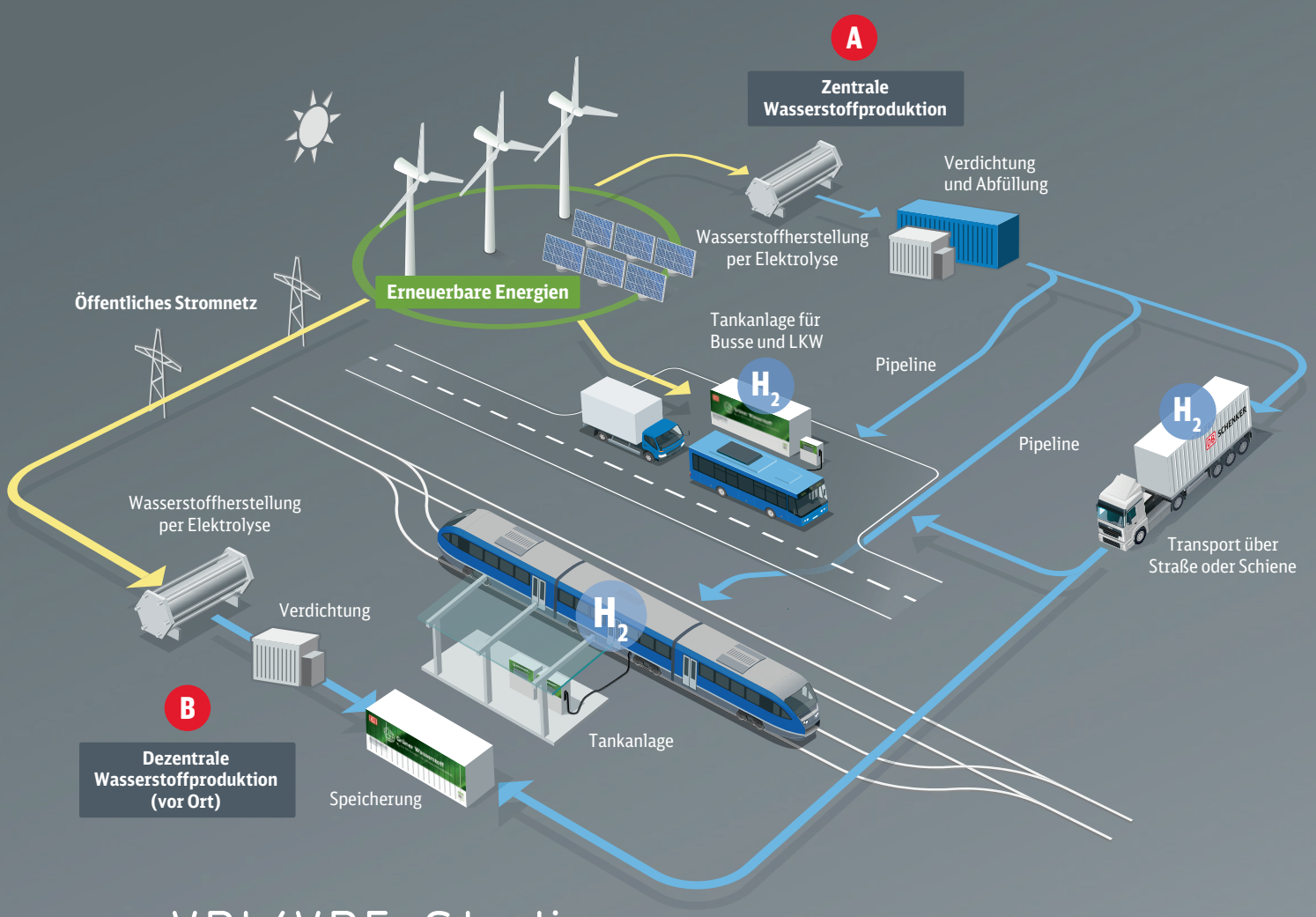
Wasserstoff für den Schienenverkehr



VDI/VDE-Studie
September 2022

Bild: © DB Energie GmbH

Executive summary

Ziel der europäischen Politik ist die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor. Dies betrifft auch die Entwicklung des Schienenverkehrs.

Die Elektrifizierung des Schienenverkehrs gilt als vorrangiger Lösungsansatz, um auf allen Strecken den Verkehr mit umweltfreundlicher elektrischer Energie zu ermöglichen. In Deutschland sind derzeit 61 % des Schienennetzes elektrifiziert, auf denen 90 % der Verkehrsleistung erbracht werden. Für diejenigen Strecken, die sich wirtschaftlich nicht mit Oberleitungen elektrifizieren lassen, bedarf es neuer technologischer Lösungen. Hierzu zählen Antriebssysteme mit Batterien oder wasserstoffbasierte Systeme, bei denen Brennstoffzellen zum Einsatz kommen.

1 Politische Rahmenbedingungen

Die Politik in Deutschland strebt eine nachhaltige, effiziente, barrierefreie, intelligente, innovative und für alle bezahlbare Mobilität an. Bis 2045 soll die Dekarbonisierung des Mobilitätsbereichs sichergestellt werden.

Zur Umsetzung dieser Zielstellungen werden die Investitionen in den Schienenverkehr erheblich gesteigert. Bis 2030 sollen 75 % des Schienennetzes elektrifiziert und innovative Antriebstechnologien unterstützt werden. Das Netz soll erweitert, Strecken reaktiviert und neue Gewerbe- und Industriegebiete an die Schiene angebunden werden.

Die politischen Zielstellungen sprechen für große Potenziale alternativer Antriebstechnologien. Insbesondere lässt sich dort ein Potenzial für alternative Antriebe ableiten, wo die Errichtungskosten einer Oberleitung Netzerweiterungen und Streckenreaktivierungen unwirtschaftlich erscheinen lassen.

2 Neue Antriebe im Schienenverkehr

Ziel der Verkehrspolitik ist die Treibhausgasneutralität. Das per Oberleitung elektrifizierte Schienennetz gilt hierbei als zielführend. Auf den Verkehrslinien, die nicht oder nur teilelektrifiziert sind, kommen bisher Dieselfahrzeuge zum Einsatz. Zur Erreichung der ökologischen Zielstellungen ist zukünftig der Einsatz von Antriebssystemen erforderlich, deren Betrieb frei von Treibhausgasemissionen ist

2.1 Einsatzfelder neuer Antriebe

Die Elektrifizierung mit Oberleitung hat trotz ihrer vielfältigen Vorteile Grenzen. Auf einigen Strecken sprechen jedoch wirtschaftliche oder technische Gründe gegen den Aufbau einer Oberleitung. Neue Antriebssysteme werden aber auch dort benötigt, wo eine Oberleitung nur mit langem Zeithorizont umsetzungsfähig ist.

2.2 Technologieoptionen

Als Option für wirtschaftlich nicht mit Oberleitungen elektrifizierbare Strecken bieten sich Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Dieseltriebfahrzeuge mit synthetischen Energieträgern (SYN) oder E-Fuels und die Umrüstung von konventionellen Antriebssystemen an:

- **Batteriefahrzeuge**, auch als Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge (BEMU) bezeichnet, sind als Erweiterung des bestehenden Systems zu betrachten, da die Traktionsbatterie während der Fahrt in elektrifizierten Bereichen aufgeladen werden kann.

  Im fahrleitungsfreien Betrieb erfolgt die Stromversorgung aller elektrischen Verbraucher aus der Traktionsbatterie, wobei in der Regel Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz kommen. Der nutzbare Energieinhalt der Batterie ist entscheidend für die erzielbare Reichweite.

  Aktuelle Fahrzeuge besitzen mit einer Batterieladung eine Reichweite bis ca. 120 km. Die Reichweite ist stark von dem Einsatzprofil bestehend aus Fahrgeschwindigkeiten, Geländeprofil und Fahrzeiten abhängig.

- **Brennstoffzellenfahrzeuge** verfügen ebenfalls über einem elektrischen Antriebsstrang; sie nutzen aber für die Energiespeicherung Wasserstoff. Für die Stromerzeugung aus Wasserstoff kommen Brennstoffzellen, heute üblicherweise Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEM-FC), zum Einsatz.

  Wasserstoff kann in größeren Mengen an Bord von Fahrzeugen gespeichert werden. Diese Technologie eignet sich damit auch für den Betrieb auf langen Strecken und potenziell für Anwendungen im Lokomotivbereich. Die auf dem Markt verfügbaren Brennstoffzellen-/Batterie-Hybrid-

fahrzeuge (FCMU) bieten eine Reichweite von bis zu 1.000 km.

Die Speicherung von Wasserstoff kann in flüssiger oder gasförmiger Form erfolgen. Der höhere Energiebedarf zur Verflüssigung des Wasserstoffs und gegebenenfalls bei der Lagerung anfallende Boil-off-Verluste sprechen eher für eine gasförmige Bevorratung. Speicherdrücke von 350 bar gelten bei Schienenfahrzeugen als Stand der Technik.

2.3 Ersatz des Dieselkraftstoffs und Hybridisierung konventioneller Antriebe

Parallel zur Entwicklung von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen könnten sich Übergangslösungen anbieten:

Der **Einsatz von SYN oder E-Fuels** bietet die Chance, bestehende Infrastrukturen weiter zu nutzen, bei gleichzeitiger Verwendung von grünem Wasserstoff. Da bei der Verbrennung dieser Energieträger die gleiche Menge CO_2 freigesetzt wie bei ihrer Herstellung gebunden wird, gelten sie als CO_2-neutal.

Hybridantriebe mit einem Diesel-Powerpack plus Speicherbatterie sind eine weitere Option, auch wenn für diese derzeit aus technischen und genehmigungstechnischen Gründen nur in wenigen Ländern eine Nachfrage zu beobachten ist.

Auch mit **Wasserstoff betriebene Verbrennungsmotore (Wasserstoffmotore)** sind als Option für CO_2-freie Antriebsysteme zu nennen. Problematisch ist jedoch die mit dem Betrieb dieser Antriebssysteme verbundene Freisetzung von Stickoxiden. Ihre Beseitigung erfordert eine Nachbehandlung der Abgase. Als vorteilhaft ist die Migrationsfähigkeit dieser Systeme zu werten. Allerdings ist der Einsatz dieser Systeme verbunden mit höheren Lebenszykluskosten und einem geringen Wirkungsgrad im Vergleich zu Brennstoffzellenfahrzeugen.

2.4 Effizienzvergleich und Potenziale zur Effizienzsteigerung

Der Vergleich der Systemeffizienz lässt auf Vorteile batteriebasierter Lösungen gegenüber den anderen alternativen Antrieben schließen. Dieser einfache Vergleich vernachlässigt jedoch die Nutzungsanforderungen. Die Entscheidung über alternative Antriebssysteme setzt einen Abwägungsprozess zwischen Betriebskosten einschließlich Energiekosten, Reichweite und einmalige oder wiederkehrende Investitionen für Fahrzeuge und Infrastruktur voraus. Weiterhin ist die Verwertung von Strom aus erneuerbaren Energien (EE-Strom) zu berücksichtigen. Von Bedeutung ist hierbei, dass die Vorteile oberleitungsgebundener Fahrzeuge möglichst erhalten bleiben. Dies betrifft insbesondere die vergleichsweise geringen Anschaffungskosten, die hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit sowie den geringen Wartungsaufwand.

Brennstoffzellen bieten das Potenzial, EE-Strom über den Energieträger Wasserstoff besser nutzen zu können. Bei Batteriefahrzeugen könnte dies den Einsatz zusätzlicher Speicher erforderlich machen, was zu einer Verschlechterung des Systemwirkungsgrads führen kann.

Synthetische Energieträger für Verbrennungsmotoren bieten zwar das Potenzial, bestehende Infrastrukturen und Fahrzeuge weiter nutzen zu können, mit ihrem Einsatz ist aber eine noch geringere Energieeffizienz als bei Brennstoffzellenfahrzeugen verbunden. Sie sollten daher nur unter besonderen Bedingungen Verwendung finden.

Eine Verbesserung der Energieeffizienz von Brennstoffzellensystemen unterstützt die breite Einführung dieser Technologie. Aus heutiger Sicht empfehlen sich die Optimierung der Investitions- und Betriebskosten sowie die Verlängerung der Lebensdauer der Hochtechnologiekomponenten. Zur Kompensation der Bezugskosten für Wasserstoff ist eine hohe Effizienz des Antriebssystems, das heißt von Brennstoffzelle und zugehöriger Batterie (Dynamikbatterie), von Relevanz.

2.5 Nutzungsorientierte Bewertung

Eine nutzungsorientierte Bewertung der technischen Lösungen erfordert mehr als den Fokus auf den Effizienzvergleich zu richten. Es ist ein Abwägungsprozess zumindest zwischen Reichweite, Energie- und Betriebskosten sowie einmalige (CAPEX) und wiederkehrende (OPEX) Aufwendungen für Fahrzeuge wie auch Infrastruktur notwendig. Studien zeigen hierzu, dass sowohl **BEMU** und **FCMU** bereits heute eine wirtschaftliche Alternative zu Dieselfahrzeugen darstellen.

Die Reichweite gilt als weiterer relevanter Faktor für eine nutzerorientierte Bewertung. Hierzu bietet sich ein Vergleich der Speicherfähigkeit von Diesel, Erdgas, flüssigem und gasförmigem Wasserstoff sowie Batterien an. Er verdeutlicht, dass sich konventionelle Dieselantriebe durch eine hohe volumetrische und gravimetrische Energiedichte auszeichnen. Zum Vergleich hierzu sind die entsprechenden Werte bei Batterieantrieben um den Faktor 10 kleiner. Wasserstoff kann zwar auch nicht mit Diesel konkurrieren, der

Energieträger weist aber gegenüber Batterien deutliche Vorteile in Bezug auf die volumetrische und gravimetrische Energiedichte auf.

3 Energieversorgung

Das Erreichen der Klimaziele im Mobilitätsbereich erfordert Lösungen ohne Treibhausgasemissionen. Für den Schienenverkehr bedeutet dies, dass bei den elektrifizierten Strecken Strom aus erneuerbaren Energien Verwendung findet. Vergleichbares gilt für den Ladestrom der Batteriefahrzeuge. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen ist die Bereitstellung von grünem Wasserstoff langfristig notwendig.

3.1 Energiepotenzial für alternative Antriebssysteme

Das Einsatzpotenzial für alternative Antriebssysteme entspricht dem Dieselverbrauch konventioneller Lokomotiven und Triebwagen. Insgesamt sind bei der Deutschen Bahn AG im Jahr 2020 rund 386 Millionen Liter (rd. 328.000 t) Dieselkraftstoff verwertet worden.

Die **Beschaffung von grünem Wasserstoff** kann durch Bezug aus dem Ausland oder Eigenproduktion im Inland erfolgen. Für die Erzeugung im Inland bieten sich zentrale Einrichtungen an. In Einzelfällen könnten Vor-Ort-Elektrolyseure im Nahbereich von Tankeinrichtungen zur Anwendung kommen.

3.2 Grüner Wasserstoff als begrenzte Ressource

Grüner Wasserstoff könnte wegen des wachsenden Interesses auch anderer Sektoren an dem Energieträger zum Zentrum eines neuen Wettbewerbs werden. Derzeit beläuft sich die H_2-Produktionsmenge (weitgehend grauer Wasserstoff) auf 55 TWh/a, für 2030 wird ein Bedarf von 90 bis 110 TWh/a prognostiziert. Damit die Klimaziele erreicht werden können, muss auch der graue Wasserstoff durch grünen Wasserstoff ersetzt werden. Um dieses Aufkommen an grünem Wasserstoff werden verschiedene Sektoren konkurrieren. Dies spricht dafür, dass die Bahn zur Ablösung der Dieselfahrzeuge den Wasserstoff selbst beschafft. Der Einsatz eigener Elektrolyseure könnte hierfür die Basis bieten.

3.3 Erzeugung von grünem Wasserstoff mittels Elektrolyse

Die Erzeugung von grünem Wasserstoff erfordert den Einsatz von regenerativem Strom. Für die dezentrale Erzeugung sind aus heutiger Sicht insbesondere PEM-Elektrolyseure geeignet. Sie ermöglichen schnelle Lastwechsel und bieten mit hohen Stromdichten die Basis für kompakte Bauweisen. Weiterhin bieten sie Vorteile durch einen netzdienlichen Betrieb (u. a. Bereitstellung von Primärregelleistung) und unterstützen die politisch gewünschte Sektorenkopplung. Die eventuelle Nähe zu Gebäuden bietet die Möglichkeit, die bei der Elektrolyse freiwerdende Wärme einer Verwertung zuzuführen.

3.4 Wasserstoffversorgung der Tankstellen

Für die Wasserstoffversorgung von H_2-Tankstellen bietet sich eine mit konventionellen Einrichtungen vergleichbare Vorgehensweise an. Da Schienenfahrzeuge in Bezug auf die Abgabeleistung und den Verbrauch den Anforderungen großer Nutzfahrzeuge entsprechen, spricht dies dafür, H_2-Tankstellen für Schienenfahrzeuge dort zu errichten, wo sie gleichzeitig dem Nutzfahrzeugsektor zugutekommen.

