

Mit Wasserstoffzügen das Klima retten?

Wolfgang Kling, Dipl.-Ing (FH)

Wie aus diversen Pressemeldungen zu schliessen ist, erfreuen sich Wasserstoffzüge einer grossen Medienpräsenz und werden oft als Teil der Lösung zu einer emissionsfreien, umweltfreundlichen Eisenbahn und damit als ein grosser Schritt in Richtung Klimaschutz im Transportwesen angesehen. Bekannte Hersteller haben inzwischen Wasserstoffzüge im Angebot und werden ab 2022 mit der Ablieferung erster Serien beginnen [8, 16, 38]. Doch wie sinnvoll ist der Einsatz solcher Züge im Gesamtzusammenhang, und bringen sie wirklich das Klimaschutzpotential mit, das von ihnen erwartet wird? Die folgenden Ausführungen sollen dazu einige Anhaltspunkte über den Vergleich verschiedener Energieträger und deren Wirkungsgrade bei der Umsetzung in eine Transportleistung liefern.

Als Wasserstoffzug wird in der Regel ein Triebzug für den Personenverkehr im Nah- und Regionalbereich bezeichnet, der seine Energie aus mitgeführtem Wasserstoff bezieht und als lokal emissionsfrei und umweltfreundlich angesehen wird. Die Betankung der Wasserstoffzüge erfolgt in ähnlicher Weise wie bei den bekannten fossilen Kraftstoffen. Die Betankungszeiten sind vergleichbar, aber es muss ein eigenständiges, lokales Tanksystem im Sinne einer Tankstelle installiert werden. Dieses dient als grossvolumiger Zwischenspeicher und als Konditioniereinheit, um den Wasserstoff in geeignetem Zustand an das Fahrzeug abgeben zu können [19]. Der Zwischenspeicher muss in gegebenen Zeiträumen aufgefüllt werden. Dazu muss eine neue Infrastruktur und Logistikkette parallel zu den flüssigen fossilen Kraftstoffen aufgebaut werden.

Wasserstoff unterscheidet sich in der Eigenschaft als Energiespeicher gegenüber Batterien und Diesellochstoff durch seine spezifische Energiedichte, also der Menge an Energie, die pro Volumen- oder Gewichtseinheit gespeichert werden kann. Durch die hohe gewichtsbezogene Energiedichte des Wasserstoffs (siehe Tabelle oben) kann ein Wasserstoffzug im Gegensatz zu batterieelektrischen Zügen ausreichend Energie für Laufleistungen bis zirka 1000 Kilometer ohne Nachtanken mitführen. Bei batterieelektrischen Zügen liegt die Laufleistung ohne Nachladen bei zirka 100 km [29]; Steigerungen sind möglich [40]. Die sehr nachteilige volumenbezogene Energiedichte verlangt dafür viel Platz. Die Ideallösung bezüglich Energiegehalt bezogen auf Gewicht und Volumen bietet Diesellochstoff; er enthält sehr viel Energie pro Volumen- und Gewichtseinheit und beansprucht damit wenig Platz und Zusatzgewicht im Fahrzeug (siehe Abbildung in der Mitte). Die spezifischen Energiedichten spielen im Eisenbahnbereich eine geringere Rolle als im Strassengüter- oder Luftverkehr; dort sind sie auf Grund restriktiver Gewichts- und Raumbeschränkungen massgebend für den Einsatz der Energieträger.

Wasserstoff und seine Grenzen

Wasserstoff wird wie andere klassische materielle Energieträger in industriellen Prozessen in eine technisch verwendbare Form gebracht, zum Empfänger geliefert und dort verwertet. Die Bereitstellungskette wird als Well-

to-Tank (WTT, Quelle zum Tank) bezeichnet, die Verwertung auf dem Fahrzeug als Tank-to-Wheel (TTW, Tank zum Rad). Beide Teilpfade unterscheiden sich je nach Energieträger wesentlich in der Emission von CO_2 , müssen aber stets zusammen als Well-to-Wheel (WTW, Quelle zum Rad) betrachtet werden.

Elementarer Wasserstoff ist keine natürlich vorkommende Ressource. Er muss mit entsprechendem Energieaufwand aus Vorprodukten erzeugt und in eine handhabbare Form gebracht werden. Dazu existieren verschiedene Produktionsmethoden, die darüber entscheiden, wie umweltfreundlich der Wasserstoff ist. Massgebend ist dabei, welche Vorprodukte verwendet werden und wie die dazu benötigte Energie zur Verfügung gestellt wird. Damit bringt der Wasserstoff beim Tanken einen CO_2 -Fussabdruck mit, der ihm bei der Herstellung eingeprägt wurde. Entschei-

dend ist also die Prozesskette von der Herstellung bis zum Tank des Fahrzeugs (WTT) und nicht wie bei den klassischen fossilen Antrieben die massgebliche Betrachtung der Energieumsetzung vom Tank bis zum Rad (TTW). Wasserstofffahrzeuge sind aus diesem Grund nur lokal emissionsfrei; bei der notwendigen Gesamtbetrachtung (WTW) sind sie es nicht. Eine nicht abschliessende Übersicht über die Wasserstoffklassen bietet die Tabelle auf der nächsten Seite oben; zur einfacheren Unterscheidung werden in der Regel Farbbegriffe verwendet. Man spricht dann von „grünem“ oder „grauem“ Wasserstoff.

