkehr eingesetzten Dieseltriebzüge wurde um die Jahrtausendwende gebaut. Aufgrund deren typischen Nutzungsdauer werden die meisten voraussichtlich bis circa 2030 ersetzt.^[14]

Aufgrund des schlechteren Wirkungsgrads und der absehbaren H₂-Preise werden die Energiekosten von HEMU im Vergleich zu BEMU voraussichtlich deutlich höher ausfallen. In einem umfassenden Wirtschaftlichkeitsvergleich von HEMU und BEMU schneiden HEMU wegen der Energiekosten und auch wegen zusätzlicher Kosten für den Tausch der Brennstoffzelle schlechter ab.^[9]

Vergleich der jährlichen Kosten von HEMU und BEMU

Der Einsatz von BEMU ist aufgrund niedrigerer Kosten für die Traktionsenergie und den Tausch von Technologiekomponenten wirtschaftlich attraktiver.^[9]



Zudem sind die Investitionskosten nicht unerheblich, wenngleich niedrig im Vergleich zur benötigten Infrastruktur für rein elektrische Züge. Der Bau einer stationären H₂-Tankstelle kostet circa eine Million Euro.^[9]

Als Alternative zur Neubeschaffung ist auch eine Umrüstung eines Dieseltriebzugs (Ersatz des Dieselantriebs durch einen elektrischen Antrieb und eine Brennstoffzelle) wirtschaftlich, wenn mindestens noch die Hälfte der Nutzungsdauer des Dieseltriebzugs verbleibt.^[21]

Versorgungssicherheit

Potenzielle Betreiber von Brennstoffzellenzügen treten in starke Konkurrenz zu potenziellen H₂-Anwendern, die über weniger gute Alternativen verfügen. Eine Lösung für die H₂-Versorgung könnte die Eigenproduktion sein. ^[2]

Wasserstoffbedarfe

Wasserstoffbedarfe eines HEMU im Schienenpersonennahverkehr und im -güterverkehr

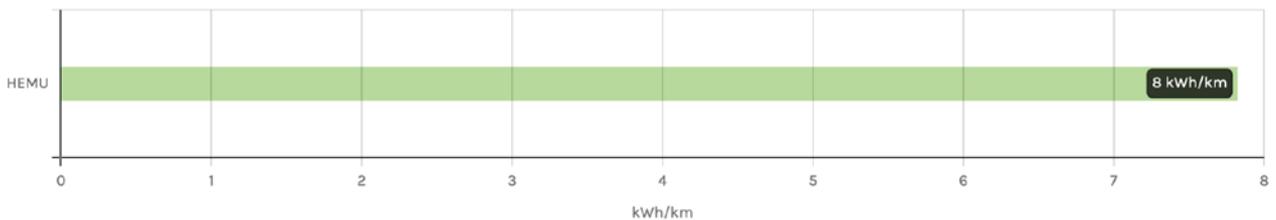
Der H₂-Bedarf pro Kilometer hängt von der Art der Strecke (Topografie, Anzahl der Halte, usw.) ab. Es wird ein Bedarf von 230 bis 360 Gramm je Kilometer geschätzt. ^{[9][20][31]}



Endenergiebedarf

Endenergiebedarf

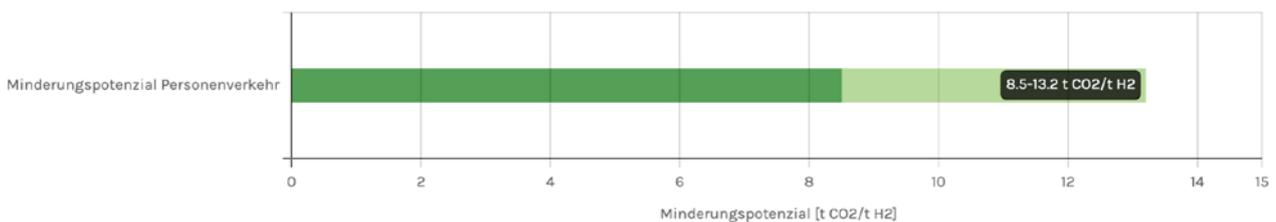
Der mittlere Endenergiebedarf eines HEMU in einem repräsentativen Streckennetz beträgt laut Literatur etwa 7,82 Kilowattstunden pro Kilometer. ^{[9][20]}