Vorrangig ist von einer H_2-Versorgung der Tankstellen per Straße oder Schiene auszugehen. Der Transport per Schiene ist derzeit noch nicht Stand der Technik, er bietet aber durch ein verringertes Verkehrsaufkommen und eine Reduzierung von Lärm und Feinstaub Vorteile gegenüber dem Straßentransport. Längerfristig könnte (bei großen Mengen) die Nutzung leitungsgebundener Verteilungssysteme oder die Erzeugung vor Ort vorteilhaft sein.

3.5 Energiepreisentwicklung

Die Preisentwicklung bei den fossilen Energieträgern bestimmt maßgeblich die Konkurrenzfähigkeit von grünem Wasserstoff. Von besonderem Einfluss sind hierbei Heizöl, Diesel und Erdgas. Relevant für die Preisentwicklung sind politisch motivierte Maßnahmen, das Interesse der Ölstaaten an hohen Einnahmen, die wirtschaftliche Entwicklung sowie der Einfluss des CO_2-Zertfikatspreises auf die Höhe des Energiepreisniveaus. Als preisdämpfend könnte sich die verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien darstellen. Für die wasserstoffbasierten Technologien könnten die jüngsten starken Preissteigerungen bei den fossilen Energieträgern Vorteile in Bezug auf ihre Wettbewerbsfähigkeit haben.

3.6 Entwicklung des Preises von grünem Wasserstoff

Die Preisentwicklung von grünem Wasserstoff ist im Rahmen diverser Studien bewertet worden. Die Ergebnisse einer Mischkalkulation sprechen, ohne Berücksichtigung von Steuern und Vermarktungskosten, für einen Abgabepreis an der Tankstelle im Jahr 2030 von 10 bis 15 ct/kWh (3,3 bis 4,9 €/kg). Ab dem Jahr 2030 könnte grüner Wasserstoff mit den Produktionskosten von grauem Wasserstoff konkurrieren.

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Verwendung von grünem Wasserstoff in den unterschiedlichen Verkehrssektoren sollten angeglichen werden. Aktuell ist nach dem Bundesimmissionsschutzrecht die Verwendung von grünem Wasserstoff nur im Straßenverkehr für den Treibhausgas-Quotenhandel zulässig. Zukünftig sollte auch die Nutzung im Schienenverkehr als Erfüllungsoption zur Vermeidung von CO_2-Emissionen zulässig werden. Hierdurch wird die Wettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff im Schienenverkehr deutlich verbessert.

4 Sektorenkopplung

Wasserstoff lässt sich neben der Strom-, Gas- und Wärmewirtschaft in vielen Bereichen der Industrie nutzen, und mit Wasserstoff lassen sich in allen Bereichen der Wirtschaft fossile Energieträger substituieren. Dieses universelle Einsatzpotenzial bietet gute Bedingungen für die politisch gewünschte Sektorenkopplung und damit Anbindung des Schienenverkehrs an die allgemeine Energieversorgung. In Verbindung mit der Gewinnung aus erneuerbaren Energien könnte sich Wasserstoff zu einem weiteren wichtigen Baustein für einen nachhaltigen Schienenverkehr entwickeln.

Vorwort

Der Ausbau des Schienenverkehrs ist Ziel der deutschen Politik. Vorrangig soll hierbei die Elektrifizierung vorangetrieben werden, um auf allen Strecken den Verkehr mit umweltfreundlichem Strom zu ermöglichen.

Trotz dieser weitgehenden Zielstellung wird es auch längerfristig viele Bereiche im deutschen, aber auch im europäischen Schienennetz geben, wo aus Gründen der geringen Verkehrsbelastung eine Vollelektrifizierung mit Oberleitungen nicht wirtschaftlich oder eine Umsetzung aus Gründen der planerischen und baulichen Kapazitäten mittelfristig nicht realisierbar ist. Hierzu zählen Strecken mit geringer Auslastung, aber auch Strecken, die heute noch stillgelegt sind und zukünftig wieder in Betrieb genommen werden sollen. Die Elektrifizierung dieser Strecken ist abhängig vom Verkehrsaufkommen.

In Deutschland sind im Jahre 2021 rd. 61 % des Schienennetzes elektrifiziert [1]. 90 % der Verkehrsleistung werden auf diesem Netzteil erbracht, der Anteil des Dieselbetriebs liegt bei 10 %. Für die wirtschaftlich nicht elektrifizierbaren Strecken bedarf es neuer technologischer Lösungen. Außerdem stellt der langsame Ausbau der Elektrifizierung eine zusätzliche Hürde dar, da hierdurch der flächendeckende Betrieb mit konventionellen elektrischen Fahrzeugen nicht ermöglicht wird. Um aus theoretischer Sicht den Gesamtbetrieb nur mit elektrischen Fahrzeugen in Deutschland sicherzustellen, müssten noch mehr als 15.000 km elektrifiziert werden [2]. Diesem steht eine durchschnittliche jährliche Neuelektrifizierung des Streckennetzes über die letzten zehn Jahre von gerade einmal 65 km entgegen [2].

Da aus Umweltgründen zukünftig auf den Einsatz fossiler Energieträger verzichtet werden soll, werden Antriebssysteme benötigt, die auf erneuerbaren Energien basieren. Hierzu zählen batteriebasierte Antriebssysteme oder Systeme, bei denen wasserstoffversorgte Brennstoffzellen oder auch Wasserstoffmotore zum Einsatz kommen können. Sie unterstützen den Transformationspfad hin zu einem CO_2-neutralen Verkehrssektor durch die fahrzeugseitige Emissionsfreiheit und ebnen so den Weg für den vollständigen Einsatz erneuerbarer Energien.

Die folgenden Ausführungen beschreiben die grundsätzlichen technischen Optionen und ihre Vor- und Nachteile. Sie führen aus, welche Voraussetzungen gegeben sein müssen, um wasserstoffversorgte Antriebssysteme nutzen zu können. Neben dem Import von Wasserstoff zählen hierzu auch Konzepte, um die nationale Wasserstoffstrategie und die politisch gewünschte Sektorenkopplung umzusetzen.

Die Kernaussagen dieser Studie werden am Ende noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Diese Studie zielt darauf ab, Barrieren für die Anwendung von Wasserstoff im Bahnsektor abzubauen. Es soll helfen, die dafür notwendigen Entscheidungen zu treffen und so den Anteil regenerativer Energien im Transportbereich zu erhöhen.

Düsseldorf im September 2022

Dipl.-Ing. Martin Pokojski
Inecs GmbH, Berlin

Inhalt

Executive summary 1

Vorwort 5

Inhalt 6

Handlungsempfehlungen 7

Abkürzungen 8

Autorenteam 8

1 Politische Zielstellungen 9

2 Neue Antriebe im Schienenverkehr 10

2.1 Einsatzfelder neuer Antriebe 10

2.2 Technologieoptionen 11

2.3 Effizienzvergleich und Potenziale zur Effizienzsteigerung 14

2.4 Nutzungsorientierte Bewertung 16

3 Energieversorgung 19

3.1 Energiepotenzial für alternative Antriebssysteme 19

3.2 Wasserstoff 20

3.3 Energiepreisentwicklung 23

3.4 Gesetzliche Rahmenbedingungen 24

4 Sektorenkopplung 26

Alle Kernaussagen zusammengefasst 28

Schrifttum 30

Handlungsempfehlungen

Politische Zielstellungen

- Derzeit bestehen bei Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen noch Mehrkosten gegenüber konventionellen Antrieben. Zur Sicherstellung der Kostengleichheit ist die Entwicklung von Fahrzeugen und Infrastruktur finanziell zu fördern.
- Die langfristige Investitionssicherheit und der Werterhalt der Technologien sind sicherzustellen. Investitionsruinen, in Form ausgemusterter Fahrzeuge, wie sie durch Stilllegungen nach Ablauf der Vertragslaufzeit mit der Industrie zu beobachten sind, sind zu vermeiden.
- Zur Sicherstellung einer schnellen Markteinführung der neuen Technologien ist eine internationale Harmonisierung der Richtlinien, insbesondere in Europa, herbeizuführen.

Technologie

- Die Forschungsanstrengungen zur Verbesserung der Batterietechnologie im Schienenverkehr sind zu verstärken.
- In Bezug auf Brennstoffzellen sind die Forschungsaktivitäten zur Verlängerung der Lebensdauer und Verbesserung der Effizienz zu intensivieren.
- Technologieoffenheit ist sicherzustellen, um mit einer erfolgreichen Energie- und Verkehrswende nicht mehr auf Dieselfahrzeuge angewiesen zu sein.
- Die Genehmigungspraxis ist zu überprüfen. Es bedarf einer aufwandsärmeren und bahnspezifischeren Zulassung/Sicherheitsnachweisführung von Wasserstoffzügen bzw. hybriden Traktionssystemen.
- Die Unabhängigkeit vom Kraftstoff Diesel ist innerhalb der EU anzustreben.

Energiebeschaffung

- Die Weiterentwicklung wasserstoffversorgter Triebfahrzeuge setzt eine zuverlässige Versorgung mit grünem Wasserstoff voraus. Zur Sicherstellung der Versorgung ist der Aufbau von H_2-Erzeugungseinrichtungen für den Schienenverkehr langfristig finanziell zu fördern.
- Bei zunehmend volatiler Einspeisung aus erneuerbaren Quellen unterstützt der netzdienliche Betrieb von Elektrolyseuren die Systemführung der Stromversorgung. Die Einbindung von H_2-Erzeugungseinrichtungen in das Lastmanagement der Stromversorgung ist entsprechend zu fördern.
- Die zukünftige Wasserstoffbeschaffung kann die Basis für neue Geschäftsmodelle bieten. Es ist zu prüfen, ob sich hieraus für den Schienenverkehr vorteilhafte Versorgungsformen entwickeln lassen.

Sektorenkopplung

- Mit dem Aufbau von H_2-Tankstellen, die sowohl dem Schienenverkehr als auch dem Nutzfahrzeugverkehr dienen, sind Synergieeffekte verbunden. Die Realisierung entsprechender Einrichtungen ist deshalb zu fördern.

Abkürzungen

BEMU	Battery Electric Multiple Unit (Oberleitungsbatterie-Hybridfahrzeug)
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
CGH2	Compressed Gaseous Hydrogen (komprimierter gasförmiger Wasserstoff)
CFO	Catenary Free Operation
EE-Strom	Strom aus erneuerbaren Energien
EMU	Electrical Multiple Unit (E-Lokomotive)
FCMU	Fuel Cell Multiple Unit (Brennstoffzellen-/Batterie-Hybridfahrzeug)
LH2	Liquified Hydrogen (Flüssigwasserstoff)
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEM-Brennstoffzelle)
SYN	Synthetic fuel (synthetische Energieträger)

Autorenteam

Dr.-Ing. Thomas Benz, VDE

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla, Technische Universität Dresden

Dr.-Ing. Carsten Cremers, Fraunhofer Institute for Chemical Technology ICT

Dr.-Ing. Thomas Grube, Forschungszentrum Jülich GmbH

Marco Loncar, M. Sc., Siemens Mobility GmbH

Dipl. Wirtsch. Ing. Thomas Holzmann, Frankfurt

Dr.-Ing. Martin Kleimaier, Essen

Dipl.-Ing. Martin Pokojski, Inecs GmbH, Berlin

Dipl.-Ing. Gerhard Schlosser, Duisburg

Dr.-Ing. Carsten Söffker, Alstom Transport Deutschland GmbH

Dr. Jochen Theloke, VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt

Özlem Tosun, M. Sc., Alstom Transport Deutschland GmbH

Johanna Vondran, M. Sc., VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt

Dipl.-Ing. Rüdiger Wendt, Alstom Transport Deutschland GmbH

Dipl.-Ing. Erik Wolf, Siemens Energy AG

1 Politische Zielstellungen

Kernaussagen

- Bis 2045 ist die Dekarbonisierung des Mobilitätsbereichs sicherzustellen. Der Güterverkehr auf der Schiene ist bis 2030 um 25 % zu steigern, der Personenverkehr zu verdoppeln.
- 75 % des Schienennetzes sollen bis 2030 elektrifiziert werden. Stillgelegte Strecken sollen reaktiviert und das Netz erweitert werden.
- Die Sektorenkopplung ist unter Einbindung des Schienenverkehrs zu forcieren.

Die politischen Zielstellungen sprechen für große Potenziale innovativer Antriebstechnologien im Schienenverkehr. Die politischen Verantwortungsträger in Deutschland verfolgen deshalb das Ziel, die 2020er-Jahre zu einem Aufbruch in der Mobilitätspolitik zu nutzen [3]. Sie streben eine nachhaltige, effiziente, barrierefreie, intelligente, innovative und für alle bezahlbare Mobilität an. Hierzu sollen Entscheidungen getroffen werden, die es ermöglichen, die politischen Klimaschutzziele für 2030 zu erreichen und bis 2045 die Dekarbonisierung des Mobilitätsbereichs sicherzustellen. Zur Umsetzung dieser Zielstellungen ist geplant, einen neuen Bundesverkehrswege- und Mobilitätsplan 2040 auf den Weg zu bringen und die Investitionen im Bereich des Schienenverkehrs erheblich zu steigern.

Der von der alten Regierung für den Schienenverkehr erarbeitete Masterplan [4] soll weiterentwickelt und zügig umgesetzt werden. Geplant ist eine nachhaltige Steigerung des Güterverkehrs bis zum Jahr 2030, für den Personenverkehr ist eine Verdoppelung der Verkehrsleistung vorgesehen. Der grenzüberscheitende Verkehr soll gestärkt und bis 2030 sollen 75 % des Schienennetzes mit Oberleitungen elektrifiziert werden. Insbesondere ist vorgesehen, innovative Antriebstechnologien zu fördern, um wichtige Alternativen bei zu langsam fortschreitender Elektrifizierung zu besitzen.

Das Streckennetz soll erweitert, alte Strecken reaktiviert sowie Stilllegungen vermieden werden. Der Einzelwagenverkehr soll gestärkt und Investitionsanreize für Gleisanschlüsse gesetzt werden. Bei neuen Gewerbe- und Industriegebieten ist vorgesehen, die Schienenanbindung verpflichtend zu prüfen.

Die nationale Wasserstoffstrategie bietet den Handlungsrahmen für die künftige Erzeugung, den Transport, die Nutzung und Weiterverwendung von Wasserstoff und damit für entsprechende Innovationen und Investitionen [5]. Einen wesentlichen Schwerpunkt stellen hierbei der Import von grünem Wasserstoff und die angestrebte Sektorenkopplung dar, wovon insbesondere der Schienenverkehr profitieren könnte.

Diese politischen Zielstellungen sprechen für große Potenziale für innovative Antriebstechnologien im Schienenverkehr. Insbesondere sollten sich bei der Erweiterung des Streckennetzes sowie der Reaktivierung stillgelegter Strecken mit neuen Technologien Kostensenkungen erreichen lassen. Dies gilt insbesondere, wenn zur Einhaltung der Klimaziele auf Antriebssysteme mit fossilen Energieträgern verzichtet wird und die Kosten der Oberleitungsinfrastruktur in der Bewertung Berücksichtigung finden.

2 Neue Antriebe im Schienenverkehr

Kernaussagen

- Wirtschaftliche und technische Gründe sowie Genehmigungsaspekte können gegen den Aufbau einer Oberleitung sprechen. Mit innovativen Technologien bieten sich Alternativen zu Dieselfahrzeugen.
- Effizienzvorteile sprechen für rein elektrische Antriebe mit Oberleitung, bei Elektrifizierungslücken mit begrenzter Ausdehnung für den Einsatz von Batteriefahrzeugen. Die Vorhaltung der Ladeleistung bei Batteriefahrzeugen kann jedoch durch Einsatz zusätzlicher Energiespeicher mit einer Einschränkung der energetischen Effizienz verbunden sein.
- Größere Reichweiten, eine bessere Ausschöpfung des Potenzials an Strom aus erneuerbaren Energien (EE-Strom) sowie Vorteile im Bereich der Sektorenkopplung sprechen für Brennstoffzellenfahrzeuge.
- Batteriefahrzeuge decken den gesamten Energiebedarf aus der Traktionsbatterie, sofern sie nicht im Oberleitungsmodus verkehren. Zum Einsatz kommen Lithium-Ionen-Batterien, die hinsichtlich Energie- und Leistungsdichte den wirtschaftlichen und technologischen Anforderungen entsprechen.
- PEM-Brennstoffzellen dienen als Energiewandler in Brennstoffzellenfahrzeugen. Die H_2-Bevorratung an Bord von Schienenfahrzeugen erfolgt gasförmig. Das Druckniveau von 350 bar gilt als Stand der Technik.
- BEMU und FCMU ermöglichen mit Blick auf den Lebenszyklus bereits heute einen emissionsfreien und wirtschaftlich effizienten Nahverkehr im Vergleich zu Dieselfahrzeugen.

Der Fahrdraht, häufig auch als Oberleitung bezeichnet, ist seit über 100 Jahren ein bewährtes Mittel zur Elektrifizierung von Streckenabschnitten. Vor allem bietet die Elektrifizierung eine leistungsfähige und effiziente Energieversorgung der Schienenfahrzeuge, die zudem die Verteilung rekuperierter Bremsenergie erlaubt. Ebenso besitzt der elektrische Antrieb eine sehr hohe Energieeffizienz.

