

VDB-LEITFADEN

EMISSIONSFREIER SCHIENENVERKEHR –

Leitfaden für den Einsatz
von Triebzügen mit
wasserstoffbasiertem Antrieb
in Deutschland



INHALT

	Vorwort von VDB-Hauptgeschäftsführer Dr. Ben Möbius	5
	Management Summary	7
1.	Gründe für den Einsatz von Triebzügen mit Wasserstoffantrieb in Deutschland	8
	Anwendung von Wasserstoff als Energieträger im Verkehrssektor	10
	Einsatzfelder von Triebzügen mit Wasserstoffantrieb	11
2.	Triebzüge mit Wasserstoffantrieb für den Regionalverkehr sind einsatzreif	12
	Technischer Aufbau	13
	Ausgeführte Fahrzeuge	14
	Geplante Projekte	15
	Wasserstoffzüge sind schon heute einsatzreif	15
3.	Wasserstoffantriebe auch für die Umrüstung von Dieseltriebzügen	16
	Umrüstungsalternative mit Brennstoffzellen für dieselmechanische Antriebe	16
	Umrüstungsalternative mit Wasserstoffmotor	17
	Alternativen auf der Basis von synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels)	17
4.	Sicherstellung der Versorgung mit Wasserstoff	18
	Herstellung von Wasserstoff	18
	Versorgung mit Wasserstoff	20
5.	Benötigen wir einen erweiterten Regelungsrahmen?	21
	Allgemeine Überlegungen zur Wasserstoff-Infrastruktur	21
	Zulassung und Infrastruktur	21
6.	Welche Betreibermodelle gibt es für den Einsatz von Triebzügen mit Wasserstoffantrieb?	22
	Betreibermodelle für Fahrzeuge	22
	Betreibermodelle für Infrastruktur	23
7.	Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit des Wasserstoffantriebs	24
	Methodik einer volkswirtschaftlichen Bewertung	24
8.	Handlungsempfehlung für die Einführung von Wasserstoffzügen	25



VORWORT VON VDB-GESCHÄFTSFÜHRER AXEL SCHUPPE

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

Europas und Deutschlands Weg hin zur Klimaneutralität ist vorgezeichnet. Dazu muss auch der Verkehrssektor einen entscheidenden Beitrag leisten. Die Schiene ist bereits heute klimafreundlichstes Verkehrsmittel, die fortschreitende Elektrifizierung ebnet den Weg Richtung Null-Emissionen. Bisher offen blieb jedoch die Frage, wie die Dekarbonisierung des Regionalverkehrs auf den verbleibenden nicht elektrifizierten Strecken erfolgreich gelingen kann.

Bis 2045 möchte Deutschland das Ziel der Treibhausgasneutralität erreicht haben. Bereits 2030 sollen Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 65 Prozent sinken. Damit der Verkehrssektor diese Ziele umsetzen kann, ist die Eisenbahn als Emittent von nur 0,5 Prozent der verkehrlichen Treibhausgase Europas unabdingbar. Dabei ist dieser Wert nicht starr, sondern bewegt sich kontinuierlich Richtung null. Die voranschreitende Dekarbonisierung der Schiene kann durch das breite und innovative Portfolio der Bahnindustrie auf vielfältige Weise umgesetzt werden.

Eines steht hierbei fest: Elektrizität bringt die Eisenbahn in Bewegung. Ob der elektrische Strom aus der Oberleitung kommt, im Akku gespeichert ist oder beispielsweise direkt im Fahrzeug erzeugt wird, ist je nach Bedarf und Gegebenheiten unterschiedlich. Für die entstehenden und angerechneten Treibhausgase und somit auch für die Dekarbonisierung spielen hauptsächlich der genutzte Energieträger und dessen Herstellung eine Rolle. Eine über den Verkehrsträger Eisenbahn hinaus angewandte Lösung ist Wasserstoff in seinen verschiedenen Facetten. Von Wasserstoff, der als industrielles Abfallprodukt anfällt, bis hin zu grünem, der vollkommen klimaneutral hergestellt wird, ist dieser Energieträger, eingesetzt in innovativen Antriebskonzepten der Bahnindustrie, ein hilfreiches Element auf dem Weg zum Null-Emissions-Ziel der Schiene.

Dieser Leitfaden beschreibt ein Konzept der Bahnindustrie in Deutschland für den Regionalverkehr der Zukunft auf den noch nicht elektrifizierten Strecken. Mit diesem Baustein ist der Plan für einen durchgehend klimaneutralen Schienenverkehr in Deutschland und Europa nahezu komplett. Seine Umsetzung unterstützt nicht nur den Bahnsektor, sondern im Rahmen der angestrebten Verlagerung des Verkehrs auf die Schiene auch den gesamten Verkehrssektor.

MANAGEMENT SUMMARY

Im Koalitionsvertrag 2021 setzt sich die Bundesregierung bis 2030 das Ziel, den Elektrifizierungsgrad des Schienennetzes von heute 61 % auf 75 % zu erhöhen. Diese ambitionierte wie richtige Zielsetzung reicht jedoch nicht aus, um den SPNV künftig emissionsfrei zu betreiben. Es verbleiben nichtelektrifizierte Strecken, auf denen heute noch ein wesentlicher Teil der Zugkilometer mit dieselbetriebenen Zügen erbracht wird.

Eine vollständige Elektrifizierung des deutschen Eisenbahnstreckennetzes erscheint nicht überall machbar – und für emissionsfreie Mobilität auf der Schiene nicht überall notwendig. Elektrischer Betrieb ist durch den Einsatz alternativer Antriebe auch ohne durchgehende Streckenelektrifizierung möglich. Die Dekarbonisierung des Zugverkehrs erfordert einen dualen Ansatz: die klimapolitisch hochwirksame Streckenelektrifizierung weiter vorantreiben und parallel innovative Antriebe fördern.

Um trotz verbleibender Elektrifizierungslücken einen durchgehenden elektrischen Regionalverkehr sicherzustellen, gibt es zwei Optionen:

- Für längere Streckenabschnitte ohne Fahrleitung bietet sich der Einsatz von **Triebzügen mit wasserstoffgespeisten Antrieben** an. Mit Brennstoffzellen-Technologie ausgestattet, verfügen sie über einen elektrischen Antrieb und sind dadurch aus Kundensicht bezüglich Lärm- und Vibration nicht von herkömmlichen elektrischen Triebzügen zu unterscheiden. Wasserstoff kann also hier die nachhaltige Brücke zur elektrischen Energie aus erneuerbaren Quellen auch auf Strecken ohne Fahrleitung herstellen.
- **Batterieelektrische Triebzüge** ermöglichen durch Nachladung über bestehende Oberleitung und Teilelektrifizierung einen kostenoptimierten und technisch realisierbaren Ansatz, um einen vollwertigen elektrischen Betrieb auch in den Elektrifizierungslücken zu gewährleisten.
- Für Nachrüstlösungen auf der Basis von Bestandsfahrzeugen mit Dieselantrieb ist die Umstellung auf einen HEMU oder BEMU zwar machbar, aber aufwändig. Hier kann stattdessen der Einbau eines Wasserstoffmotors oder die direkte Verwendung von E-Fuels in Erwägung gezogen werden. Die zu erwartenden Mehrkosten für E-Fuels können durch vermiedene Anpassungsaufwendungen am Fahrzeug sowie die Nutzung vorhandener Kraftstoffinfrastruktur vsl. ausgeglichen werden.

Die Markteinführung sowohl von wasserstoffbetriebenen als auch von batterieelektrischen Triebzügen bietet erstmals die Möglichkeit, flächendeckend einen nachhaltigen und umweltfreundlichen Verkehr auf den bisher dieselbetriebenen Strecken umzusetzen. Dem Wunsch von Fahrgästen, Anwohnern, Betreibern und Politik nach einem weitgehend emissionsfreien SPNV kann somit schon heute entsprochen werden. Alle genannten Maßnahmen sind kurz- bis mittelfristig umsetzbar.

Neben den positiven ökologischen Effekten ist über den ganzen Lebenszyklus auch mit ökonomischen Vorteilen für den Besteller und somit auch für die Steuerzahler und Fahrgäste zu rechnen. Allerdings werden diese ökonomischen Effekte erst relativ spät eintreten, sodass sie der Gewährung von Fördermitteln zum Technologieanschub nicht entgegenstehen. Hinzu kommt, dass die Bahnindustrie in Deutschland bei einer konsequenten Anwendung beider Antriebstechniken ihre Technologieführerschaft nicht nur ausbauen, sondern zukünftig auch exportieren kann.

1. GRÜNDE FÜR DEN EINSATZ VON TRIEBZÜGEN MIT WASSERSTOFFANTRIEB IN DEUTSCHLAND

Der Eisenbahnverkehr ist seit 1879 ein Vorreiter elektrischer Mobilität. Bereits heute profitiert ein großer Anteil der auf der Schiene erbrachten Tonnen- und Personenkilometer von der hohen Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit elektrischer Antriebstechnik. Ihre Vorteile überzeugen heute auf den 61 Prozent des deutschen Eisenbahnnetzes, die bereits elektrifiziert sind. Aufgrund der Bevorzugung von stärker frequentierten Strecken bei der Auswahl zur Elektrifizierung werden heute über 90 % der Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr mit direkter elektrischer Speisung erbracht.