Minderungspotential

Treibhausgas-minderungspotenzial

Laut einer Fallstudie, in der zwei Dieseltriebzüge auf einer Strecke des Schienenpersonennahverkehrs in Rumänien durch HEMU ersetzt werden, läge das Minderungspotenzial bei 8,5 Tonnen CO₂ pro Tonne H₂. ^[31] Allerdings wird in dieser Studie von einem höheren H₂-Bedarf pro Kilometer als in anderen Studien ausgegangen. ^{[9][20]} Nimmt man einen niedrigeren H₂-Bedarf von 230 Gramm pro Kilometer an, liegt das Minderungspotenzial bei 13,2 Tonnen CO₂ pro Tonne H₂.



AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

- › H2goesRail
<https://www.now-gmbh.de/en/projectfinder/h2goesrail/>
- › Wasserstoffschiene Heidekrautbahn
<https://www.wasserstoffschiene-heidekrautbahn.de/>
- › Weltpremiere Wasserstoff im Schienenpersonennahverkehr
<https://www.lnv.de/wasserstoff>

Akteure

- › Betreiber von Regionalbahnen
- › Hersteller von Brennstoffzellenzügen

MASSNAHMEN

MASSNAHME

› Förderung des Infrastrukturausbaus

Investitionen in bestimmte Infrastrukturkomponenten könnten durch Förderungen angereizt werden. Dies macht besonders dann Sinn, wenn Infrastrukturen wie H₂-Tankstellen dort gebaut werden, wo unterschiedliche Verkehrsträger betankt werden können. ^[21]

INITIATOREN

- › Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- › Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen

MASSNAHME

› Wasserstoffversorgung gemeinsam mit anderen lokalen Nutzern

Durch den Zusammenschluss mit ähnlichen potenziellen Nutzern wie zum Beispiel Betreibern von Brennstoffzellenbussen würde sich die nachgefragte Menge an Wasserstoff erhöhen. Dies erleichterte auch Vertragsabschlüsse mit Lieferanten. ^[20] Im Rahmen eines lokalen H₂-Zentrums, das zum Beispiel einen lokalen oder regionalen H₂-Markt bietet, könnten sich potenzielle gemeinsame Nutzer von H₂-Infrastruktur zusammenfinden.

INITIATOREN

- › Politik auf Bundes-, Landes- sowie kommunaler Ebene, vor allem in den Bereichen Wirtschaft(-sförderung) und Verkehr

Batterieelektrische Triebzüge

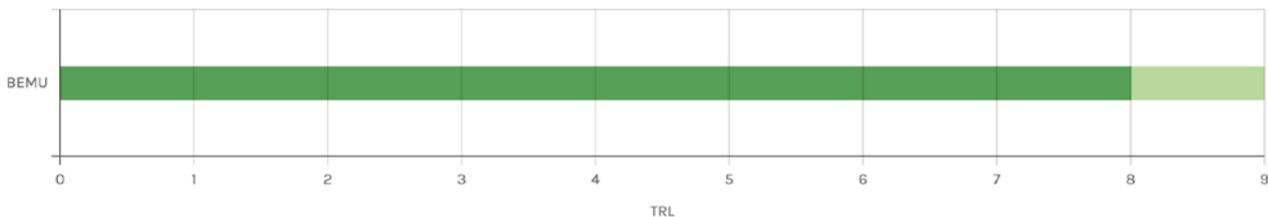
Batterieelektrische Triebzüge (battery electric multiple units, BEMU) – auch Oberleitungs-Batterie-Hybridfahrzeuge genannt – fahren wie konventionelle Züge und greifen auf nicht elektrifizierten Teilstrecken auf Batterien zurück. Die Nutzung von BEMU ist aufgrund der relativ kurzen Reichweite der Batterie mit etwa 120 Kilometern auf kurzen Strecken oder in Kombination mit einer Oberleitung sinnvoll.^{[2][14]}