Gepaart mit einer verlustarmen Zuführung ist ein Betrieb mit dem geringstmöglichen Primärenergieeinsatz möglich, weshalb das System „Elektrische Bahn“ trotz hoher Infrastrukturkosten in vielen Fällen langfristig wirtschaftlich ist.

2.1 Einsatzfelder neuer Antriebe

Die Elektrifizierung mittels Oberleitung hat trotz ihrer vielfältigen Vorteile Grenzen. Auf einigen Strecken sprechen wirtschaftliche oder technische Gründe gegen den Aufbau einer Oberleitung. Beispiele sind gering frequentierte Nebenstrecken sowie lange Streckenabschnitte, bei denen ein leistungsfähiger Zugang zu Anlagen der öffentlichen Stromversorgung oder dem Bahnenergienetz fehlt. Hierzu zählen aber auch große Elektrifizierungslücken, deren Schließung einen erheblichen Planungs- und Finanzierungsaufwand erfordern würde. Der Aufbau einer klassischen Oberleitungsanlage mit notwendiger Bahnstromversorgung in Deutschland kostet durchschnittlich mehr als 1,5 Mio. € pro Kilometer. Die DB Netz AG gibt je nach Topografie für eine eingleisige Streckenelektrifizierung sogar Werte von bis zu 3,6 Mio. €/km an [6].

Neue Antriebssysteme werden aber auch dort benötigt, wo ein Ausbau des Oberleitungsnetzes nur mit langem Zeithorizont umsetzungsfähig ist. Wegen langer Vorlaufzeiten, hoher Investitionen und aufwendiger Planungsmaßnahmen sind auch lohnende Vorhaben nicht kurzfristig, manchmal gar nicht umsetzbar. Daher ist auch die Migrationsfähigkeit, das heißt der weitere Ausbau und die zwischenzeitliche und sich anpassende Nutzung der Anlagen, zu beachten.

Auf den Verkehrslinien, die bisher nicht oder nur teilelektrifiziert sind, kommen bisher ausschließlich Dieselfahrzeuge zum Einsatz. Sie lassen sich wirtschaftlich betreiben, sind betrieblich flexibel und genügen den technischen und verkehrlichen Anforderungen. Der verwendete Energieträger Diesel wird jedoch nicht mehr den zukünftigen ökologischen Anforderungen gerecht.

Allein in Deutschland umfasst das nicht elektrifizierte Streckennetz der DB Netz AG mehr als 13.000 km [7]. Dennoch wurden in den vergangenen Jahren (2010 bis 2020) durchschnittlich gerade einmal 65 km/a neu elektrifiziert [2]. Mit dieser Ausbaugeschwindigkeit ist das formulierte Ziel einer Elektrifizierung von 75 % bis 2030 nicht erreichbar. Die mögliche Umsetzung wird einen deutlich größeren Zeithorizont erfordern. Auch deshalb ist die Migrationsfähigkeit, das heißt die sich anpassende Nutzung der Anlagen und Fahrzeuge, zu beachten.

Auf europäischer Ebene ist die Elektrifizierung nur in wenigen Ländern weiter fortgeschritten als in Deutschland. Belgien mit einem Elektrifizierungsanteil von 86 %, die Niederlande mit 76 % oder Österreich mit 72 % sind ausgewählte Länder dieser Kategorie. Der europäische Durchschnitt liegt aber mit nur 55 % Elektrifizierungsanteil unter dem deutschen Wert. Nach wie vor sind deshalb ca. 8.850 Dieselfahrzeuge in Europa im Einsatz, wovon mehr als 3.000 Dieselfahrzeuge auf den deutschen Bereich entfallen [8].

2.2 Technologieoptionen

Für die Befahrung der oberleitungsfreien Trassenabschnitte eignen sich aus heutiger Sicht drei Optionen:

- BEMU – Triebwagen mit Traktionsbatterie und Stromabnehmer (Bild 1 oben)
- FCMU – Triebwagen mit Brennstoffzellen, H_2-Tanks und Dynamikbatterien (Bild 1 unten)
- weitere Technologiemöglichkeiten, z. B. SYN oder E-Fuels und die Umrüstung von konventionellen Antriebssystemen

2.2.1 Batteriefahrzeuge (BEMU)

BEMU sind als logische Erweiterung der elektrischen Traktion zu betrachten (Bild 2). Dies gilt insbesondere, wenn Linien bereits teilweise elektrifiziert sind und die Traktionsbatterien auf diesen Strecken während der Fahrt aufgeladen werden können. Im besten Fall entfallen damit teure und betrieblich ineffiziente Standzeiten.

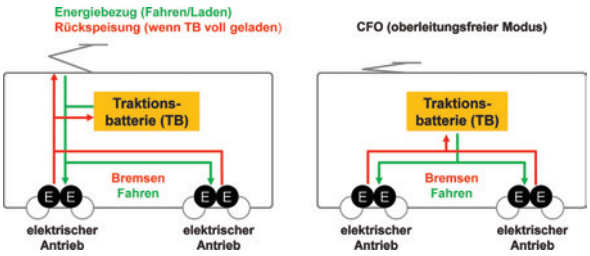


Bild 2. BEMU mit Traktionsbatterie (TB) – Prinzip: Laden-Entladen (Quelle: VDI)

Im Oberleitungsbetrieb dient der Fahrdraht direkt zur Versorgung des Antriebs. Gleichzeitig wird die Traktionsbatterie während Fahrt und Stillstand daraus geladen. Beim Bremsen wird die Energie dynamisch in die Traktionsbatterie zurückgespeist oder kann für die Klimatisierung und Versorgung weiterer Hilfsaggregate verwendet werden. Im Regelfall wird die Bremsenergie erst bei vollständig geladener Traktionsbatterie zurück in das Oberleitungssystem gespeist. Nur ein geringer Anteil wird gegebenenfalls durch mechanisches Bremsen in Verlustwärme umgewandelt.

Im CFO (Catenary Free Operation), das heißt oberleitungsfreien Modus, steht die Energie vollständig aus der Traktionsbatterie zur Verfügung. Das rekuperative Prinzip beim Bremsen erfolgt analog wie im beschriebenen Oberleitungsbetrieb. Die Traktionsbatterien liefern die gesamte Antriebsleistung. Sie decken damit auch die dynamischen Leistungsanforderungen, die aus dem Fahrverlauf des Fahrzeugs resultieren. Zum Einsatz kommen Lithium-Ionen-Zellen unter Verwendung der Lithium-Titanat-Oxid (LTO)- und der Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt (NMC)-Zellentechnologie. Sie stellen aktuell hinsichtlich Energie- und Leistungsdichte eine wirtschaftliche und technologisch machbare Technologie dar. Den prinzipiellen Aufbau einer Zelle beschreibt Bild 3.

Die wichtigsten Kriterien für den Einsatz der Batterien im Schienenverkehr sind Energiedichte (Wh/kg), Leistungsdichte (W/kg), Lebensdauer, Zyklenzahl, Betriebstemperaturbereich und Betriebssicherheit.

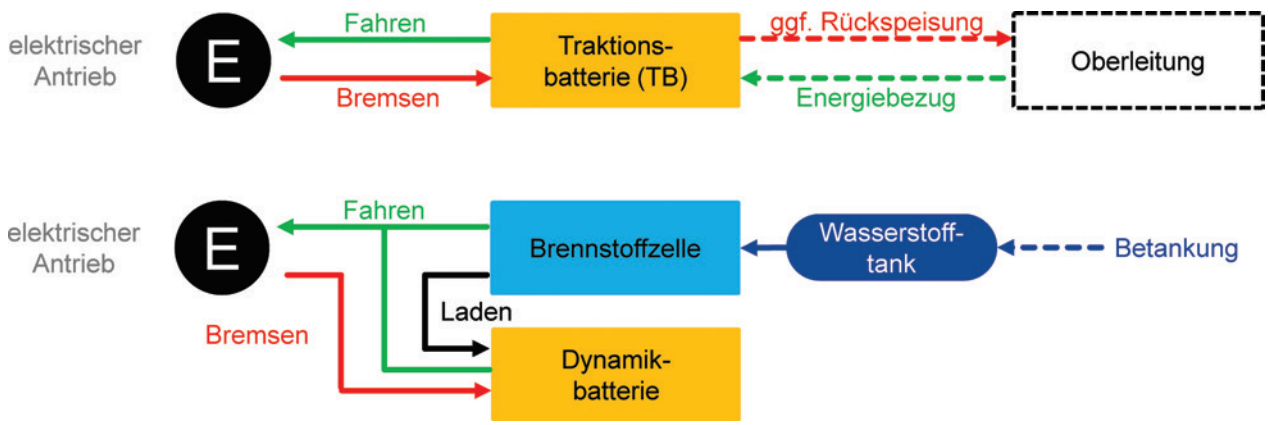


Bild 1. Energieflüsse von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen (Quelle: VDI)

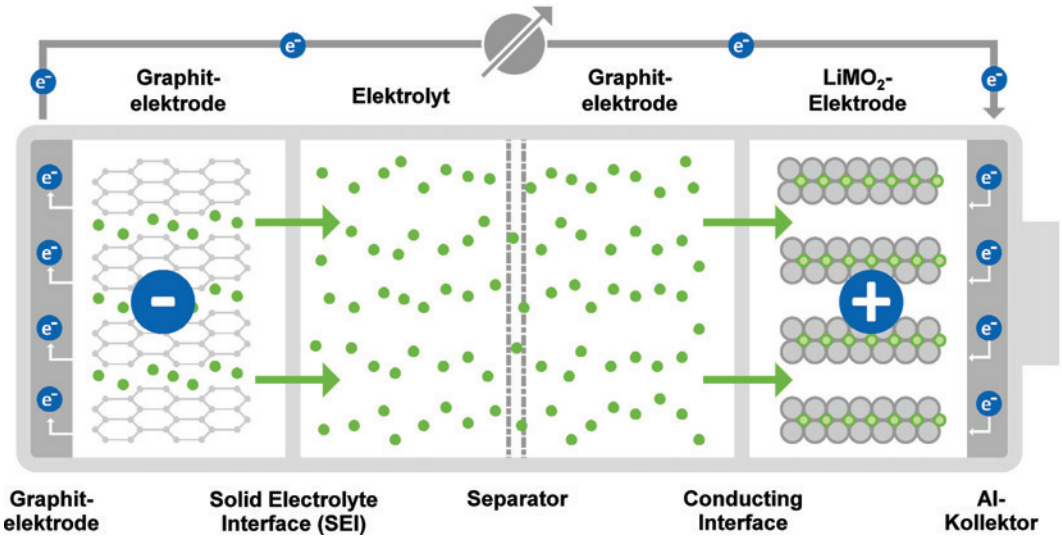


Bild 3. Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle (Entladezustand) [9]

Exemplarisch kann von 120 bis 280 Wh/kg (Energiedichte), 0,5 bis 1,5 kW/kg (Leistungsdichte) sowie einer Zyklenfestigkeit von 1000 bis 10.000 ausgegangen werden [10]. Die Herausforderungen im Schienenverkehr liegen im Zielkonflikt der technischen Kriterien unter sich sowie der wirtschaftlichen Bewertung.

Die Reichweite der aktuellen BEMU-Fahrzeugmodelle beträgt bis zu 120 km und ist abhängig von den topologischen und betrieblichen Randbedingungen. Zur Verlängerung der Einsatzstrecken von Batteriefahrzeugen bieten sich zusätzliche Elektrifizierungen an. Dies können Verlängerungen der Bestandsoberleitung, Ladestationen oder Oberleitungsinseln sein. Das Problem liegt hier neben den zusätzlichen Kosten in der Realisierbarkeit. Letzteres betrifft unter anderem die zeitliche Umsetzung, die geografischen und baulichen Randbedingungen wie auch die benötigte elektrische Anschlussleistung.

Klärungsbedürftig bleibt zudem, ob und wie die teilweise hohen Kosten für Errichtung und Betrieb von Ladestationen auf die Stromkunden umgelegt werden. Die Gleichsetzung mit Fahrstrom aus dem Fahrleitungsnetz der DB wird zwar in vielen Fällen unterstellt, ist aber vor dem Hintergrund der Umlage auf alle elektrisch erbrachten Verkehrsleistungen fragwürdig. Dies gilt insbesondere für Fahrzeuge, die grundsätzlich sowohl technisch als auch betrieblich von einer Nutzung der meist netzspezifisch errichteten Ladestationen ausgeschlossen sind.

2.2.2 Brennstoffzellenfahrzeuge (FCMU)

Wie BEMU verfügen FCMU über einen elektrischen Antriebsstrang. Sie besitzen aber aktuell für Fahrzeuge in Deutschland noch keine Möglichkeit, die Oberleitung für die Energieversorgung zu nutzen. Die Energie wird steht in Form von Wasserstoff bereitgestellt, der an Bord gespeichert wird. FCMU besitzen eine Brennstoffzelle und eine zusätzliche Dynamikbatterie, mit der sich die Leistungsspitzen abfahren lassen und die Bremsenergie aufgenommen werden kann (Bild 4).

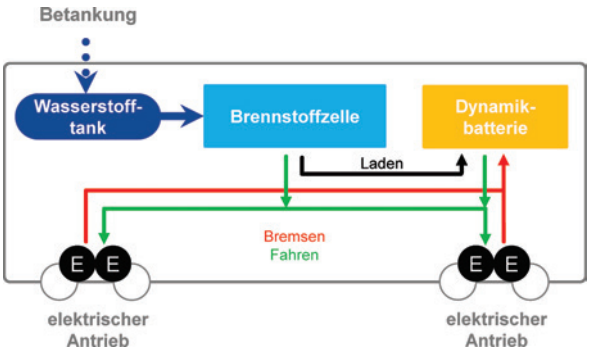


Bild 4. Prinzip Brennstoffzellentriebwagen (Quelle: VDI)

Für die Stromerzeugung kommt die Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC – Protonaustauschmembran-Brennstoffzelle) zur Anwendung. Sie wandelt Wasserstoff mit aus der Umgebung stammendem Sauerstoff (Luftsauerstoff) in elektrische Energie um (Bild 5) und versorgt so den Antrieb sowie Hilfs- und Komfortbetriebe. Neben Wasser entsteht als Nebenprodukt Wärme. Sie kann bei kühlen Temperaturen energiesparend zum Aufheizen des Fahrgastraums bei kühlen Temperaturen genutzt werden.

Kennzeichnend für PEMFC sind elektrische Wirkungsgrade von 60% bei Zellspannungen von 0,8 V, Stromdichten von ca. 240 mA/cm^2 und Betriebstemperaturen von 60 bis 80 °C. Die Zellen arbeiten in der Regel mit reinem Wasserstoff, wobei die Anforderungen in Bezug auf die Reinheit des Energieträgers mit der Reinheitsklasse 5.0 hoch sind.

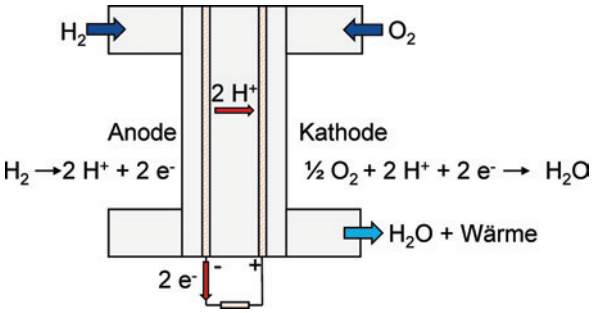


Bild 5. Prinzip der Brennstoffzelle (Quelle: VDI)

Neben der Brennstoffzelle und der Dynamikbatterie ist der Wasserstofftank ein elementarer Bestandteil für die Fahrzeugenergieversorgung. Bei der gasförmigen Speicherung gilt ein Speicherdruck der Tanks von 350 bar als Stand der Technik. Größere Drücke wären prinzipiell möglich, bieten aber derzeit keine wirtschaftlichen Vorteile. Aktuell werden Druckgefäße aus gewickelten Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffen, sogenannte Typ 4 Tanks, in FCMU verbaut. Sie zeichnen sich gegenüber herkömmlichen metallischen Behältern durch ein geringeres Gewicht sowie hohe Belastbarkeit aus [11]. Charakteristisch ist der mehrfache Aufbau aus Liner, Strukturschichten und äußerer Schutzschicht (Outer casting), wie in Bild 6 dargestellt.