Entsprechend dem nun ausdrücklich formulierten Ziel der Klimaneutralität in allen Wirtschaftssektoren rückt die vollständige Dekarbonisierung des Verkehrs weiter in den Vordergrund. Im Bereich der Eisenbahn betrifft dies den Betrieb auf allen nicht elektrifizierten Strecken. In Summe werden bisher 39 Prozent des Gesamtnetzes ausschließlich unter Verwendung von Dieselantrieben betrieben – nahezu vollständig gespeist von fossilen Kraftstoffen.

Aufgrund der Netzstruktur überwiegt im nicht-elektrifizierten Streckennetz der Schienenpersonenverkehr, auf den auf circa 450¹ Linien mit rund 2000 Dieseltriebzügen etwa zwei Drittel des Dieselbedarfs der Eisenbahn entfallen. Die im Nahverkehr benötigte Dieselmenge entspricht circa 700 Millionen Kilogramm CO₂-Austoß jährlich.² Auf Platz zwei folgt der Güterverkehr. Auf den Personenfernverkehr entfällt hingegen nur ein geringer Anteil an der Dieseltraktion der Schiene.

Für einen vollständig klimaneutralen Bahnbetrieb müssen auch diese Verkehre ausschließlich unter Verwendung erneuerbarer Energien abgewickelt werden können. Laut internationalen Vereinbarungen³ liegt der Zeithorizont für den Abschluss dieser Umstellung in der Mitte des laufenden Jahrhunderts.

Die nationalen Zielsetzungen gehen angesichts des laut Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) verbleibenden globalen Restbudgets für Emissionen von CO₂-Äquivalenten teilweise darüber hinaus. Mit der Novelle des deutschen Klimaschutzgesetzes vom Juni 2021 ist bis 2030 eine Minderung der CO₂-Emission um 65 % gegenüber 1990 vorgesehen und die vollständige Klimaneutralität auf 2045 terminiert. Das Zwischenziel für den Verkehrssektor für 2030 liegt bei einer Reduzierung von 51 % gegenüber 1990, nachdem bis 2020 hier bereits eine Minderung von 11 % erreicht werden konnte.

Vor diesem Hintergrund ist die Umstellung aller Wirtschaftssektoren auf erneuerbare Energien zwingend erforderlich. Um den Einsatz erneuerbarer Energien auch auf nicht-elektrifizierten Strecken zu ermöglichen, gibt es nach Stand der Technik drei Optionen, die je nach den Bedingungen des Einzelfalls anzuwenden sind:

¹ Technische Universität Berlin: Potentialanalyse für Batterietriebfahrzeuge im deutschen Schienennetz, unveröffentlicht.
² Hecht, Markus; Stephan, Arnd; Walther, Christoph: Klimapolitisches Potenzial elektrischer Schienenstrecken in Deutschland (08.10.2018).
³ Pariser Klimaschutzabkommen 2015.

1. Nachträgliche Elektrifizierung dieser Strecken,
2. Einsatz batterieelektrischer Triebzüge⁴ mit Nachladung vor und nach dem nichtelektrifizierten Bereich über die Oberleitung, ggf. ergänzt durch sogenannte „Ladeinseln“, oder aber
3. Einsatz von Triebzügen, die mit Wasserstoff oder aber anderen klimaneutral produzierten Kraftstoffen betrieben werden.

Dieses Papier befasst sich mit der letzten Option, wobei die Verwendung von Antrieben, die mit sogenanntem „Grünen Wasserstoff“ gespeist werden, im Vordergrund steht. Denn Wasserstoff ist bereits seit über 20 Jahren als Energieträger zur Versorgung von Landfahrzeugen in Erprobung, zunächst in Personenkraftwagen der Oberklasse. Dabei stand aber noch die Nutzung in Verbrennungsmotoren im Vordergrund⁵.

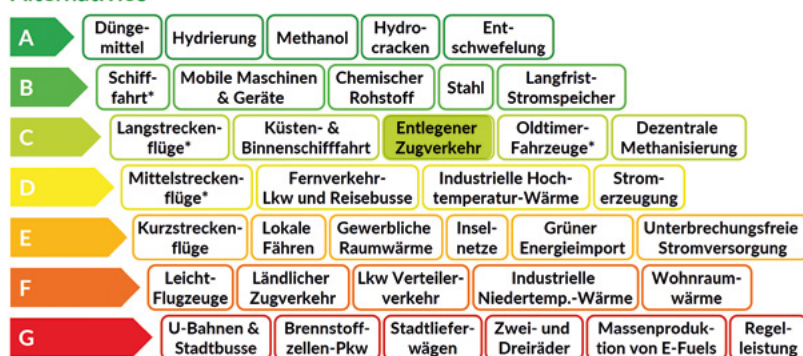
Inzwischen ist die Entwicklung so weit fortgeschritten, dass Wasserstoff als Energieträger sowohl im Straßen- als auch im Schienenverkehr uneingeschränkt eingesetzt werden kann. Er weist gegenüber batterieelektrischen Antriebstechniken folgende Merkmale auf:

- Niedriges Vorratsgewicht, damit
- höhere Reichweite möglich,
- vergleichbar schneller Betankungsvorgang wie mit Benzin oder Diesel und
- Emissionsfreiheit am Einsatzort.

Damit ist Wasserstoff ein geeigneter physischer Energieträger. Wenn er mit Hilfe klimaneutral hergestellter Energien erzeugt wird, passt Wasserstoff zudem ideal in die Maßnahmenketten zur Dekarbonisierung verschiedener Wirtschaftssektoren (Abbildung 1). Hierzu gehört natürlich auch der Verkehrssektor, in dem die Direktspeisung mit elektrischer Energie aufgrund der Mobilität der Fahrzeuge nicht durchgehend sichergestellt werden kann.

Für den Fall, dass eine vollständige Elektrifizierung bis zur geplanten Umsetzung der Klimaneutralität aus zeitlichen oder wirtschaftlichen Gründen noch nicht gewährleistet werden kann, ist der Einsatz von Wasserstoff eine Lösung zur Beschleunigung der Dekarbonisierung.

Alternativlos



Unwirtschaftlich

* Sehr wahrscheinlich in Form von mittels Wasserstoff erzeugten E-Fuels oder Ammoniak.

Abbildung 1: Einsatzbereiche von Wasserstoff in verschiedenen Wirtschaftssektoren (M. Liebreich 2021)

4 Verband der Bahnindustrie: Emissionsfreier Schienenverkehr – eine Strategie für den Einsatz von batterieelektrischen Triebzügen mit Ladeinfrastruktur in Deutschlands Schienenpersonennahverkehr. Berlin 2020.

5 Zu den ersten mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen weltweit gehörten die bereits im Jahre 2000 gebauten 15 Einzel Exemplare vom Typ BMW 750hL. Sie wurden unter anderem auf der Expo 2000 vorgeführt. Anschließend folgte eine ähnlich ausgestattete Kleinserie mit 100 Fahrzeugen.

Mit dem Einsatz von Wasserstoff als Energieträger für den Schienenverkehr ergibt sich die besondere Chance, Synergien mit anderen Verkehrsträgern und Kopplungen mit weiteren Wirtschaftssektoren zu schaffen, um diese ebenfalls bei der Einführung von Wasserstoff zu fördern.

Das größte Hindernis liegt zunächst in der fehlenden Tankinfrastruktur. Durch langfristige, planbare und hohe Abnahmemengen der Schiene wird der Bau von H₂-Tankstellen für Investoren attraktiver und in Kombination mit dem Angebot für andere Verkehrsteilnehmer, beispielsweise lokale Verkehrsbetriebe oder Spediteure mit Lkw, noch deutlich rentabler.

Anwendung von Wasserstoff als Energieträger im Verkehrssektor

Wasserstoff als Energieträger kann in ganz unterschiedlichen Formen eingesetzt werden. Ursprünglich wurde tiefgekühlter Wasserstoff in flüssiger Form verwendet. Aus wirtschaftlichen Aspekten und aufgrund der besseren Eignung für die Verwendung in Brennstoffzellen werden inzwischen eher gasförmige Varianten bevorzugt. Hier wird entweder die niedrigere Druckstufe mit 350 bar für größere Verbraucher genutzt, z. B. in Lkw und Schienenfahrzeugen, oder aber die höhere Druckstufe mit 700 bar zunächst nur für Pkw (Tabelle 1). Wasserstoff-Tankstellen können daher so ausgerüstet werden, dass Fahrzeuge beider Druckstufen bedient werden können. Um den Transport, die Lagerung und die Betankung noch effizienter zu gestalten, befinden sich darüber hinaus Technologien in Entwicklung, um Wasserstoff zeitweise durch ein flüssiges Trägermedium aufnehmen zu können, wie z. B. LOHC⁶.

Im Hinblick auf die hohen Betriebsdrücke sind alle Anlagen zum Transport, zur Betankung und zur Speicherung von vornherein extrem sicher ausgelegt und natürlich entsprechend zertifiziert. Behälter, Leitungen und Verbindungen sind weit überdimensioniert und beherrschen damit alle Betriebsfälle, können aber auch Unfällen widerstehen. Aufgrund jahrzehntelanger Erfahrung gilt die Wasserstofftechnologie und -logistik zumindest für industrielle Anwendungen als ausgereift. Wasserstoff als Energieträger eignet sich somit für alle Einsatzfelder, in denen Maschinen oder Fahrzeuge nicht direkt mit elektrischer Energie versorgt werden können. Neben Straßen- und Schienenfahrzeugen gehören hierzu vor allem Schiffe, Flugzeuge und Off-Road-Anwendungen wie Land- und Baumaschinen (Abbildung 1).