Zukunftsfähig, weil tatsächlich weitgehend emissionsfrei, ist grüner Wasserstoff, der mit regenerativer Energie auf Basis nichtfossiler Ausgangsstoffe hergestellt wird, wobei zurzeit nur die verschiedenen Varianten der Elektrolyse grosstechnisch anwendbar sind. Je nach Methode stellt sich ein Wirkungsgrad von

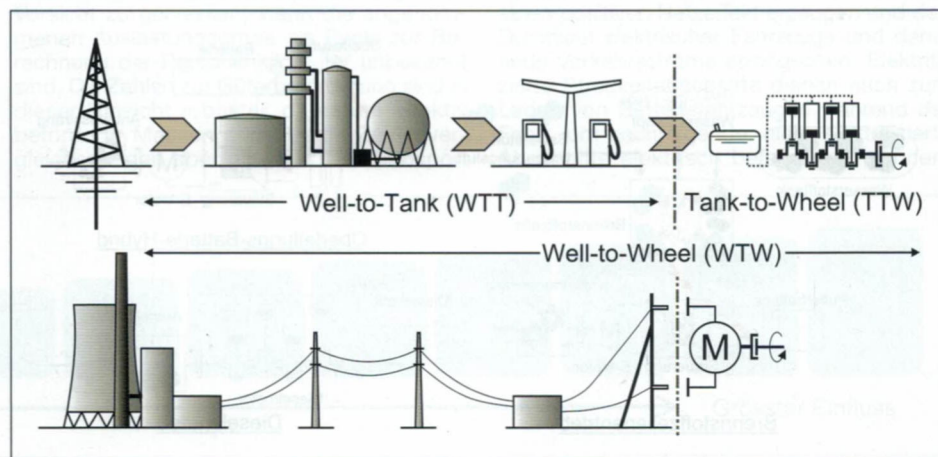
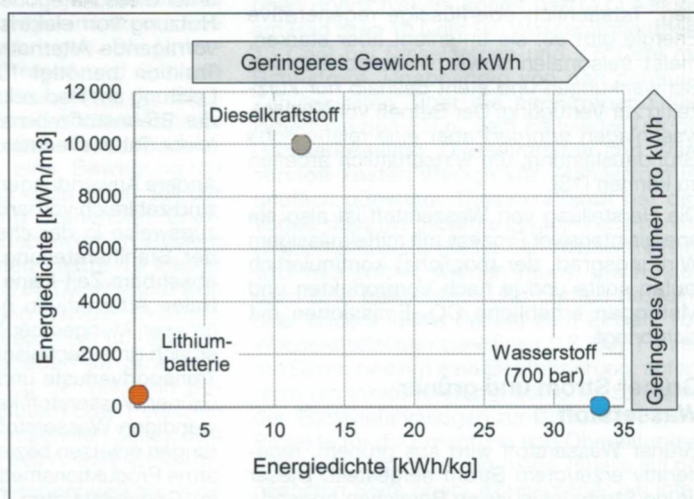
Spezifische Energiedichten ausgewählter Energiespeicher

Energiespeicher	Spezifische Energiedichte, gewichtsbezogen [kWh/kg]	Spezifische Energiedichte, volumenbezogen [kWh/m ³]
Wasserstoff	33,30 [27] (120 MJ/kg)	3,0 bei 1 bar [27] (0,012 MJ/l) 4,8 bei 700 bar
Diesellochstoff	11,97 [27] (42,4 MJ/kg)	9960,9 [27] (35,3 MJ/l)
Lithiumbatterie	0,15 – 0,35 [11]	zirka 450 [14]

Oben: Spezifische Energiedichten von Wasserstoff, Diesellochstoff und Lithiumbatterie.

Rechts: Grafische Darstellung der spezifischen Energiedichten von Wasserstoff, Diesellochstoff und Lithiumbatterie [11, 14, 27].

Unten: Systemdefinition Well-to-Tank (WTT) und Tank-to-Wheel (TTW) (Grafik: W. Kling).



Klassifizierung von Wasserstoff nach Herstellungsverfahren

Farbe		Herstellungsprozess für gasförmigen, komprimierten Wasserstoff [12], [27], [42]	CO ₂ -Emission WTT [gCO ₂ eq/MJ] [27]
Grau		Thermische Methanspaltung, das entstehende CO ₂ wird in die Umwelt abgegeben	98 – 140
Blau		Thermische Methanspaltung, das entstehende CO ₂ wird gebunden (CCS)	35 – 43
Türkis		Thermische Methanspaltung, das entstehende CO ₂ wird gebunden (CCS), thermische Energie aus erneuerbaren Energiequellen	12 – 53
Grün		Elektrolyse mit regenerativ erzeugtem Strom	4,2
Rot/Pink		Elektrolyse mit Strom aus Kernenergie	9 – 10
Gelb		Elektrolyse mit Strom aus dem Netz (EU-Strommix)	168 – 182
Weiss		Abfall aus chemischen Prozessen (zum Beispiel Chlorelektrolyse)	Keine Angaben

66 – 75 % ein [9], der bei den Emissionen in der Tabelle oben bereits eingerechnet ist.

Nicht berücksichtigt ist der Transport des Wasserstoffs an den Ort, an dem er getankt oder anderweitig verwendet werden soll. Wird dieser, wie bei grossen lokalen Verbrauchern üblich, direkt vor Ort produziert, entfallen diese Verluste. Wenn Logistikketten zum Einsatz kommen, ist mit Verlusten beziehungsweise einer erhöhten CO₂-Emission zu rechnen, die stark von der Art der Logistik abhängt.

Grüner Wasserstoff basiert vollumfänglich auf dem Einsatz regenerativer Energie, aber die ist auch auf lange Sicht hin nicht im Überfluss und nicht kostenlos vorhanden [32]. Sie sollte deshalb möglichst effizient eingesetzt werden. Tatsächlich überflüssige regenerative Energie gibt es; sie unterliegt aber starken, meist saisonalen sowie wetterabhängigen Schwankungen und steht deshalb nur kurzzeitig zur Verfügung. Der Betrieb von Elektrolyseanlagen erfordert aber eine relativ hohe Grundauslastung, um wirtschaftlich arbeiten zu können [13].

Die Herstellung von Wasserstoff ist also ein energieintensiver Prozess mit mittelmässigem Wirkungsgrad, der möglichst kontinuierlich laufen sollte und je nach Vorprodukten und Methoden erhebliche CO₂-Emissionen mit sich bringt.