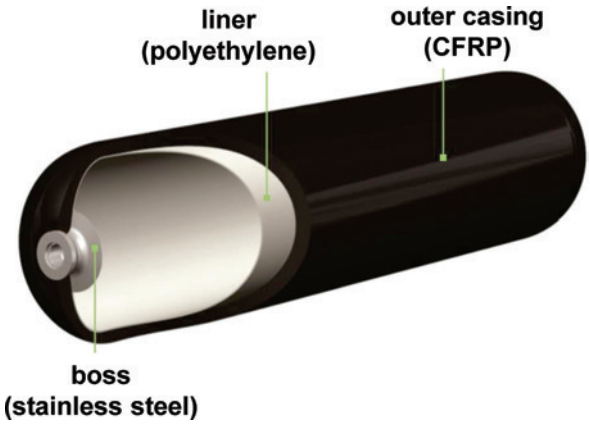


Bild 6. H_2-Druckbehälter [12] (Quelle: NPROXX)

Die auf dem Markt verfügbaren Speicher ermöglichen eine Reichweite bis zu 1.000 km. Alternative Speicherformen von Wasserstoff, z. B. flüssiger Wasserstoff (LH2), besitzen zwar eine höhere Energiedichte, kommen aber aktuell im Schienenverkehr nicht zum Einsatz. Aufwendigere und sehr kostenintensive Tanksysteme (Kryotanks), die den Wasserstoff bei -253 °C im flüssigen Zustand auf dem Zug längerfristig speichern können, und die aufwendige Verflüssigung mit bis zu 40 % Verlust sind in Bezug auf ihre langfristige Wirtschaftlichkeit kritisch zu prüfen.

Zukünftig könnte sich als Alternative zur Druckspeicherung das Cryo-compressed-Verfahren anbieten. Es stellt eine Mischung von flüssiger und druckförmiger Speicherung dar und ermöglicht es, über einen erhöhten Druck Boil-off-Verluste des Gases zu vermeiden [13].

Als eine Besonderheit kann die Erprobung von Brennstoffzellenzügen mit zusätzlicher möglicher Stromzuführung per Oberleitung in anderen Ländern, z. B. Frankreich (SNCF) und Spanien (RENFE), gewertet werden. So wird beispielsweise ein derartiges bimodales Antriebssystem im EU geförderten Projekt „FCH_2RAIL“ [14] entwickelt und getestet. Es bietet die Möglichkeiten, sowohl aus der Oberleitung als auch aus einem Brennstoffzellen-Hybrid-Power-Pack mit Dynamikbatterien Energie zu beziehen.

2.2.3 Ersatz des Dieselkraftstoffs und Hybridisierung konventioneller Antriebe

Vor dem Hintergrund des geringen Alters einiger Dieselfahrzeuge könnten sich parallel zur Entwicklung von Batterie- und Wasserstofffahrzeugen Übergangslösungen anbieten. Diese ermöglichen die nachhaltige Nutzung der Fahrzeuge bis an ihr Lebensdauerende bei gleichzeitiger Reduktion der Emissionen.

Hybridantriebe mit einem Diesel-Powerpack plus Speicherbatterie stellen eine dieser Optionen dar, auch wenn für diese derzeit nur in wenigen Ländern eine Nachfrage zu beobachten ist. Begründet liegt dies in dem hohen Aufwand, der mit dem Einbau der neuen Antriebssysteme in bestehende Fahrzeuge verbunden ist. Hierzu zählt die elektrische Leistungsübertragung, die zusätzliche Masse- und Bauraumreserven erfordert. Zudem sind diese Hybridantriebe mit klassischem Dieselkraftstoff nicht vollständig CO_2-frei, und auch die Umrüstkosten sind im Vergleich zu den Neuanschaffungen der bereits vorhandenen Optionen (BEMU, FCMU) im Hinblick auf die restliche Lebenszeit der eingesetzten Dieseltriebwägen abzuwägen.

Der Einsatz von **SYN oder E-Fuels** bietet die Chance, bestehende Infrastrukturen und Fahrzeuge weiter zu nutzen. Bei Verwendung von grünem Wasserstoff (produziert mittels Stroms aus erneuerbaren Energien) als Ausgangsstoff für SYN oder E-Fuels gilt dieser Energieträger als CO_2-neutral, da bei der Verbrennung von SYN oder E-Fuels die gleiche Menge an CO_2 freigesetzt wie bei der Herstellung eingebunden wird. Dies setzt allerdings voraus, dass auch die Prozessenergie erneuerbar bereitgestellt wird. Ein vollständiger Ersatz des benötigten fossilen Dieselkraftstoffs für den Schienenverkehr scheint aufgrund der branchenübergreifenden hohen benötigten Menge sowie der Konkurrenzsituation mit anderen Bereichen (z. B. Luft- oder Schiffsverkehr) unrealistisch. Denn es existieren Bereiche und Branchen, in denen aus heutiger Sicht weder batterieelektrische

noch wasserstoffbasierte Lösungen technisch realistisch sind, und SYN oder E-Fuels auch langfristig benötigt werden.

Als „kleine“ Lösung ist ein System bestehend aus Starter/Generator und kleinem Akku zu betrachten. Diese Lösung zielt vorrangig auf die Energieeinsparung und ist prinzipiell als Nachrüstung umsetzbar. Neben der Stromversorgung von Hilfsaggregaten zählen zu den Einsatzgebieten die Effizienzverbesserung in Form der Lastpunktoptimierung sowie Betriebsphasen, bei denen das Antriebsaggregat zur Kraftstoffeinsparung vorrübergehend abgeschaltet wird. Dennoch werden CO_2-Gase emittiert, sodass diese Lösung auf dem Weg zur Dekarbonisierung nur als Zwischenschritt zu betrachten ist.

Als nahezu vollständig CO_2-freie Hybridisierung ist auf Seiten der wasserstoffbasierten Antriebe noch der **wasserstoffversorgte Verbrennungsmotor (H_2-Motor)** zu nennen. In vorhandenen Dieseltriebfahrzeugen könnte eine Bevorratung des Wasserstoffs wie bei FCMU auf Dächern oder bei fehlendem Freiraum auch durch zwischengeschaltete Speicherwagen, vergleichbar mit Schlepptendern, erfolgen. Generell wird in diesen Systemen deshalb die Migrationsfähigkeit als gut gewertet. Bei genauerer Betrachtung ist aber ein sogenanntes „Retrofitting“ mit weiteren Herausforderungen wie beispielsweise einem geringeren Wirkungsgrad oder auch der noch möglicherweise komplexen wie auch aufwendigen Zulassung der umgerüsteten Dieseltriebwagen verbunden.

Zusätzlich gilt die mit dem Betrieb der H_2-Motore verbundene Freisetzung von Lärm und Luftschadstoffen (Stickoxiden) als problematisch. Die Beseitigung der Stickoxide erfordert zudem eine Nachbehandlung der Abgase, was gemeinsam mit den genannten Grenzen und dem geringeren technologischen Reifegrad im Vergleich zu vorhandenen Antrieben für BEMU und FCMU beachtet werden muss.

2.3 Effizienzvergleich und Potenziale zur Effizienzsteigerung

Für die Bewertung der Vor- und Nachteile der alternativen Antriebssysteme dient als Vergleichskriterium häufig die Effizienz der Systeme. Sie spricht für Vorteile batteriebasierter Lösungen, ohne jedoch weitere Faktoren wie die Deckung des Energiebedarfs aus EE-Strom oder potenzielle Weiterentwicklungen im Bereich FCMU zur Effizienzsteigerung zu berücksichtigen.

Wie der Referenzwert zeigt, ist bei konventionellen elektrischen Triebfahrzeugen von Wirkungsgraden – Energieerzeugung bis Rad – um 72 % auszugehen (Bild 7). Dieser hohe Wert kann mit alternativen Systemen nicht erreicht werden. Bei batterieelektrischen Antriebssystemen beträgt die Effizienz für die komplette Prozesskette – von der Stromerzeugung bis zum Rad – rund 65 %. Bei brennstoffzellenbasierten Systemen liegen die Werte zwischen 25 % und 31 %, wohingegen bei Antriebssystemen mit synthetischen Energieträgern nur von 15 % bis 18 % auszugehen ist.

Trotz praktischer Vorteile (Nutzung vorhandener Systeme) spricht die geringe Effizienz gegen den Einsatz von SYN oder E-Fuels, da der Austausch des Kraftstoffs keine Vorteile im Hinblick auf den Wirkungsgrad im Dieselmotor oder allgemeiner in der Energieerzeugung (tank-to-wheel) bewirkt.

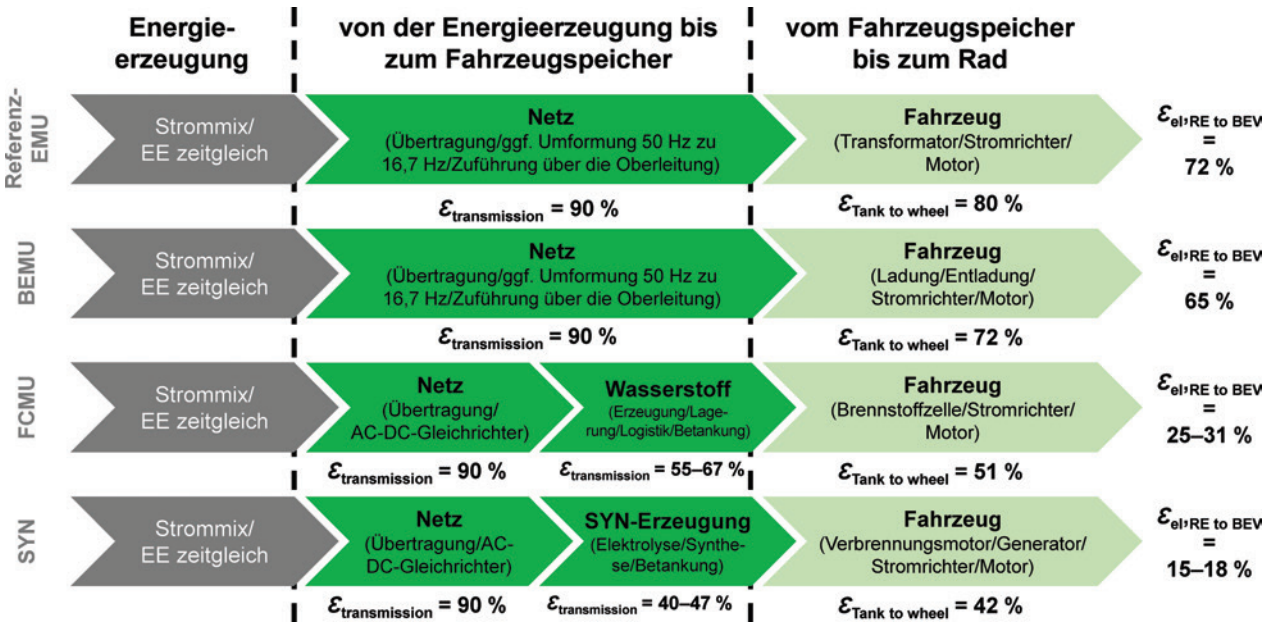


Bild 7. Effizienzkette von Schienenfahrzeugen [15; 16]

Hinzu kommt die Herausforderung, dass die Beschaffung dieser Kraftstoffe zukünftig auf Märkten geschieht, für die mittelfristig keine Alternativen in Aussicht stehen. Dieser Umstand spricht dafür, dass die Marktpreise auch in Zukunft angespannt sein werden.

Als weitere Option könnten sich, wie oben erwähnt, zukünftig H_2-Motore anbieten. Da hierzu noch keine Erfahrungen im Schienenverkehr vorliegen, sind belastbare Aussagen derzeit nicht möglich. Aktuell ist aber von einem geringeren Wirkungsgrad im Vergleich zur PEMFC auszugehen, was bei Einsatz in FCMU einen erhöhten Wasserstoffverbrauch zur Folge hätte.

Die weiteren Betrachtungen konzentrieren sich deshalb auf die aus heutiger Sicht aussichtsreichsten neuen Antriebe im Schienenverkehr, BEMU und FCMU: Bei der Bewertung der Effizienzvorteile von BEMU ist der Einsatz dieser Technologie in Zusammenhang mit der Erzeugung von EE-Strom zu berücksichtigen. Aktuell steht im Bahn-Strommix rund 50 % bis 60 % aus EE-Strom zur Verfügung [17]. Ein genauer Wert ist aufgrund der viel diskutierten Zertifikate, mit welchen Grünstrom gekennzeichnet wird, nicht möglich.

Wie in Bild 8 dargestellt, erfolgt das Laden der Batteriefahrzeuge zu festen Zeiten. In diesen kann eine Versorgung mit dem genannten Anteil EE-Strom und entsprechend notwendiger Leistung aber nicht konsequent durchgehend zugesichert werden, da der EE-Strom natürlichen Schwankungen unterliegt. Folglich ist deshalb bis auf Weiteres zur Deckung des Energiebedarfs anteilig auch auf Strom aus konventionellen Kraftwerken mit fossilen Energieträgern zurückzugreifen. Dies ist mit Nachteilen für die ökologische Bilanz verbunden.

In Bezug auf den Systemwirkungsrad von BEMU ist zudem zu berücksichtigen, dass das Laden von Batterien die Bereitstellung kurzzeitiger und hoher Leistungen im Netz erfordert. Unter Umständen kann es notwendig werden, die punktuell verfügbare Netzleistung durch stationäre Speicher zu erweitern, um die hohe Ladeleistung kurzzeitig bereitstellen zu können. Dies kann in Form stationärer Speicher im Nahbereich von Ladestationen erfolgen, dies kann dies aber auch durch Bezug von Ladestrom über die Oberleitung aus Systemspeichern der Deutschen Bahn geschehen. Unabhängig von der Speichertechnologie hat dieser Aspekt nicht zu vernachlässigende Auswirkungen auf den Gesamtwirkungsgrad von BEMU. Bei der Verwendung von elektrochemischen Speichern (Wirkungsgrad: 90 % bis 97 % [18]), reduziert sich der Wirkungsgrad von der Stromerzeugung bis zum Rad auf etwa 58 % bis 63 %. Werden wie heute üblich Pumpspeicherkraftwerke (Wirkungsgrad: 70 % bis 82 % [18]) eingesetzt, sinkt dieser auf 45 % bis 53 %.

Im Unterschied hierzu wird grüner Wasserstoff immer nur dann mit Elektrolyseuren erzeugt, wenn Strom aus erneuerbaren Quellen vorhanden ist. Da eine größere Bevorratung (unabhängig von dem aktuell benötigten Bedarf) von H_2 möglich ist, lässt sich bei fehlendem Wind- oder Sonnenaufkommen die Erzeugungsleistung der Elektrolyseure entsprechend reduzieren. Umgekehrt ist bei größerem und vor allem günstigerem Angebot von Strom aus erneuerbaren Energiequellen der Weiterbetrieb der Elektrolyseure möglich, da sich Wasserstoff einfach speichern lässt. Wenn sich dadurch eine Abregelung der EE-Erzeugung vermeiden lässt, ist eine deutlich größere Nutzung erneuerbarer Energie möglich. Lokale Leistungsspitzen, wie sie bei der Ladung von Batteriefahrzeugen zu erwarten sind, lassen sich vermeiden und der Leistungsbedarf der Elektrolyseure an das EE-Dargebot anpassen.

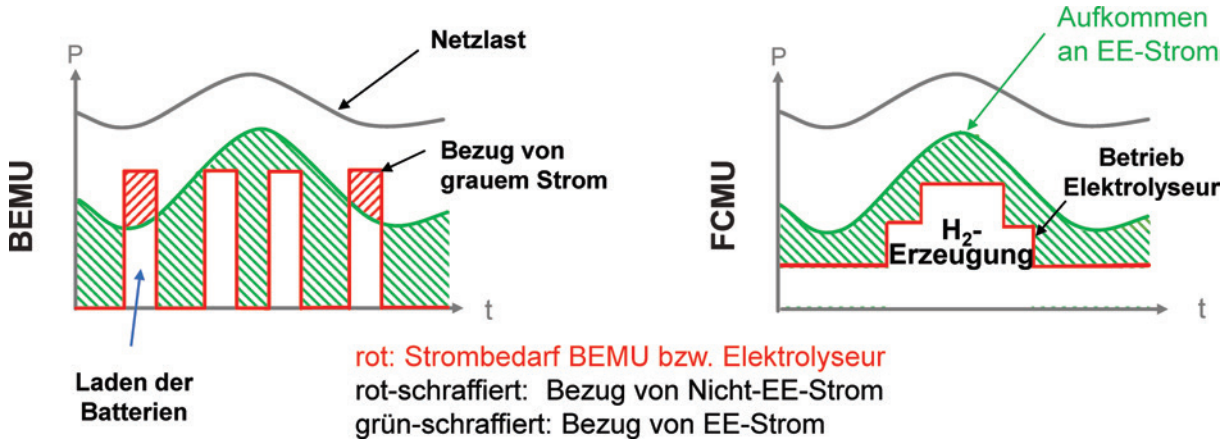


Bild 8. Exemplarischer zeitlicher Lastverlauf von Erneuerbaren Erzeugern und der Energieversorgung von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen (Quelle: VDI)

Effizienzsteigerungen für die Anwendung von FCMU

Grundsätzlich sind die aktuellen Wirkungsgrade der Einzelkomponenten von BEMU verhältnismäßig hoch. Transformatoren, Leistungselektronik und Antriebsmaschinen sind bewährte elektrotechnische Komponenten und bereits heute stark optimiert und besonders effizient. Ihr Einsatz ist im System „elektrische Bahn“ Standard, und Wirkungsgrade oberhalb von 90 % sind übliche Werte. Wesentliche Energieeinsparungen durch weitere Optimierung sind kaum zu erwarten.