	Wasserstoff flüssig	Wasserstoff gasförmig 350 bar	Wasserstoff gasförmig 700 bar	zum Vergleich: Dieselkraftstoff
Druck	1 bis 4 bar	350 bar	700 bar	Umgebung
Temperatur	-250 °C	Umgebung	Betankung mit -40 °C, dann Umgebung	Umgebung
Energiedichte je Volumen (netto)	2,36 kWh/l	0,93 kWh/l	1,86 kWh/l	9,7 kWh/l
Einsatzfeld	Pkw, Schienen- fahrzeuge	Lkw, Schienen- fahrzeuge	Pkw	alle

Tabelle 1: Arten der Wasserstoffspeicherung

6 LOHC – liquid organic hydrogen carriers, zu Deutsch flüssige organische Wasserstoffträger.

Der Einsatz von Wasserstoff eröffnet ähnlich wie elektrische Energie die Möglichkeit, beliebige Energiequellen zu verwenden. Deren Nachhaltigkeit hängt jeweils von der Art ihrer Erzeugung ab. Vergleichbar zur E-Mobilität besteht damit ebenfalls die Möglichkeit, die bedarfsführenden Anlagen, also die Fahrzeuge selbst, und deren Versorgungsnetz bereits jetzt auf die neue Technologie umzustellen, auch wenn – gemäß den strategischen Festlegungen der Bundesregierung zur Energieversorgung der einzelnen Sektoren – erst zu einem späteren Zeitpunkt die Energiebereitstellung aus nachhaltigen Quellen sichergestellt werden kann. Bis zum Abschluss der Dekarbonisierung wird Wasserstoff in der Regel mittels Verfahren auf Basis von fossilen Energieträgern gewonnen (siehe Abschnitt 4).

Einsatzfelder von Triebzügen mit Wasserstoffantrieb

Die Einsatzfelder der künftig möglichen Antriebsarten für Regionaltriebzüge lassen sich entsprechend ihren Charakteristiken folgendermaßen definieren und abgrenzen:

- Elektrische Triebzüge (EMU) benötigen natürlicherweise eine Streckenelektrifizierung mit Fahrleitung, für deren Wirtschaftlichkeit eine gewisse Mindestleistungsfähigkeit erforderlich ist. Diese ergibt sich aus den Anforderungen der Kapazität bzw. der Zugfolge, der Fahrdynamik und des Streckenprofils. Je länger die betrachtete Strecke ist, desto höher wird der Aufwand für die Elektrifizierung. Bei Überschreitung gewisser Grenzen sind zusätzliche Einrichtungen zur Bahnenergieversorgung erforderlich. Kurze Netzergänzungen, die aus bereits vorhandenen Nachbarbereichen gespeist werden können, sind dagegen vergleichsweise günstig. Bezogen auf den spezifischen Energiebedarf weisen elektrische Triebzüge die höchste Energieeffizienz aus.
- Nichtelektrifizierte Stich- und Verbindungsbahnen⁷ innerhalb des elektrifizierten Netzes lassen sich mit batterieelektrischen Triebzügen (BEMU) betreiben, solange die Streckenlänge unter Fahrleitung genügt, um den Ladezustand der Batterie über den Betriebseinsatz aufrechtzuhalten und die geplante Streckenbelastung eine durchgehende Elektrifizierung nicht rechtfertigt. Je geringer die Leistungsanforderungen sind, desto länger dürfen die fahrleitungslosen Abschnitte daher sein.
- **Alle Anwendungsfälle mit darüberhinausgehenden Anforderungen bezüglich Reichweite und Performance bestimmen das Einsatzfeld für mit regenerativ erzeugten Kraftstoffen betriebene Regionaltriebzüge (primär Wasserstoff), in Abb. 2 als Hydrogen-MU (HMU) oder -EMU (HEMU) bezeichnet. Sie zeichnen sich entsprechend aus durch**
 - **fehlende elektrifizierte Abschnitte, speziell außerhalb der Kernbereiche verbunden mit**
 - **zu großen Lücken im elektrischen Netz, um BEMU einsetzen zu können, sowie**
 - **mit eher hohen Anforderungen z. B. aus der Streckentopologie, an Fahrgeschwindigkeit und Komforteinrichtungen.**

Damit ergibt sich eine klare Abgrenzung der Einsatzfelder (Abbildung 2). Aufgrund der besonderen Umstände für jeden Anwendungsfall sowie wegen des aktuell zu beobachtenden rasanten Fortschritts bei der Entwicklung alternativer Antriebssysteme sowie im Energiesektor ist eine feste Definition der Bereichsgrenzen (momentan noch) nicht möglich oder sinnvoll.

⁷ Stichbahn – einseitig angebundene Bahnlinie, Verbindungsbahn – zweiseitig angebundene Bahnlinie.

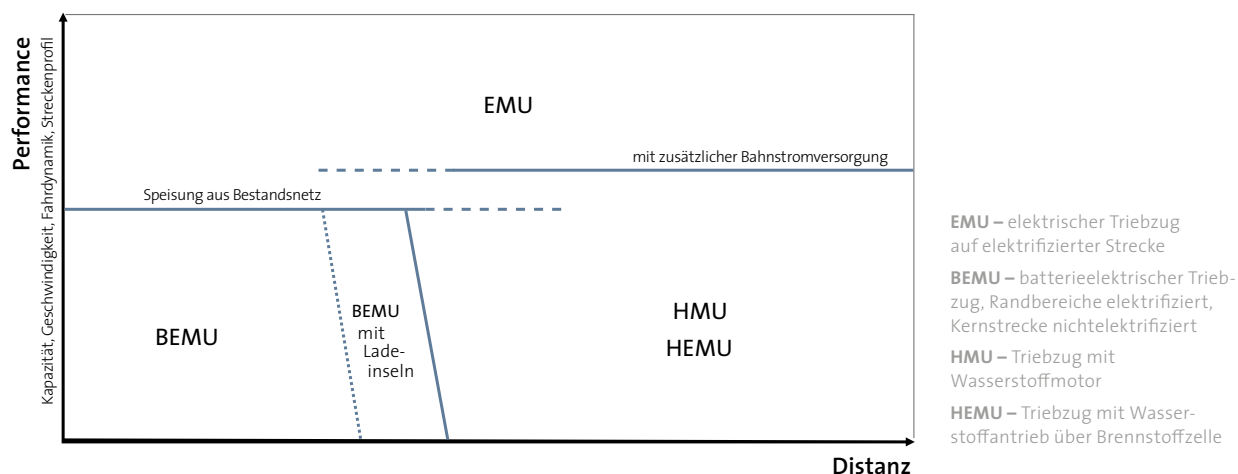


Abbildung 2: Einsatzfelder für Regionaltriebzüge mit verschiedenen Antriebskonzepten (Karch)

2. TRIEBZÜGE MIT WASSERSTOFFANTRIEB FÜR DEN REGIONALVERKEHR SIND EINSATZREIF

Bereits seit Beginn des Jahres 2017 fahren in Deutschland Regionaltriebzüge mit Wasserstoffantrieb. Nachdem zunächst mit Versuchsfahrten begonnen wurde, erhielt der erste wasserstoffbetriebene Regionaltriebzug Mitte 2018 seine Zulassung durch das Eisenbahn-Bundesamt (EBA). Anschließend erfolgten die ersten Einsätze zweier Züge des Typs *Coradia iLint* von Alstom im Regelbetrieb:

- Praxiseinsatz im Elbe-Weser-Netz von September 2018 bis Februar 2020,
- Fahrgastbetrieb in Österreich vom September bis November 2020,
- Demonstrationsbetrieb in Frankreich im August 2021,
- Fahrgastbetrieb auf der Schwäbischen Alb vom Juli 2021 bis Februar 2022.

In beiden Einsätzen konnten die neuartigen Fahrzeuge ihre Praxistauglichkeit eindrücklich unter Beweis stellen. Damit ist die Zeit nun reif für eine Serienanwendung in einem umfassenden Verkehrsnetz.

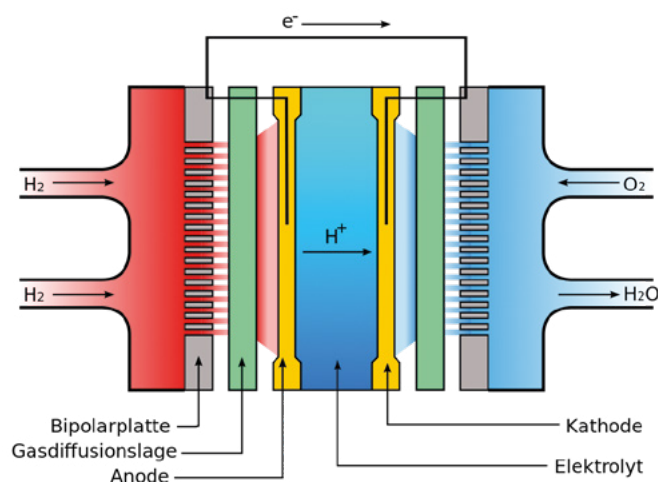


Abbildung 3: Brennstoffzelle zur Energiewandlung von Wasserstoff (H_2) zu elektrischem Strom (e^-)

Technischer Aufbau

Heutige wasserstoffbetriebene Fahrzeuge verfügen über eine Brennstoffzelle, die die Energiewandlung zwischen Wasserstoff als chemischem Energieträger und dem folgenden elektrischen Antriebsstrang herstellt und ihn somit für elektrische Antriebe nutzbar macht (Abbildung 3).