Grüner Strom und grüner Wasserstoff

Grüner Wasserstoff wird aus grünem, regenerativ erzeugtem Strom hergestellt. Dieser grüne Strom ist in vielen Bereichen begehrte

Mangelware, da er nur einen Anteil von 10 – 30 % im Strommix der europäischen Länder ausmacht [37]. Daran kann auch die Diskussion der EU-Kommission um die Einstufung von Atomstrom als grüne Energie nichts ändern. Kann dieser grüne Strom nicht in Prozessen mit hohen Wirkungsgraden verwendet werden, bietet sich die weniger effiziente Umsetzung in Wasserstoff im Sinne einer Speicherung an. Der aus grüner elektrischer Restenergie gewonnene grüne Wasserstoff ist ein wertvolles Gut, dass sehr gezielt dort zur Dekarbonisierung eingesetzt werden muss, wo es den grössten Effekt hat und keine vernünftigen Alternativen zur Verfügung stehen. Der Eisenbahnsektor fällt klar nicht unter diese Kategorie; er hat mit der direkten Nutzung von elektrischer Energie eine hervorragende Alternative. Die rein elektrische Traktion benötigt für 1 Mega-Joule (MJ) Leistung am Rad zirka 1,2 MJ grünen Strom, der Brennstoffzellenantrieb zirka 3 bis 4 MJ (siehe Tabelle rechts oben).

Andere Anwendungen für grünen Wasserstoff sind zahlreich vorhanden; sie finden sich vorzugsweise in der chemischen Industrie und der Stahlherstellung, also dort, wo es auf absehbare Zeit keine einfacheren, klimaneutralen Alternativen gibt und Wasserstoff in grossen Mengen benötigt wird [44]. Dort lässt er sich grosstechnisch lokal produzieren, um Transportverluste und Kosten zu minimieren. Grüner Wasserstoff kann den heutzutage notwendigen Wasserstoff anderer Farbschattierungen ersetzen beziehungsweise emissionsarme Produktionsmethoden erst ermöglichen. Im Gegensatz zum Transportwesen auf der

Das CO₂-Äquivalent

Das CO₂-Äquivalent (CO₂eq) ist eine Masseinheit, mit der die Klimaschädlichkeit von Gasen in Bezug auf die Wirkung von CO₂ beschrieben wird. Solche Gase entstehen oder entweichen bei der Bereitstellung der verschiedenen Energieträger und müssen bei den Gesamtemissionen in Form des CO₂eq berücksichtigt werden. Methan (CH₄) hat zum Beispiel die 25fache Wirkung von CO₂; Stickoxide (N₂O) sind um den Faktor 298 klimaschädlicher. Wird ungenutzt in die Atmosphäre entweichendes Methan (zum Beispiel im Bereich der Landwirtschaft) verbrannt, entstehen 2,6 kg CO₂ pro kg Methan, was die gesamthafte Klimaschädlichkeit deutlich reduziert und negative CO₂eq ergibt – trotz der Emission von CO₂ bei der Verbrennung [27].

Schiene gibt es dort für Wasserstoff keine Alternativen.

Als Beispiel sei die Stahlindustrie in Deutschland genannt, die jährlich zirka 45 Millionen Tonnen Stahl erzeugt und dabei prozessbedingt 67 Millionen t CO₂ emittiert. Zur nahezu emissionsfreien Stahlherstellung durch Direktreduktion würden 2,4 Millionen t grüner Wasserstoff benötigt [10]; dazu muss je nach Wirkungsgrad regenerativer Strom von zirka 860 Milliarden MJ eingesetzt werden. Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2020 etwa 900,7 Milliarden MJ Strom aus erneuerbaren Energieträgern erzeugt [18], was damit nominal gerade für die Dekarbonisierung der Stahlerzeugung mit Wasserstoff ausreicht.

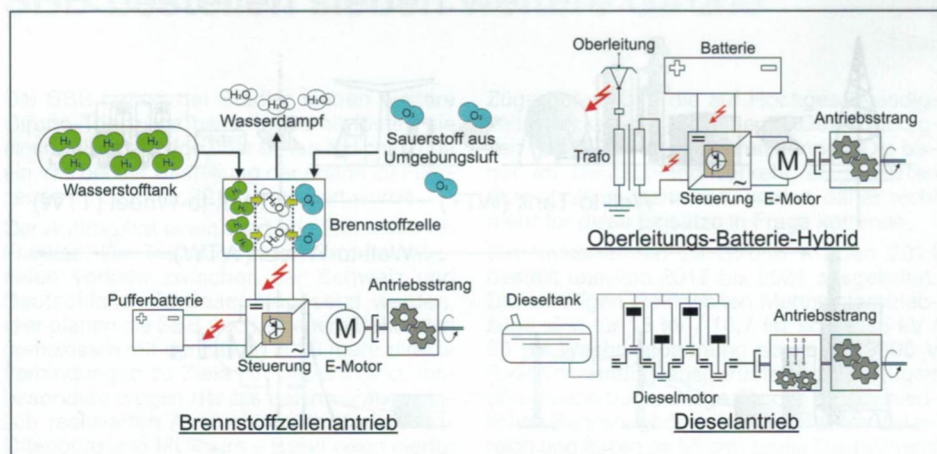
Zur Einordnung dieser Grösse sollen folgende Zahlenwerte dienen: Die Eisenbahn in Deutschland benötigte 2018 zirka 0,26 Millionen t Dieseldraftstoff [5] und emittiert damit zirka 0,8 Millionen t CO₂ [28]. Um mit Wasserstoffzellen die gleiche Leistung zu erbringen sind zirka 0,07 Millionen t grüner Wasserstoff notwendig.

Wasserstoff in der Mobilität

Um Wasserstoff in der Mobilität nutzen zu können, wird er gasförmig in Behältern bei nominal 350 oder 700 bar Druck mitgeführt und in einer Brennstoffzelle unter Abgabe elektrischer Energie in Wasserdampf umgewandelt. Brennstoffzellen arbeiten vorzugsweise in einem optimalen Betriebspunkt unter gleichbleibender Belastung. Um den schwankenden Energiebedarf des Antriebs auszugleichen, ist der Brennstoffzelle eine Batterie als Puffer nachgeschaltet, die bei höherem Energiebedarf zusätzlich Strom liefert und bei tieferem Energiebedarf den Strom aus der Brennstoffzelle speichert. So gesehen beschränkt sich die Aufgabe der Brennstoffzelle auf das Nachladen der Pufferbatterie, die damit im Gegensatz zu batterieelektrischen Fahrzeugen deutlich kleiner und damit leichter dimensioniert werden kann.