Für die Komponenten von FCMU, maßgeblich der Brennstoffzelle, gelten abweichende Einschätzungen. Aus diesem Grund stellt sich die Frage, wie sich Effizienzsteigerungen für FCMU realisieren lassen. Aus heutiger Sicht empfehlen sich folgende Maßnahmen:

- Die am Markt verfügbaren H_2-Brennstoffzellensysteme wurden nicht für Bahnanwendungen entwickelt, sondern adaptiert. Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit sind Investitionen, Instandhaltungskosten und Lebensdauern zu optimieren und von den Entscheidungsträgern in öffentlichen Ausschreibungen konsequent zu fordern.

- Die Bezugskosten für Wasserstoff sind in der Regel höher als die für Strom. Eine hohe Effizienz des Antriebssystems, das heißt vor allem das Zusammenspiel von Brennstoffzelle und Dynamikbatterie, ist von höchster Relevanz. Ergänzend können hybride Systeme einen Beitrag für eine energieeffiziente Fahrweise leisten, was sich in geringeren Energiekosten für Fahrzeugbetreiber widerspiegeln sollte.

- Die Errichtung von Wasserstofftankstellen erfolgt derzeit schleppend. Zur Sicherstellung der Reichweite der Fahrzeuge ist deshalb eine maximale Speicherkapazität anzustreben. Als zukunftsorientierte Option könnte „automatisches Fahren“ in Verbindung mit der Nutzung von KI (künstlicher Intelligenz) z. B. für die Analyse von Energiebedarf und Pünktlichkeit helfen, den Energiebedarf zu minimieren. Dies sollte der Reichweite und den Betriebskosten von FCMU zugutekommen.

- Durch Reichweitenprädiktion und ein Antriebssteuerungssystem als Bestandteil des hybriden (Fahrer-)Assistenzsystems wird die Betriebsstabilität verbessert. Hierzu zählt auch ein effizientes Reagieren, z. B. durch Handlungsoptionen bei Störfällen.

2.4 Nutzungsorientierte Bewertung

Eine nutzungsorientierte Bewertung der technischen Lösungen erfordert mehr als den Fokus auf den Effizienzvergleich zu richten. Diverse betriebliche Einflussgrößen sind für einen Vergleich der Technologieoptionen auf einzelnen Verkehrslinien, aber auch für eine allgemeinere valide Evaluierung miteinzubeziehen.

Unter der Voraussetzung der planerischen und baulichen Umsetzbarkeit ist ein Abwägungsprozess zumindest zwischen **Reichweite, Energie- und Betriebskosten sowie einmalige (CAPEX) und wiederkehrende (OPEX) Aufwendungen** für Fahrzeuge wie auch Infrastruktur notwendig. Die Vorteile oberleitungsgebundener Fahrzeuge sollen möglichst erhalten bleiben. Sie betreffen insbesondere die vergleichsweisen günstigen Anschaffungskosten, die hohe Zuverlässigkeit wie auch Verfügbarkeit sowie den geringen Wartungsaufwand.

In den sogenannten **Life-Cycle-Costs (LCC)- oder Total-Cost-of-Ownership (TCO)-Analysen finden Energie- und Betriebskosten sowie Aufwendungen für Fahrzeug und Infrastruktur** über den Lebenszyklus (Schienenfahrzeug: min. 30 Jahre) für den Vergleich von BEMU und FCMU Berücksichtigung. Existierende Studien zeigen hierbei, dass BEMU und FCMU bereits heute eine wirtschaftliche Alternative zu Dieselfahrzeugen darstellen. Das Institut für Bahntechnik (IfB GmbH) machte so auf Basis der VDE-Studie „Bewertung klimaneutraler Alternativen“ transparent, dass auf dem aktuellen Dieselnetz in Düren (Szenario 1) BEMU mit stationärer Nachladeeinrichtung (Szenario 2) sowie FCMU mit errichteter Wasserstofftankstelle (Szenario 3) wirtschaftlich geeignete Lösungen darstellen. Eine vollständige Elektrifizierung wäre verglichen mit dem Dieselbetrieb zwar günstiger, im Vergleich zu den alternativen Antriebssystemen ist sie aber die teurere Variante. In Bild 9 sind die TCO in €/km für das jeweilige Technologieszenario dargestellt.

Streckenabhängige Untersuchungen geben dennoch nur bedingt Auskunft über die allgemeine Auswahl einer Technologieoption, da sie in hohem Maße von den festgelegten, möglicherweise auch lokal unterschiedlichen Gegebenheiten und Annahmen abhängig sind. Exemplarisch machen der angesetzte Dieselpreis von 1,2 €/ℓ (12 ct/kWh), der grüne Wasserstoffpreis von 4,5 €/kg (13,5 ct/kWh) oder der Strompreis von 12 ct/kWh in den Studien die Herausforderung deutlich. So basieren die Energiewerte (hellgrüner Abschnitt, Bild 9) wie auch die restlichen Teile der TCO-Analyse auf dem heutigen Wissenstand.

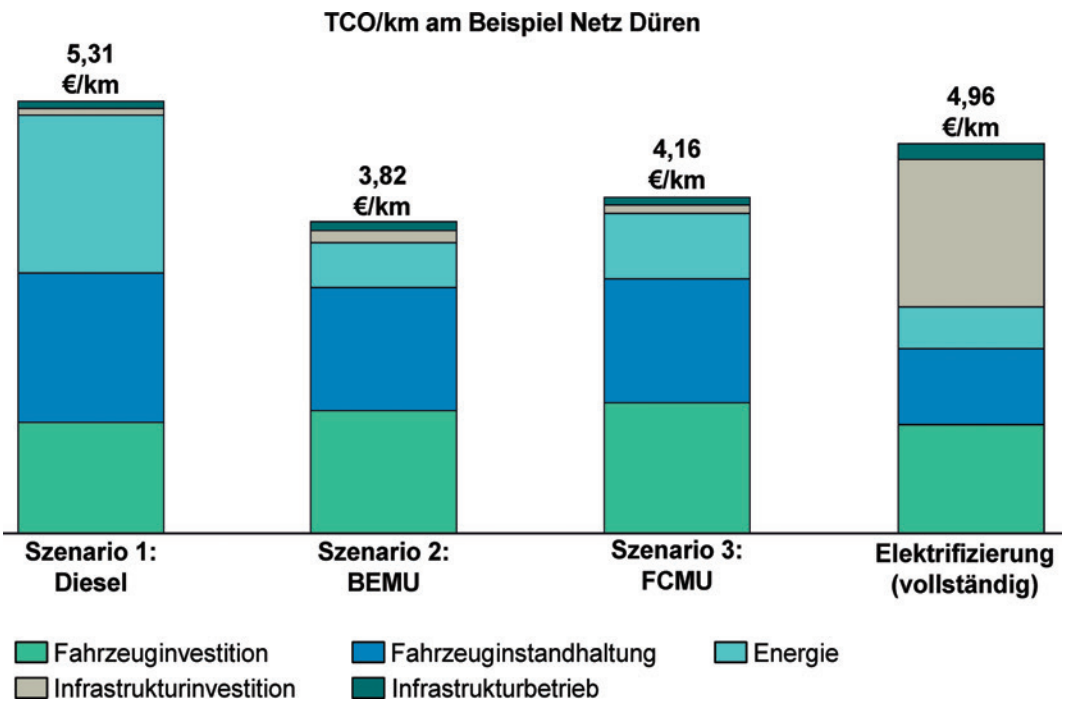


Bild 9. TCO-Analyse am Beispiel des Netz Düren nach [19]

Eine Bestimmung für die nächsten 30 Jahre im Voraus unterliegt einer Prognoseunschärfe, die im Hinblick auf die aktuellen Kosten wie auch globalen Umstände schwierig abbildbar ist. Grundsätzlich werden in den Kostenentwicklungen der Prognosemodelle aber globale Trends erfasst.

Ein Verschieben der Technologieauswahl in Richtung FCMU am Beispiel Düren ist neben möglichen günstigeren Wasserstoffbezugskosten über 30 Jahre, aber auch infolge von Potenzialen bei der Effizienzsteigerung oder durch eine Optimierung der Technologiekomponenten (Brennstoffzelle, Tanksysteme) inklusive deren Instandhaltung möglich. Auch eine positive Veränderung des Betriebs beim BEMU, z. B. durch reduzierte Batteriekosten oder längere Lebensdauern, bietet eine Chance für die Zukunft.

Die Reichweite gilt als weiterer relevanter Einflussfaktor. Für eine nutzerorientierte Bewertung dieser Einflussgröße bietet sich ein Vergleich der Speicherfähigkeit an. Die Darstellung in Bild 10 unterscheidet nach volumetrischer und gravimetrischer Dichte für Diesel, Batterie, Wasserstoff wie auch Erdgas. Als Referenz für die Bewertung des Speicherbedarfs dient ein Dieseltriebfahrzeug mit einem Wirkungsgrad von ca. 40 % (tank-to-wheel) und einem Energieverbrauch im Streckenzugdienst von ca. 100 ℓ Diesel/100 km. Die Reichweite wird mit 1.000 km veranschlagt.

Wie die Darstellung im linken Teil des Bilds zeigt, zeichnen sich konventionelle Systeme mit Diesel durch eine hohe spezifische volumetrische Dichte aus. Entsprechend ist das benötigte Volumen für eine Reichweite von 1.000 km mit 1,0 m^3 vergleichsweise gering. Zum Vergleich hierzu benötigt ein Batteriesystem trotz des hohen Wirkungsgrads von 77 % für die gleiche Distanz ein Speichervolumen von 10,5 m^3. Vergleichbares zeigt sich bei der gravimetrischen Dichte. Das Gewicht des Dieselkraftstoffs inklusive Tank beläuft sich auf 1,2 t, während für ein vergleichbares Batteriesystem 17,5 t zu veranschlagen sind. Wasserstoff als Speichermedium kann bezüglich der volumetrischen Dichte zwar auch nicht die Dieselwerte erreichen, der Energieträger weist aber gegenüber Batterien deutliche Vorteile auf.

Grundsätzlich sind beide Dichtewerte für den Schienenverkehr aufgrund des erforderlichen Platzbedarfs für neue Komponenten wie den Wasserstofftank und der Traktionsbatterie, aber auch aufgrund der maximal begrenzten Achslast von Schienenfahrzeugen bedeutend. Tendenziell besitzt im Schienenverkehr das Gewicht des Speichers im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern aufgrund des geringen Rollwiderstands jedoch eine geringere Bedeutung.

Zusammenfassend sprechen Anwendungen mit geringen Reichweiten wegen der höheren Effizienz und der Ausnutzung der Oberleitung für Vorteile von BEMU. Das Erreichen von höheren Reichweiten ohne Oberleitung ist wegen der deutlich größeren volumetrischen und gravimetrischen Dichte von Wasserstoff am einfachsten mit FCMU realisierbar. Aktuell ist die Nutzung von 350-bar-Technologien in Triebwagen des Schienenverkehrs für den Dieselersatzverkehr ausreichend. Höhere Drücke von 700 bar sind in Bezug auf die Energiespeicherung zwar theoretisch möglich, führen aber zugleich zu zusätzlichen technischen Anforderungen.

Auch bezüglich der Wirtschaftlichkeit im Lebenszyklus können aktuelle FCMU bereits sinnvoll anwendbar sein. Die TCO Analyse macht offensichtlich, dass es viel Potenzial für Anwendungen von FCMU gibt. Denn neben den möglichen Verbesserungen im Schienenfahrzeug oder sinkenden Anschaffungskosten auf Infrastrukturseite, z. B. Elektrolyseure, ist auch eine neue und grüne Energieversorgung Deutschlands bzw. der EU mit möglicher Sektorenkopplung zu berücksichtigen.

Die Sicherheit von wasserstoffversorgten Schienenfahrzeugen kann als gegeben betrachtet werden. Wasserstoff als Energieträger ist im Rahmen von umfangreichen Untersuchungen bewertet worden. In Verantwortung als offiziell benannte Stelle, auch als Notified Body (NoBo) bezeichnet, prüft der TÜV Süd Rail beispielsweise einige der aktuell in Deutschland verfügbaren FCMU von diversen Fahrzeugherstellern. In die Sicherheitsnachweisführung zum hybriden Wasserstoffsystem des Alstom iLint kann bereits auf eine Historie von über sieben Jahren zurückgeblickt werden, in den die Sicherheit des Systems wie auch die Einhaltung entsprechender Vorschriften als sicher bewertet worden sind. Das Gefährdungspotenzial wird nicht höher eingeschätzt als das bei konventionellen Kraftstoffen. Diverse Vorschriften und Normen liefern heute die Basis für eine sicherheitskonforme Auslegung, wenn auch gleich für den Bahnverkehr noch viele Optimierungen bezüglich einer Aufwandsreduzierung bestehen. Insbesondere ist eine Anpassung von Vorschriften wie auch das Erstellen bahnspezifischer Normen notwendig, um die Zulassung für FCMU bei gleichbleibender Sicherheit zu vereinfachen.

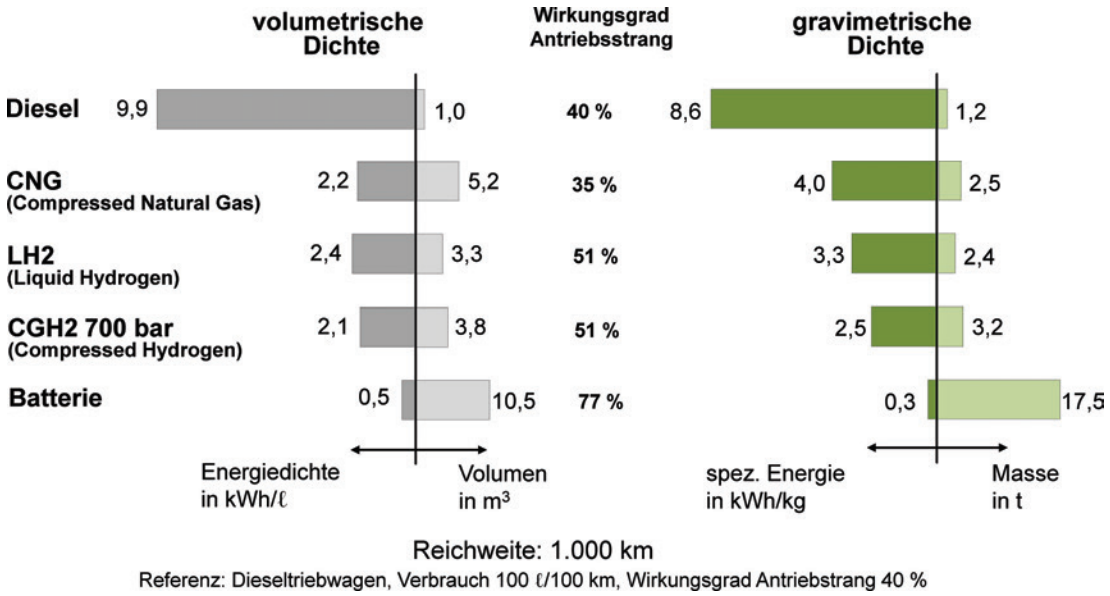


Bild 10. Volumetrische und gravimetrische Energiedichte von Fahrzeugenergiespeichern [20]

3 Energieversorgung

Kernaussagen

- Der Dieselverbrauch der Deutschen Bahn AG beläuft sich auf rd. 328.000 t/a. Die Substitution dieses Energieträgers bietet Potenziale für den Einsatz von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen.
- Das Aufkommen an grünem Wasserstoff wird im Jahr 2030 trotz Importe geringer sein als der erwartete Bedarf. Dies spricht dafür, dass der Schienenverkehr längerfristig seinen Bedarf mit eigenen Erzeugungseinheiten deckt.
- Für die H_2-Erzeugung empfehlen sich aus heutiger Sicht PEM-Elektrolyseure. Sie ermöglichen schnelle Lastwechsel und einen netzdienlichen Betrieb, vereinfachen die Gasverdichtung durch einen hohen Betriebsdruck und bieten mit hohen Stromdichten die Basis für kompakte Bauweisen.
- Bis Leitungssysteme für Wasserstoff oder H_2-Erzeugungseinrichtungen aufgebaut sind, kann die Versorgung der Tankstellen mit Wasserstoff per Straße oder Schiene erfolgen. Die gasförmige Speicherung an Bord von Schienenfahrzeugen spricht für die Anlieferung im gasförmigen Zustand.
- Steigende Preise für fossile Energieträger sollten der Wettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff zugutekommen.
- Die Erwartungen zu den Abgabepreisen von grünem H_2 differieren deutlich. In optimistischen Analysen werden für 2030 ohne Berücksichtigung von Steuern und Vermarktungskosten an der Tankstelle Abgabepreise von 10 ct/kWh bis 15 ct/kWh (3,3 bis 4,9 €/kg) erwartet.

Die Bereitstellung von grünem Wasserstoff ist bei Brennstoffzellenfahrzeugen langfristig zwingend. Voraussetzung ist hierbei, dass die Erzeugung des Wasserstoffs mit EE-Strom erfolgt. Dies setzt neue Infrastrukturen sowohl bei der H_2-Erzeugung als auch Verteilung voraus.