Der vollständige Antriebsstrang (Abbildung 4) eines wasserstoffgespeisten Triebzugs mit Brennstoffzelle geht von den Wasserstoff-Tanks (v. l. n. r.) aus, die einen Speicherdruck von gegenwärtig 350 bar aufweisen. Die bereits erwähnte Brennstoffzelle wirkt nun als primäre Energiequelle und wandelt die im Wasserstoff gebundene Energie in Elektrizität um. Elektrische Umrichter sorgen danach für eine Anpassung der elektrischen Parameter zum einen für die Traktion und zum anderen für die Versorgung aller Hilfsbetriebe im Fahrzeug. Dabei ist auch eine Hochvolt-Batterie (HV-Batterie) als Pufferspeicher eingebunden. Diese sorgt für den Ausgleich des schwankenden Energiebedarfs des Bordnetzes und den effizienten Betrieb der Brennstoffzelle in wirkungsgradoptimalen Betriebspunkten. Die Fahrmotoren wandeln elektrische in mechanische Energie um und ermöglichen so Beschleunigen, Beharrungsfahrt und auch verschleißfreies elektrisches Bremsen mit Rückspeisung der Energie in Bordnetz und Batterie (Rekuperation).

Ein wasserstoffbasierter Antriebsstrang benötigt mehr Raum als ein herkömmlicher Dieselantrieb. Da die Komponenten aber relativ leicht sind, lässt sich dieser zusätzliche Platzbedarf durch Nutzung des Dachbereichs ausgleichen (Abbildung 5). So werden die Brennstoffzellen neben Wasserstofftanks auf dem Dach angeordnet. Dafür finden die schwereren Elemente wie die HV-Batterie und die elektrischen Umrichter genug Raum unter den Hochflurbereichen der beiden Wagen. Die elektrischen Fahrmotoren werden direkt neben den Triebdrehgestellen montiert und treiben dann die Triebachsätze über Gelenkwellen an oder werden – wie bei den meisten elektrischen Triebfahrzeugen üblich – direkt in den Triebdrehgestellen angeordnet.

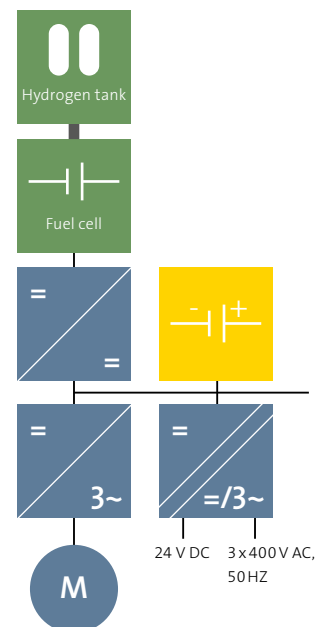


Abbildung 4: Energieversorgung eines wasserstoffbetriebenen Triebzugs mit Brennstoffzelle (Alstom)

Nicht nur wegen der erforderlichen Traktionsleistung, sondern auch aus Gründen der Redundanz sind im Falle des *Coradia iLint* von **Alstom** beide Wagenkästen gleich ausgeführt und somit auch zwei vollständige Traktionsanlagen vorhanden.

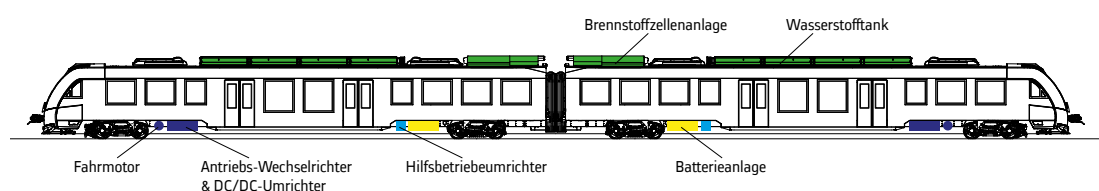


Abbildung 5: Anordnung der Antriebsausrüstung am Beispiel eines *Coradia iLint* (Alstom)

Ausgeführte Fahrzeuge

Vom Triebzug iLint von Alstom wurden bereits 2016 zwei Vorserien-Fahrzeuge hergestellt (Abbildung 5). Inzwischen läuft die Serienfertigung für Projekte in Niedersachsen und Hessen. Aufgrund der Konzeptähnlichkeit zwischen der bewährten dieselbetriebenen Ausführung des Lint und der neuen Wasserstoff-Variante iLint bietet sich diese Fahrzeugplattform besonders auch für die Nachrüstung zahlreicher Bestandsfahrzeuge an.

Auf Basis der bereits eingeführten Produktfamilie *Mireo* entwickelt Siemens einen Regionaltriebzug mit alternativer Antriebstechnik und modularem Aufbau:

- *Mireo Plus B* mit Traktionsbatterie für teilweise elektrifizierte Strecken mit einer Reichweite von 80 bis 120 km.
- *Mireo Plus H* mit Wasserstofftraktion für Langstrecken ohne Oberleitung mit einer Reichweite von 600 bis zu 1.000 km.

Beide Triebzüge sind als Zwei- oder Dreiteiler konzipiert, die jeweils über zwei Triebdrehgestelle verfügen und mit einer installierten Traktionsleistung von 1.700 kW Geschwindigkeiten von bis zu 160 km/h erreichen können (Abbildung 6).

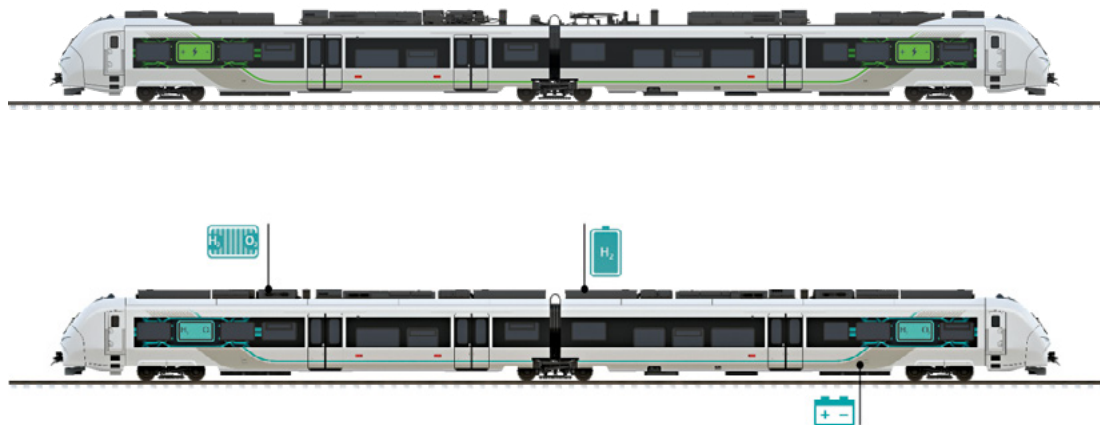


Abbildung 6: Regionaltriebzüge *Mireo Plus B* (oben) und *Mireo Plus H* (unten) (Siemens).

Die Bauräume sind entsprechend der unterschiedlichen Anforderungen aufgeteilt: Der Unterflurbereich beider Fahrzeuge ist nahezu gleich ausgerüstet. Während die Triebdrehgestelle identisch sind, variiert die Batterieausrüstung. Während der *Mireo Plus B* über die größeren Traktionsbatterien verfügt, ist die Pufferbatterie des *Mireo Plus H* an gleicher Stelle deutlich kleiner. Die Hauptunterschiede finden sich in der Dachbelegung: Hier weist der *Mireo Plus B* die übliche Ausrüstung eines elektrischen Triebzugs mit Stromabnehmer, Transformator und Stromrichter auf, während beim *Mireo Plus H* in diesem Bereich die Wasserstofftanks und die Brennstoffzelle angeordnet sind.

Eine anderes Fahrzeugkonzept wurde durch Stadler mit der Fahrzeugfamilie *Flirt^{H2}* eingeführt. Die *Flirt-H2*-Familie zeichnet sich durch das modular aufgebaute Power Pack aus, durch das Fahrzeuggrößen vom Zweiteiler bis zum Vierteiler (+ Power Pack) realisiert werden können. Die Leistung der Brennstoffzellen und die Tankkapazität können den Erfordernissen des Betriebs individuell angepasst werden.

Erster Vertreter dieser Familie wird der Triebzug vom Typ *FLIRT H₂ SBCTA* sein, der für den Einsatz im US-Bundesstaat Kalifornien vorgesehen ist (Abbildung 7).

Neben der zentralen Anordnung der Traktionsausrüstung ist eine Ausstattung mit Stromabnehmern ein weiteres Merkmal dieser Fahrzeugfamilie, um die Energieversorgung innerhalb der Ballungsräume ausschließlich aus der Oberleitung zu ermöglichen. Dabei dient die Wasserstoffseite des Antriebs, bestehend aus H₂-Tank und Brennstoffzelle, lediglich zur Verlängerung der Reichweite in den Außenbereichen des Netzes („Range Extender“).



Abbildung 7: Regionaltriebzug *FLIRT H₂ SBCTA* aus der Fahrzeugfamilie *Flirt H₂* (Stadler)

Geplante Projekte

Hessen ist über den Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV) Pilotanwender für wasserstoffbetriebene Triebzüge im Rahmen einer landesweit eingesetzten Flotte. Ausgewählt wurden hierfür Triebzüge vom Typ *Coradia iLint* der Firma Alstom. Insgesamt 27 Triebzüge dieses Typs werden ab 2023 auf bisher nicht- bzw. teilelektrifizierten Strecken des Taunusnetzes im regulären Fahrgastbetrieb rund um Frankfurt am Main eingesetzt. Ein entsprechendes Ausschreibungsverfahren des Rhein-Main-Verkehrsverbundes (RMV) wurde im Mai 2019 erfolgreich abgeschlossen und stellt den bis dato größten Einzelauftrag für wasserstoffbetriebene Regionaltriebzüge weltweit dar.