BEMU wiegen aufgrund der Batterie durchschnittlich circa zehn Prozent mehr als EMU, sind allerdings nicht wesentlich schwerer als die alternativen Wasserstoff-Brennstoffzellentriebzüge (hydrogen electric mobile units, HEMU). HEMU besitzen eine kleinere Batterie als BEMU, tragen aber zusätzlich auch das Gewicht der Brennstoffzelle und des H₂-Tanks.^[12]

Technologiereifegrad

TRL

Der Technologiereifegrad für BEMU liegt aktuell bei 8 bis 9.^{[15][18]}



Voraussetzungen

- › Für eine klimaneutrale Alternative zu Dieseltriebzügen muss der für die Batterieladung verwendete Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt werden.
- › Für einen Einsatz von BEMU auf längeren, nicht elektrifizierten Strecken müssen zusätzlich Oberleitungen (»Oberleitungsinseln«) für das punktuelle Laden der Batterie installiert werden.

Vorteile

- › BEMU sind im Vergleich zu den auch für teilelektrifizierte Strecken geeigneten HEMU einfacher aufgebaut und somit in den meisten Fällen günstiger.
- › Es werden Luftschadstoff- und Lärmemissionen vermieden.^[18]

Nachteile

- › Das regelmäßige Laden der Batterien verursacht hohe punktuelle Leistungsnachfragen im Stromnetz, sofern nicht stationäre Stromspeicher eingesetzt werden.^[2]
- › Die Batterien benötigen Materialien wie Lithium, Nickel oder Kobalt, die zu den kritischen Rohstoffen gehören.^[15]

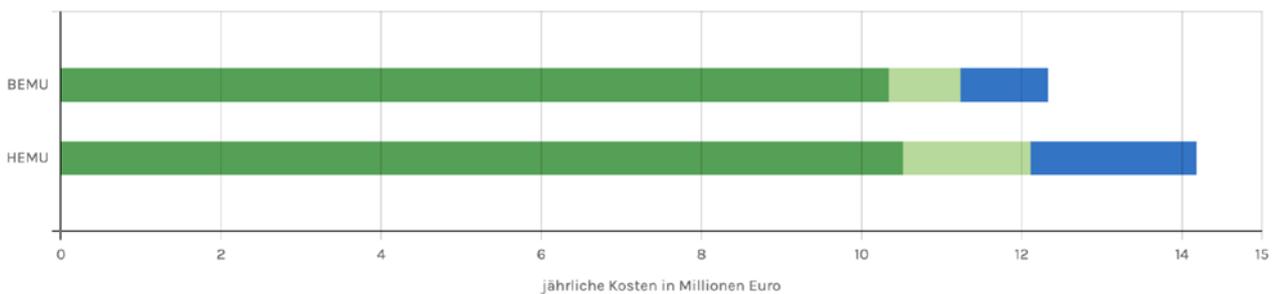
Ökonomische Aspekte

Ein Großteil der im Schienenpersonennahverkehr eingesetzten Dieseltriebzüge wurden rund um die Jahrtausendwende gebaut. Aufgrund deren typischen Nutzungsdauer werden die meisten bis circa 2030 ersetzt.^[14]

In einem umfassenden Wirtschaftlichkeitsvergleich der BEMU und HEMU schneiden BEMU wegen günstigerer Stromkosten im Vergleich zu H₂ und aufgrund der weniger komplexen Bauart (niedrigere Kosten beim Austausch der Technologiekomponenten) besser ab.^[9]