Auf dem Weg vom Tank zum Antrieb am Rad entstehen wie auch bei der Herstellung des Wasserstoffs Verluste, die recht gross sein können. Von der im Behälter verfügbaren Energie kommen je nach Bauart zirka 35 – 42 % [24] am Rad an. Bahn und Strasse verfügen damit über die technisch gleichen Ausgangsbedingungen; der Aufbau der An-

Blockschema Brennstoffzellenantrieb, Dieselantrieb und Oberleitungs-Batterie-Hybrid (Grafik: W. Kling).



Emission und Wirkungsgrade ausgewählter Energieträger					
Energieträger, Traktionsart	WTT in gCO ₂ eq/MJ [27]	TTW in gCO ₂ eq/MJ [27]	Wirkungsgrad Antriebsstrang [24]	gCO ₂ eq/MJ am Rad	Elektrische Primärenergie MJ/MJ am Rad
Regenerativer Strom, Elektroantrieb ab Oberleitung oder Batterie	0	0	0,76 – 0,90	0	1,11 – 1,32
H ₂ grün aus Elektrolyse, Brennstoffzelle	4,2	0	0,35 – 0,42	10 – 12	2,8 – 4,4
H ₂ grau aus Erdgas, Brennstoffzelle	98 – 140	0	0,35 – 0,42	233 – 400	–
Fossiler Diesel, Verbrennungsmotor	18,9	73,2	0,28 – 0,30	307 – 329	–

triebsstränge gemäss Abbildung links unten ist allen Fahrzeugen gemeinsam, unabhängig ob Strassen-, Schienen- oder Wasserfahrzeug.

Vergleich der klassischen Energieträger

Die verschiedenen Zahlen rund um Wasserstoff und dessen Wirkungsgrade können verwirrend sein. Deshalb soll ein einfacher Vergleich die Grössenordnungen zeigen. Am Ende interessiert nur, wie viel CO₂ emittiert wird, um eine Leistung am Rad zu erzeugen, und wie viel elektrische Primärenergie dazu notwendig ist. Beim Blick in die nahe Zukunft werden nur regenerativer Strom sowie der derzeit in grossen Mengen verwendete graue Wasserstoff [30] und fossiler Dieselmotorkraftstoff berücksichtigt, zudem die durchschnittlichen Wirkungsgrade der Antriebsanlagen auf den Fahrzeugen. Der batterieelektrische Antrieb darf dazu in einem ähnlichen Wirkungsgradbereich wie der rein elektrische Antrieb angenommen werden [34].

Der Blick auf die Tabelle oben zeigt, dass sich bezüglich der CO₂-Emissionen grauer Wasserstoff und Dieselmotorkraftstoff ebenbürtig sind und die rein (batterie-)elektrische Traktion dem Wirkungsgrad geschuldet deutlich weniger Energie zur Erbringung der gleichen Traktionsleistung benötigt als der mit grünem Wasserstoff arbeitende Brennstoffzellenantrieb.

Unbeliebter Dieselmotorkraftstoff

Der Dieselantrieb hat keinen besonders guten Ruf mehr. Ihn im Schienenpersonenverkehr schnellstmöglich abzuschaffen, scheint erklärtes Ziel vieler Bahnen und Besteller zu sein. Der Ersatz durch Wasserstoffzüge wird von der Politik durch grosszügige Fördergelder ermöglicht (zum Beispiel [4, 35]) und gerne zur eigenen Profilierung genutzt. Die Bahn kann sich dann mit reinem Gewissen „umweltfreundlich“ nennen und hofft allein deswegen auf grossen Zulauf. Wer als Fahrgast das Vergnügen hat, über einem in verschiedenen Drehzahlbereichen geräuschvoll arbeitenden Dieselmotor der 500-kW-Klasse seine Reise zu erleben, kann einem leisen Wasserstoffzug tatsächlich einiges abgewin-

nen, aber wie steht es mit der Bewertung der Umweltfreundlichkeit durch die Passagiere? Eine aktuelle Umfrage aus England kommt zu dem Ergebnis, dass der Umweltgedanke nahezu keine Rolle bei der Verkehrsmittelwahl spielt [41]. Der Wasserstoffantrieb als Marketinginstrument wirkt nicht. Wohl deshalb bezieht sich die Werbung für solche Züge auf vom Antriebsstrang eher unabhängige Bereiche wie zum Beispiel die Innenausstattung [35].

Solange mit grauem Wasserstoff gefahren wird, bleibt der Wasserstoffzug bei realistischer Betrachtung ohnehin weit hinter den umweltbezogenen Erwartungen zurück. Erst beim Einsatz von grünem Wasserstoff ist diese Antriebsart dem Dieselmotorkraftstoff in Bezug auf die Emissionen überlegen. Doch auch die Dieselmotortechnik bleibt nicht stehen, und der Einsatz von Bio- oder synthetischem Dieselmotorkraftstoff senkt die Emissionen des Dieselmotors weiter [21, 27].