Mit einer Tankfüllung werden diese wasserstoffbetriebenen Regionaltriebzüge mit Brennstoffzelle auch bei laufender Klimaanlage im Kühl- oder Heizbetrieb eine Reichweite von 1.000 km ermöglichen. Die Höchstgeschwindigkeit der hier eingesetzten Fahrzeuge liegt bei 140 km/h. Sie werden mit Wasserstoff aus dem Industriepark Hoechst versorgt. Die Wartung erfolgt im Instandhaltungswerk von DB Regio in Griesheim. Täglich soll jeweils die Hälfte der Flotte betankt werden; ein Tankvorgang dauert je nach Außentemperatur etwa 15 min.

Auch andere Unternehmen in der Branche treiben den ökologischen Umbau voran. So hat die Niederbarnimer Eisenbahn-AG (NEB) gerade EU-weit einen Auftrag für sechs Wasserstoff-Brennstoffzellenzüge für die sogenannte Heidekrautbahn nordöstlich von Berlin ausgeschrieben. Der Auftrag hängt davon ab, ob die NEB den Zuschlag bei der geplanten Direktvergabe der Linie erhält. Auch in Niedersachsen lässt der Aufgabenträger LNVG ab 2022 eine Flotte von 14 Wasserstoffzügen von Alstom fahren.

Wasserstoffzüge sind schon heute einsatzreif

Die beiden Vorserien-Triebzüge von Alstom wurden bereits 2016 hergestellt. Nach ihrer Zulassung wurden für ihre Erprobung Einsatzfelder mit den unterschiedlichsten Bedingungen ausgewählt, um ein möglichst umfangreiches Erfahrungsspektrum zu gewährleisten.

Bei diesen Einsätzen wurden einige wichtige Erkenntnisse gesammelt, die als Verbesserung zunächst in den Vorserien-Fahrzeugen umgesetzt worden sind und nun beim Serienbau berücksichtigt werden.

Damit kann die Einsatzreife von Regionaltriebzügen mit wasserstoffgespeisten Brennstoffzellen bereits jetzt festgestellt werden. Das Gleiche gilt für die gesamte Betankungs- und Speicherslogistik einschließlich der Wasserstofftanks. Wasserstoffmotoren als weitere Einsatzmöglichkeit werden gerade zur Serienreife gebracht, nachdem sie schon lange prinzipiell erprobt wurden. Somit wird auch eine weitere Umrüslösung für Dieseltriebzüge demnächst zur Verfügung stehen.

3. WASSERSTOFFANTRIEBE AUCH FÜR DIE UMRÜSTUNG VON DIESELTRIEBZÜGEN

Wenn die letzten neuen Regionaltriebzüge mit Dieselantrieb ausgeliefert sein werden, wird es alleine in Deutschland eine Bestandsflotte von ca. 2.000 solcher Fahrzeuge geben. Mit einer zu erwartenden Nutzungsdauer von mehr als 25 Jahren würde ein Teil dieser Flotte auch noch zum derzeit angestrebten Zeitpunkt der Klimaneutralität – also über das Jahr 2045 hinaus – in Betrieb sein. Zusätzlich werden Fahrzeuge mit Verbrennungsantrieben auch im Zuge einer immer rascher ablaufenden Elektrifizierung des Straßenverkehrs unter Erneuerungsdruck geraten.

Um diesem entsprechen zu können, ohne die wirtschaftliche Nutzungsdauer dieser Fahrzeuge verkürzen zu müssen, stellt sich somit die Frage nach der Umrüstung von Dieseltriebzügen bereits vor dem Ende ihrer Nutzungszeit. In diesem Sinn wurden bereits von verschiedenen Herstellern auf dem aktuellen Stand der Antriebstechnik realisierbare Fahrzeugkonzepte erarbeitet.

Umrüstungsalternative mit Brennstoffzellen für dieselmechanische Antriebe

Die erste Umrüstungsoption geht von einer Elektrifizierung des ursprünglichen Dieseltriebzugs mit mechanischer oder hydraulischer Kraftübertragung aus. Sie ist zwar die aufwändigste, aber auch energieeffizienteste Variante, führt sie doch zum Gewinn aller wesentlichen Eigenschaften von neugelieferten Fahrzeugen mit Wasserstoffantrieb: Geräusch- und Vibrationsreduzierung sowie Reduzierung des Energiebedarfs durch Rekuperationsfähigkeit der Bremsenergie.

Die Einheit aus Dieselmotor und Getriebe wird durch einen Elektromotor ersetzt, der ebenfalls am Wagenkasten angeordnet ist und seine Traktionsleistung weiterhin über die vorhandene Gelenkwelle auf die Triebradsätze überträgt. Die Brennstoffzelle, die HV-Batterie sowie die Wasserstofftanks werden so verteilt auf den Dachbereichen des Triebzugs angebracht, dass die Schwerpunktlagen der einzelnen Wagen nicht beeinträchtigt werden.

Neben den Vorteilen, die sich aus der Elektrifizierung im Vergleich zum Dieselantrieb für die Fahrgäste ergeben, ist zusätzlich zur Dekarbonisierung auch mit einem geringeren Instandhaltungsaufwand zu rechnen. Im Hinblick auf die verbleibende Restnutzungsdauer sollte diese Umrüstungsoption spätestens beim Erreichen der halben Nutzungsdauer des Bestandsfahrzeugs realisiert werden.

Umrüstungsalternative mit Wasserstoffmotor

Seit vielen Jahrzehnten bekannt und in Erprobung ist eine Technologie, auf der die zweite Umrüstungsoption basiert: Entweder wird der vorhandene Dieselmotor zur Nutzung mit Wasserstoff anstelle von Dieselmotor umgerüstet oder aber komplett durch einen speziellen Wasserstoff-Verbrennungsmotor ersetzt. Während die Anlagen zur Kraftübertragung im Wesentlichen beibehalten werden können, muss die Tankanlage ersetzt werden. Aufgrund der höheren Volumenanforderungen bei geringerer Masse bietet sich hierfür wiederum der Dachbereich an. Infolge der geringeren Energiedichte von Wasserstoff ist analog zum Einsatz von Brennstoffzellen mit einer reduzierten Reichweite zu rechnen.

Zwar wird diese Umrüstungsalternative deutlich günstiger sein als die erste Option, dafür bleibt aber auch der Verbrennungsmotor mit seinen arbeitsbedingten Eigenschaften wie Geräuschemissionen und erhöhtem Wartungsaufwand erhalten. Dank des neuen Energieträgers Wasserstoff bestehen die Abgase im Gegensatz zum Dieselmotor aber nun im Wesentlichen aus Wasserdampf. Restschadstoffe lassen sich mit Hilfe einer Abgasnachbehandlung wirkungsvoll eliminieren. Aufgrund der speziellen Motorentechnik ist bei gegebenem Einbauvolumen allerdings mit geringen Leistungseinbußen zu rechnen.

Diese Umrüstungsalternative wird insbesondere dann attraktiv sein, wenn eine Versorgungslogistik für Wasserstoff schon vorhanden ist, z. B. weil sie bereits für neubeschaffte wasserstoffbetriebene Regionaltriebzüge oder Busse benötigt wird.

Alternativen auf der Basis von synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels)

Nicht unerwähnt bleiben darf an dieser Stelle die Fortsetzung des Betriebs der vorhandenen Dieseltriebzüge unter Verwendung sogenannter „E-Fuels“. Hierbei handelt es sich um einen synthetischen Kraftstoff, der mit Hilfe elektrischer Energie aus Wasserstoff und Kohlendioxid synthetisiert werden kann (Abbildung 8). Weil das Kohlendioxid dabei zunächst der Atmosphäre entzogen und erst später bei der Verbrennung wieder freigesetzt wird, wirken E-Fuels in ihrer Gesamtbilanz klimaneutral, soweit auch die erforderliche elektrische Energie klimaneutral hergestellt wird.

Die chemische Struktur von E-Fuels kann in der Produktion in gewissen Grenzen gestaltet und damit in den Formen verschiedener Endprodukte ausgeführt werden, z. B. synthetisches Benzin, Diesel oder auch Kerosin. Sie sind damit grundsätzlich geeignet, auch bereits vorhandene Fahrzeuge und deren Infrastrukturen, die bisher für fossile Brennstoffe genutzt worden sind, klimaneutral weiter betreiben zu können, mindestens aber bis zum Ende ihrer technischen Lebensdauer. Da synthetisch hergestellte Kraftstoffe keine Aromaten oder Zyko-Aromaten enthalten, verbrennen diese deutlich sauberer als entsprechende fossile Kraftstoffe, sind nicht gesundheitsschädlich/wassergefährdend, lagerstabil und verfügen über bessere Kaltstarteigenschaften.