3.1 Energiepotenzial für alternative Antriebssysteme

Das Energiepotenzial für alternative Antriebsysteme lässt sich aus dem Energiebedarf der Fahrzeuge auf nicht elektrifizierten Eisenbahnstrecken ableiten. Der hier bestehende Zugverkehr erfolgt mit Dieseltriebfahrzeugen, die durch Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge ersetzt werden können.

Nach Informationen der Deutschen Bahn AG wurden 2020 rund 23.300 GWh an elektrischer Energie für Stationen und Betrieb benötigt, hiervon 7.263 GWh an Traktionsenergie [21]. Hinzu kamen 386 Mio. Liter (rd. 328.000 t/a = 3.890 GWh/a) Dieselkraftstoff, die sich auf drei Bereiche verteilen [22]:

- Fernverkehr: 2,5 %
- Nahverkehr: 76,1 %
- Güterverkehr: 21,5 %

Bild 11 beschreibt die Entwicklung des Dieselverbrauchs der Deutschen Bahn in den Jahren 1994 bis 2014. Die Entwicklung verdeutlicht, dass die Elektrifizierung des Netzes und die Stilllegung insbesondere nicht elektrifizierter Nebenstrecken zu einem abnehmenden Dieselverbrauch geführt haben.

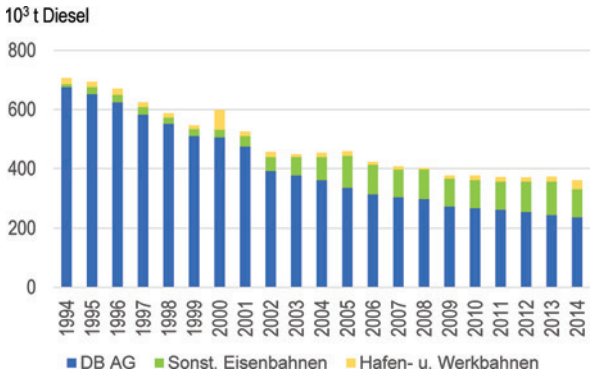


Bild 11. Dieselverbrauch im deutschen Schienenverkehr [23]

Mit Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen lässt sich der Energieträger Diesel anteilig substituieren. Folgende Aufkommen an EE-Strom und grünem Wasserstoff (ohne CO_2-Emissionen erzeugt) sind in Abhängigkeit von der Substitutionshöhe denkbar (Tabelle 1).

Tabelle 1. Substitutionspotenzial

Substitutionspotenzial	Ersatz durch FCMU		Ersatz durch BEMU	
3.890 GWh Diesel	1/3	1.297 GWh 38.950 t H_2	2/3	2.593 GWh
	2/3	2.593 GWh 78.576 t H_2	1/3	1.297 GWh

Die Beschaffung von EE-Strom für Batteriefahrzeuge entspricht der am Markt üblichen Vorgehensweise. Entweder ist er über die Direktvermarktung, Strombörse, Stromhändler oder eigene EE-Erzeugungsanlagen zu beziehen. Als Großkunde am Energiemarkt sollte die Bahn über geeignete Tools für die Beschaffung verfügen. Insgesamt erhöht sich das Strombeschaffungsvolumen an Traktionsenergie der Bahn bei 1/3 Substitution um rd. 18 %; bezogen auf den gesamten Strombedarf der Bahn ist von einem Mehrbedarf von 5,5 % auszugehen. Bei 2/3 Substitution erhöht sich der Bedarf an Traktionsenergie um 36 %, der Gesamtbedarf um 11 %.

Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge ist derzeit noch kein Handelsprodukt bei der Bahn. Die folgenden Ausführungen bieten Ansätze für die Beschaffung des neuen Energieträgers.

3.2 Wasserstoff

Wasserstoff wird nach der Art seiner Herstellung unterschieden (Bild 12). Grauer Wasserstoff resultiert üblicherweise aus der Erdgas-Reformierung unter Freisetzung von CO_2. Bei blauem Wasserstoff wird das während der Erdgas-Reformierung anfallende CO_2 separiert und einer Endlagerung zugeführt. Die Gewinnung von grünem Wasserstoff erfolgt per Elektrolyse unter Nutzung von zeitgleich erzeugtem überschüssigem regenerativem Strom, der nicht für andere Zwecke mit einer besseren Klimaeffizienz eingesetzt werden kann, z. B. für die Substitution von Kohlestrom in der öffentlichen Versorgung.

Die Gewinnung von Wasserstoff aus Biomasse ist zwar frei von fossilen Energien, es können aber CO, CO_2 und Methan freigesetzt werden. Der Prozess gilt nicht als klimaneutral.

Wasserstoff, als „Nebenprodukt der chemischen Industrie“ bei der Chloralkali-Elektrolyse gewonnen, dient in der Regel zur Deckung des Energiebedarfs der Produktion. Eine Verwertung im Schienenverkehr erscheint unwahrscheinlich.

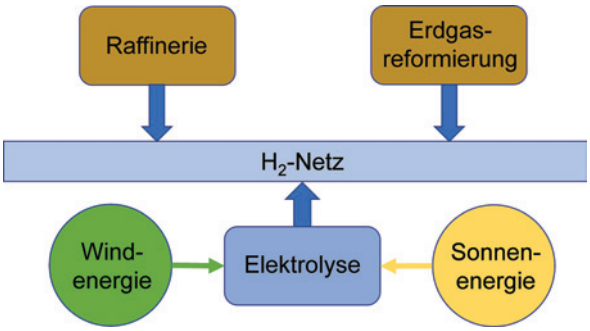


Bild 12. Verfahren zur Gewinnung von H_2 (Quelle: VDI)

3.2.1 Wasserstoffbeschaffung

Die Beschaffung von Wasserstoff kann durch Bezug aus dem Ausland oder Eigenerzeugung im Inland erfolgen. Potenzielle Akteure für die Beschaffung sind:

- DB-Energie
- Bahngesellschaften oder Dritte
- Industrieunternehmen als Betreiber der H_2-Tankstellen
- Energie- und Gasunternehmen

Import ist dann eine Option, wenn auch in den betroffenen Ländern der benötigte Wasserstoff mittels regenerativem Stromüberschuss erzeugt wird. Vertiefte Ausführungen hierzu finden sich in der Nutzfahrzeugstudie von VDE und VDI [24]. Für die Eigenerzeugung von grünem Wasserstoff bieten sich zentrale Einrichtungen aber auch Vor-Ort-Elektrolyseure im Nachbereich von Tankeinrichtungen.

3.2.2 Wasserstoff als begrenzte Ressource

Das wachsende internationale Interesse an der Versorgung mit Wasserstoff wirft die Frage nach dem verfügbaren Aufkommen dieses Energieträgers in Deutschland auf. Bei begrenzten Erzeugungsaktivitäten wird die steigende Nachfrage dazu führen, dass sich in den nächsten Jahren ein Wettbewerb um die Nutzung von Wasserstoff entwickelt.

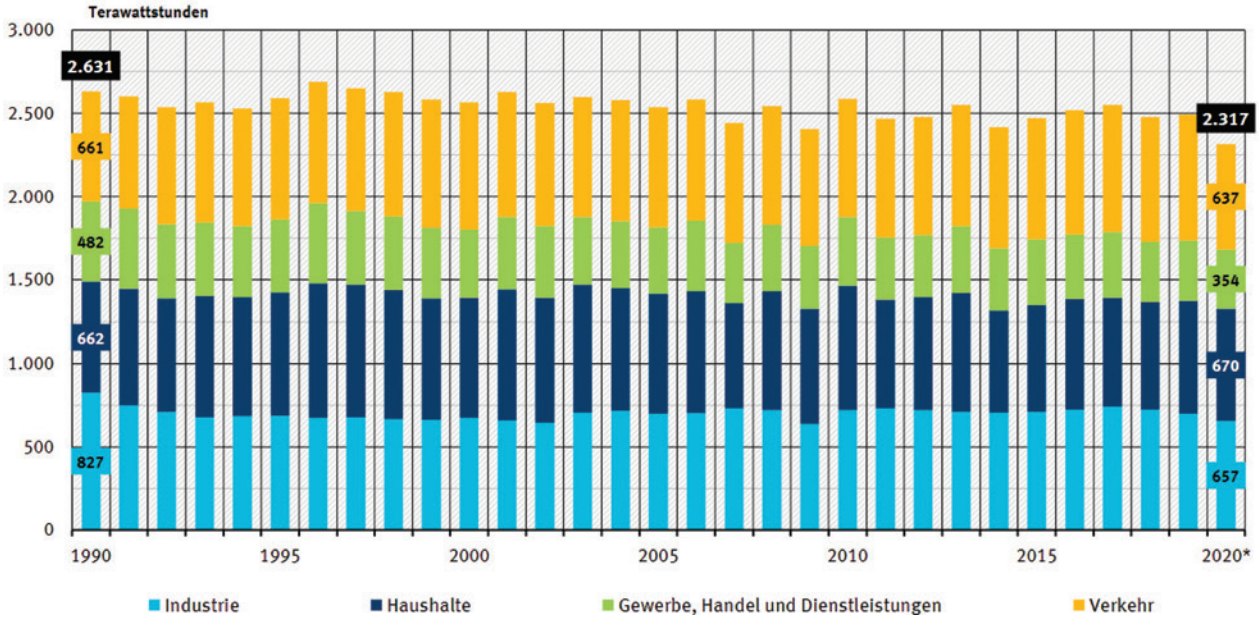


Bild 13. Entwicklung des Endenergiebedarfs in Deutschland [26]

Für die Bewertung des verfügbaren H_2-Potenzials bietet die Energiebilanz Deutschlands Anhaltswerte. In den letzten Jahren lag der Endenergiebedarf bei 2.500 TWh/a (Bild 13). Hiervon entfielen rd. 640 TWh/a auf den Verkehr, das heißt etwa 25 % [25]. Der Anteil des von der Deutschen Bahn benötigten Dieselkraftstoffs – das Substitutionspotenzial für Wasserstoff – lag bei 0,16 % des Endenergiebedarfs. Dies entspricht 0,61 % des im Verkehrssektor bestehenden Bedarfs.

Der Verbrauch an Wasserstoff ist Teil des Endenergieaufkommens. Der derzeit graue Wasserstoff beläuft sich auf etwa 55 TWh, das heißt rd. 2,2 % des Endenergiebedarfs, wobei der Energieträger vorrangig in der Industrie und Petrochemie zum Einsatz kommt [27]. Die nationale Wasserstoffstrategie geht davon aus, dass 2030 ein „Wasserstoffbedarf“ von 90 bis 110 TWh/a besteht und dass ein Großteil dieses grauen Wasserstoffs bis 2030 auf grünen Wasserstoff umzustellen ist. Dieses H_2-Aufkommen entspricht rd. 4 % des Endenergiebedarfs, und um dieses Aufkommen werden verschiedenen Sektoren konkurrieren.

Die Verteilung des grünen Wasserstoffs wird sich am Preis orientieren. Solange das Aufkommen begrenzt ist, wird die Politik regulierend eingreifen müssen, sei es über entsprechende Steuern oder mittels Subventionen. In der Nationalen Wasserstoffstrategie wird zwar nicht priorisiert, allerdings wird die Industrie und der Schwerlastverkehr vor den Dieseltriebfahrzeugen im Nahverkehr genannt [28]. Da die Bahn mit ihren insgesamt ca. 23.300 GWh Stromverbrauch bereits als weitgehend grün gewertet wird, könnten damit andere Sektoren hier den Vorrang genießen.

Diese Spannungslage spricht dafür, dass der Schienenverkehr seinen Wasserstoff selbst erzeugen sollte. Einen möglichen Ansatz dazu hat der VDE bereits in seiner Dialogreihe beschrieben [29]. Er spricht sich für Elektrolyseure als Regellast in den Netzen aus. Zwei positive Effekte verbinden sich mit dieser Vorgehensweise: Erzeugungsschwankungen bei der Nutzung regenerativer Energien lassen sich ausgleichen und die Bahn würde gleichzeitig grünen Wasserstoff produzieren. Als kritisch ist jedoch die aus heutiger Sicht geringe Auslastung der Anlagen (geringe Volllaststunden) zu werten.

3.2.3 Wasserstofferzeugung mit Elektrolyseuren

Die Bereitstellung von grünem Wasserstoff erfordert den Einsatz von EE-Strom sowie geeigneter Elektrolyseure. Als eine zukunftsgerichtete Option für eine nachhaltige Verkehrspolitik ist die Vor-Ort-Elektrolyse zu werten. Mit der Effizienzverbesserung und der Reduktion der Baugröße von Elektrolyseuren wird es wirtschaftlich interessant, die H_2-Produktion in die Verbrauchsschwerpunkte zu verlagern, in denen gleichzeitig ausreichend EE-Strom zur Verfügung steht. Neben dem Entfall von H_2-Transporten und dem Verzicht auf den Bau neuer Leitungssysteme bieten dezentrale Erzeugungseinrichtungen Vorteile im Sinne der Sektorenkopplung. Indem sie netzdienlich betrieben werden, können sie zur Spannungsstabilisierung und Netzregelung beitragen sowie das Redispach im Rahmen der Lastverteilung unterstützen.

Die lokale Erzeugung in Verbindung mit dem Schienenverkehr bietet darüber hinaus Vorteile im Sinne der Anlagensteuerung. Da der Bahnverkehr auf verlässlichen Fahrplänen basiert, ergeben sich für die H_2-Erzeugung kalkulierbare Abnahmemengen und ein planbarer Anlageneinsatz, soweit ausreichend Strom

aus erneuerbaren Energien zur Verfügung steht. Die Nähe zu den Verbrauchern bietet zusätzlich die Möglichkeit, die bei der Elektrolyse freiwerdende Wärme einer Verwertung zuzuführen.

Drei Verfahren stehen zur Diskussion:

- alkalische Wasserelektrolyse (Niedertemperaturverfahren)
- PEM-Wasserelektrolyse (Niedertemperaturverfahren)
- Hochtemperatur-Elektrolyse (Hochtemperaturverfahren)

Wie Tabelle 2 zeigt, weist die Alkali-Elektrolyse unter den Niedertemperaturverfahren den höchsten Wirkungsgrad auf. Auch wenn Anlagen im Leistungsbereich von wenigen MW möglich sind, ist die Technologie eher für größere Leistungen prädestiniert. Ein Lastfolgebetrieb zur Unterstützung der Stromversorgung ist nur eingeschränkt möglich.

Die **PEM-Elektrolyse** eignet sich für schnelle Lastwechsel [31], weist einen hohen Betriebsdruck auf mit Vorteilen für die Gasnutzung und bietet mit hohen Stromdichten die Basis für kompakte Bauweisen. In Bezug auf die Lebensdauer besteht noch Verbesserungsbedarf. Neuere Entwicklungen sprechen für Effizienzvorteile von PEM-Niederdrucksystemen mit großen Anlagenleistungen (> 10 MW). Wirkungsgrade von 75 % sind möglich, allerdings verbunden mit dem Nachteil einer aufwendigeren Nachverdichtung.

Für die **Hochtemperatur-Elektrolyse** ist ein hoher Wirkungsgrad charakteristisch, der sich jedoch durch Wärmeverluste während längerer Stillstandszeiten relativiert. Ein Lastfolgebetrieb ist nur eingeschränkt möglich, das hohe Temperaturniveau bietet aber Potenziale für die Auskopplung von Wärme.

Zusammenfassend ergeben sich Vorteile für die PEM-Elektrolyse. Unter bestimmten Prämissen (kein netzdienlicher Betrieb) ist aber auch der Einsatz von Alkali-Elektrolysen denkbar. Längerfristig könnten auch für Hochtemperatur-Elektrolyseure wegen ihrer hohen Wirkungsgrade und dem großen Abwärmepotenzial Einsatzmöglichkeiten bestehen.

3.2.4 Wasserstoffversorgung von Tankstellen des Schienenverkehrs

Schienenfahrzeuge weisen von der Traktionsleistung und vom Verbrauch her eine mit großen Nutzfahrzeugen vergleichbaren Bedarf auf. Die Einrichtungen zur Betankung der Fahrzeuge sollten deshalb von der Konzeption her vergleichbar sein.

Mit ihrer Studie „Klimafreundliche Nutzfahrzeuge“ [32] haben VDE und VDI nachgewiesen, dass für die Versorgung von Nutzfahrzeugen neue H_2-Tankstellen mit den für Nutzfahrzeuge geeigneten Vorratsmengen und Tankleistungen benötigt werden. Dies spricht dafür, H_2-Tankstellen für Schienenfahrzeuge dort zu errichten, wo sie gleichzeitig auch dem Nutzfahrzeugsektor zugutekommen können. Da bei Schienenfahrzeugen derzeit keine flüssige Speicherung vorgesehen ist, ergeben sich Synergieeffekte nur bei einer gasförmigen Speicherung. Neben der Vermeidung von Doppelinvestitionen zählen hierzu geringere Betriebskosten sowie eine größere Auslastung der Anlagen.

Tabelle 2. Eigenschaften von Elektrolyseuren [30]

	Alkali-Elektrolyse	PEM-Elektrolyse	Solid-Oxide-Elektrolyse
Wirkungsgrad in %			
Ist	65	63	81
Potenzial	69	68	83
Stromdichte in A/cm²	0,2-0,5	2	0,46-1,3
Leistung in MW	bis 130	bis 6	0,018
Temperatur in °C	50-80	50-80	600-900
Lastbereich in %	20-100	5-100	k. A.
Lastgradient in %/s	< 1	< 10	0,05
Lebensdauer in h	ca. 90.000	ca. 50.000	k. A.