Vergleich der jährlichen Kosten von BEMU und HEMU

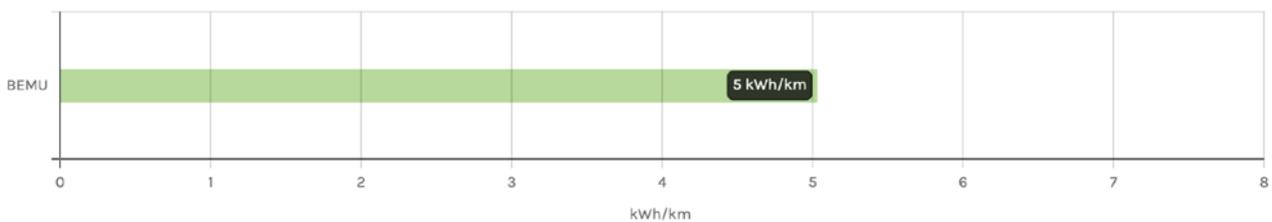
Der Einsatz von BEMU ist aufgrund niedrigerer Kosten für die Traktionsenergie und den Tausch von Technologiekomponenten wirtschaftlich attraktiver.^[9]



Endenergiebedarf

Endenergiebedarf

Der mittlere Endenergiebedarf von BEMU auf einem repräsentativen Streckennetz beträgt 5,03 Kilowattstunden pro Kilometer.^[9]



Minderungspotential

BEMU könnten nahezu einhundert Prozent des Dieserverbrauchs im Bahnverkehr ersetzen. Unter Berücksichtigung des CO₂-Emissionsfaktors für Dieselmotoren (74 Tonnen CO₂ pro Terajoule)^[34] und der unterschiedlichen Wirkungsgrade von Dieseltriebzügen (40 Prozent) und BEMU (77 Prozent im Batteriemodus)^[9] läge das Minderungspotenzial von BEMU bei circa 0,5 Kilogramm CO₂-Äquivalenten pro Kilowattstunde.

Akteur*innen

- > Betreiber von Regionalbahnen
- > Hersteller von batterieelektrischen Zügen

Literatur

- [1] **Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2022):** Verkehr in Zahlen. 2022/2023. 51. Jahrgang. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2022-2023-pdf.pdf?__blob=publicationFile
- [2] **Benz et al. (2022):** VDI/VDE-Studie. Wasserstoff für den Schienenverkehr. <https://www.vde.com/resource/blob/2208680/856e76b3bf2c31104030c12127e0f0bd/wasserstoff-fuer-den-schieneverkehr-data.pdf>
- [3] **Sozialdemokratische Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90/Die Grünen und Die Freien Demokraten (FDP) (2021):** Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021–2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90/Die Grünen und den Freien Demokraten (FDP). Berlin. https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf
- [4] **dena Deutsche Energie-Agentur (2018):** Nicht elektrifizierter Schienenverkehr. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/Factsheet_PowerFuels_Nicht_elektrifizierter_Strassenverkehr.pdf
- [5] **Allianz pro Schiene: Elektrifizierung erklärt:** Das Schienennetz muss unter Strom stehen, zuletzt aufgerufen am: 23.07.2023. <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/elektrifizierung-bahn/>
- [6] **Deutsche Bahn (2022):** Integrierter Bericht 2022. Deutsche Bahn AG, Berlin. https://ibir.deutschebahn.com/2022/fileadmin/pdf/db_ib22_de_web.pdf
- [7] **Stephan et al. (2021):** Systementscheidung zum Einsatz einer alternativen Antriebsform im VVO-Dieselnetz und Handlungsempfehlung für das Ostsachsenetz. Verkehrsverbund Oberelbe GmbH (VVO), Dresden. <https://www.vvo-online.de/doc/VVO-Broschuere-Alternative-Antriebe.pdf>
- [8] **Pagenkopf, Johannes; Böhm, Mathias und Schirmer, Toni (2019):** Einsatzpotenzial hybrider Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr (Studie für NOW – aktueller Stand). DLR, Stuttgart. https://elib.dlr.de/127331/1/1-%C3%96V-8_Pagenkopf-DLR.pdf
- [9] **Klebsch, Wolfgang; Guckes, Nina und Heininger, Patrick (2020):** Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am Praxis-Beispiel »Netz Düren«. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, Frankfurt am Main. <https://edocs.tib.eu/files/e01fn20/1737544083.pdf>
- [10] **Umweltbundesamt:** Indikator: Endenergieverbrauch des Verkehrs, zuletzt aufgerufen am: 20.07.2023. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-endenergieverbrauch-des-verkehrs#die-wichtigsten-fakten>
- [11] **Kopernikus-Projekt Ariadne (2021):** Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Potsdam. <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>
- [12] **Nationaler Wasserstoffrat (2023):** Stellungnahme. Versorgung des Verkehrssektors mit grünem Wasserstoff und seinen Derivaten. Leitstelle Wasserstoff, dena, Berlin. https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2023/2023-02-01-NWR_Stellungnahme_Wasserstoff-im-Verkehr.pdf