Wirkungsgrade Strasse und Schiene

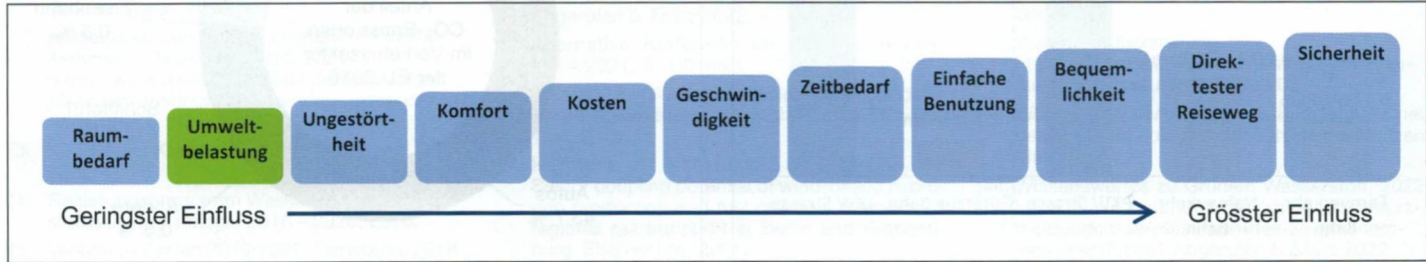
Die vorhergehenden Ausführungen beziehen sich auf die verfügbare Energie am Rad und den dazu benötigten Energieeinsatz, um eine Leistung am Rad zu erbringen. Die Unterscheidung zwischen Strasse und Schiene fängt erst danach an: Besonders der Rollwiderstand zwischen den Systemen Strasse und Schiene differiert stark. Er muss überwunden werden, um eine Bewegung zu generieren und benötigt dazu einen Teil der am Rad zur Verfügung stehenden Energie. Der Rollwiderstandsbeiwert im System Schiene ist etwa um den Faktor 10 kleiner als im Strassenverkehr [26]. Damit ergibt sich je nach Berücksichtigung weiterer Einflüsse und entsprechender Quellen ein um 260 bis 500 % höherer Energiebedarf für Strassenfahrzeuge zur Erbringung der gleichen Beförderungsleistung an Gütern oder Personen (siehe Abbildung auf der nächsten Seite), dies unabhängig von der Art des Antriebssystems. Die Zahlenwerte im Personenverkehr sind unscharf; ein Vergleich ist immer mit grosser Vorsicht zu geniessen, wenn die angenommenen Auslastungsgrade als Basis zur Berechnung der Personenkilometer unbekannt sind. Die Zahlen zur Güterbeförderung sind in dieser Hinsicht robuster, da es um effektiv beförderte Massen geht. Beide Zahlenvergleiche zeigen aber deutlich: Der Transport

von Personen und Waren auf der Schiene ist um Faktoren energieeffizienter als auf der Strasse; Diskussionen über Nachkommastellen erübrigen sich.

Jede Person und jede Tonne Fracht, die von der Strasse auf die Bahn wechselt, spart massiv Energie und vermeidet damit Emissionen, und zwar unabhängig davon, ob der Zug mit Dieselmotorkraftstoff, Wasserstoff oder Bahnstrom betrieben wird.

Kostenbetrachtung

Basierend auf den im Netz frei zugänglichen Energiepreisen darf von zirka 10 Euro/kg Wasserstoff, 1,40 Euro/l Dieselmotorkraftstoff und 0,069 Euro/kWh Bahnstrom ausgegangen werden. Die Prognosen für die Wasserstoffpreise sind rosig und gehen von 4 bis 5 Euro/kg Wasserstoff im Jahr 2030 aus. Die aktuellen Entwicklungen bei den Gaspreisen und dessen Verfügbarkeit als Basis für grauen oder blauen Wasserstoff (siehe Tabelle links oben) sprechen dagegen; Dieselmotorkraftstoff wird ohnehin teuer werden. Über die Wirkungsgrade der Antriebsstränge aus der Tabelle oben überschlagen, kostet das MJ Leistung am Rad zirka 10 Cent bei Wasserstoffantrieb, 13 Cent bei Dieselantrieb und 2,5 Cent mit Bahnstrom. Unabhängig von den genauen Zahlenwerten, über die hervorragend diskutiert werden kann, geht es wieder um die Grössenordnung: Dieselmotorkraftstoff und Wasserstoff kosten ähnlich viel; Bahnstrom ist deutlich günstiger. Dieselmotorkraftstoff hat den Vorteil, dass die gesamte Logistikkette bereits existiert und nicht wie für den Wasserstoffeinsatz neu erstellt werden muss. Die Kosten dazu sind beträchtlich und dürften das eine oder andere lokale Projekt zum Einsatz von Wasserstoffzügen beerdigen [17, 39]. Fahren mit Strom bedingt eine Elektrifizierung, sofern nicht ein Inselbetrieb mit stationär zu ladenden Batteriefahrzeugen zur Diskussion steht. Projekte für die Errichtung von Oberleitungen sind nicht kostengünstig (siehe Tabelle auf der nächsten Seite oben), können aber bei intelligenter Auswahl der Strecken zusätzlich einen positiven Netzeffekt erzeugen und den Durchlauf elektrischer Fahrzeuge und damit neue Verkehrsströme ermöglichen. Elektrifizierte Streckenabschnitte dienen auch zum Laden von Batteriefahrzeugen während der Fahrt, um nachfolgende, nicht elektrifizierte Abschnitte elektrisch befahren zu können.



Kosten aktueller Elektrifizierungsprojekte bei Bahnen

Strecke	Kosten [Millionen Euro/Gleis-km]
Geltendorf – Lindau (D), 15 kV / 16,7 Hz	2,20 [33]
Ulm – Lindau (D), 15 kV / 16,7 Hz	1,42 [2]
Paris – Nogent-sur-Seine (F), 25 kV / 50 Hz	1,17 [20]
Einfache Elektrifizierung (UK), 25 kV / 50 Hz	0,9 – 1,2 [36]
Komplexe Elektrifizierung (UK), 25 kV / 50 Hz	1,8 (2,4 – 3,0) [36]

Das Elektrifizieren von Eisenbahnstrecken ist eine sehr nachhaltige Investition in eine ausgereifte Technologie für die emissionsarme Zukunft.

Ferner haben die Kosten zur Anschaffung und Instandhaltung der verschiedenen Antriebsarten einen Einfluss. Das Streufeld ist gross und bei den Wasserstoffzügen noch nicht in der Praxis verifiziert. Zumindest bei den Instandhaltungskosten schneiden Elektro- oder Batterietriebzüge sehr gut ab, Wasserstoffzüge dürften im Mittelfeld liegen, gefolgt von Dieseltriebzügen mit schlechter Bewertung [29]. Damit ist für die Fahrzeugbetreiber die Elektrifizierung die lohnendste Alternative.

CO₂-Emissionen im Kontext

Beim Einsatz von Wasserstoffzügen geht es primär darum, die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor zu senken. Dieser ist in Europa für zirka 30 % der gesamten CO₂-Emissionen verantwortlich und teilt sich auf die einzelnen Verkehrsträger gemäss der Abbildung unten auf. Daran hat die Eisenbahn einen Anteil von zirka 0,5 %, dies im Gegensatz zum Strassenverkehr mit mehr als 70 %. Eine mit grossen Anstrengungen und hohen Kosten verbundene Emissionsreduktion bei der Eisenbahn ohne folgende wesentliche Verkehrsverlagerung auf die Schiene hat damit de facto keine erkennbare Auswirkung auf die CO₂-Emissionen des Transportsektors.