Da aber E-Fuels für ihre Produktion Wasserstoff benötigen, der zunächst ebenfalls hergestellt werden muss (siehe Kapitel 4), wird sich eine Anwendungs-Konkurrenz ergeben: Soll der Wasserstoff direkt eingesetzt oder aber in einer weiteren Produktionsstufe noch zu E-Fuels umgewandelt werden? Für eine qualifizierte Abwägung müssen die Mehrkosten für die E-Fuel-Produktion mit den Einsparungen dank Nutzung der bestehenden Infrastruktur sowie der niedrigeren Trans-

portkosten aufgrund der erheblich höheren Energiedichte und einfacheren Lagerung verglichen werden. Dieser Prozess ist aktuell im Gang. Sein Ergebnis wird zeigen, ob E-Fuels trotz des geringen Wirkungsgrades der Herstellungskette auch aus wirtschaftlicher Sicht für einen ähnlich breitbandigen Einsatz im Verkehrssektor wie Wasserstoff geeignet sind oder aber nur für Spezialanwendungen, z. B. im Luftverkehr, in Frage kommen. Ausschlaggebend dafür werden die Marktpreise sein, zu denen E-Fuels aus nachhaltiger industrieller Herstellung angeboten werden können.

Nicht zu vernachlässigen ist hierbei, dass E-Fuels prinzipiell auch am gleichen Ort wie der grüne Wasserstoff erzeugt werden können. Danach wäre der Transport dieser E-Fuels via Schiff oder Tankzug sowie die Verteilung sehr einfach über die vorhandene Infrastruktur möglich. Dies ist ein nicht zu vernachlässigbarer Vorteil gegenüber dem Handling von Wasserstoff.

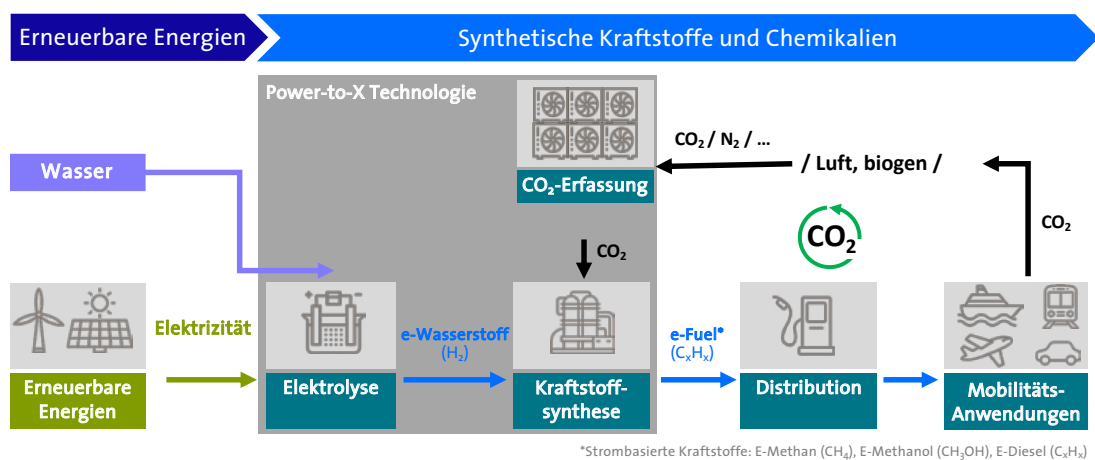


Abbildung 8: Produktionskette für E-Fuels

4. SICHERSTELLUNG DER VERSORGUNG MIT WASSERSTOFF

Wasserstoff wird heute überwiegend für Prozesse innerhalb der chemischen Industrie verwendet. Um auch eine erweiterte Rolle als maßgeblicher Energieträger im Verkehrssektor übernehmen zu können, muss seine Gewinnung in Zukunft um ein Vielfaches ausgeweitet werden. Da der dazu erforderliche Ausbau der erneuerbaren Energien im Bundesgebiet auch auf lange Sicht nur zu einem sehr geringen Teil für die Herstellung von Wasserstoff zur Verfügung stehen wird, ist eine internationale Arbeitsteilung und Logistik zur Versorgung der Welt mit grünem Wasserstoff unumgänglich. Überdies wird es erforderlich sein, an geeigneten Stellen im Bundesgebiet H₂-Tankstellen als Hubs zu platzieren, die einerseits eine ausreichend hohe, gebündelte Nachfrage aus allen Sektoren bedienen können, andererseits aber auch über entsprechende Quellen für die Bereitstellung des Wasserstoffs verfügen. Beide Anforderungen sind Grundvoraussetzungen für die Implementierung der Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung aus dem Jahr 2020⁸.

⁸ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Die Nationale Wasserstoffstrategie, Berlin 2020.

Herstellung von Wasserstoff

Wasserstoff kann über verschiedene Wege gewonnen werden. Derzeit überwiegt die Produktion von sogenanntem „grauen Wasserstoff“, der aus Erdgas oder Kohle hergestellt wird. Weil dabei CO₂ in die Atmosphäre abgegeben wird, ist eine Klimaneutralität nicht gegeben. Es besteht jedoch die Möglichkeit, die Emissionen bei der Herstellung zu senken, wenn ein Teil des bei der Produktion entstehenden Kohlendioxids gebunden und in unterirdischen Lagerstätten sicher und dauerhaft gespeichert werden kann. Dies erfordert jedoch zusätzliche Energie und Infrastruktur bzw. Logistik. Das entsprechende resultierende Produkt wird als „blauer Wasserstoff“ bezeichnet und weist schon eine erheblich günstigere Klimabilanz auf, soweit die CO₂-Speicherung langfristig sichergestellt werden kann.

Von vornherein nachhaltig ist die Herstellung von Wasserstoff aber nur, wenn dafür ausschließlich erneuerbare Energien eingesetzt werden. Der daraus entstehende „grüne Wasserstoff“ prägt damit das Zielbild einer sauberen Wasserstoffwirtschaft. Und er ist hervorragend zur Energiespeicherung geeignet, insbesondere dann, wenn die aus Wind- oder Sonnenkraft zur Verfügung stehende Elektroenergie größer ist als der aktuelle Bedarf (z.B. in Nacht- oder Feiertagszeiten). Entsprechend gelten alle anderen Produktionsformen allenfalls als Brückentechnologie, die nur vorübergehend zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft eingesetzt werden (Tabelle 2), damit jedoch das Risiko der „Stranded Assets“ in sich bergen. Vor Einsatz dieser Brückentechnologien muss daher bereits Einigkeit über die Übernahme der Kostenrisiken für die rechtzeitige Bereitstellung von grünem Wasserstoff bestehen, gerade auch im Hinblick auf den Bedarfswettbewerb mit anderen Anwendungsfällen (siehe Abbildung 1).

	Ausgangsstoff	Nebenprodukt	Energie	CO ₂ -Emission (pro kg H ₂)
grauer Wasserstoff	Erdgas, Kohle	CO ₂ in Atmosphäre	Strommix, fossile Brennstoffe	ca. 13,3 – 23 kg
blauer Wasserstoff	Erdgas, Kohle	CO ₂ unterirdisch	Strommix, fossile Brennstoffe	ca. 5 – 7 kg
grüner Wasserstoff	Wasser	O ₂	Regenerative Energie	< 1 kg
türkiser Wasserstoff	Methan	Kohlenstoff fest	variabel, optimal regenerativ	variabel

Tabelle 2: Einteilung der Wasserstoffe nach ihrer Herstellung

Mit Hilfe des Energieträgers Wasserstoff ließe sich Energie auch über lange Strecken in verschiedenen Aggregatzuständen transportieren. Damit besteht die prinzipielle Möglichkeit, das Potenzial der im eigenen Land vorhandenen natürlichen Quellen für erneuerbare Energien durch zusätzliche Ressourcen von außerhalb zu ergänzen. Dabei kommen in erster Linie besonders sonnen- oder auch windbegünstigte Gebiete der Welt in Frage, in denen die Produktion deutlich günstiger sein wird.

Hierzu wurde bereits von der deutschen Bundesregierung eine Initiative unter dem Titel „H₂-Global“ gestartet. Ziel ist die Ermöglichung von Importkapazitäten im Ausland in Verbindung mit einer Handelsplattform für grünen Wasserstoff. Durch die Initiative soll der Markthochlauf gefördert und der Import von grünem Wasserstoff für Power-to-X-Produkte unterstützt werden.

Versorgung mit Wasserstoff

Die Schnittstelle für die Betankung wird durch eine Schienen-Wasserstoff-Tankstelle gebildet, die in Deutschland unter anderem den Regelungen des Allgemeinen Eisenbahngesetzes (AEG) unterliegt. Sie wird von einem Energieversorgungsunternehmen für die Eisenbahn erstellt und muss allen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) diskriminierungsfrei zur Verfügung gestellt werden. Die Neueinrichtung einer solchen Tankstelle erfolgt unter Hoheit der zuständigen Behörde und verlangt ein Genehmigungsverfahren, dessen Verfahrensdauer zwischen einem halben und eineinhalb Jahren liegen kann⁹.

Die Technik der Tankstelle gilt dank langjähriger Erfahrung im Straßenverkehr als erprobt. Die Betankung von Schienenfahrzeugen läuft im Wesentlichen gleich ab wie bei Lkw. Auch hier wird gasförmiger Wasserstoff mit einem Druck von 250 bis 350 bar verwendet. Während allerdings ein Lkw in der Regel eine Wasserstoffmenge von bis zu 40 kg aufnimmt, verfügen wasserstoffbetriebene Regionaltriebzüge je nach Länge über Tankvolumina von bis zu 400 kg.

Der Transport des Wasserstoffs vom Produktionsort bis zur Tankstelle erfolgt in der Regel in geeigneten Wasserstoff-Druckbehältern. Üblich ist heute ein Transportdruck von 200 bar. Für die Anwendung von Wasserstoff als Energieträger im Verkehrssektor sind Anlagen und Behälter mit einem Transportdruck von 500 bar in der Entwicklung, um den höheren Kapazitätsanforderungen des Transportsektors ebenfalls genügen zu können. Die einzelnen Druckbehälter werden gebündelt und bilden dann einen „Multiple-Element Gas Container“ (MEGC) in der Größe eines 40-Fuß-Containers (Abbildung 9).