Bild 14. H_2-Transport in flüssiger (links) und gasförmiger Form (rechts) [33] (Quelle: Linde GmbH, Pullach)

Für die H_2-Versorgung der Tankstellen bietet sich die Anlieferung per Straße oder Schiene an (Bild 14). Der Transport per Straße in flüssiger Form (LH2) oder als Druckgas (CGH2) gilt als etablierte Technik, wobei die größere Energiedichte normalerweise für den Flüssigtransport spricht. Die flüssige Transportkapazität beträgt bis zu 4.000 kg. Denkbar ist aber auch die Anlieferung im gasförmigen Zustand, wobei abhängig von der Druckstufe bis zu 1.000 kg möglich sind.

Der Transport per Schiene ist noch nicht Stand der Technik. Er bietet aber gegenüber dem Straßentransport Vorteile. Er entlastet die Straßen in Ballungsräumen und leistet einen Beitrag zur Reduzierung von Lärm und Feinstaub bei mit dem Straßentransport vergleichbaren Kosten [34]. Längerfristig bietet sich die Nutzung leitungsgebundener Verteilungssysteme oder die Erzeugung vor Ort an. Leitungsgebundene Verteilungssysteme stehen heute nur in eingeschränktem Maße zur Verfügung. Sie finden dort Verwendung, wo im größeren Stil Industriebetriebe versorgt werden müssen, das heißt vorrangig im Einflussbereich der chemischen Industrie und Raffinerien.

Neben der Errichtung neuer Leitungen oder Umrüstung bestehender Erdgasleitungen ist die Zumischung von H_2 zu Erdgasleitungen denkbar. Zumischraten bis zu 10 % gelten als unkritisch. Die Nutzung dieser Option für Schienenfahrzeuge bedeutet jedoch, dass an den Abnahmestellen der Wasserstoff zurückgewonnen werden muss. Geeignete Membranen zur Gastrennung werden derzeit getestet [35]. Ergänzend werden zusätzlich große Verdichteranlagen benötigt, um das Gas auf den benötigten Speicherdruck (ca. 400 bar) zu verdichten.

Wie bereits dargestellt, gilt die Vor-Ort-Erzeugung mittels PEM-Elektrolyse als aussichtsreiche Option. Als Vorteil der PEM-Elektrolyse ist zudem der hohe Betriebsdruck von ca. 35 bar zu werten [36]. Er ermöglicht eine kompakte Bauweise, und im Vergleich zu anderen Elektrolyseuren ist für die H_2-Verdichtung auf 400 bar von einem deutlich geringeren Bedarf an Verdichterarbeit auszugehen.

Zusammenfassend sprechen die vorstehenden Aussagen dafür, dass die Tankstellen im ersten Schritt über Straßentransporte versorgt werden. Schienentransporte könnten diese mittelfristig ergänzen. Längerfristig bietet sich die Vor-Ort-Elektrolyse als Zukunftsoption an. Hiermit wären auch die Voraussetzungen für einen Beitrag zur Sektorenkopplung gegeben.

3.3 Energiepreisentwicklung

Die Preisentwicklung bei den fossilen Energieträgern (Bild 15) bestimmt maßgeblich die Konkurrenzfähigkeit von Wasserstoff. Folgende Einflussgrößen werden aus heutiger Sicht die Preisentwicklung insbesondere bei Heizöl, Diesel und Erdgas, beeinflussen:

- Die politisch motivierten Maßnahmen zur Beschränkung von russischem Öl gehen einher mit signifikant steigenden Heizöl- und Dieselpreisen. Bereits heute liegen die Großhandelspreise (ohne Steuern) für leichtes Heizöl bei über 1 €/ℓ (Bild 15 links).
- Das Interesse der Ölförderländer an steigenden Einnahmen könnte den Effekt des politischen Boykotts noch verstärken.
- Die weitere wirtschaftliche Entwicklung könnte zu einer steigenden Nachfrage nach Öl und Gas führen mit preissteigernden Effekten.
- Die Entwicklung der CO_2-Zertifikatspreise (Bild 15 rechts) führt zu Preiserhöhungen bei allen fossilen Energieträgern. Seit 2018 ist hier ein kontinuierlicher Anstieg des Zertifikatspreises zu beobachten. Bezogen auf einen Dieselpreis von 1 € (Großhandelspreis, Stand Frühjahr 2022) ist bei einem CO_2-Preis von 85 €/t von einer zusätzlichen Preiserhöhung durch die Zertifikate um rd. 23 % auszugehen.
- Langfristig sollte die verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien preisdämpfend wirken.

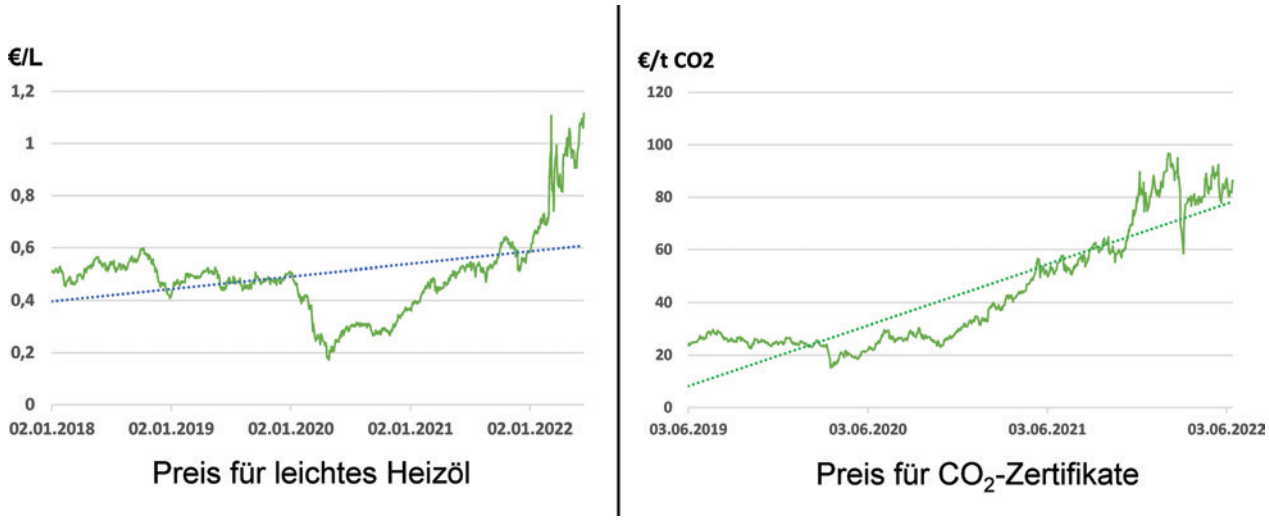


Bild 15. Entwicklung der Preise für leichtes Heizöl (Großhandel) [37] und CO_2-Zertifikate [38]

3.3.1 Preisentwicklung von grünem Wasserstoff

Die Entwicklung des Preises für grünen Wasserstoff ist im Rahmen der VDE/VDI-Studie zu klimafreundlichen Nutzfahrzeugen bewertet worden, wobei sich diese Analyse an diversen Drittstudien orientiert. Folgende Schlussfolgerungen lassen sich ziehen [39]:

- Die Erwartungen zu den Abgabepreisen von H_2 differieren deutlich. Sie gehen ohne Berücksichtigung von Steuern und Vermarktungskosten von Wasserstoffkosten an der Tankstelle im Jahr 2030 von 10 bis 15 ct/kWh (3,3 bis 4,9 €/kg) aus.

- Die Produktionskosten für Wasserstoff in den Jahren 2030 bzw. 2050 sollten nach McKinsey bezogen auf den heutigen Preistand bei 6,0 bis 4,5 ct/kWh, entsprechend 2,00 und 1,50 €/kg, liegen. Nach der Delft University of Technology ist demgegenüber von einem Wert von 19 ct/kWh bzw. 6,33 €/kg auszugehen.

  Neuere Veröffentlichungen vom 21. Januar 2021 von Nel ASA, ein global operierendes und im H_2-Bereich tätiges norwegisches Unternehmen, zeigen, dass unter bestimmten Prämissen 2025 H_2-Produktionskosten von 1,5 USD/kg, das heißt 4,5 ct/kWh (1,5 €/kg), möglich sind. Dies würde der Größenordnung von McKinsey entsprechen [40]. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass bei dem norwegischen Unternehmen Wasserkraft ganzjährig zu sehr günstigen Konditionen zur Verfügung steht, sodass eine hohe Auslastung der Anlagen gegeben ist.

- Der Vergleich der Wasserstoff-Bereitstellungskosten zeigt, dass trotz höherer Produktionskosten bei einem Bezug von Windstrom aus der Nordsee Vorteile von ca. 2 ct/kWh gegenüber der Versorgung aus Nordafrika zu erwarten sind. Die Vorteile der günstigen Erzeugungskosten in Nordafrika werden durch höhere Transportkosten überkompensiert.

Bild 16 fasst diese Aussagen nochmals zusammen. Hiernach könnte ab dem Jahr 2030 grüner Wasserstoff mit den Produktionskosten von grauem Wasserstoff konkurrieren.

Zu berücksichtigen ist, dass die im Bild 17 angegeben Daten Importpreise darstellen. Sie sind als optimistisch zu werten und korrespondieren nicht mit der aktuellen Preissituation. Derzeit ist von 8,5 € je kg H_2 auszugehen.

3.4 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Verwendung von grünem Wasserstoff in den unterschiedlichen Verkehrssektoren sind derzeit nicht einheitlich. Sie sollten angeglichen werden. Aktuell ist nach dem Bundesimmissionsschutzrecht (BImSchG) [42] die Verwendung von grünem Wasserstoff für den Treibhausgas-Quotenhandel nur im Straßenverkehr zulässig. Zukünftig sollte auch die Nutzung im Schienenverkehr als Erfüllungsoption zur Vermeidung von CO_2-Emissionen zulässig werden. Hierdurch würde sich die Wettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff im Schienenverkehr deutlich verbessern.

Grüner Wasserstoff wird im Schienenverkehr eine wachsende Rolle spielen. Dabei sollten hier die gleichen gesetzlichen Rahmenbedingungen wie in anderen Verkehrssektoren gelten. Das heißt, auch im Schienenverkehr sind die in BImSchG vorgegebenen Treibhausgasminderungen von –25 % bis 2030

einzuhalten. Die Nutzung von grünem Wasserstoff als „Erfüllungsoption“ nach BImSchG stößt aber heute noch auf dessen Ausschluss nach § 3 Abs. 1 desselben Gesetzes. Hiernach können strombasierte Kraftstoffe wie grüner Wasserstoff nach Anlage 1 Verwendung finden, wenn diese „im Straßenverkehr“ in den Verkehr gebracht werden. Diese Regelung sollte umgehend im Sinne einer Gleichbehandlung der Verkehrsträger angepasst werden.

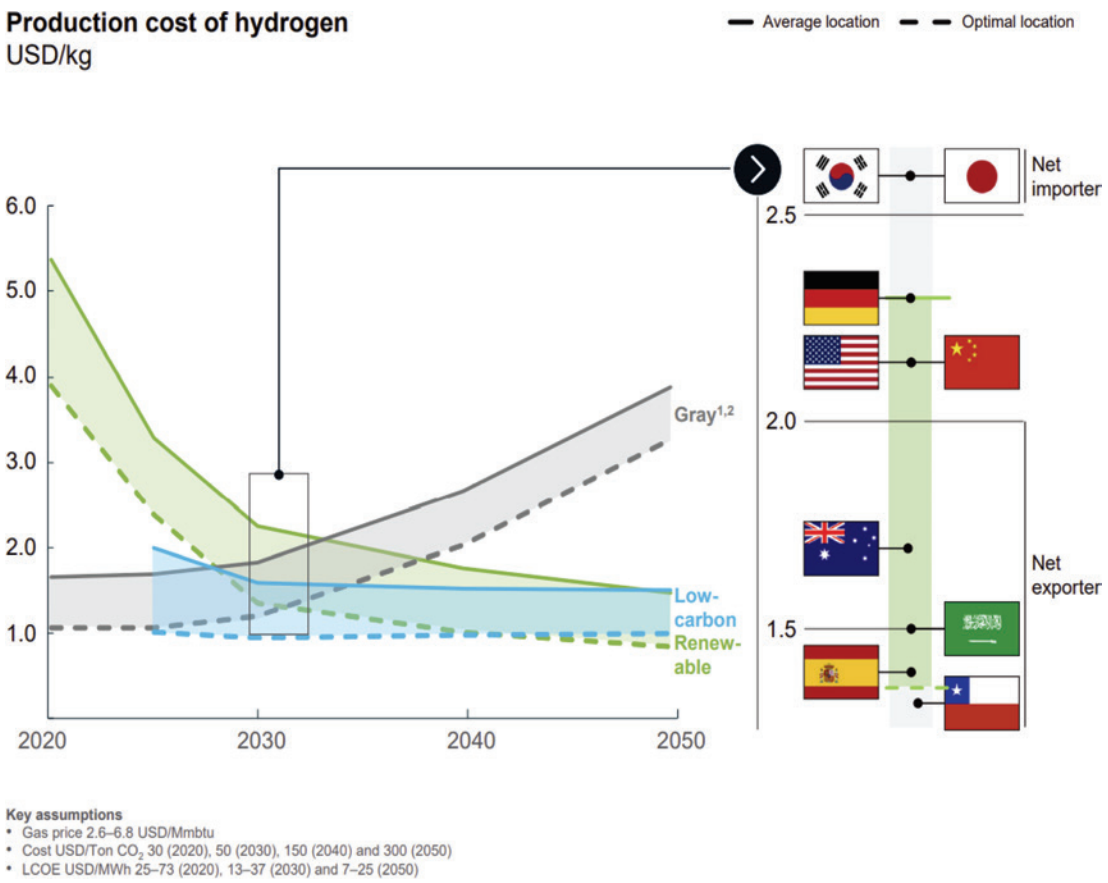


Bild 16. Entwicklung des H_2-Preises in Abhängigkeit von der Herstellung [41] (Quelle: Hydrogen Council)

4 Sektorenkopplung

Kernaussagen

- Wasserstoff ist als universeller Energieträger in vielen Bereichen der Wirtschaft einsetzbar. Er bietet die Basis für die politisch gewünschte Sektorenkopplung.
- Das Laden der Batterien in BEMU erfolgt bedarfsabhängig und somit unabhängig vom aktuellen EE-Dargebot. Demgegenüber wird grüner Wasserstoff immer dann erzeugt, wenn für den Betrieb der Elektrolyseure ausreichend Strom aus erneuerbaren Quellen vorhanden ist.
- H_2-Tankstellen sind flexibel und skalierbar. Durch gemeinsame Nutzung der Infrastruktur mit anderen Verkehrsträgern lassen sich Akzeptanz, Effizienz und Wirtschaftlichkeit steigern und Synergieeffekte heben.
- Zukünftige dezentrale Energieversorgungskonzepte erfordern u. a. eine Versorgung mit grünem Wasserstoff. Die Bevorratungseinrichtungen des Schienenverkehrs könnten die Basis für den Aufbau dezentraler Versorgungseinrichtungen darstellen.

Wasserstoff ist als Sekundärenergieträger universell nutzbar. Einsatzmöglichkeiten liegen neben der Strom-, Gas- und Wärmewirtschaft in vielen Bereichen der Industrie. Hierzu zählen die chemische Industrie, die Stahlgewinnung sowie die Produktion synthetischer Energieträger für spezielle Anwendungen wie der Luftfahrt.

Dieses universelle Einsatzpotenzial von Wasserstoff bietet gute Bedingungen für die politisch gewünschte Sektorenkopplung. Mit Wasserstoff lassen sich in allen Bereichen der Wirtschaft fossile Energieträger substituieren. In Verbindung mit der Gewinnung aus erneuerbaren Energien bietet sich die Basis, um Wasserstoff als einen weiteren Baustein für die nachhaltige Energieversorgung des Schienenverkehrs zu etablieren.