Physik, Politik und Psychologie

Aus technischer Sicht hat der Wasserstoffzug zurzeit und auch in naher Zukunft keine wesentlichen Vorteile gegenüber Dieseltriebwagen. Der vorherrschende graue Wasserstoff hat einen recht grossen CO₂-Fussabdruck; der Wirkungsgrad zur Erzeugung von grünem Wasserstoff ist ebenso unbefriedigend wie die energetische Umsetzung auf dem Fahrzeug.

Das Thema ist komplex und bedarf einer ganzheitlichen Betrachtung vieler Einflussgrössen, um einen Entscheid zum gewinnbringenden Betrieb von Wasserstoffzügen zu fällen (siehe zum Beispiel [23, 34]). Darunter fällt zum Beispiel der Einsatz um Frankfurt (Main) ab Ende 2022, da lokal weisser Wasserstoff als Abfallprodukt der chemischen Industrie vorhanden ist und verwendet wird [38].

Für die Politik ist jeder Wasserstoffzug ein Segen; er bietet die Möglichkeit, plakativ Werbung für eine umweltfreundliche Bahn zu machen und das Engagement der Politik für den Umweltschutz darzustellen. Es gibt zwar wirksamere und kostenneutralere Methoden zur forcierten Emissionsreduktion im Verkehrswesen als Wasserstoffzüge, aber schärfere Regularien bezüglich der Emissionen zum Beispiel im Strassenverkehr sind äusserst unbeliebt bei der Stimmbewölkerung [3] und den Fahrzeugherstellern. Darum bietet sich ein Loben und Fördern von grünen Technologien zur Imagepflege an, statt das Einschränken oder Verteuern bestehender Emissionen gegen persönliche und industrielle Widerstände, zumindest solange genügend Geld in den Fördertöpfen und Energie in ausreichender Menge vorhanden ist. Der vermehrte Wunsch nach Wasserstoff- statt Dieseltriebzügen ist deshalb eher politisch-psychologisch begründet. Nach den Regeln der Physik verspricht er keine Vorteile bei der Energieeffizienz und keinen nennenswerten Effekt bei der CO₂-Emissionsreduktion im Verkehrssektor. Das steigende Interesse an diesen Zügen in den Medien und der Politik dürfte wohl eher auf einen Hype zurückzuführen sein. Bei Betrachtung des Hype-Zyklus (siehe Abbildung rechts oben) und den allgemein gehaltenen Definitionen der Zyklen befinden sich Wasserstoffzüge zwischen den ersten zwei Phasen: Der technologische Auslöser bringt die Dinge ins Rollen; frühe Proof-of-Concept-Stories und Medieninteresse lösen eine grosse Öffentlichkeitswirkung aus.

Oft gibt es keine brauchbaren Produkte, und die kommerzielle Lebensfähigkeit ist nicht bewiesen. Auf dem Weg zum Gipfel der überzogenen Erwartungen bringt die frühe Öffentlichkeitsarbeit eine Reihe von Erfolgsgeschichten hervor – oft begleitet von einer Vielzahl von Misserfolgen [25]. Mit einem anschliessenden Abstieg in das Tal der Ernüchterung muss gerechnet werden.

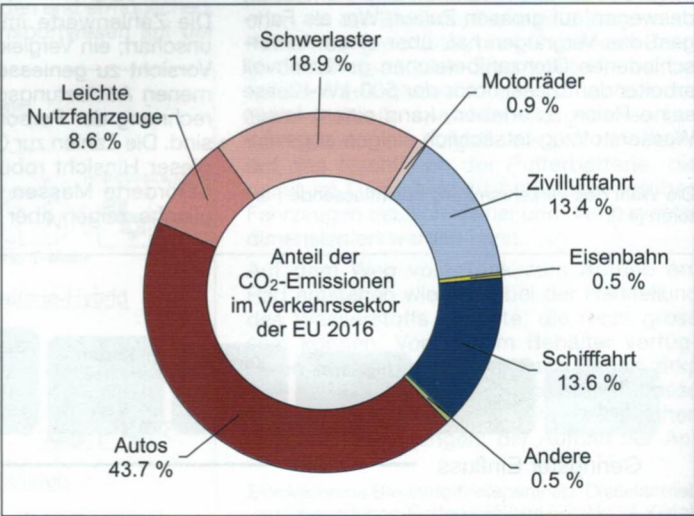
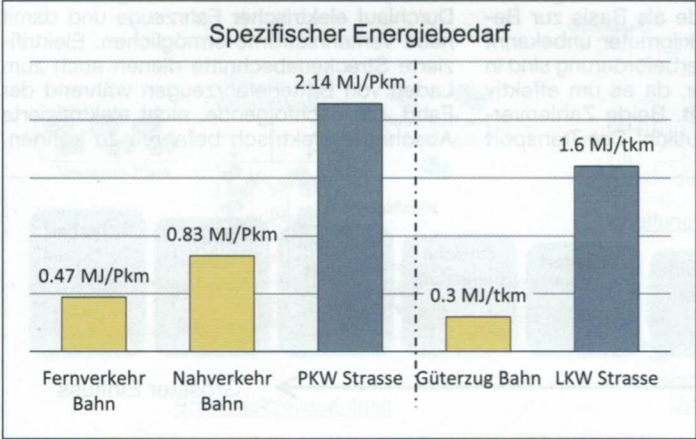
Unabhängig davon ist es in der Allgemeinheit weitgehend akzeptiert, dass der Strassengüterverkehr fast ausschliesslich auf fossilen Kraftstoffen basiert und die Automobilisten vermehrt Gefallen an immer schwereren und damit ineffizienteren Fahrzeugen finden [22], während dieselgetriebenen Schienenfahrzeugen der Ruf schamloser Umweltverschmutzer anhaftet. Eine mit der kognitiven Dissonanz psychologisch gut erklärbare Verhaltensweise, bei der die Welt so zurechtgerückt wird, wie es einem gerade passt.