- [13] **Nationaler Wasserstoffrat (2023):** Informations- und Grundlagenpapier. Forschungs- und Entwicklungsbedarfe: Speicherung, Transport und Betankung von Wasserstoff im Bereich Straßenfahrzeuge und Bahn. Leitstelle Wasserstoff, dena, Berlin. https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2023/2023-03-29_Grundlagenpapier_F_E-Bedarfe-Strasse-und-Bahn.pdf
- [14] **Pagenkopf et al. (2020):** Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr. NOW, Berlin. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now_marktanalyse-schienenverkehr-1.pdf
- [15] **Thorne, Rebecca; Amundsen, Astrid H. und Sundvor, Ingrid. (2019):** Battery Electric and Fuel Cell Trains. Maturity of Technology and Market Status. TØI Report. 1737/2019. Institute of Transport Economics, Oslo. <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=52027>
- [16] **Deutscher Bundestag (2020):** Drucksache 19/25231. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Torsten Herbst, Frank Sitta, Dr. Christian Jung, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/24799. Energieverbrauch der Deutschen Bahn AG. <https://dserver.bundestag.de/btd/19/252/1925231.pdf>
- [17] **Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2021):** Informationsblatt CO₂-Faktoren Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss. BAFA Eschborn. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2021.pdf;jsessionid=DB778EB4665EF03CBB4F213F827BC735.intranet662?__blob=publicationFile&v=2
- [18] **Frank, Fabio und Gnann, Till (2022):** Alternative Antriebe im Schienenverkehr. Working Papers Sustainability and Innovation, No. S 01/2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2022/WP01-2022_Alternative_Antriebe_im_Schienerverkehr_Frank_Gnann.pdf
- [19] **Boeswillwald et al. (2022):** SteFanS. Strategie für lokal-emissionsfreie Fahrzeugen auf nicht elektrifizierten Strecken. TransportTechnologie-Consult Karlsruhe GmbH (TTK), Karlsruhe. https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/PM_Anhang/Schlussbericht_SteFanS-Studie_NVBW_18012023.pdf
- [20] **Scholz et al. (2016):** Auf dem Weg zur Emissionsfreiheit im Zugverkehr. Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene. Fahrplan für den Einsatz von Brennstoffzellentriebwagen in Deutschland. NOW Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie. Berlin. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/broschuere_wasserstoff-infrastruktur-fuer-die-schiene-online-version.pdf
- [21] **VDB Verband der Bahnindustrie in Deutschland (2022):** Emissionsfreier Schienenverkehr – Leitfaden für den Einsatz von Triebzügen mit wasserstoff-basiertem Antrieb in Deutschland. VDB, Berlin. https://bahnindustrie.info/fileadmin/user_upload/220915_VDB_Leitfaden_Wasserstoff.pdf
- [22] **Shell Deutschland und Wuppertal Institut (2017):** Shell Wasserstoff-Studie. Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂. Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg. www.shell.de/wasserstoffstudie
- [23] **IAC Partners (2020):** Strategic roadmap for Hydrogen in the rail transportation sector. <https://www.iacpartners.com/wp-content/uploads/2022/07/IAC-Partners-Strategic-roadmap-for-Hydrogen-in-the-railway-sector.pdf>