Der MEGC ist so gestaltet, dass er sich sowohl für Straßen- als auch für den Bahntransport eignet. In der 500-bar-Ausführung ist ein solcher MEGC in der Lage, über 1000 kg Wasserstoff aufzunehmen. Das ist alleine schon ausreichend, um einen Regionaltriebzug bis zur viermal zu betanken. Nicht nur aufgrund des relativ hohen Transportvolumens, sondern natürlich auch aus ökologischen Gründen ist es jedoch sinnvoll, Tankstellen nach Möglichkeit über die Schiene zu versorgen, ein systemimmanenter Vorteil von Tankstellen für den Schienenverkehr.



Abbildung 9: „Multiple-Element Gas Container“ (MEGC) in der Größe eines 40-Fuß-Containers (Beispiel NPROXX, Abbildungen zur Wasserstofftransportstudie, Frankfurt am Main, 2020)

⁹ Landesenergieagentur Hessen (Hrsg.): Potenzialbeschreibung – Wasserstofftransport über das Schienennetz, Wiesbaden 2020.

Für größere Anlagen wird sich künftig auch die Option eines direkten Pipeline-Anschlusses anbieten, sobald ein entsprechendes Verteilungssystem für Wasserstoff z. B. in den Ballungsräumen aufgebaut sein wird.¹⁰ Für Anlagen, die dagegen eher in der Fläche liegen, werden bereits Elektrolyseure entwickelt, die als Kleinanlagen den Wasserstoffbedarf vor Ort direkt selbst aus erneuerbarem Strom herstellen können. Ein passender Zwischenspeicher gewährleistet den Ausgleich zwischen der kontinuierlichen Produktion und der volatilen Kundennachfrage.

Im Hinblick auf den technischen Aufwand für eine Wasserstofftankstelle ist es sinnvoll, ihre Nutzung durch die Bedienung verschiedener Verkehrsträger zu erhöhen: Bei entsprechender Standortwahl können zumindest Schienen- und Straßenfahrzeuge, ggf. aber sogar auch Binnenschiffe, betankt werden. Die Tatsache, dass die Betankungstechniken einschließlich Anschlüssen und Druckstufen im Wesentlichen identisch sind, unterstützt dieses Bestreben. Somit ließe sich die Rentabilität von Wasserstoffanlagen signifikant steigern.

5. BENÖTIGEN WIR EINEN ERWEITERTEN REGELUNGSRAHMEN?

Allgemeine Überlegungen zur Wasserstoff-Infrastruktur

Entscheidend für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Deutschland ist die Investitionssicherheit. Um den Einsatz von grauem (aus Erdgas gewonnenem) Wasserstoff, ggf. in Verbindung mit der Abscheidung von CO₂, so weit wie möglich einzuschränken, sollte sich der Einsatz öffentlicher Mittel zum Ausbau der Infrastruktur auf die emissionsfreien Herstellungsprozesse des Wasserstoffs fokussieren. Die Situation ist vergleichbar mit dem Aufbau der Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität auf der Straße, die dem Ausbau der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Quellen deutlich voran läuft und damit übergangsweise noch auf die auslaufende fossile Energieproduktion angewiesen ist.

In diesem Sinne muss bei der Auswahl der Energieversorgung für kommende Ausschreibungen im Nahverkehr der Bedarf an grünem Wasserstoff definiert und über eine Zeitskala quantifiziert werden. Denn nur mit einer solchen Festlegung wie auch einer angemessenen Risikoteilung hinsichtlich des Beschaffungspreises von Wasserstoff sind tragfähige Geschäftsmodelle in der Wasserstoffwirtschaft möglich. Dazu gehört auch, dass heutige und künftig absehbare CO₂-Abgaben schon jetzt jahresscharf in jegliche Business-Pläne aufgenommen werden müssen.

Zulassung und Infrastruktur

Die bahntechnische Zulassung von Schienenfahrzeugen mit Wasserstoffantrieb hat sich als unproblematisch erwiesen: Alle Strecken, die bereits für Dieseltriebzüge freigegeben waren, dürfen auch von Triebzügen mit Wasserstoffantrieben unter gleichen Bedingungen benutzt werden.

¹⁰ Siehe auch Bundesnetzagentur (BNetzA): Regulierung von Wasserstoffnetzen – Ergebnisse der Marktkonsultation. Bonn, November 2020.

Darüber hinaus wurde festgelegt, dass Fahrzeuge mit Brennstoffzellen und elektrischen Antrieben normalen elektrischen Triebzügen gleichgestellt sind, sodass Brennstoffzellenzüge unter Oberleitung wie normale elektrische Züge betrieben werden dürfen. Damit ist auch die Befahrbarkeit langer Tunnel durch die Innenstadt grundsätzlich möglich (z. B. City-Tunnel Leipzig).

Innovative Entwicklungen von Wasserstoffanwendungen für den Eisenbahnbereich stellen einen starken Normungsimpuls dar. Damit geht eine kontinuierlich fortlaufende Normungsarbeit einher, die ganzheitlich elektrische, mechanische, drucktechnische, schutzspezifische sowie auch damit einhergehende batterieelektrische Aspekte betrachtet. Darüber hinaus werden auch Schnittstellen zur Betankung und Instandhaltung einbezogen. Die Veröffentlichung entsprechender Normen ist in den nächsten Jahren zu erwarten.

Handlungsempfehlung:

- Schaffung klarer Regeln und Vorgaben zur Tankstelleninfrastruktur. Im Speziellen bezüglich Rohrführung im Gleisbett und Redundanz.
- Finanzieller Förderung von Wasserstoff-Antriebslösungen über den Nachweis von CO₂-Einsparung hinaus. Denn der Umstieg von fossilen Brennstoffen auf Wasserstoff geht immer mit einem CO₂-Einsparpotenzial einher.

6. WELCHE BETREIBERMODELLE GIBT ES FÜR DEN EINSATZ VON TRIEBZÜGEN MIT WASSERSTOFFANTRIEB?

Betreibermodelle für Fahrzeuge

Für die Vergabe der Leistungen von Triebzügen mit Wasserstoffantrieb kommen unter den vorgenannten Bedingungen alle bisher etablierten Vergabemodelle in Betracht. Sowohl die Eisenbahnverkehrsunternehmen als auch die Hersteller stehen für die Vergabe von Triebzügen mit Wasserstoffantrieben vollumfänglich zur Verfügung. Es bedarf hierbei keiner Neuerung in dem aktuellen Set-up, wie in Tabelle 3 dargestellt ist. Wichtig ist es allerdings, dass der Preis für den erforderlichen Wasserstoff von vornherein fixiert ist, gegebenenfalls mit einer Dynamisierung über die Vertragslaufzeit, um einen tragfähigen Business Case zu definieren.

	Aufgabenträger	EVU	Hersteller
Klassisches EVU-Modell	Bestellt EVU Leistung	Kauft Fahrzeuge und erbringt Instandhaltung	Liefert Fahrzeuge und Ersatzteile
Leasing	Bestellt EVU Leistung	Sucht Leasing-Partner und erbringt Instandhaltung	Liefert Fahrzeuge und Ersatzteile
BW-Modell	Kauft Fahrzeuge von gewinnendem EVU, Rückverpachtung	Kauft Fahrzeuge nach Vorgaben des AT und erbringt Instandhaltung	Liefert Fzg- und Ersatzteile ggf. Mitwirkung Instandhaltung

	Aufgabenträger	EVU	Hersteller
Aufgabenträgerpool	Kauft Fahrzeuge und Instandhaltung von Hersteller/Service	Fährt mit Fahrzeugen	Liefert Fahrzeuge und erbringt (in Koop.) Instandhaltung
Lebenszyklus-Modell	Kauft Fahrzeuge und Instandhaltung von Hersteller	Fährt mit Fahrzeugen	Liefert Fahrzeuge und erbringt Instandhaltung

Abbildung 10: Zusammenfassende Übersicht der aktuell existierenden Vergabemodelle

Die Vergabe von SPNV-Leistungen mit wasserstoffbetriebenen Triebzügen sowie die Bereitstellung der zugehörigen Wasserstofftankstellen können im Rahmen dieser Vergabemodelle stattfinden. Wichtig ist jedoch ein Verständnis der Aufgabenträger für die Tatsache, dass die Wasserstoff-Technologie am Anfang der Entwicklung selbst innerhalb des vorgesehenen Einsatzfeldes (Abbildung 2) noch aufwändiger ist als bisher bekannte konventionelle Technologien. Dies lässt sich jedoch in den üblicherweise vergaberelevanten Total-Cost-of-Ownership-Modellen abbilden und berücksichtigen. Im Laufe der künftigen Entwicklung im Energiesektor ist jedoch mit einer Verringerung der Kosten für die Versorgung mit grünem Wasserstoff und dessen Herstellung zu rechnen.

Betreibermodelle für Infrastruktur

Anlagen zur Betankung von Fahrzeugen für den Schienenverkehr im Bereich der öffentlichen Schieneninfrastruktur unterliegen dem Allgemeinen Eisenbahngesetz (AEG) und dem Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG). Betankungsanlagen von Schienenfahrzeugen jeglichen Umfangs sind gemäß Definition § 2 Abs. 3 c AEG den „*Einrichtungen für die Brennstoffaufnahme*“ zuzuordnen, daher ist ein Planfeststellungsverfahren mit formeller Konzentrationswirkung nach § 18 AEG in Verbindung mit §§ 72–78 VwVfG durchzuführen.