Ausblick

Die Bahn bietet gegenüber dem Strassenverkehr die einmalige Möglichkeit, bereits heutzutage auf einem grossen Netz elektrische Energie über die Oberleitung direkt auf die Fahrzeuge zu bringen und diese dank niedrigem Rollwiderstand mit geringsten Verlusten in eine Transportleistung umzusetzen. Damit wird aus knappen Energieressourcen das Maximum an Leistung herausgeholt. Der bescheidene Wirkungsgrad von Wasserstoff bei der Produktion und Umsetzung auf einem Fahrzeug kann dem Wunsch nach effizientem Energieeinsatz nicht entsprechen, und solange grauer Wasserstoff verwendet wird, bietet er auch aus Sicht der Emissionen keine Vorteile gegenüber Dieselantrieben.

Wasserstoffzüge sollten deshalb Insellösungen bleiben, wenn der Einsatz gesamtheitlich betrachtet einen Gewinn auf allen Ebenen bringt, aber nicht als Prestigeprojekte dienen. Allenfalls können sie als Brückentechnologie bis zur Elektrifizierung längerer Streckenabschnitte angesehen werden. Dabei kann die diskontinuierliche, also nur abschnittsweise Elektrifizierung von Strecken, den Einsatz effizienterer batterieelektrischer Züge [29, 39] bei gegenüber der Vollektrifizierung geringeren Investitionskosten in vielen Fällen sehr vorteilhaft ermöglichen. Sie kann auch einen nachhaltigen Teilschritt zu einem elektrifizierten Netzwerk bilden [7], dessen Aufbau aufgrund des politischen Willens, der notwendigen Planungs- und Genehmigungsprozesse sowie der Baukapazität auf einzelnen Ab-

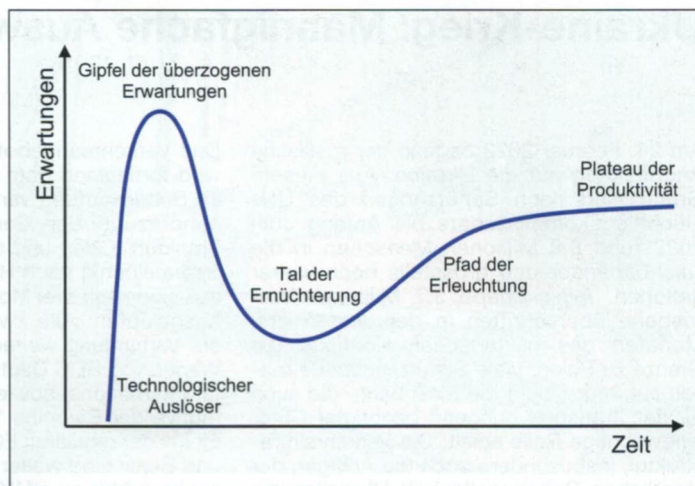
Rechts: Prozentuale CO₂-Emissionen des Verkehrssektors in der EU 2016 [6].
Unten: Spezifischer Energiebedarf verschiedener Transportarten [15].



Energie und Leistung

Um eine Arbeit im physikalischen Sinn zu verrichten, ist Energie notwendig. Energie verschiedener Formen kann mit der gleichen Einheit quantifiziert werden, im heute üblichen SI-Einheitensystem steht dafür das Joule (J). Wird Energie in einer gewissen Zeit umgesetzt, so ergibt sich daraus eine Leistung über der Zeit. Die Grundeinheit für die Leistung ist Watt (W), oft erfolgt die Angabe von Zahlenwerten in Kilowatt (kW) oder Megawatt (MW). Elektrische Energie wird gerne in Kilowattstunden (kWh) ausgedrückt, chemische Energie in Megajoule (MJ). Für die direkte Umrechnung zwischen beiden Größen über die SI-Einheiten gilt: 1 MJ = 0,278 kWh beziehungsweise 1 kWh = 3,6 MJ.

Hype-Zyklus nach Gartner [25].



schnitten Jahre bis Jahrzehnte in Anspruch nehmen kann [31, 39].

Geht es um die gesamtheitliche Reduktion der CO₂-Emissionen im Verkehrswesen, so gibt es deutlich wirksamere Methoden als den Ersatz von Dieseltriebzügen durch Wasserstoffzüge. Der in der Abbildung unten links aufgeführte spezifische Energiebedarf zeigt klar, in welche Richtung es gehen muss. Die Verlagerung von Strassenverkehr auf die Schiene bietet weit mehr Klimaschutzpotential als der Einsatz von Wasserstoffzügen, zumal grüner Wasserstoff ein edles Gut ist und an anderen Orten alternativlos zur Reduktion von CO₂-Emissionen verwendet werden muss. Die Eisenbahn kann helfen, die CO₂-Emissionen des Transportsektors durch eine Verlagerung der Verkehrsströme auf die Schiene weiter zu senken sowie Waren und Personen weitaus energiesparender als auf der Strasse zu befördern, wobei eine Elektrifizierung den Energiepareffekt deutlich verstärkt.

Welcher Transportsektor letztendlich auf Basis von Wasserstoff seine bisherigen CO₂-Emissionen signifikant reduziert, ist nicht entschieden und Gegenstand vieler Untersuchungen. Sicher ist aber, dass es nicht der Eisenbahnsektor sein wird, sondern eher die Bereiche Luftfahrt, Seeverkehr und Strassengütertransport [1]. Der Eisenbahnsektor hingegen muss versuchen, neue und bekannte Technologien schnellstmöglich, aber auch unter Berücksichtigung der Gesamtkosten des Systems zu implementieren und seine Transportleistung so günstig, umweltschonend und energieeffizient wie möglich mit der in Zukunft geforderten Kapazität anzubieten [43]. Nach dem aktuellen Stand der Technik können diese Forderungen Wasserstoffzüge nur in sehr wenigen Ausnahmesituationen erfüllen. Die Elektrifizierung von Bahnstrecken bietet hier das Optimum und lässt die etwas abhanden gekommene Tugend des Energieparens durch Effizienz neu aufleben.