- [24] **mcm, Fraunhofer ISE:** 16.03.2023, Solarstrom für das Bahnstromnetz – Projekt »PV4Rail« startet [Pressemitteilung]. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2023/solarstrom-fuer-das-bahnnetz-projekt-pv4rail-startet.html>
- [25] **Umweltbundesamt:** Fahrleistungen, Verkehrsleistung und Modal Split in Deutschland, zuletzt aufgerufen am: 29.07.2023. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#fahrleistung-im-personen-und-guterkehr>
- [26] **Wasserscheid et al. (2019):** Neue Optionen für einen wirtschaftlichen Betrieb von Wasserstoffzügen durch Nutzung der LOHC-Technologie? Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt/Energy & Environment, Band/Volume 453. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich. https://juser.fz-juelich.de/record/861708/files/Energie_Umwelt_453.pdf
- [27] **Westfalen AG:** 14.10.2021, Auf dem Weg zur klimaneutralen Mobilität: Westfalen präsentiert mobile Wasserstoff-Tankstelle – NRW-Wirtschaftsminister testet Zukunftstechnologie [Pressemitteilung]. https://www.westfalen.com/fileadmin/user_upload/dateien-de/pdf/cc/pi-2021-25-westfalen-hyvent.pdf
- [28] **Deutsche Bahn:** 09.09.2022, Deutsche Bahn und Siemens testen erstmals Wasserstoffzug und mobile Wasserstofftankstelle [Pressemitteilung]. https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Deutsche-Bahn-und-Siemens-testen-erstmal-Wasserstoffzug-und-mobile-Wasserstofftankstelle--8801164
- [29] **Projektträger Jülich (PtJ) (2022):** Langfassung der Expertenempfehlung Forschungsnetzwerk Wasserstoff. PtJ, Jülich. https://www.forschungsnetzwerke-energie.de/lw_resource/datapool/systemfiles/agent/fnepublications/DBF8D4CA3A3570CEE0537E695E867B90/live/document/FNEH2_Langfassung.pdf
- [30] **Wille et al. (2020):** Innovatives Triebfahrzeug – Abschlussbericht. »Identifizierung von Forschungsansätzen und technischen Grundlagen zur Entwicklung eines leiseren, umweltfreundlicheren und betriebswirtschaftlich darstellbaren innovativen Triebfahrzeugs für bislang nicht elektrifizierte Netze«. Im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)SCI Verkehr, Köln. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/innovatives-trieffahrzeug-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile
- [31] **Ruf et al.(2019):** Study on the use of fuel cells & hydrogen in the railway environment. Report 2. Shift2Rail Joint Undertaking and Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. <https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2019/04/Report-2.pdf>
- [32] **Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2019):** CO₂-Emissionen im Verkehrsbereich. WD 8 - 3000 - 056/19. Deutscher Bundestag. <https://www.bundestag.de/resource/blob/660794/dfdee26b00e44b018b04a187f0c6843e/WD-8-056-19-pdf-data.pdf>
- [33] **Koalitionsausschuss (2023):** Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung. https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Beschluesse/20230328_Koalitionsausschuss.pdf



- [34] **Juhrich, Kristina (2022):** CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. Aktualisierung 2022. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_28-2022_emissionsfaktoren-brennstoffe_bf.pdf
- [35] **eolos (2022):** Study on alternatives to fossil diesel use in railways. Im Auftrag der Association of European Rail Rolling Stock Lessors (AERRL). https://aerrl.eu/wp-content/uploads/2023/04/AERRL_Report_Study-on-alternatives-on-fossil-diesel-use-in-railways_final-Version_2001232.pdf
- [36] **Deutsche Bahn:** 04.10.2022, Deutsche Bahn entwickelt emissionsfreien Ammoniak-Wasserstoffmotor [Pressemitteilung]. https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Deutsche-Bahn-entwickelt-emissionsfreien-Ammoniak-Wasserstoffmotor--8924848
- [37] **Chorowski et al. (2023):** Challenges of Application of Green Ammonia as Fuel in Onshore Transportation, *Energies*, 16, 4898. https://mdpi-res.com/d_attachment/energies/energies-16-04898/article_deploy/energies-16-04898-v2.pdf?version=1687676302