Energieversorgungsunternehmen sind dazu verpflichtet, die eigenen Betankungsanlagen diskriminierungsfrei allen Eisenbahngesellschaften zugänglich zu machen. Dabei ist das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) außerhalb von NE-Bahnen die leitende Fachbehörde. Die Verfahrensdauer für ein Genehmigungsverfahren inklusive Planfeststellung kann ab Einreichung der vollständigen Unterlagen zwischen einem halben und eineinhalb Jahren betragen.

Zum jetzigen Zeitpunkt definiert das EBA den Begriff der „Betankungsanlage“ als Kombination aus Zapfsäulen (Dispenser) und Betankungsgleisen. Der restliche Anlagenteil, im Folgenden als „Betankungsinfrastruktur“ (Speicher, Verdichter, Elektrolyseur, Systemsteuerung) bezeichnet, dient der Bereitstellung des Wasserstoffs und soll genehmigungstechnisch durch die verantwortlichen Immissionsschutzbehörden behandelt werden.“

Handlungsempfehlung:

- Öffnung von Förderbedingungen für verschiedene und innovative Betreibermodelle (zum Beispiel „Sale and Lease-back“-Modelle)

7. WIRTSCHAFTLICHKEIT UND WETTBEWERBSFÄHIGKEIT DES WASSERSTOFF-ANTRIEBS

Die gesellschaftspolitische Debatte über Klimaschutz und Luftreinhaltung schafft die Voraussetzungen für einen Markteintritt alternativer Antriebskonzepte. Studien zeigen, dass nicht nur die kombinierte Oberleitungs- und Batterietechnologie dabei wirtschaftlich und somit wettbewerbsfähig ist, sondern auch die Wasserstofftechnologie. Voraussetzung ist jedoch die korrekte Einhaltung der technologiebezogenen Einsatzfelder (siehe Kapitel 1).

Die Wirtschaftlichkeit eines Systems ist maßgeblich von den zwischen Herstellung und Entsorgung, d. h. den über den gesamten Lebenszyklus anfallenden Kosten bestimmt, den sogenannten Lebenszykluskosten. Dies gilt insbesondere für langlebige Güter wie Energieversorgungsinfrastruktur und Schienenfahrzeuge.

Methodik einer volkswirtschaftlichen Bewertung

Besonders der volkswirtschaftliche Nutzen ist vergleichend für verschiedene mögliche Arten von Fahrzeugantrieben zu bewerten.

Der volkswirtschaftliche Nutzen ist durch eine staatlich finanzierte Eisenbahninfrastruktur und einen gleichzeitig aus den Regionalisierungsmitteln des Bundes finanzierten Regionalverkehr in besonderem Maße bedeutend. Investitionen für das Fahren mit alternativen Antriebssystemen sowohl in die Infrastruktur als auch indirekt in die Fahrzeuge sind heute noch in besonderem Maße auf Steuermittel angewiesen. Die Gesamtwirtschaftlichkeit einer Technologie bemisst sich dementsprechend aus den Gesamtkosten für beide Teile des Systems.

Für die Bewertung können fünf grundlegende wirtschaftliche Indikatoren herangezogen werden, die über den Lebenszyklus in zeitdiskreten und kontinuierlichen finanziellen Aufwendungen zu bemessen sind. Diese sind:

- Investition in Fahrzeuge
- Betriebskosten der Fahrzeuge (Energiekosten für Traktion und Hilfsbetriebe, Instandhaltung, zusätzlich Fahrten zur Betankung)
- Investition in Infrastruktur (Tankstellen, Grundstücke, Netzanschlussgebühren an Energieversorger und ggf. Bahnnetzbetreiber)
- Betriebskosten der Infrastruktur (Instandhaltung, Netzentgelte)
- Reinvestitionen in die Betriebsmittel (Speicherkomponenten wie Batterien, Energiewandler wie Brennstoffzellen oder Wasserstoffmotoren, Wiederbeschaffung von Fahrzeugen, Wiederbeschaffung von Infrastruktur)

Solch eine Bewertung muss zudem immer anhand des geplanten Betriebsprogramms der zu bedienenden Strecken eines Netzes, des Fahrzeugeinsatzes und des vorhandenen Elektrifizierungsgrads konkret untersucht werden.

Zur Analyse muss ein repräsentativer Betrachtungszeitraum festgelegt werden. Werden kürzere Betrachtungszeiträume als die zugrunde gelegten Abschreibungsdauern (üblicherweise Triebwagen 20 Jahre, Elektrifizierung > 50 Jahre) gewählt, so müssen für eine volkswirtschaftliche Betrachtung geeignete Restwerte für die verschiedenen Anlagegüter angesetzt werden, um einen realistischen und gleichwertigen Technologievergleich zu ermöglichen.

Handlungsempfehlung:

- Gesonderte Betrachtung bestellter Verkehrsleistungen und (Wasserstoff-)Infrastruktur, um hierdurch mehr wettbewerbliche Dynamik im Infrastrukturmarkt zu schaffen.

8. HANDLUNGSEMPFEHLUNG FÜR DIE EINFÜHRUNG VON WASSERSTOFFZÜGEN

Linien des Schienenpersonennahverkehrs sind grundsätzlich für den Einsatz von Wasserstoffzügen geeignet, wenn sie innerhalb des Einsatzfeldes für wasserstoffbetriebene Regionaltriebzüge liegen (siehe Kapitel 1). Um hier den Betrieb aufnehmen zu können, muss zunächst eine Schienen-Wasserstoff-Tankstelle an geeigneter Stelle errichtet werden. Mit dem richtigen zeitlichen Vorlauf stellen die Planung und Errichtung der Infrastruktur zur Betankung kein Hindernis dar. Analog zu anderen Infrastrukturmaßnahmen können die dafür etablierten Institutionen mit Unterstützung und Beteiligung der Bahnindustrie die rechtzeitige Planung, Finanzierung und Umsetzung sicherstellen.

Die Schaffung verlässlicher politischer Rahmenbedingungen mit Blick auf die Unterstützung der Finanzierung der Betankungsinfrastruktur wie auch der übrigen etablierten Technologie-Förderprogramme sowie deren Ausstattung mit zweckgebundenen finanziellen Mitteln sind Voraussetzung für die kurz- und mittelfristige Einführung wasserstoffbetriebener Triebzüge. Die Auswahl der Netze mit Eignung für den Wasserstoffbetrieb sollte im Sinne der Sektorkopplung in enger Zusammenarbeit aller Beteiligten aus Aufgabenträgern, Wirtschaftspolitik und Verbänden wie der Bahnindustrie erfolgen. Triebzüge mit wasserstoffbasiertem Antrieb können die Basis für eine durch mehrere Verkehrsträger genutzte Wasserstoff-Versorgungsinfrastruktur sein. Insbesondere, da sich eine Investition durch langfristige, regelmäßige und hohe Abnahmengruppen wirtschaftlich abbilden lässt. Hierauf können dann weitere Verkehrsträger mit geringeren Abnahmevolumina aufsetzen.

Sobald die Versorgung mit E-Fuels aus erneuerbaren Energiequellen im industriellen Maßstab absehbar ist, sollte eine Anschubförderung für deren Nutzung mindestens so lange gewährt werden, bis die Entwicklung der Kostenstrukturen einen fortgesetzten Einsatz auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht erwarten lässt.

Handlungsempfehlung:

- Vorantreiben der Sektorkopplung durch Verankerung entsprechender Bedingungen innerhalb der Förderrichtlinien.
- Anreize in Form höherer Fördersätze bei Öffnung von Wasserstoff-Versorgungsinfrastruktur für Dritte und weitere Verkehrsträger.
- Frühzeitiger und beschleunigter Umstieg auf Wasserstoff-Antriebssysteme durch höhere
- Förderung der Fahrzeugbeschaffung und konsequenteren Umstieg auf alternative Antriebslösungen.

Abbildungen & Tabellen

Abbildung 1: M. Liebereich (2021),
Quelle: <https://mobile.twitter.com/wozukunft/status/1436681783920242696>

Abbildung 2: Prof. M. Karch (2021)

Abbildung 3: Schema einer Brennstoffzelle, Adrien Pilleboue (2008),
Free Art License, Quelle: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Schema-Brennstoffzelle.svg>

Abbildung 4: Alstom Transport Deutschland

Abbildung 5: Alstom Transport Deutschland

Abbildung 6: Siemens Mobility

Abbildung 7: Stadler Deutschland

Abbildung 8: Rolls-Royce Power Systems AG

Abbildung 9: NPROXX, Abbildungen zur Wasserstofftransportstudie, 2020

Abbildung 10: VDB-Expertenkreis Wasserstoff

Tabelle 1 & 2: VDB-Expertenkreis Wasserstoff

Erstellt durch den Verband der Bahnindustrie in Deutschland e. V.
unter Mitwirkung eines Expertenteams folgender Firmen:

- Alstom Transport Deutschland GmbH
- J.M. Voith SE & Co. KG
- MAN Truck & Bus AG
- Rail Power Systems GmbH
- Rolls-Royce Solutions GmbH
- Siemens Mobility GmbH
- Stadler Deutschland GmbH und
Stadler Rail Management AG
- TÜV SÜD Rail GmbH

Mit Unterstützung von Prof. Dr.-Ing. Stefan Karch
(TU Dortmund, Railway Design & Innovation AG).

Gestaltung

designhaus-berlin

© September 2022