Literatur

- [1] Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr. Berlin, 2019.
- [2] Aufgeleitet: Ulm – Friedrichshafen – Lindau-Aeschach. Deutschlandtakt, 2021. <https://www.deutschlandtakt.de/blog/aufgeleitet-ulm-friedrichshafen-lindau-aeschach/>. Abgerufen 6. März 2022.
- [3] KFZ-Steuer Kanton Bern. Berner Zeitung, Bern, 2022.
- [4] Regierungsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2016 – 2026. 2016.
- [5] Verkehr in Zahlen 2019/2020. Flensburg, 2019.
- [6] CO₂-Emissionen von Autos: Zahlen und Fakten, 2019. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190313STO31218/CO2-emissionen-von-autos-zahlen-und-fakten-infografik>. Abgerufen 6. März 2022.
- [7] Culemann, C.-R. et al.: Emissionsfreie Mobilität. Berlin, 2021.
- [8] Deutsche Bahn und Siemens starten ins Wasserstoff-Zeitalter. Siemens, 2020. <https://press.siemens.com/global/de/feature/deutsche-bahn-and-siemens-enter-hydrogen-age>.
- [9] Dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Deutsche Energie-Agentur GmbH (Dena), Köln, 2021.
- [10] Einsatzgebiete für Power Fuels – Stahlproduktion. Berlin, 2018.
- [11] Energiespeicher der Elektromobilität. 2020.
- [12] Ruhwedel, S.: Die Farben des Wasserstoffs. H2 News. <https://h2-news.eu/energieversorgung/die-farben-des-wasserstoffs/>. Abgerufen 6. März 2022.
- [13] DIHK: Wasserstoff. Berlin und Brüssel, 2020.
- [14] Dormann, L.; Sann-Ferro, K.; Heining, P. Mähliß, J.: Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Frankfurt am Main, 2021.
- [15] Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs. Umweltbundesamt. 2021. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs%20spezifischer-energieverbrauch-sinkt>. Abgerufen 6. März 2022.
- [16] Roll-out für ersten Mireo-Wasserstoffzug. ERI 6/2022, S. 298–299.
- [17] Wasserstoffzug im Schwarzwald ausgebremst. ERI 2/2022, S. 60.
- [18] Erneuerbare Energien in Zahlen. Umweltbundesamt, 2021. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen%20ueberblick>. Abgerufen 6. März 2022.
- [19] Extending the Reach of the Hydrogen Value Chain. Linde, 2021. https://www.linde-engineering.com/en/images/LE_LH2_Technologies_Brochure_RZ_VIEW_51906_tcm19-646805.pdf. Abgerufen 6. März 2022.
- [20] Frankreich: Start der Elektrifizierung Paris – Troyes. Lok-Report, 2019. <https://www.lok-report.de/news/europa/item/9629-frankreich-start-der-elektrifizierung-paris-troyes.html>. Abgerufen 6. März 2022.
- [21] Alternative Kraftstoffe im Schienenverkehr. ERI 4/2021, S. 192–198.
- [22] Helmers, E.: Die Modellentwicklung in der deutschen Autoindustrie: Gewicht contra Effizienz. Trier, 2015.
- [23] Herwartz, S.; Pagenkopf, S.; Streuling, C.: Sector coupling potential of wind-based hydrogen production and fuel cell train operation in regional rail transport in Berlin and Brandenburg. Elsevier Ltd, 2021.
- [24] Hoffrichter, A.; Miller, A. R.; Hillmans, S.; Roberts, C.: Well-to-wheel analysis for electric, diesel and hydrogen traction for railways. Elsevier Ltd, 2012.
- [25] Hype Cycle. <https://www.gartner.de/de/methoden/hype-cycle>.
- [26] Ihme, J.: Schienenfahrzeugtechnik. Wiesbaden, 2016.
- [27] JEC Well-to-Tank report v5, Luxembourg, 2020.
- [28] Juhrich, K.: CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. Dessau-Rosslau, 2016.
- [29] Klebsch, W.; Heining, P., and Martin, J.: Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV. Frankfurt am Main, 2019.
- [30] Kruse, M.; Wedemeier, J.: Potenzial grüner Wasserstoff: langer Weg der Entwicklung, kurze Zeit bis zur Umsetzung. Wirtschaftsdienst, S. 26 – 32, 2021.
- [31] Miller, J.: München-Lindau unter Strom. Verlag Hans Högel KG, 2021.
- [32] Wasserstoff-Aktionsplan Deutschland 2021 – 2025. 2021.
- [33] Noch schneller zwischen München und Zürich. DB Netze, 2021. <https://www.abs48.com/>. Abgerufen 6. März 2022.
- [34] Pfaff, R.; Nolte, R.; Vetter, M.: Innovatives Triebfahrzeug – Abschlussbericht. Köln, 2020.
- [35] Pioneering hydrogen mobility for rail. Alstom. <https://www.alstom.com/pioneering-hydrogen-mobility-rail>.
- [36] RIA Electrification Cost Challenge. London, 2019.
- [37] Renewable energy (indicator). OECD, 2022. <https://data.oecd.org/energy/renewable-energy.htm>. Abgerufen 6. März 2022.
- [38] RMV-Tochter fahma bestellt grösste Brennstoffzellenzug-Flotte der Welt bei Alstom, 2019. <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2019/5/rmv-tochter-fahma-bestellt-groesste-brennstoffzellenzug-flotte-der-welt>. Abgerufen 6. März 2022.
- [39] Umstellung von SPNV-Linien auf lokal-emissionsfreie Triebzüge am Beispiel des Niederrhein-Münsterland-Netzes. ETR 5/2022, S. 18 – 25.
- [40] 224 Kilometer Batteriereichweite: Stadler stellt mit Flirt Akku Weltrekord für das Guinness Buch der Rekorde auf. Berlin, 2021.
- [41] The journey towards sustainable travel. London, 2021.
- [42] Wasserstoffherstellung. <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoffherstellung>. Abgerufen 6. März 2022.
- [43] Weigand, W.: Mobilität und Klimaschutz neu denken – das Potential der Bahn besser nutzen. Minirex, 2021.
- [44] Wissenswertes zu Grünem Wasserstoff, 2022. <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurz-meldungen/de/wissenswertes-zu-gruenem-wasserstoff.html>. Abgerufen 6. März 2022.