Bild 17 zeigt einige Optionen, die sich bei einer Versorgung des Schienenverkehrs mit Wasserstoff über die Sektorenkopplung nutzen lassen:

- Wasserstoff findet in unterschiedlichsten Wirtschaftsbereichen Verwendung. Hierzu zählen neben der chemischen Industrie und der Stahlindustrie, der Verkehrssektor und der Endenergiebereich. Dies bietet Potenziale im Sinne des Energieaustauschs und der Energiebeschaffung.
- H_2-Tankstellen sind flexibel und skalierbar. Zusätzliche Komponenten, Speicher oder Betankungsanlagen können bei Bedarf hinzugefügt oder gegebenenfalls reduziert werden. Durch gemeinsame Nutzung der H_2-Infrastruktur, vorrangig durch unterschiedliche Akteure des Verkehrssektors, kann die Akzeptanz, Effizienz und Wirtschaftlichkeit gesteigert werden.
- Die Anlieferung von Wasserstoff per Straße oder Schiene sollte sich im Rahmen einer größeren Nachfragemenge durch zusätzliche Abnehmer kostengünstiger gestalten lassen.
- Zukünftig wird ein Teil der vorhandenen Erdgasleitungen auf Wasserstoff umgestellt werden. Das Wasserstoffnetz wird damit neben dem Stromnetz zum „Backbone“ der zukünftigen Energieversorgung.
- Für die Stromversorgung der Elektrolyseure kommt EE-Strom zum Einsatz, der gleichzeitig für die Gebietsversorgung Verwendung findet.
- Bei dem Betrieb von Elektrolyseuren fallen rd. 25 % bis 30 % Verlustwärme an. Sie kann bei vorhandenem Bedarf zur Wärmeversorgung benachbarter Gebäude genutzt werden und führt damit zu einer Steigerung der Effizienz.
- Zukünftige dezentrale Energieversorgungskonzepte, z. B. mit Brennstoffzellen, erfordern eine Versorgung mit grünem Wasserstoff. Die H_2-Bevorratungseinrichtungen des Schienenverkehrs könnten hierzu einen Beitrag leisten.

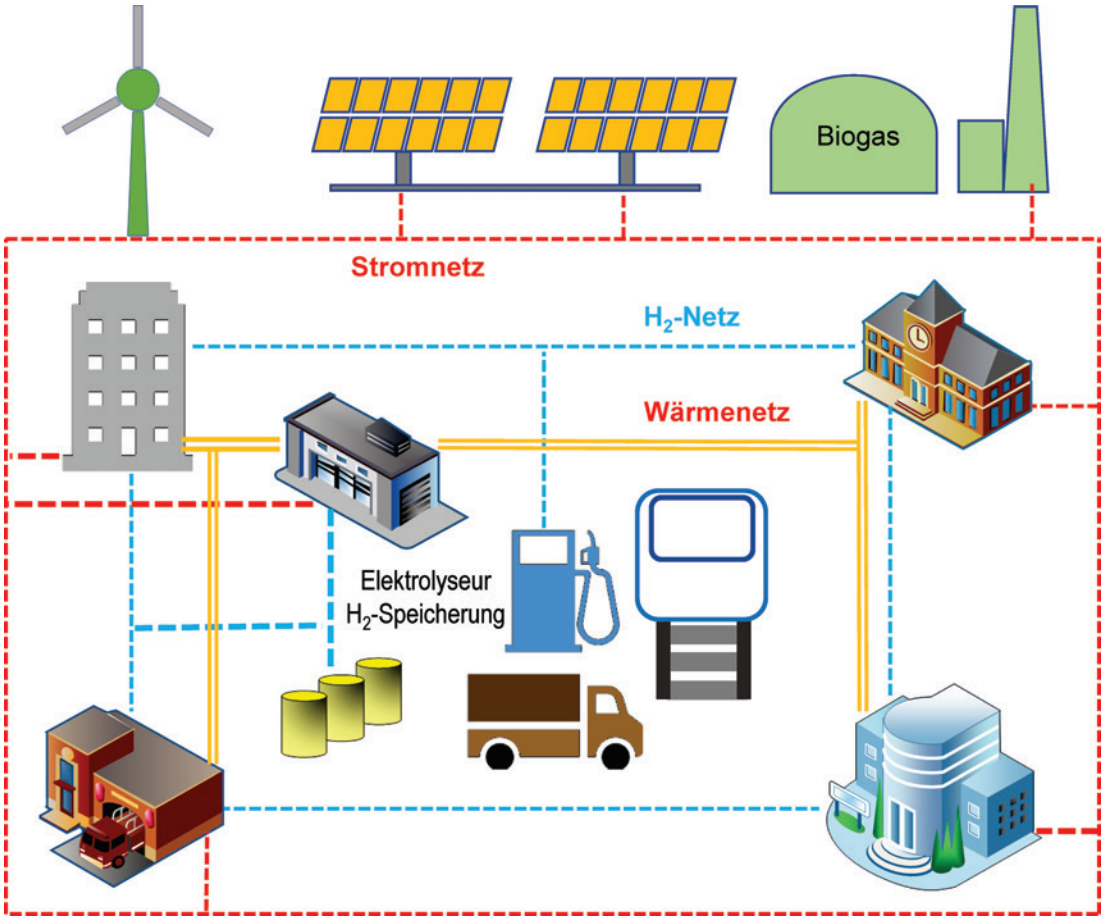


Bild 17. Sektorenkopplung - Optionen (Quelle: VDI)

Alle Kernaussagen zusammengefasst

Politische Zielstellungen

- Bis 2045 ist die Dekarbonisierung des Mobilitätsbereichs sicherzustellen. Der Güterverkehr auf der Schiene ist bis 2030 um 25 % zu steigern, der Personenverkehr zu verdoppeln.
- 75 % des Schienennetzes sollen bis 2030 elektrifiziert sein. Stillgelegte Strecken sollen reaktiviert und das Netz erweitert werden.
- Die Sektorenkopplung ist unter Einbindung des Schienenverkehrs zu forcieren.

Neue Antriebe im Schienenverkehr

- Wirtschaftliche und technische Gründe sowie Genehmigungsaspekte können gegen den Aufbau einer Oberleitung sprechen. Mit innovativen Technologien bieten sich Alternativen zu Dieselfahrzeugen.
- Effizienzvorteile sprechen für rein elektrische Antriebe mit Oberleitung, bei Elektrifizierungslücken mit begrenzter Ausdehnung für den Einsatz von Batteriefahrzeugen. Die Vorhaltung der Ladeleistung bei Batteriefahrzeugen kann jedoch durch Einsatz zusätzlicher Speicher mit einer Einschränkung der energetischen Effizienz verbunden sein.
- Größere Reichweiten, eine bessere Ausschöpfung des Potenzials an Strom aus erneuerbaren Energien (EE-Strom) sowie Vorteile im Bereich der Sektorenkopplung sprechen für Brennstoffzellenfahrzeuge.
- Batteriefahrzeuge decken den gesamten Energiebedarf aus der Traktionsbatterie, sofern sie nicht im Oberleitungsmodus verkehren. Zum Einsatz kommen Lithium-Ionen-Batterien, die hinsichtlich Energie- und Leistungsdichte den wirtschaftlichen und technologischen Anforderungen entsprechen.
- PEM-Brennstoffzellen dienen als Energiewandler in Brennstoffzellenfahrzeugen. Die H_2-Bevorratung an Bord von Schienenfahrzeugen erfolgt gasförmig. Das Druckniveau von 350 bar gilt als Stand der Technik.
- Oberleitungsbatterie-Hybridfahrzeuge (BEMU) und Brennstoffzellen-/Batterie-Hybridfahrzeuge (FCMU) ermöglichen mit Blick auf den Lebenszyklus bereits heute einen emissionsfreien und wirtschaftlich effizienten Nahverkehr im Vergleich zu Dieselfahrzeugen.

Energieversorgung

- Der Dieselverbrauch der Deutschen Bahn AG beläuft sich auf rd. 328.000 t/a. Die Substitution dieses Energieträgers bietet Potenziale für den Einsatz von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen.
- Das Aufkommen an grünem Wasserstoff wird im Jahr 2030 trotz Importe geringer sein als der erwartete Bedarf. Dies spricht dafür, dass der Schienenverkehr längerfristig seinen Bedarf mit eigenen H_2-Erzeugungseinheiten deckt.
- Für die H_2-Erzeugung empfehlen sich aus heutiger Sicht PEM-Elektrolyseure. Sie ermöglichen schnelle Lastwechsel und einen netzdienlichen Betrieb, vereinfachen die Gasverdichtung durch einen hohen Betriebsdruck und bieten mit hohen Stromdichten die Basis für kompakte Bauweisen.
- Bis Leitungssysteme für Wasserstoff oder H_2-Erzeugungseinrichtungen aufgebaut sind, kann die Versorgung der Tankstellen mit Wasserstoff per Straße oder Schiene erfolgen. Die gasförmige Speicherung an Bord von Schienenfahrzeugen spricht für die Anlieferung im gasförmigen Zustand.
- Steigende Preise für fossile Energieträger sollten der Wettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff zugutekommen.
- Die Erwartungen zu den Abgabepreisen von grünem Wasserstoff differieren deutlich. In optimistischen Analysen werden für 2030 ohne Berücksichtigung von Steuern und Vermarktungskosten an der Tankstelle Abgabepreise von 10 ct/kWh bis 15 ct/kWh (3,3 bis 4,9 €/kg) prognostiziert.

Sektorenkopplung

- Wasserstoff ist als universeller Energieträger in vielen Bereichen der Wirtschaft einsetzbar. Er bietet die Basis für die politisch gewünschte Sektorenkopplung.
- Das Laden der Batterien in BEMU erfolgt bedarfsabhängig und somit unabhängig vom

aktuellen EE-Dargebot. Demgegenüber wird grüner Wasserstoff immer dann erzeugt, wenn für den Betrieb der Elektrolyseure ausreichend Strom aus erneuerbaren Quellen vorhanden ist.

- H_2-Tankstellen sind flexibel und skalierbar. Durch gemeinsame Nutzung der Infrastruktur mit anderen Verkehrsträgern lassen sich Akzeptanz, Effizienz und Wirtschaftlichkeit steigern und Synergieeffekte heben.
- Zukünftige dezentrale Energieversorgungskonzepte erfordern u. a. eine Versorgung mit grünem Wasserstoff. Die Bevorratungseinrichtungen des Schienenverkehrs könnten die Basis für dezentrale Versorgungseinrichtungen darstellen.

Schrifttum

[1] https://www.allianz-proschiene.de/presse/pressemitteilungen/deutschland-faellt-bei-e-mobilitaet-auf-gleisen-zurueck/

[2] https://www.allianz-pro-schie-ne.de/themen/infrastruktur/schienennetz/#Header1; https://www.eb-info.eu/archiv/eb-ausgaben-alle/ebausgaben-2022/807-eb-1-2-2022; Thomas Nickel (Leiter Oberleitungen bei DB Netz AG), Elektrifizierungsgrad 75 % bis 2030 ein realistisches Ziel? Fokus 120 (2022) Heft 1–2, S.4

[3] 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)

[4] Masterplan Schienenverkehr, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Jahr 2020

[5] Die Nationale Wasserstoffstrategie, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Juni 2020

[6] https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-aktuell/kostenvergleich-streckenelektrifizierungen-versus-einsatz-alternative-antriebe.html

[7] eb Ausgabe 1-2 | 2022, Thomas Nickel, Elektrifizierungsgrad 75 % bis 2030 ein realistisches Ziel? Fokus 120 (2022) Heft 1-2, S.4

[8] https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2022/03/210924_Anteil-Elektrifizierte-Strecken-EU-01.png; https://efahrer.chip.de/news/deutsche-bahn-hat-noch-3000-diesel-loks-bald-sollen-sie-mit-abfall-laufen_107145

[9] Informationen zur Zellentechnologie aus VDE-Studie - Batteriesysteme für Schienentriebzüge - Emissionsfreier Antrieb mit Lithium-Ionen-Zellen, 27. August 2018, Kap. 3.1.1; Bild 3 aus VDE/DKE, „Kompendium: Li-Ionen-Batterien – Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen“, S.3, Abb. 1, Juli 2015

[10] VDE-Studie - Batteriesysteme für Schienentriebzüge - Emissionsfreier Antrieb mit Lithium-Ionen-Zellen, 27. August 2018, S. 36

[11] https://www.nproxx.com/; Potenzialbeschreibung - Wasserstofftransport über das Schienennetz, LandesEnergieAgentur Hessen GmbH (LEA), 30.06.2020, S. 13 und 14

[12] NPROXX Typ IV Druckbehälter: CFK-Verbundstoff-Druckbehälter - kohlefaserverstärkte Struktur mit großer Festigkeit/Steifigkeit-zu-Gewicht-Verhältnis

[13] https://www.uni-augs-burg.de/de/forschung/einrichtungen/institute/amu/wasserstoff-forschung-h2-unia/h2lab/h2-sp/physikalische-speicherung/cch2/

[14] https://eb-info.eu/nachrichten/energie-und-umwelt/676-brennstoffzellenzug-in-spanien

[15] Wirkungsgrad Elektrisches Fahrzeug ab Oberleitung 80 %, Helmut Bendel, die elektrische Lokomotive, Transpress, 1994, S.18; Wirkungsgrad BEV = Wirkungsgrad OL-Elektrisch * Wirkungsgrad Batterie mit Annahme 96 % nach Michael Sterner, Energiespeicher, Springer, 2017, S. 649

[16] VDI/VDE-Studie, Klimafreundliche Nutzfahrzeuge, Januar 2022, Kapitel 2.5, S. 17

[17] https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Mit-Rueckenwind-von-Helgoland-Bahnstrommix-wird-noch-gruener-6868328#:~:text=Schon%20heute%20besteht%20der%20Bahnstrom,2038%20komplett%20bei%20100%20Prozent.

[18] https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-48893-5; Sterner, Stadler (2017), Energiespeicher, S.649ff

[19] IfB: Bericht Nr. 2021-616770-619.0 - Analyse der VDE Studie "Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen, Dresden, 21. April 2021; vde.com/resource/blob/1979350/a41e9c3559af76fee9c91befbc1e9216/studie-klimaneutrale-alternative-zu-dieseltriebzuegen-data.pdf

[20] NOW, Auf dem Weg zur Emissionsfreiheit im Zugverkehr - Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene Fahrplan für den Einsatz von Brennstoffzellentriebwagen in Deutschland, S. 21, 2016

[21] Deutsche Bahn, Daten & Fakten 2020, S. 29

[22] Aufteilung des Dieselverbrauchs in Prozentwerte aus Deutsche Bahn, Daten & Fakten 2019

[23] https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/342234/

[24] VDI/VDE-Studie - Klimafreundliche Nutzfahrzeuge, Kapitel 6.2, Januar 2022

[25] https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren

[26] Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, stand 09/2021

[27] Die Nationale Wasserstoffstrategie, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Juni 2020, S. 5

[28] Die Nationale Wasserstoffstrategie, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Juni 2020

[29] VDE Dialog 02/22, Wasserstoff, Im Dienste des Systems, Seite 34 ff

[30] https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/elektrolyse-die-schluesseltechnologie-fuer-power-to-x, Elektrolyse – Die Schlüsseltechnologie für Power-to-X, 23.04.2019

[31] https://www.bdew.de/energie/effizienzsteigerung-bei-der-wasserstofferzeugung/

[32] VDI/VDE-Studie - Klimafreundliche Nutzfahrzeuge, Kapitel 2.7, Januar 2022

[33] Linde GmbH, Pullach

[34] Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz, LandesEnergieAgentur Hessen GmbH (LEA), 30.06.2020

[35] https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/aktuelles/presse/PI-Start-H2-Membransep-20200513.pdf

[36] Herausforderungen für Windparkbetreiber und Chancen durch Power-to-Gas, Siemens Energy und Siemens AG, Forum 16, 28. Windenergietage, Potsdam, 2019-11-06

[37] https://www.boerse-frankfurt.de/rohstoff/heizoel-nymex/kurshistorie/historische-kurse

[38] https://www.boerse-frankfurt.de/rohstoff/kohlendioxid-co2-emissionsrechte/kurshistorie/historische-kurse

[39] VDE/VDI-Studie - Klimafreundliche Nutzfahrzeuge, Januar 2022. Kap. 6.3

[40] https://businessportal-norwegen.com/2021/01/22/nel-asa-will-gruenen-wasserstoff-bereits-2025-konkurrenzfaehig-machen/

[41] Hydrogen Insights Report 2021, McKinsey &Company

[42] § 37a Abs. 4 des Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) https://www.allianz-pro-schiene.de/presse/pressemitteilungen/deutschland-faellt-bei-e-mobilitaet-auf-gleisen-zurueck/

Der VDI

VDI als Gestalter der Zukunft

Seit mehr als 165 Jahren gibt der VDI wichtige Impulse für den technischen Fortschritt. Mit seiner einzigartigen Community und seiner enormen Vielfalt ist er Gestalter, Wissensmultiplikator, drittgrößter technischer Regelsetzer und Vermittler zwischen Technik und Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Er motiviert Menschen, die Grenzen des Möglichen zu verschieben, setzt Standards für nachhaltige Innovationen und leistet einen wichtigen Beitrag, um Fortschritt und Wohlstand in Deutschland zu sichern. Der VDI gestaltet die Welt von morgen – als Schnittstelle zwischen Ingenieurinnen und Ingenieuren, Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. In seinem einzigartigen multidisziplinären Netzwerk mit mehr als 135.000 Mitgliedern bündelt er das Wissen und die Kompetenzen, die nötig sind, um den Weg in die Zukunft zu gestalten.

ISBN 978-3-949971-15-0
E-ISBN 978-3-949971-16-7

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt
Dr.-Ing. Jochen Theloke
Johanna Vondran, M.Sc.
Tel. +49 211 6214-369/-247
geu@vdi.de
www.vdi.de

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.
Energietechnische Gesellschaft (ETG)
Dr.-Ing. Thomas Benz
Tel. +49 69 6308-346
etg@vde.com
www.vde.com/etg