Beteiligte Institutionen



acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

www.acatech.de



DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Die DECHEMA ist das kompetente Netzwerk für chemische Technik und Biotechnologie in Deutschland. Sie vertritt als gemeinnützige Fachgesellschaft diese Gebiete in Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. Die DECHEMA fördert den technisch-wissenschaftlichen Austausch von Fachleuten unterschiedlicher Disziplinen, Organisationen und Generationen und bündelt das Know-how von über 5.500 Einzel- und Fördermitgliedern. Sie engagiert sich in (inter-)nationalen technischen Expertengremien und ist in öffentlich geförderten F&E-Projekten sowie der Auftragsforschung aktiv. Dabei koordiniert sie große Forschungsverbünde und ist in verschiedenen Fördermaßnahmen für die Begleitforschung verantwortlich.

www.dechema.de

Autor*innen

- > **Dr. Jens Artz**
Teamleiter DECHEMA
- > **Dr. Benjamin Baur**
Referent Stakeholder-Dialog acatech
- > **Marie Biegel**
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Dr. Dominik Blaumeiser**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Jasper Eitze**
Teamleiter acatech
- > **Dr. Alexandra Göbel**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Tamara Hanstein**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Christopher Hecht**
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **Thomas Hild**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Florian Hölting**
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **David Knichel**
Wissenschaftlicher Referent acatech
- > **Valerie Kwan**
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Jördis Lemke**
Teamassistentin acatech
- > **Dr. Michaela Löffler**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Andrea Lübcke**
Teamleiterin acatech
- > **Alena Müller**
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Lars Ole Reimer**
Redakteur Multimedia acatech
- > **Dr. Damien Rolland**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Anna Runkel**
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Emre Yildirim**
Studentische Hilfskraft acatech

Ansprechpartner*innen acatech

- > **Jasper Eitze**
eitze@acatech.de
- > **Dr. Andrea Lübcke**
luebcke@acatech.de

Ansprechpartner*innen DECHEMA

- > **Dr. Jens Artz**
jens.artz@dechema.de
- > **Dr. Michaela Löffler**
michaela.loeffler@dechema.de



WASSERSTOFF KOMPASS

IMPRESSUM

Wasserstoff-Kompass
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft

Herausgebende

**acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e.V.**

Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München
T +49 (0) 89 / 52 03 09-0
F +49 (0) 89 / 52 03 09-900
info@acatech.de
www.acatech.de

**DECHEMA Gesellschaft für
Chemische Technik und Biotechnologie e.V.**

Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
T +49 (0) 69 / 75 64-0
info@dechema.de
www.dechema.de

Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums / acatech

Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Prof. Dr. Ursula Gather,
Dr. Stefan Oschmann, Manfred Rauhmeier,
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber,
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner
Vorstand i.S.v. § 26 BGB:
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner,
Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier

Verantwortlicher im Sinne des Presserechts

Dr. Jens Artz, DECHEMA

Redaktion

Jasper Eitze, Dr. Andrea Lübcke / acatech
Dr. Jens Artz, Dr. Michaela Löffler / DECHEMA

Gestaltung und Satz

Lindner & Steffen GmbH, www.lindner-steffen.de

Bildnachweis

AdobeStock: scharfsinn86

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium
für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sowie dem
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens
(FKZ 03EWT002).

Betreut wurde das Projekt durch den Projektträger Jülich.

Erschienen im März 2024 in Frankfurt am Main

1. Auflage

ISBN 978-3-89746-245-8

www.wasserstoff-kompass.de

Empfohlene Zitierweise

acatech, DECHEMA (Hrsg.): Wasserstoff-Kompass
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft,
Frankfurt am Main 2023, ISBN: 978-3-89746-245-8
<https://www.wasserstoff-kompass.de/handlungsfelder#>



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages