

Bachelorarbeit

Wasserstoffbetriebene Schienenfahrzeuge

**Analyse der Antriebstechnologie mit Wasserstoff hinsichtlich erforderlicher
Infrastrukturadaptionen, Wirkungsgrad und CO_2 -Ausstoß**

Lisa Kneidinger

e01526220@student.tuwien.ac.at

Matr.Nr. 01526220

Datum: 5. November 2019

Kurzfassung

In Hinblick auf den Klimaschutz und der Einhaltung der Klimaziele werden alternative Treibstoffe und Antriebsmethoden für Züge zu Diesel gesucht. Es wird Wasserstoff als möglicher Treibstoff für Schienenfahrzeuge untersucht. Die Grundlagen und Möglichkeiten zur Erzeugung von Wasserstoff auf Basis fossiler Rohstoffe und erneuerbarer Energien werden behandelt. Die Brennstoffzelle und der Wasserstoffverbrennungsmotor dienen zur Umwandlung, der in Wasserstoff gespeicherten Energie in Bewegungsenergie, ihre Funktionsweise wird erläutert. Die Möglichkeiten zur Speicherung und Transport des Wasserstoffs werden angeführt. Anhand von zwei Fallbeispielen wird die erforderliche Infrastruktur einer mit Wasserstoffzügen betriebenen Strecke und deren Umsetzung analysiert. Abschließend erfolgt eine Bewertung von Wasserstoff als Treibstoff und ein Vergleich mit Diesel anhand des Wirkungsgrads und der emittierten CO_2 -Abgase. Die Betrachtung erfolgt von der Primärenergiequelle bis zur Übertragung der Bewegungsenergie auf die Räder.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Wasserstoffherzeugung	4
2.1	Elektrolyse	5
2.2	Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen	6
2.2.1	Reformierung	7
2.2.2	Vergasung	7
2.3	Wasserstoff als Abfallprodukt der chemischen Industrie	8
2.4	Sonstige Verfahren	8
3	Energieumwandlung	8
3.1	Verbrennungsmotor	8
3.2	Brennstoffzelle	9
4	Speicherung	10
5	Transport	11
6	Infrastruktur	11
6.1	Zillertalbahn	12
6.2	Niedersachsen	13
6.3	Schlussfolgerungen zur erforderlichen Infrastruktur	14
7	Bewertung	15
7.1	Bewertung nach der Energieeffizienz	15
7.2	Bewertung nach dem CO_2 -Ausstoß	18
8	Fazit	19

1 Einleitung

Es gibt in Europa noch einen großen Anteil an nicht elektrifizierten Eisenbahnstrecken. In der EU sind rund 53% des Eisenbahnnetzes elektrifiziert.[8] In Österreich sind es 73% des Streckennetzes.[3] Der nicht elektrifizierte Teil des Netzes wird großteils mit Dieseltriebfahrzeugen betrieben. Der Betrieb von Triebfahrzeugen mit fossilen Treibstoffen bedingt die Emission von Treibhausgasen. In Bezug auf den Schutz des Klimas, geregelt im Klima- und Energiepaket 2020 der Europäischen Kommission, soll der Anteil an dieselbetriebenen Triebfahrzeugen reduziert werden. In dem Paket aus gesetzlich verbindlichen Rechtsvorschriften ist eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 20% festgelegt. Außerdem soll bis 2020 ein Anteil von 20% an erneuerbaren Energien erreicht und die Energieeffizienz um 20% verbessert werden. [5] Auch die Lärmemissionen, die Entstehung von Feinstaub und die in Zukunft mit großer Wahrscheinlichkeit weiter ansteigenden Preise für Diesel sind Gründe für eine Abwendung von dieselbetriebenen Eisenbahnfahrzeugen. [8]

Im Regelfall wird eine mit Dieselfahrzeugen betriebene Strecke elektrifiziert, um den CO_2 -Ausstoß zu reduzieren und somit einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Aufgrund verschiedener Faktoren kann aber die Elektrifizierung einer Strecke nicht sinnvoll bzw. auch gar nicht möglich sein. Letzteres kann der Fall sein, wenn die Auslastung einer Strecke zu gering ist, um sie wirtschaftlich zu elektrifizieren oder der benötigte Platz für eine Oberleitung fehlt. [20] [15] [3] Bei touristischer Nutzung einer Region kann aufgrund von ästhetischen Aspekten eine oberleitungsfreie Lösung bevorzugt werden. [22]

Die Möglichkeiten für einen umweltfreundlichen Betrieb ohne Oberleitung umfassen einerseits batteriebetriebene Fahrzeuge, andererseits wasserstoffbetriebene Fahrzeuge. Im Vergleich zu batteriebetriebenen Schienenfahrzeugen weisen wasserstoffbetriebene Fahrzeuge den Vorteil auf, dass sie eine größere Reichweite haben und mit kurzen Betankungszeiten viel schneller wieder betriebsbereit sind. [20]

An der Umsetzung von "Hydrail-Strecken" ¹ wird z. B. in Deutschland und Österreich bereits gearbeitet. In Niedersachsen findet seit September 2018 der Probebetrieb von zwei Wasserstoffzügen der Firma Alstom statt. In Hessen sollen bis Dezember 2022 vier Bahnlinien mit Wasserstoffzügen betrieben werden. [18] Auch die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg haben bereits Züge bei Alstom bestellt. [7] In Österreich sollen planmäßig bis Ende 2022 Wasserstoffzüge auf der Zillertalbahn in Betrieb genommen werden. [22] Dabei wird es sich um die erste wasserstoffbetriebene Schmalspurbahn handeln. [26]

Anhand dieser Fallbeispiele lassen sich unterschiedliche Aspekte ableiten, die bei der Umstellung von fossilen Treibstoffen auf Wasserstoff beachtet werden müssen. Die Unterschiede liegen in der Herstellung des Treibstoffs, aber auch in der erforderlichen Infrastruktur, um die Schienenfahrzeuge verlässlich und sicher versorgen zu können. Außerdem müssen Züge beschafft werden, die mit Wasserstoff als Treibstoff betrieben werden können.

Damit Wasserstoff in seiner Reinform als H_2 vorliegt und als Treibstoff für ein Fahrzeug genutzt werden kann, muss zunächst Energie in dessen Erzeugung investiert werden. Die Herstellung von Wasserstoff kann durch die Reformierung von kurzkettigen Kohlenwasserstoffen (Methan, Erdgas) erfolgen. Es können mit dieser Methode hohe Wirkungsgrade erzielt werden, allerdings wird dadurch auch CO_2 freigesetzt. Die Elektrolyse stellt eine umweltfreundlichere Methode zur Wasserstoffgewinnung dar, sofern der erforderliche Strom für die Elektrolyse von erneuerbaren Energien kommt. Bei der Verwendung von Strom aus Wasser-, Wind-, oder Solarenergie entstehen keine Emissionen. Weitere Varianten zur Herstellung von Wasserstoff sind die Vergasung von Biomasse, oder biologische und photochemische Prozesse mit Mikroorganismen. Wasserstoff fällt

¹Der Begriff Hydrail setzt sich aus hydrogen und rail zusammen und umfasst schienenbasierte Transporttechnologien, die mit Wasserstoff als Treibstoff betrieben werden. Der Begriff wird von der Appalachian State University folgendermaßen definiert: "1. a propulsion device that runs on rails and is fueled wholly or partly by hydrogen 2. a self-electrified propulsion device that uses hydrogen fuel and travels a fixed path" [27]

auch als Nebenprodukt der chemischen Industrie bei der Erzeugung von Chlor, bei der Benzinreformierung oder der Herstellung von Methanol an. In diesen Fällen kann das "Abfallprodukt" Wasserstoff als Treibstoff genutzt werden. [4]

Im Zuge der Umstellung auf Wasserstoff als Treibstoff sind auch Änderungen an der Infrastruktur erforderlich. Wasserstofftankstellen, mit anderen Anforderungen als Tankstellen für fossile Treibstoffe, müssen errichtet werden. Die Speicherung von Wasserstoff ist grundsätzlich flüssig in Kryospeichern oder gasförmig und unter Druck möglich. Bei geeigneter Materialwahl kommt es bei der gasförmigen Speicherung zu sehr geringen Verlusten. Wird der Wasserstoff flüssig gespeichert, kommt es trotz der vorhandenen Vakuumisolierung zur Verdampfung des Wasserstoffs und einem Druckaufbau im Behälter. Es muss daher aus Sicherheitsgründen ein Ablassventil installiert werden, wodurch es zu Verlusten kommt. Der Transport von Wasserstoff zur Tankstelle kann entweder in Druckgefäßen per LKW, Schiff oder Bahn bzw. bei großen Mengen per Pipeline erfolgen.[4] Es besteht auch die Möglichkeit, den Wasserstoff direkt vor Ort per Elektrolyse zu erzeugen, um so längere Transportwege zu umgehen. [22]

Die Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff für Schienenfahrzeuge im oberleitungsfreien Eisenbahnnetz ermöglicht die Abwendung von fossilen Treibstoffen. Allerdings ist die Umstellung auf Wasserstoff mit Investitionen in neue Fahrzeuge und Infrastruktur verbunden. Daher soll Wasserstoff als Treibstoff für Schienenfahrzeuge mit bisher genutzten fossilen Treibstoffen (v.a. Diesel) verglichen und bewertet werden. Die Bewertung und der Vergleich beschränken sich auf Anwendung von Wasserstoff als Treibstoff im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) in Europa. Zunächst werden die Grundlagen für Wasserstoff als Treibstoff eines Fahrzeugs erörtert. Im ersten Teil dieses Themenbereichs werden die unterschiedlichen Erzeugungsmethoden von Wasserstoff, zum Beispiel durch Reformierung von Kohlenwasserstoffen oder durch Elektrolyse von Wasser, untersucht. Im zweiten Teil wird die Umwandlung der in Wasserstoff gespeicherten Energie in Bewegungsenergie behandelt. Das kann entweder durch Verbrennung von Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor oder durch Umwandlung in elektrische Energie mithilfe einer Brennstoffzelle erfolgen. Der Energieumwandlungsprozess mithilfe der Brennstoffzelle wird anhand der PEM (Polymerelektrolytmembran)-Brennstoffzelle erläutert. Im dritten Teil der Grundlagenermittlung soll die erforderliche Infrastruktur für den Betrieb eines Schienenfahrzeuges mit Wasserstoff näher erläutert werden und anhand des Testbetriebs in Niedersachsen [1] bzw. der geplanten Umstellung der Zillertalbahn auf Wasserstoff als Treibstoff [22] analysiert werden.

Abschließend soll anhand der Wirkungsgrade von Wasserstoffherzeugung, Transport, Speicherung und Umwandlung in Bewegungsenergie ein Vergleich zwischen Diesel und Wasserstoff als Treibstoffe für Schienenfahrzeuge erstellt werden. Auf Basis dieses Vergleichs soll Wasserstoff als Treibstoff für Schienenfahrzeuge bewertet werden. Im Zuge der Bewertung wird der Fokus auf folgende Punkte gelegt: die Herstellung von Wasserstoff, die Speicherung an der Tankstelle, sowie der Verbrauch des Treibstoffs im Schienenfahrzeug. Zusätzlich wird auch der CO_2 Ausstoß von der Quelle bis zu der Energieübertragung auf die Räder analysiert.

2 Wasserstoffherzeugung

Wasserstoff gehört zu den am häufigsten vorkommenden Elementen des Universums. Da Wasserstoff sehr reaktionsfreudig ist, kommt er in den seltensten Fällen in seiner Reinform vor. Es muss daher Energie investiert werden, um aus den vorhandenen Verbindungen Wasserstoff zu erzeugen. [12] Die Energie, die investiert werden muss, um reinen Wasserstoff zu erhalten, kann über unterschiedliche Verfahren wiedergewonnen werden. Wasserstoff eignet sich daher gut zur Speicherung von Energie. Wasserstoff ist im Gegensatz zu Rohöl, Wasserkraft und Sonnenenergie ein Energieträger und keine Energiequelle. [4] Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, um den reinen Wasserstoff zu gewinnen. 4 bis 5% des Wasserstoffs werden global durch Elektrolyse, also der Spaltung von Wasser mithilfe elektrischer Energie, erzeugt. Die restliche Wasserstoffproduktion

basiert größtenteils auf fossilen Rohstoffen. [4][13] [19]. Wasserstoff kann in eigens dafür entwickelten Verfahren hergestellt werden oder auch als Nebenprodukt anfallen. Zum Beispiel entsteht in einer Raffinerie bei der Verarbeitung von Erdöl als Nebenprodukt Wasserstoff. [4]

Der folgenden Abbildung sind die Wirkungsgrade der unten angeführten Verfahren zu entnehmen. (siehe Abb. 1) Die höchsten Wirkungsgrade können durch die beiden Elektrolyseverfahren alkalische Elektrolyse und PEM-Elektrolyse (Polymerelektrolytmembranelektrolyse) bzw. Dampfreformierung erreicht werden.

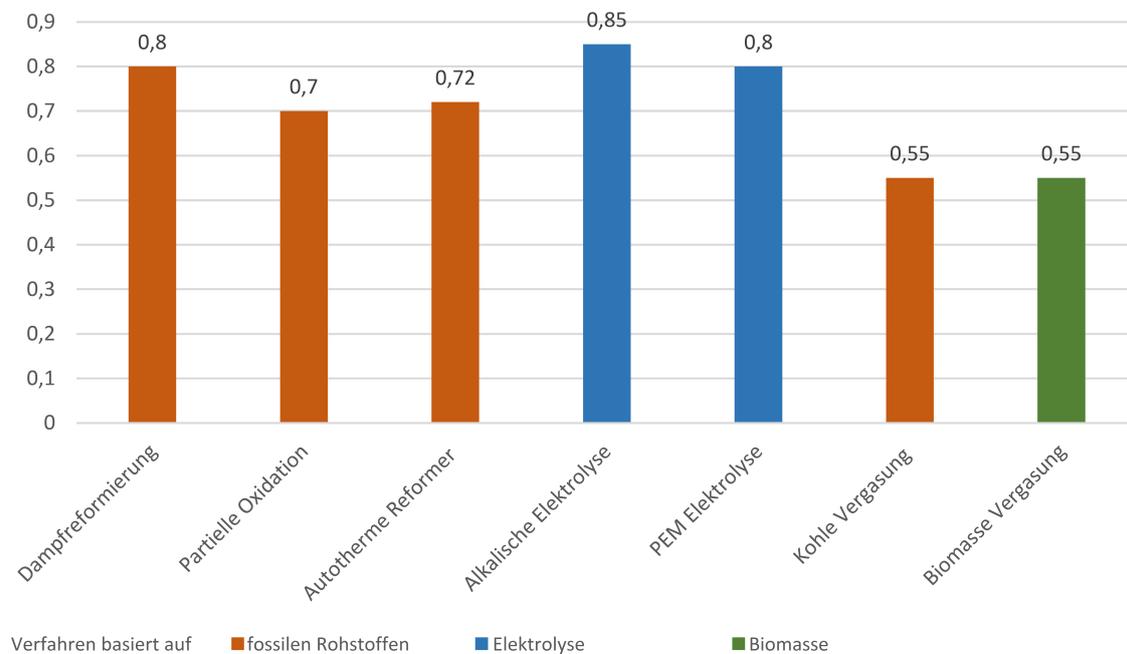
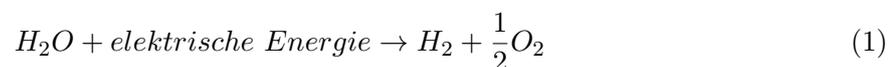


Abb. 1: Mögliche Wirkungsgrade in der Wasserstoffherzeugung (nach [4])

Die Verfahren, die zurzeit am häufigsten verwendet werden bzw. für eine emissionsfreie Wasserstoffherstellung wichtig sind, werden im folgenden Abschnitt erläutert. Für genauere Ausführungen wird auf vertiefende Literatur verwiesen. (z. B. [4], [21])

2.1 Elektrolyse

Bei der Elektrolyse wird mittels Zufuhr von elektrischer Energie Wasser in seine Bestandteile gespalten. Die zugeführte elektrische Energie wird in chemische Energie übergeführt. Zusätzlich zum gewünschten Wasserstoff wird bei der Elektrolyse auch Sauerstoff freigesetzt.



Der Bedarf an elektrischer Energie kann über die Temperatur gesteuert werden. Bei höheren Reaktionstemperaturen ist weniger elektrische Energie erforderlich. Allerdings steigt der Gesamtenergiebedarf (elektrische Energie + Wärmeenergie) durch die zusätzlich zugeführte Wärmeenergie an. [19] Im Folgenden wird die Funktionsweise eines Elektrolyseurs erläutert. Ein Elektrolyseur besteht aus einer Anode (Pluspol), einer Kathode (Minuspole) und einem Elektrolyt (Ionenleiter). Durch die Abgabe von Elektronen an der Kathode dissoziiert das Wasser in H^+ -Ionen (Protonen) und OH^- -Ionen (Hydroxid-Ionen). Das Proton verbindet sich mit einem Wassermolekül zu einem H_3O^+ Ion. An der Anode wird das überschüssige Elektron der OH^- -Anionen aufgenommen und die Anionen unter Freisetzung von Sauerstoff zu Wasser oxidiert. Der Ausgleich der Ladungen findet im Elektrolyt, in diesem Fall Wasser, statt.

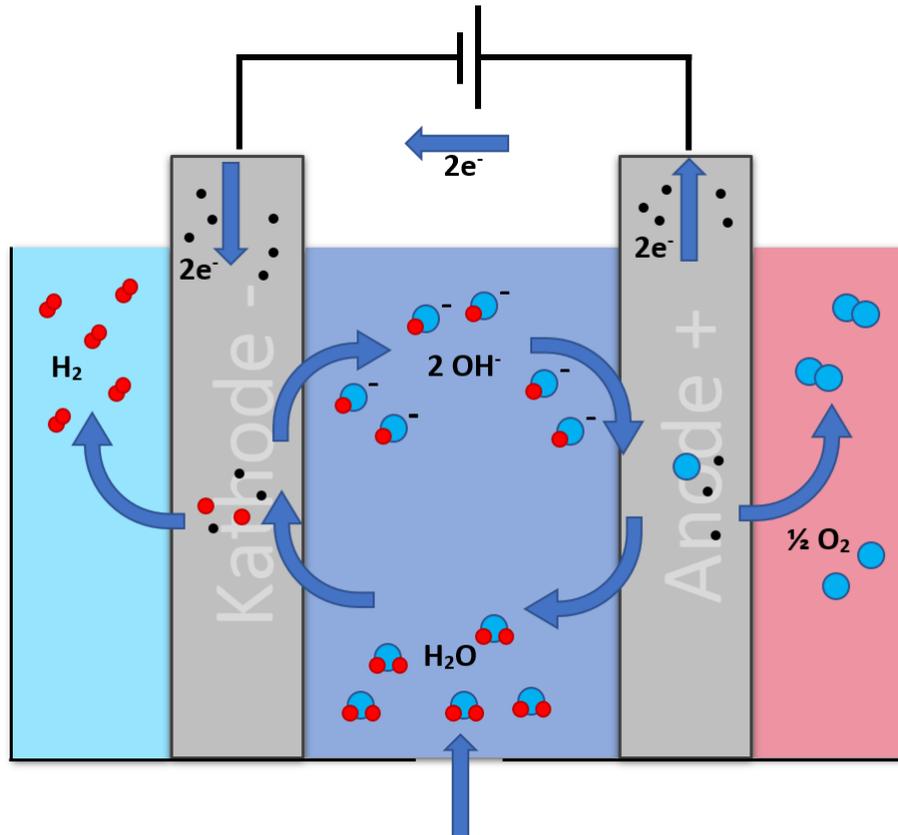


Abb. 2: Schema der Elektrolyse (nach [4])

Elektrolyseuren werden anhand des verwendeten Elektrolyts unterschieden. Bei der alkalischen Elektrolyse (AEL) werden basische Elektrolyte verwendet. Bei der AEL handelt es sich um die am häufigsten verwendete Elektrolysetechnologie. Für die Polymerelektrolytmembranelektrolyse (PEMEL) werden feste Polymerelektrolyte verwendet. Diese Elektrolyseart wird als saure Elektrolyse bezeichnet und eignet sich für kleinere Leistungsbereiche. Die Hochtemperaturolektrolyse ist durch die Verwendung eines Festoxids als Elektrolyt und höhere Betriebstemperaturen von $700-1000\text{ }^\circ C$ gekennzeichnet. Für diese Art gibt es allerdings noch keine kommerziell verwendeten Anlagen. [4]

Der Vorteil der Elektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff liegt darin, dass kein CO_2 emittiert wird. Zudem kann mithilfe der Elektrolyse überschüssige elektrische Energie während Schwachlastzeiten des Energiebedarfs in chemische Energie umgewandelt werden. Somit kann das Energiespeicherungspotential des Wasserstoffs genutzt werden.[22] In Abhängigkeit vom Wirkungsgrad des Elektrolyseurs kommt es nur zu geringen Energieverlusten. Die Wirkungsgrade liegen bei 80% (bezogen auf den Brennwert) und können im Idealfall sogar 85% erreichen (Siehe Abb. 1).

Ein weiterer Vorteil der Elektrolyse ist die hohe Reinheit des damit hergestellten Wasserstoffs. Es ist keine zusätzliche Reinigung erforderlich. [4]

2.2 Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen

Fossile Rohstoffe sind die meist verwendete Quelle zur Produktion von Wasserstoff. 95 bis 96 % der Produktion von Wasserstoff basieren auf unterschiedlichen fossilen Rohstoffen (Kohle, Erdöl und Erdgas). [4] [13] [19] Bei der Herstellung von Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen entsteht unvermeidbar CO_2 . Jährlich verursacht die globale Wasserstoffproduktion 830 Tonnen CO_2 . [11] Laut der International Energy Agency (IEA) könnten durch Auffangen und Speichern des anfallenden CO_2 die negativen Umwelteinflüsse der Wasserstoffproduktion basierend auf

fossilen Rohstoffen eingedämmt werden. Das anfallende CO_2 könnte in ehemaligen Erdgas- und Erdöllagerstätten gespeichert werden. [19]

Folgende Verfahren werden zur Erzeugung von Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen verwendet:

2.2.1 Reformierung

Unter dem Begriff Reformierung werden drei Prozesse zur Herstellung von Wasserstoff zusammengefasst, die Dampfreformierung, die partielle Oxidation und die autotherme Reformierung. [4][19]

Dampfreformierung: Bei der Dampfreformierung werden leichte Kohlenwasserstoffe, wie z. B. Methan, Flüssiggas und Naphta (Rohbenzin) mit Wasser zur Reaktion gebracht. Es entsteht ein Gemisch aus CO und H_2O , welches auch als Synthesegas bezeichnet wird. Um daraus Wasserstoff gewinnen zu können, wird das Kohlenmonoxid mit Wasserdampf unter Verwendung eines Katalysators zur Reaktion gebracht. Im Zuge dieser sogenannten Shift-Reaktion entstehen reiner Wasserstoff (H_2) und Kohlendioxid (CO_2) (siehe Glg. 2).



Der Wirkungsgrad einer Dampfreformierungsanlage liegt zwischen 75 % und 80 %. [4]

Partielle Oxidation: Bei der Partiellen Oxidation sind im Gegensatz zur Dampfreformierung schwere Kohlenwasserstoffe wie z. B. Altöle, schweres Heizöl oder Kohle die Ausgangsstoffe. Diese Ausgangsstoffe werden mit Sauerstoff zur Reaktion gebracht. In dieser Reaktion entstehen, analog zur Dampfreformierung, ein Synthesegas und zusätzlich CO_2 und Ruß. Der Wirkungsgrad liegt bei 70%. [4]

Autotherme Reformierung: Die Autotherme Reformierung kombiniert beide Verfahren und nutzt die jeweiligen Vorteile. Bei der Dampfreformierung handelt es sich um ein endothermes Verfahren, das heißt Energie muss zugeführt werden, damit die Reaktion abläuft. Bei der Partiellen Oxidation handelt es sich um ein exothermes Verfahren, es wird Energie im Reaktionsprozess freigesetzt. Ziel der Autothermen Reformierung ist, die beiden Parameter Wasserdampf- und Luftzufuhr so einzustellen, dass der Energiebedarf der Dampfreformierung durch die freiwerdende Energie der Partiellen Oxidation gedeckt wird. [4]

2.2.2 Vergasung

Bereits seit dem 17. Jahrhundert existiert das Prinzip der Vergasung. Genutzt werden zur Herstellung von Wasserstoff allerdings hauptsächlich die oben genannten Verfahren, da mit der Vergasung nur Wirkungsgrade von bis zu 50% in Abhängigkeit des jeweiligen Ausgangsstoffs erreicht werden können. Zusätzlich weist das entstehende "Produktgas" keine hohe Reinheit auf. Der Wasserstoffanteil kann maximal 50 % betragen und es ist eine aufwendige Reinigung erforderlich um die restlichen Bestandteile, wie Ruß, Asche, Teer und Öle zu entfernen. [4]

Das Grundprinzip der Vergasung funktioniert folgendermaßen:



Kohlenstoff und Wasser reagieren zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff. (siehe Glg. 3) Im Zuge einer Shiftreaktion reagiert das Kohlenmonoxid wieder zu Wasserstoff und Kohlendioxid (siehe Glg. 2). [19] Diese Reaktion läuft in einem Vergaser ab. [4]

2.3 Wasserstoff als Abfallprodukt der chemischen Industrie

Mit Hilfe der Chlor-Alkali-Analyse können Chlor und Natronlauge hergestellt werden. Beide sind wichtige Grundchemikalien der chemischen Industrie, z. B. für die Erzeugung von Salzsäure oder Kunststoffen. Als Nebenprodukt dieses Verfahrens entsteht Wasserstoff, der als Treibstoff genutzt werden kann. Auch bei der Benzinreformierung und Ethenproduktion² fällt Wasserstoff als Nebenprodukt an. [4]

2.4 Sonstige Verfahren

Abgesehen von den oben genannten Verfahren gibt es noch weitere Möglichkeiten, Wasserstoff zu erzeugen. Die Vergasung kann auch mit Biomasse (Holz, Stroh, Klärschlamm) als Rohstoff durchgeführt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die direkte Spaltung von Kohlenwasserstoffen bei hohen Temperaturen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass kein CO_2 freigesetzt wird. Nachteilig sind allerdings der hohe Energieverbrauch und der geringe Wasserstofftrag. [4]

Wasserstoff kann auch durch chemische Spaltung von Wasser erzeugt werden, indem ein Element (aus der 1., 2. bzw. 3. Hauptgruppe) zugesetzt wird, das sich mit dem Sauerstoff verbindet, wodurch der Wasserstoff freigesetzt wird. Nachteilig ist hier anzuführen, dass die Metalle erst mit großem Energie- bzw. Kostenaufwand gewonnen werden müssen. [4]

Bei biologischen Prozessen auf Basis von Photolyse oder Fermentation entsteht auch Wasserstoff. Bei der Photolyse können Bakterien oder Algen aus Sonnenlicht und Wasser Energie und Wasserstoff erzeugen. Bei der Fermentation ist organisches Material der Ausgangspunkt. Bakterien können in einem mikrobiellen Abbauprozess Wasserstoff erzeugen. [4]

3 Energieumwandlung

Um die im Wasserstoff gespeicherte Energie wieder nutzen zu können, muss ein Energieumwandlungsprozess stattfinden. Der Umwandlungsprozess kann einerseits durch die Verbrennung des Wasserstoffs und nachfolgender Nutzung der thermischen Energie erfolgen. Andererseits kann mithilfe einer Brennstoffzelle direkt elektrische Energie gewonnen werden. Beide Möglichkeiten zur Energieumwandlung werden nachfolgend beschrieben.

3.1 Verbrennungsmotor

Ein Wasserstoffverbrennungsmotor ähnelt einem konventionellen Verbrennungsmotor³ und ist eine Adaption hinsichtlich des Gemischbildungssystems (Wasserstoff + Luft) und des Brennverfahrens. Bei der Verbrennung von Wasserstoff entstehen ebenfalls keine CO_2 -Emissionen. Für die Herstellung von Wasserstoffverbrennungsmotoren kann auf die Erfahrung bei der Erzeugung von herkömmlichen Verbrennungsmotoren zurückgegriffen werden. Bereits bestehende Produktionsstätten für Verbrennungsmotoren wären auch für die Produktion von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren geeignet. Diese Aussagen beziehen sich allgemein auf den Wasserstoffverbrennungsmotor, der bisher nur in Bussen und PKWs verbaut wurde. Es gibt zurzeit kein Schienenfahrzeug, welches mit einem Wasserstoffverbrennungsmotor betrieben wird. Der Fokus in der Entwicklung von wasserstoffbetriebenen Schienenfahrzeugen liegt auf dem Antrieb mit Brennstoffzellen. [4] [8] Als Beispiel für ein Fahrzeug mit einem Wasserstoffverbrennungsmotor wird ein Wasserstoffbus von MAN angeführt. Der Bus hat im Idealfall einen Wirkungsgrad von 42%. [4]

²Ethen wird zur Herstellung von Schädlingsbekämpfungsmitteln oder zur Herstellung von Kunststoffen wie PVC und Polystyrol verwendet. [4]

³fremdgezündeter Verbrennungsmotor

3.2 Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler. Darunter versteht man, dass bei Zufuhr eines Brennstoffs eine Redox-Reaktion⁴ abläuft, bei der elektrische Energie freigesetzt wird. Mögliche Brennstoffe sind Wasserstoff, Methanol oder Erdgas. Der Wasserstoff ist der einzige emissionsfreie Brennstoff.

Analog zum Elektrolyseur werden die unterschiedlichen Brennstoffzellen anhand des verwendeten Elektrolyts, aber auch anhand der Betriebstemperatur unterschieden. Bei einer Betriebstemperatur bis zu 600°C handelt es sich um eine Niedertemperaturzelle, bei einer Betriebstemperatur über 600°C um eine Hochtemperaturzelle. Die Unterscheidung nach Elektrolyt ergibt folgende Arten von Brennstoffzellen⁵:

- Alkalische Brennstoffzelle
- Polymerkelektrolytmembran - Brennstoffzelle (PEMFC bzw. PEMBZ)
- Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)
- Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)
- Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)

Da das Antriebsmodul des Coradia iLint von Alstom, das von Hydrogenics hergestellt wird, aus einer PEMFC besteht, soll das Funktionsprinzip anhand dieser Art von Brennstoffzelle erklärt werden. [10].

Die Polymerelektrolytmembran - Brennstoffzelle wird mit Wasserstoff und Sauerstoff betrieben. Als Elektrolyt wird ein nicht korrosives Polymer verwendet.



Die Brennstoffzelle wird über den Strömungskanal mit Wasserstoff versorgt. Der Wasserstoff diffundiert als H_2 durch die Gasdiffusionsschicht zu der Anode. An der Anode befindet sich ein Katalysator, durch den der Wasserstoff oxidiert wird. Durch die Oxidation gibt der Wasserstoff zwei Elektronen ab und es bleiben zwei Wasserstoff-Protonen übrig (siehe Glg. 4). Der Elektrolyt, in diesem Fall die stark saure Membran, ist nur für die Wasserstoffprotonen durchlässig. Die Wasserstoffprotonen diffundieren über die Membran zu Kathode. Aufgrund des elektrischen Potentialunterschieds fließen die Elektronen von der Anode über den äußeren Stromkreis zur Kathode. Es entsteht dadurch elektrischer Strom.



An der Kathode reagiert der Wasserstoff mit dem Sauerstoff, der über einen zweiten Strömungskanal zugeführt wird. Als Reaktionsprodukt entsteht Wasser, welches über die Gasdiffusionsschicht diffundiert und über den Strömungskanal von der Zelle abgeleitet wird (siehe Glg. 5). [4]

Ein wesentlicher Vorteil der Brennstoffzelle gegenüber dem Verbrennungsmotor ist, dass die Umwandlung direkt von der chemischen zur elektrischen Energie erfolgt und der Umweg über die thermische Energie ausgelassen wird. Bei dem in Abbildung 3 dargestellten Schema handelt es sich um die Funktionsweise einer Einzelzelle. Werden mehrere Brennstoffzellen bzw. Membranen gekoppelt kann die Leistung gesteigert werden.[9]

Der thermodynamische Wirkungsgrad einer mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzelle liegt zwischen $\eta_{th} = 83\%$ für flüssigen Wasserstoff und $\eta_{th} = 94,5\%$ für gasförmigen Wasserstoff. Bei

⁴chemische Reaktion mit Elektronenübergabe [29]

⁵Für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Brennstoffzellen wird auf vertiefende Literatur verwiesen: z. B. [4]

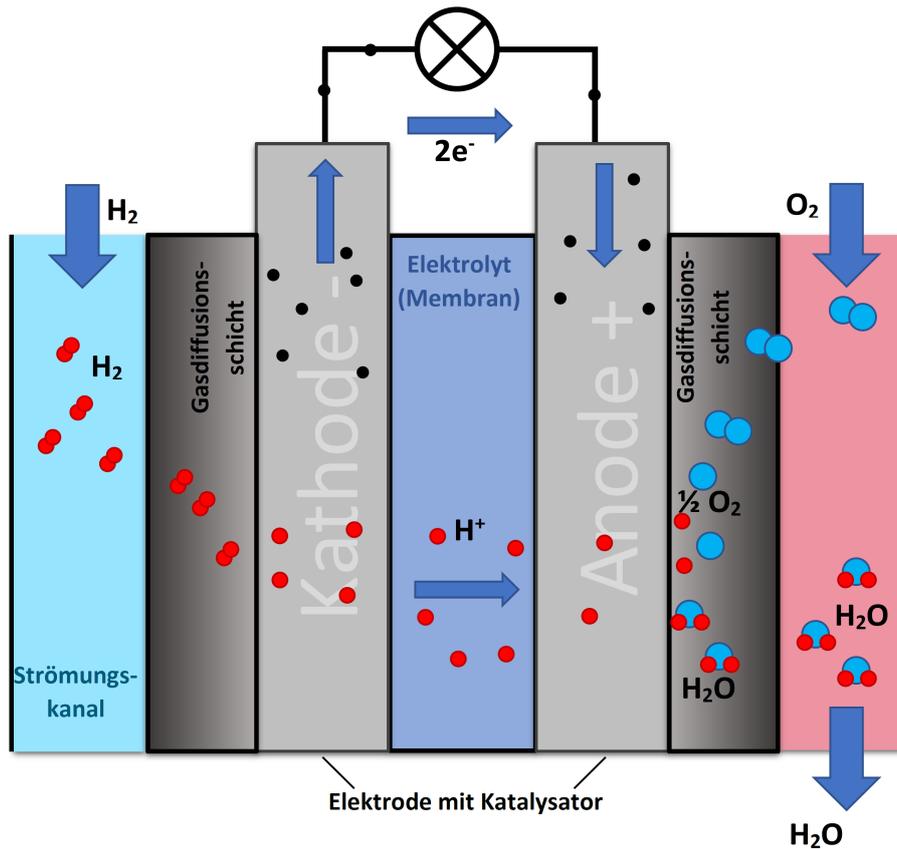


Abb. 3: Funktionsprinzip einer Polymerenlektrolytmembran - Brennstoffzelle (PEMFC) (nach [4])

diesen Wirkungsgradangaben handelt es sich allerdings um theoretische Berechnungen. In der Realität liegt der Wirkungsgrad eines Systems von Brennstoffzellen bei $\eta = 60\%$. Es treten in der Realität Verluste in Form von Abwärme auf, außerdem verschlechtert sich der Wirkungsgrad bei der Kopplung von Einzelzellen zu einem System. [4]

4 Speicherung

Wasserstoff wird nicht unbedingt an der Verbraucherstelle produziert oder sofort zum Zeitpunkt der Erzeugung wieder verbraucht. Der Wasserstoff muss daher für unterschiedlich lange Zeiträume gespeichert werden können. Sei es für den Transport zur Belieferung einer Tankstelle mit einem Hochdruck- Wasserstoff-Trailer-LKW, bei der Speicherung in der Tankstelle selbst oder im Tank eines Zuges. Problematisch bei der Speicherung von Wasserstoff ist, dass er eine sehr geringe Dichte aufweist, bzw. eine sehr geringe volumenbezogene Energiedichte. Das Bestreben ist daher, die Dichte zu erhöhen, um die Speichervolumina zu verringern. [4]

Bei gasförmiger Speicherung wird der Wasserstoff komprimiert und in Druckbehältern bei 250 bis 300 bar bzw. 700 bar gespeichert. Bei flüssiger Speicherung wird der Wasserstoff abgekühlt und in Kryobehältern gespeichert. Außerdem gibt es die Möglichkeit einer Speicherung in chemischen oder physikalischen Verbindungen. Diese Art der Speicherung befindet sich allerdings erst im Entwicklungsstadium und wird zurzeit erforscht. [4]

Für beide, gasförmige und flüssige Speicherung, ist Energie erforderlich, um den Wunschzustand zu erreichen. Der Energieaufwand für die Verdichtung auf 700 bar und einer Energiedichte von $1,3kWh/dm^3 = 1,3kWh/l$ beträgt 15% des Heizwerts. Für die Verflüssigung ist ein Energieaufwand von 20 bis 30% des Heizwerts erforderlich. Die Energiedichte liegt allerdings bei

2, $3kWh/dm^3$ und ist somit höher als bei gasförmiger Speicherung. [4] Die Energie, die dem Erreichen des Speicherzustands dient, sollte auch bei der Ermittlung des Wirkungsgrads berücksichtigt werden.

Bei gasförmiger Speicherung kommt es bei geeigneter Materialwahl quasi zu keinen Verlusten. Die Materialwahl sollte so erfolgen, dass die Diffusion von Wasserstoff verhindert wird. Dafür eignen sich austenitische Stähle bzw. Legierungen z. B. mit Aluminium. Das Gewicht eines Gastanks pro kg gespeichertem Wasserstoff liegt bei 20 bis 40 kg. Die ideale Tankform wäre eine Kugel, aber aufgrund der einfacheren Produktion werden meist zylinderförmige Tanks produziert. Die Befüllung eines Tanks bzw. der Betankungsvorgang des Fahrzeugs erfolgt über ein Druckgefälle. Für eine Speicherung bei 750 bar muss der Wasserstoff zuvor auf 900 bar komprimiert werden. [4]

Ein Tank zur Speicherung von flüssigem Wasserstoff besteht eigentlich aus zwei Tanks und einer isolierenden Vakuumschicht dazwischen. Selbst bei guter Isolierung ist ein gewisser Wärmeeintrag unvermeidbar. Es kommt zum Verdampfen des flüssigen Wasserstoffs und der Druck im Behälter steigt an. Aus Sicherheitsgründen ist daher ein Ventil im Tank eingebaut, das eine Abfuhr des Wasserstoffs bei Erreichen des maximalen Drucks garantiert. Durch das Ventil kommt es täglich zu Verlusten zwischen 0,3 und 3%. Um die Verluste zu begrenzen, sollte das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen möglichst gering sein. Aus selbigen Gründen wie bei der gasförmigen Speicherung und der großen freien Oberfläche, wenn der Tank nicht voll befüllt ist, werden meist Zylindertanks hergestellt. Die Entnahme des Wasserstoffs erfolgt durch beabsichtigte Zufuhr von Wärme, der Wasserstoff verdampft und wird über das Druckgefälle entnommen. [4] Nachteilig an der flüssigen Speicherung ist, dass auch Leitungen und Entnahmevorrichtungen aufwendig isoliert ausgeführt werden müssen. [4]

Die Speicherung als komprimiertes Gas wird der flüssigen Speicherform gegenüber bevorzugt. Es gibt europaweit nur drei Anlagen, die flüssigen Wasserstoff produzieren, da es sich um sehr komplexe Anlagen handelt und der Energieaufwand größer ist als bei gasförmiger Speicherung. Zudem kommt es bei gasförmiger Speicherung zu geringeren Verlusten. [4]

Für längerfristige Speicherung von Wasserstoff, z. B. als Energiedepot, werden unterirdische geologische Hohlräume in Erwägung gezogen. Aber auch die Speicherung von Wasserstoff im bestehenden Pipelinesystem für Erdgas ist eine Möglichkeit. Die Kapazität zur Speicherung von Wasserstoff ist allerdings begrenzt, da der Wasserstoffanteil im Erdgasnetz limitiert ist. In Österreich dürfen maximal 4% Wasserstoff, bezogen auf das vorhandene Volumen in der Pipeline, enthalten sein. [4] [11]

5 Transport

Nach Möglichkeit soll ein Transport von Wasserstoff vermieden werden. Von Vorteil ist eine Produktionsstätte möglichst nahe an der Verbraucherstelle, da ansonsten die Kosten für den Transport die Kosten für die Herstellung um ein Vielfaches übersteigen können. Die hohen Kosten für den Transport resultieren daraus, dass der Transport in Druckgefäßen erfolgt und der Wasserstoff dafür unter Energieaufwand komprimiert werden muss (siehe Kapitel 4). [11] Ist ein Transport dennoch erforderlich, kann der Transport der Druckgefäße per LKW, Bahn oder Schiff erfolgen. Bei einem ausreichend großen Wasserstoffbedarf und einer begrenzten Länge kann sich eine Pipeline als sinnvolle Lösung erweisen. [4]

6 Infrastruktur

Anhand der unten angeführten Fallbeispiele sollen die erforderliche Infrastruktur und notwendige Adaptationen bei der Umstellung auf Wasserstoffzüge aufgezeigt werden. Die Zillertalbahn zwischen Mayrhofen und Jenbach in Tirol, Österreich und die Nebenstrecke in Niedersachsen, Deutsch-

land zwischen Cuxhaven, Bremervörde, Bremerhaven und Buxtehude wurden als Fallbeispiele ausgewählt.

6.1 Zillertalbahn

Bei der Zillertalbahn handelt es sich um eine Schmalspurbahn (Spurweite 760mm) von Mayrhofen bis nach Jenbach im Zillertal in Tirol. Die Strecke wird zurzeit mit zum Teil 35 Jahre alten Dieselfahrzeugen betrieben und ist 31,74km lang. Der Großteil der Strecke ist einspurig, 8km sind zweispurig. Im Jahr 2015 gab es Überlegungen zur Elektrifizierung der Strecke. Die Möglichkeit der Elektrifizierung wurde aber, nach Bedenken aus Tourismuskreisen, nicht weiter verfolgt. [22] Der Plan ist, dass die Strecke bis 2022 auf wasserstoffbetriebene Züge (Brennstoffzellenantrieb) der Firma Stadler umgestellt wird. [14] Bei Stadler Rail handelt es sich um den einzigen Anbieter für dieses Projekt, der nach der Vorauswahl übrigblieb, nachdem ein chinesischer Anbieter wegen Qualitätsmängel ausschied. [14]

Es wurden sechs Garnituren bei der Firma Stadler Rail in Auftrag gegeben. Zudem besteht die Möglichkeit zum Abruf von zwei weiteren Garnituren.[26]. Fünf Garnituren sind erforderlich, um 66 Fahrten am Tag bewältigen zu können. Die Anzahl der Fahrten ergibt sich daraus, dass die Züge im Halbstundentakt von 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr verkehren.[22]

Der Tank eines Zuges fasst 150 kg H_2 . Für einen Betriebstag wäre mit diesem Tankinhalt ein Verbrauch von 0,3 kg H_2 pro km möglich, der durchschnittliche Verbrauch liegt darunter und beträgt 0,25 kg H_2 pro km. Es sind daher keine Tankvorgänge während der Betriebszeit erforderlich. [22]

Der Zug von Stadler wird mit vier Brennstoffzellen mit einer Leistung von 100 kW betrieben. Bei der Brennstoffzelle handelt es sich um die in Kapitel 3.2 beschriebene Polymerelektrolytmembranbrennstoffzelle (PEMFC). Der Wirkungsgrad der Brennstoffzellen liegt bei ca. 50%. Für die Beschleunigungsphasen reicht die Energie der Brennstoffzellen nicht aus. Die zusätzliche Energie wird aus Pufferakkus im Fahrzeugunterboden gewonnen. In den Akkus wird ein Großteil der Bremsenergie, die durch Rekuperation rückgewonnen wird, gespeichert. Bezogen auf einen ähnlichen Zug, der mit Gleichstrom aus der Oberleitung versorgt werden würde, sind für den Antrieb und die Speicher 1% mehr Raumbedarf notwendig und 5% mehr Masse zu berücksichtigen. [22]

Die Versorgung mit Wasserstoff wird vor Ort mittels zwei Elektrolyseuren am Bahnhof in Mayrhofen durchgeführt. Zwei Elektrolyseure sind vorgesehen, um eine gewisse Ausfallsicherheit zu ermöglichen. Die erforderliche elektrische Energie kommt von den vorhandenen Wasserkraftwerken im Zillertal. Zu den Schwachlastzeiten in der Nacht wird der Strom zu günstigen Konditionen bezogen und der Wasserstoff erzeugt. Beide Elektrolyseure werden mit je 1,5 MW versorgt und produzieren jeweils rund 700 kg H_2 pro Tag. Der Wasserstoff wird gasförmig in einer sogenannten Hydrogen Refuelling Station (HRS) in Mayrhofen bzw. Jenbach gespeichert. In Mayrhofen wird der Wasserstoff über eine kurze Pipeline zur HRS befördert. Die zweite HRS ist in Jenbach geplant. Deren Versorgung soll über Hochdruck-Wasserstoff-Trailer-LKWs bzw. Waggons erfolgen. Die Betankung soll am Morgen in Mayrhofen durchgeführt werden und wie oben bereits erwähnt für einen gesamten Betriebstag ausreichen. Da durch den Pendlerverkehr aus dem Tal die Züge am Morgen in Mayrhofen benötigt werden, wird die Hauptinfrastruktur in Mayrhofen gebaut. Die HRS in Jenbach ist für eventuelle Streckenunterbrechungen oder -sperrungen als Sicherheit eingeplant. Für eine weitere Ebene der Versorgungssicherheit sind LKWs vorgesehen, die beide HRS im Notfall versorgen sollen. [22]

Für den Betrieb der Elektrolyseure wurden drei Varianten analysiert. Die erste Variante sieht die Eigenherstellung des Wasserstoffs durch den Betreiber der Zillertalbahn, die Zillertaler Verkehrsbetriebe, vor. Der Strom wird direkt von der Strombörse entnommen. Aufgrund einer gesetzlichen Regelung entfallen die Netzpreise für Elektrolyseure und Pumpspeicherkraftwerke und es sind sehr günstige Strompreise möglich.

Die zweite Variante beinhaltet einen externen Betreiber, der zusätzlich zur Wasserstoffherstellung für die Verkehrsbetriebe auch die Anlagen zur Netzregulierung nutzen soll. Der Strom wird direkt von den Laufwasserkraftwerken bezogen oder bei Bedarf zugekauft.

Die dritte Variante ist eine Kooperation mit einem großen Elektrizitätsversorgungsunternehmen. Die Elektrolyse - Anlage soll in einen großen Kraftwerkspark integriert werden und auch zusätzlich zur Netzregulierung genutzt werden. Weiters könnte der überschüssige Wasserstoff für LKWs, Busse und PKWs, der Sauerstoff für Kläranlagen und die Abwärme zur Beheizung genutzt werden. [22]

Für die Wasserstoffversorgung wurde schließlich eine Kooperation mit VERBUND abgeschlossen. Der Wasserstoff wird in Mayrhofen produziert und der Zillertaler Verkehrsbetriebe AG übergeben. [23]

6.2 Niedersachsen

In Niedersachsen fahren bereits die ersten Wasserstoffzüge. Auf der 100km langen Regionalbahnlinie (RB33) Cuxhaven-Bremerhaven-Bremervörde-Buxtehude werden die ersten beiden Prototypen des Coradia iLint von Alstom getestet. [16] Der Probetrieb findet seit 17. September 2018 statt. Die Entscheidung für Wasserstoff als Treibstoff in der Zukunft wurde von der LNVG (Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen) bereits im Jahr 2014 getroffen, als eine Absichtserklärung über den Kauf des Wasserstoffzugs mit drei anderen deutschen Bundesländern (Hessen, Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen) unterzeichnet wurde. [1]

Bei der Strecke handelt es sich um eine eingleisige Nebenbahn. Die Züge verkehren im Stundentakt in Einfach- oder Doppeltraktion. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 80 km/h, der mittlere Haltestellenabstand 10km. Zurzeit wird die Bahnstrecke von der Eisenbahnen und Verkehrsbetriebe Elbe-Weser GmbH (evb) noch mit Dieseltriebzügen vom Typ Lint 41 betrieben. Nach dem Probetrieb soll bis 2020/21, wie vertraglich festgelegt, die Flotte auf 14 Züge ausgebaut werden. Die Dieseltriebzüge sollen als Backup-Lösung in der Einführungsphase noch zur Verfügung stehen. [16]

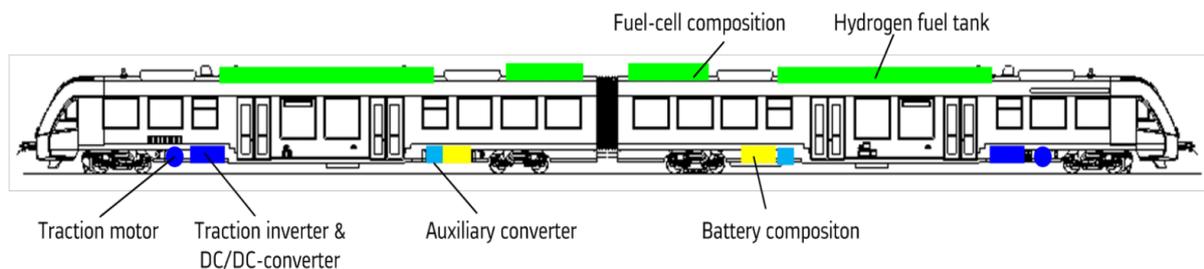


Abb. 4: Coradia iLint von Alstom (Grafik: [1])

Die elektrische Energie für den Antrieb wird über Brennstoffzellen am Dach des Coradia iLint erzeugt (siehe Abb. 4). [1] Bei den Brennstoffzellen handelt es sich um die bereits oben erwähnten PEMFC des kanadischen Herstellers Hydrogenics. [9] Der Treibstoff kommt aus zwei Tanks, die sich am Dach des Coradia iLint befinden. 130 kg Wasserstoff können bei einem Druck von 350 bar je Tank gespeichert werden. [16] Die Antriebsenergie in der Beschleunigungsphase wird von der Brennstoffzelle bereitgestellt. Unterstützend dazu kommt elektrische Energie aus den Lithium-Ionen-Batterien. Die Batterien werden in Phasen niedriger Beschleunigung oder beim Ausrollen von der Brennstoffzelle geladen. Die beim Bremsvorgang durch Rekuperation gewonnene Energie wird auch in der Batterie gespeichert. Mit Hilfe der Batterie, die ermöglicht, die Energie zu speichern und dann einzusetzen, wenn sie gebraucht wird, soll ein besseres Management des Wasserstoffverbrauchs erreicht werden. [1]

Der Wasserstoffzug ist am bereits existierenden Dieseltriebwagen Lint 54 angelehnt, um ein beschleunigtes Zulassungsverfahren zu ermöglichen. Es wurden keine Veränderungen am Führerstand, der Kupplung, der Innenausstattung und den Drehgestellen vorgenommen. Lediglich der Wagenkasten wurde für die neue Lage des Antriebs modifiziert. [16] Der Testbetrieb von zwei Prototypen wurde am 17. September 2018 gestartet, nachdem die eisenbahnrechtliche Zulassung vom Eisenbahn - Bundesamt (EBA) am 11. Juli 2018 erfolgt war. Die rasche Zulassung war möglich, weil die EBA in allen Schritten der Zugentwicklung seit 2012 involviert war. [2] Ab 2021/22 sollen dann die restlichen 12 Züge der LNVG in Betrieb genommen werden. [1]

Alstom bietet seinen Kunden ein Paket an, welches aus dem Zug selbst, der Instandhaltung für 30 Jahre und einer Wasserstoffinfrastruktur besteht. [2] Die Wasserstoffinfrastruktur wird im konkreten Fall zunächst von Linde bereitgestellt. Die Tankstelle ist in Bremervörde situiert. Dieser Standort wurde ausgewählt, da er sich in der Mitte der Strecke befindet und die meisten Zugfahrten in Bremervörde beginnen oder enden. Beim Wasserstoff handelt es sich um Bestandswasserstoff aus der chemischen Industrie oder Produktwasserstoff durch Dampfreformierung. Der Wasserstoff wird per Hochdruck- Wasserstoff-Trailer-LKW bei einem Druck von rund 300 bar geliefert. Der Tagesbedarf an Wasserstoff beträgt 1600 kg. Ab dem zweiten Betriebsjahr soll aber auf dem Gelände in Bremervörde ein Elektrolyseur, betrieben mit Strom aus Windkraft, errichtet werden. Es soll mit 30% sogenannten "grünem Wasserstoff" gestartet werden. Der Anteil soll kontinuierlich gesteigert werden. Als Rückfallebene kann immer noch Wasserstoff per Hochdruck-Wasserstoff-Trailer-LKWs angeliefert werden. Eine Analyse der CO_2 -Emissionen folgt in Kapitel 7.2.

Die Speicherung des Wasserstoffs auf der Tankstelle erfolgt mit Mitteldruckspeichern mit einer Kapazität von 1800 kg. Der Wasserstoff wird mit Trailer-LKWs mit einem Druck von 300 bar geliefert, auf 500 bar komprimiert und über das Druckgefälle in den Mitteldruckspeicher gefüllt. An der Wasserstofftankstelle gibt es zwei Zapfsäulen (Dispenser). Es können pro Stunde zwei Fahrzeuge betankt und abgefertigt werden. Vor dem Tankvorgang muss der Wasserstoff erneut komprimiert werden, um die Druckgefällebefüllung zu ermöglichen. Die reine Tankzeit beträgt 15 Minuten. [16] Im vollgetankten Zustand hat der Zug eine Reichweite von 1000 km. Die Maximalgeschwindigkeit beträgt 140 km/h. Ähnlich wie beim geplanten Zug für die Zillertalbahn beträgt der Verbrauch 0,26kg Wasserstoff pro km. [16]

In dem von Alstom angebotenen Paket ist auch die Instandhaltung der Züge enthalten. Die Wartung und Instandhaltung werden von Alstom im Betriebshof in Bremervörde durchgeführt. Der Standort in Bremervörde wird daher adaptiert und etwa um eine Wasserstoffdetektion ergänzt. [2]

6.3 Schlussfolgerungen zur erforderlichen Infrastruktur

Anhand der beiden Beispiele sieht man, dass abgesehen von der Errichtung einer HRS und ggf. einer Elektrolyseanlage nur geringfügige bauliche Adaptionen erforderlich sind. Der kostenintensive Bau einer Oberleitung entfällt komplett. Zwingend erforderlich ist der Bau einer stationären Wasserstofftankstelle bzw. Hydrogen Refuelling Station (HRS). Im Zillertal besteht die neue Infrastruktur aus dem Bau einer HRS und einer Elektrolyseanlage in Mayrhofen und einer zusätzlichen HRS in Jenbach. [22] In Niedersachsen wurde zunächst eine HRS in Bremervörde von Linde installiert, die mit LKW-Tankwagen versorgt wird. In einer späteren Projektphase wird zusätzlich eine Elektrolyseanlage gebaut werden. Die in Bremervörde situierte Werkstatt, die für die Wartung und Instandhaltung des Zuges genutzt wird, wird den Erfordernissen entsprechend adaptiert. [16]

7 Bewertung

Die Bewertung von Wasserstoff wird durch einen Vergleich der Energieeffizienz und der CO_2 -Emissionen von Diesel und Wasserstoff als Treibstoff durchgeführt. Die Energieeffizienz wird anhand des Wirkungsgrads der Prozesse von der Primärenergiequelle bis zum Antrieb des Rads betrachtet (Well-to-Wheel). Analog dazu wird auch der Betrachtungszeitraum für das ausgestoßene CO_2 festgelegt. [8]

7.1 Bewertung nach der Energieeffizienz

Der Ausgangspunkt der Bewertung ist das Rohöl, das Erdgas oder die erneuerbare Energie (Solarenergie, Wasserkraft und Windenergie). Am Ausgangspunkt sind 100% der Energie vorhanden. Die Effizienzen der Teilprozesse werden multipliziert, um zu einer Gesamteffizienz bzw. zu einem Gesamtwirkungsgrad zu gelangen.

Zunächst werden die Wirkungsgrade "Well-to-tank" von Diesel, Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen und Wasserstoff aus erneuerbaren Energien mittels Elektrolyse betrachtet.

Diesel	Rohstoff/ Quelle	Gewinnung & Transport	Raffiniere (Rohöl → Diesel)	Speicherung & Transport
Wirkungsgrad	-	96%	90%	99,5%
vorhandene Energie ⁶	100%	96%	86,4%	85,5%

Tab. 1: Wirkungsgrad und vorhandene Energie Quelle bis zum Tank: Diesel [4][8]

Bevor Diesel aus Rohöl erzeugt werden kann, müssen zuerst die Rohstoffe gewonnen und zu einer Raffinerie transportiert werden. Hoffrichter gibt für diese Prozesse bei Rohöl eine Effizienz von 96% an. Wie in Tabelle 1 angeführt, wird in der Raffinerie aus dem Rohöl, mit einer Effizienz von 90% Diesel, erzeugt. Da der Treibstoff häufig nicht an der Verbraucherstelle erzeugt wird müssen auch Energieverluste im Zuge des Transports berücksichtigt werden. Hoffrichter setzt für Speicherung und Transport eine Effizienz von 99,5% an. [8] Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich, wie in Tabelle 1 ersichtlich, zu 85,5%.

Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen	Rohstoff/ Quelle	Gewinnung & Transport	Reformierung	Speicherung & Transport
gasförmige Speicherung				
Wirkungsgrad	-	95%	70-80% ⁷	85-86% ⁸
vorhandene Energie	100%	95%	66,5%	57,1%
flüssige Speicherung				
Wirkungsgrad	-	95%	70-80%	70 %
vorhandene Energie	100%	95%	66,5%	46,6%

Tab. 2: Wirkungsgrad und vorhandene Energie von der Quelle bis zum Tank: Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen (gasförmige und flüssige Speicherung) [4][8]

Analog zur Erzeugung von Diesel aus Rohöl müssen auch für die Gewinnung und den Transport von Erdgas Energieverluste berücksichtigt werden. Die Effizienz dieser Prozesse liegt bei 95% und

⁶vorhandene Energie nach dem jeweiligen Prozess

⁷Die Berechnung wurde mit einem Reformierungs-Wirkungsgrad von $\eta = 70,0\%$ durchgeführt

⁸Die Berechnung für gasförmige Speicherung wird für alle nachfolgenden Berechnungen mit $\eta = 85\%$ durchgeführt

ist in Tabelle 2 ersichtlich. [8] Aus den fossilen Rohstoffen wird mittels Reformierung, bei einem Wirkungsgrad von 70 bis 80% in Abhängigkeit vom jeweiligen Verfahren (Dampfreformierung, Partielle Oxidation und Autotherme Reformierung), Wasserstoff erzeugt. [4] Hoffrichter nimmt einen Wirkungsgrad von 71,5% für die Reformierung an und unterscheidet keine unterschiedlichen Reformierungsvarianten. [8]

Der Wasserstoff wird, wie auch der Diesel, nicht an der Verbraucherstelle produziert bzw. nicht sofort nach Erzeugung verbraucht. Daher sind Speicherung und Transport zur Verbraucherstelle erforderlich. Der Energieaufwand für die Speicherung und den Transport von Wasserstoff ist deutlich höher als der für Diesel. Es wird zwischen gasförmiger und flüssiger Speicherung unterschieden. Für gasförmige Speicherung liegt die Effizienz bei 86% [8] bzw. 85% [4], für flüssige Speicherung liegt der Wirkungsgrad zwischen 70 und 80%. [4] Hoffrichter nimmt einen Wert von 71% an. [8] Der Gesamtwirkungsgrad von Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen liegt bei 46,6 % für gasförmige Speicherung und bei 57,1 % für flüssige Speicherung. Die Berechnungsschritte sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Wasserstoff aus erneuerbaren Energien	Rohstoff/ Quelle	Produktion & elektrische Energie	Elektrolyse	Speicherung & Transport
Strom aus Windenergie				
Wirkungsgrad vorhandene Energie	- 100%	40-50% ⁹ 40%	50-85% ¹⁰ 32%	85-86% 27,5%
Strom aus Wasserkraft				
Wirkungsgrad vorhandene Energie	- 100%	86% 86%	50-85% 68,8%	85-86% 59,9%

Tab. 3: Wirkungsgrad und vorhandene Energie von der Quelle bis zum Tank: Wasserstoff aus erneuerbaren Energien (gasförmige Speicherung) [4][8][24][28]

Für erneuerbare Energien ist laut Hoffrichter die Effizienz bis zur Stromerzeugung mit 100% anzunehmen, da vor der Stromerzeugung keinerlei Transporte und Aufbereitungsprozesse erforderlich sind. [8] Wird der Wasserstoff durch Elektrolyse erzeugt, muss zunächst elektrische Energie zur Verfügung stehen, um den Elektrolyseur betreiben zu können. Im Zillertal soll der Elektrolyseur mit Energie aus Wasserkraft betrieben werden. Der Wirkungsgrad von Strom aus Wasserkraft liegt unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der Turbine und des Generators bei ca. 86%¹¹. [24]

Auch in Niedersachsen ist in Teilschritten die Umstellung auf Elektrolyse geplant. Dort soll der Elektrolyseur zukünftig mit Windenergie betrieben werden. Der Wirkungsgrad einer Windkraftanlage ist nicht konstant und abhängig von der Windgeschwindigkeit. [28] Im Idealfall liegt der Wert zwischen 40 und 50%. [28] [17] Für die Berechnung in Tabelle 3 wurde ein Wirkungsgrad von $\eta = 40\%$ angenommen.

Es handelt sich bei den angegebenen Wirkungsgraden nicht um konkrete Angaben der beiden Fallbeispiele, sondern um Werte aus der Literatur. Für elektrischen Strom, bezogen aus dem Stromnetz wurde kein Wirkungsgrad ermittelt.

Der Wirkungsgrad von Elektrolyseuren, die mit elektrischer Energie betrieben werden, liegt zwischen 50 und 80% bzw. sogar 85% im Fall von Großanlagen mittels alkalischer Elektrolyse. Der Wirkungsgrad ist abhängig von der Leistungsgröße der Anlage. [4] Hoffrichter verwendet in seinen Berechnungen einen Wirkungsgrad $\eta = 71,5\%$. [8] Die Berechnung in Tabelle 3 wurde

⁹Der Windkraftanlagen-Wirkungsgrad wird in der Berechnung mit $\eta = 40\%$ angenommen

¹⁰Die Berechnung wurde mit einem Elektrolyse-Wirkungsgrad von $\eta = 80\%$ durchgeführt

¹¹Der Wirkungsgrad der Turbine wurde mit $\eta_T = 0,90$ angenommen und ist abhängig vom Durchfluss [24]

mit einem Elektrolyse-Wirkungsgrad $\eta = 80\%$ durchgeführt. Die Speicherung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien erfolgt analog zur Speicherung von Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen. Die Berechnung der Wirkungsgrade für erneuerbare Energien wird nur für gasförmige Speicherung beispielhaft durchgeführt (siehe Tabelle 3). Für gasförmige Speicherung ergibt sich für Wasserstoff aus Windenergie ein Wirkungsgrad von 27,5% und für Wasserstoff aus Wasserkraft ein Wirkungsgrad von 59,9%. Für flüssige Speicherung des Wasserstoffs ergeben sich folgende Ergebnisse: Für Wasserstoff aus Windenergie erhält man einen Wirkungsgrad von 22,4%, für Wasserstoff aus Wasserkraft einen Wirkungsgrad von 48,2%. Für Wasserstoff, der als Nebenprodukt der chemischen Industrie anfällt, wurde kein Wirkungsgrad ermittelt, da sich abhängig vom jeweiligen Verfahren unterschiedliche Werte ergeben.

Diesel	Wasserstoff			
	Reformierung		Elektrolyse	
	Erdgas		Windenergie	Wasserenergie
flüssig	gasförmig	flüssig	gasförmig	gasförmig
85,5%	57,1%	46,6%	27,5%	59,9%

Tab. 4: Wirkungsgrade Well-to-tank [8][6]

In Tabelle 4 sind die Wirkungsgrade der Wasserstoffherzeugung bis zum Tank zusammengefasst. In der Literatur sind in Abhängigkeit von der Abgrenzung der Prozesse unterschiedliche Werte zu finden. So gibt z. B. Hoffrichter den Gesamtwirkungsgrad für Diesel mit 85,5% an.[8] In einer Schweizer Studie der ESU-services GmbH wird für Diesel von einem Wirkungsgrad von 82 % ausgegangen. [6] Es ist generell schwierig, allgemein gültige Aussagen über den Wirkungsgrad "Well to tank" zu treffen, da viele Faktoren den Wirkungsgrad der Teilprozesse beeinflussen. Zum Beispiel wird der Wirkungsgrad einer Windkraftanlage stark von der vorhandenen Windgeschwindigkeit beeinflusst. [28] Daher können unterschiedliche Annahmen für die Wirkungsgrade zu stark schwankenden Endergebnissen des Gesamtwirkungsgrads führen.

Da für beide Hersteller, Alstom und Stadler Rail, kein Wirkungsgrad des jeweiligen Schienenfahrzeugs ermittelt werden konnte, werden die beiden konkreten Züge im Vergleich der unterschiedlichen Antriebsarten nicht berücksichtigt. Es wird auf die Ergebnisse aus Hoffrichters Dissertation [8] zurückgegriffen. Hoffrichter vergleicht in seiner Dissertation "Hydrogen as an energy carrier for railway traction" den Wirkungsgrad einer dieselektrischen Lokomotive, einer fiktiven Wasserstoffverbrennungsmotor-Lokomotive ¹² und einer Brennstoffzellenlokomotive. Unter der Berücksichtigung der zwischengeschalteten Prozesse gelangt er zu folgenden Wirkungsgraden (tank-to-wheel):

Antriebsart	Wirkungsgrad
Diselelektrische Lokomotive	30%
Wasserstoffverbrennungsmotor - Lokomotive	30%
Brennstoffzellen Lokomotive ¹³	42%

Tab. 5: Wirkungsgrade Tank-to-Wheel [8]

¹²Ersatz des herkömmlichen Verbrennungsmotors durch einen Wasserstoffverbrennungsmotor in einer dieselektrischen Lokomotive

¹³Der für die Berechnung angegebene Wirkungsgrad ($\eta = 49\%$) des Brennstoffzellenzugs stimmt mit den Angaben von Stadler Rail ($\eta=50\%$) in etwa überein. [22]

Diesel	Wasserstoff			
	Reformierung		Elektrolyse	
	Erdgas		Windenergie	Wasserenergie
flüssig 25,7%	gasförmig 23,9%	flüssig 19,6%	gasförmig 11,6%	gasförmig 25,6%

Tab. 6: Wirkungsgrade Well-to-wheel

In Tabelle 6 ist der gesamte Wirkungsgrad von der Quelle bis zum Antrieb der Räder für die unterschiedlichen Antriebsmöglichkeiten und Treibstoffe zusammengefasst. Für Wasserstoff wurde die Berechnung nur für den Brennstoffzellenantrieb durchgeführt, da der Wasserstoffverbrennungsmotor im Eisenbahnwesen keine Anwendung findet und außerdem auch einen geringeren Wirkungsgrad als der Brennstoffzellenantrieb aufweist. Anhand der Wirkungsgrade von Gewinnung, Transport und Speicherung ist zu erkennen, dass Diesel gegenüber Wasserstoff klar die besseren Wirkungsgrade hat. Nur bei der Energieumwandlung des Treibstoffs in Bewegungsenergie hat ein Zug mit Brennstoffzellenantrieb einen besseren Wirkungsgrad als ein Diesel-Verbrennungsmotor. Trotzdem ergeben sich bei Betrieb mit Diesel in Summe die geringsten Energieverluste.

7.2 Bewertung nach dem CO_2 -Ausstoß

Der zweite Teil der Bewertung wird anhand der Kohlendioxidemissionen durchgeführt. Zum Vergleich des CO_2 -Ausstoßes der unterschiedlichen Antriebsmöglichkeiten werden die Untersuchungen von Hoffrichter [8] und Nawrocki [16] verwendet. Nawrockis Untersuchungen beziehen sich auf den Testbetrieb des Coradia iLints in Niedersachsen. Es wird die Menge an CO_2 in Gramm angegeben, die für 1 kWh erforderliche Energie an den Rädern entsteht. [8]

Fahrzeug		CO_2 -Intensitäten [g CO_2/kWh]	CO_2 -Ausstoß je Fz-km [g CO_2/km]
Dieselizeug	Diesel inkl. Vorkette	305	4068
Coradia iLint	H_2 -Ergasreformierung	261	2610
	H_2 -Elektrolyse (Strommix derzeit)	903	9031
	H_2 -Elektrolyse (Strommix 2030)	270	2698
	H_2 -Elektrolyse Windenergie	35	35

Tab. 7: Vergleich der CO_2 -Emissionen [16]

Antriebsart	Gesamt CO_2 -Ausstoß [g CO_2/kWh]
Diesel	1020
gasförmiger Wasserstoff (Rohstoff: Erdgas), Brennstoffzelle	828
gasförmiger Wasserstoff (Rohstoff: Erdgas), Verbrennungsmotor	1158
flüssiger Wasserstoff (Rohstoff: Erdgas), Brennstoffzelle	1014
flüssiger Wasserstoff (Rohstoff: Erdgas), Verbrennungsmotor	1419
Wasserstoff aus erneuerbaren Energien	0

Tab. 8: Vergleich gesamter CO_2 -Ausstoß [8]

Die höheren CO_2 -Emissionen beim Wasserstoff-Verbrennungsmotor verglichen mit dem Brennstoffzellenantrieb ergeben sich durch den geringeren Wirkungsgrad des Motors. [8]

Der Unterschied in den CO_2 -Mengen nach Nawrocki [16] in Tabelle 7 und Hoffrichter [8] in Tabelle 8 könnte aufgrund folgender Punkte entstanden sein: Hoffrichter berücksichtigt kein regeneratives Bremsen. Seine Berechnungen basieren auf Werten aus dem Jahr 2008 und teilweise auf Literatur vor dem Jahr 2008. Es könnte mittlerweile eine Verbesserung der Wirkungsgrade der einzelnen Prozesse eingetreten sein. Weiters basieren Hoffrichters Ausgangswerte auf UK¹⁴-spezifischen Daten. Hoffrichter selbst weist in seiner Dissertation darauf hin, dass die Ausgangsdaten aus unterschiedlichen Jahren stammen und die Berechnung unter der Annahme der Gültigkeit der Daten durchgeführt wurden. [8]

Trotz der Unterschiede in Tabellen 7 und 8 ist zu erkennen, dass Wasserstoff aus erneuerbaren Energien die einzige Lösung zum emissionsfreien Betrieb von Zügen mit Wasserstoff ist. Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen in flüssiger Form übersteigt sogar den CO_2 -Ausstoß eines dieselbetriebenen Zuges. Bei der Betrachtung von Elektrolyse ohne Vorprozesse zur Erzeugung der Energie handelt es sich scheinbar um ein emissionsfreies Verfahren. Wie in Tabelle 7 ersichtlich, schneidet aber die Elektrolyse mit Strom aus dem heutigen Strommix auch schlechter ab, als ein Zug, der mit Diesel betrieben wird. Das liegt daran, dass in Deutschland große Teile der Stromerzeugung auf fossilen Rohstoffen basieren. [25] Die umweltfreundlichste Methode ist daher Elektrolyse, betrieben mit Strom aus erneuerbaren Energien. Diese Variante wird im Zillertal umgesetzt werden und auch in Niedersachsen soll der Umstieg schrittweise auf den Betrieb eines Elektrolyseurs mittels Windenergie erfolgen.

In Bezug auf die Einhaltung der Klimaziele und die Reduktion der CO_2 -Emissionen hat die Wasserstofftechnologie klare Vorteile. Ein Wasserstoffzug emittiert im Betrieb an der Verbrauchsstelle nur Wasserdampf und keine Treibhausgase. Wird dieser Wasserstoff auch durch Elektrolyse mit erneuerbaren Energien erzeugt, handelt es sich um die einzige emissionsfreie Variante.

8 Fazit

Wasserstoff als Treibstoff für Schienenfahrzeuge ist nicht grundsätzlich eine umweltfreundlichere Variante als Diesel. Während des Betriebs des Schienenfahrzeugs wird nur Wasserdampf emittiert, der Zug ist an der Verbrauchsstelle emissionsfrei. Allerdings dürfen all jene Prozesse, die zur Erzeugung des Treibstoffs erforderlich sind, nicht vernachlässigt werden. Daher wurde Wasserstoff als Treibstoff in Bezug auf Effizienz und CO_2 -Ausstoß bewertet.

Es zeigt sich, dass von der Primärenergiequelle bis in den Tank eines Schienenfahrzeugs bei Wasserstoff größere Energieverluste auftreten als bei Diesel. Die Prozesse zur Erzeugung von Wasserstoff, sei es mittels Elektrolyse und erneuerbaren Energien oder auf Basis fossiler Rohstoffe, haben einen geringeren Wirkungsgrad als die Prozesse zur Erzeugung von Diesel. Der

¹⁴United Kingdom

Wirkungsgrad "Well-to-tank" liegt bei Diesel bei 85,5% und somit deutlich über den Wirkungsgrad von Wasserstoff, der in Abhängigkeit von der Primärenergiequelle zwischen 27,5% und 59,9% (siehe Tabelle 4) liegt. Lediglich bei der Energieumwandlung hat der Brennstoffzellenantrieb mit 42% einen besseren Wirkungsgrad als ein Diesel-Verbrennungsmotor mit 30% .

Betrachtet man den gesamten Wirkungsgrad "Well-to-Wheel", so ist zu erkennen, dass Diesel mit einem Wirkungsgrad von 25,7% den geringsten Energieverlust aufweist. Einen ähnlichen Wirkungsgrad weist Wasserstoff, erzeugt mittels Elektrolyse und elektrischer Energie aus Wasserkraft, auf. Wasserstoff, auf diesem Weg erzeugt, erreicht einen Wirkungsgrad von 25,6%. Auch andere Möglichkeiten zur Erzeugung von Wasserstoff liegen unter den Werten von Diesel (siehe Tabelle 6).

Es ist zu beachten, dass das Endergebnis des Wirkungsgrads stark von den Annahmen für die Teilwirkungsgrade und den festgelegten Betrachtungsgrenzen abhängt. Daher sind in der Literatur auch unterschiedliche Werte für die Wirkungsgrade "Well-to-tank" zu finden. Es kann außerdem keine allgemeine Aussage bezüglich der Effizienz von Wasserstoff getroffen werden, da die unterschiedlichen Wege von der Primärenergiequelle bis zur Erzeugung und Speicherung stark von einander abweichende Ergebnisse für den Wirkungsgrad "Well-to-wheel" liefern. So ist z. B. der Betrieb eines Schienenfahrzeugs mit Wasserstoff aus Windenergie mit 11,5% nicht einmal halb so effizient wie der Betrieb eines Schienenfahrzeugs mit Wasserstoff aus Wasserkraft mit 25,6%.

In Bezug auf den Schutz des Klimas muss nicht nur die Effizienz betrachtet werden, sondern auch der Ausstoß an Emissionen. Mit Wasserstoff besteht die Möglichkeit, ein Schienenfahrzeug ohne Oberleitung emissionsfrei zu betreiben. Das Schienenfahrzeug emittiert bei Betrieb mit Wasserstoff kein CO_2 . Allerdings dürfen auch hier die Prozesse, die notwendig sind, um Wasserstoff zu erzeugen und in den Tank zu befördern, nicht vernachlässigt werden. Ein Großteil der Wasserstoffherzeugung basiert auf fossilen Rohstoffen und ist daher keineswegs frei von CO_2 -Emissionen. Auch der Betrieb eines Elektrolyseurs garantiert keine emissionsfreie Herstellung von Wasserstoff. Kommt der Wasserstoff für den Betrieb des Schienenfahrzeugs z. B. aus einem Elektrolyseur, der mit Strom aus dem deutschen Stromnetz betrieben wird, ist die CO_2 Bilanz schlechter, als bei Betrieb des Schienenfahrzeugs mit Diesel. Durch den Wasserstoff wird in diesem Fall 903 g CO_2/kWh emittiert, für Diesel nur 305 g CO_2/kWh . Das liegt daran, dass in Deutschland Teile der Stromerzeugung auf fossilen Rohstoffen basieren. Eine wirklich emissionsfreie Herstellung von Wasserstoff ist nur möglich, wenn der Wasserstoff vor Ort mittels Elektrolyse und Strom aus erneuerbaren Energien betrieben wird. Bei beiden Fallbeispielen, im Zillertal und in Niedersachsen wurde diese Variante für den Weg zum emissionsfreien Betrieb gewählt. Die Literaturrecherche ergab auch bei der Untersuchung der CO_2 -Emissionen unterschiedliche Ergebnisse. Trotzdem ist zu erkennen, dass nur Wasserstoff mittels Elektrolyse und Strom aus erneuerbaren Energien zu einem emissionsfreien Betrieb führen kann.

Soll Wasserstoff als Treibstoff für den Betrieb eines Schienenfahrzeuges implementiert werden, sind Adaptionen an der Infrastruktur erforderlich.

Die Analyse der erforderlichen Infrastruktur anhand der beiden Fallbeispiele hat gezeigt, dass keine großen Änderungen an der Infrastruktur erforderlich sind. Zwingend erforderlich ist nur eine Wasserstofftankstelle (HRS) und Adaptionen in den Werkstätten für den Betrieb und die Wartung der neuen Züge. Ein großer Vorteil ist die Ersparnis des Baus einer Oberleitung und trotzdem kein Auftreten von CO_2 -Emissionen vor Ort an der Verbrauchsstelle.

Literatur

- [1] Alstom. *Coradia iLint - the worlds first hydrogen powered train*. 2019. URL: <https://www.alstom.com/our-solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train> (Zugriff am 27.08.2019).
- [2] K. Barrow. „LNVG embraces innovation in regional rail“. In: *International Railway Journal* (Sep. 2018), S. 40–44.
- [3] C. Danner, J. Kropika und F. Ruhm. *Nachhaltigkeitsbericht 2017/18*. Österreich zusammen bringen. 2018. URL: https://presse.oebb.at/file_source/corporate/presse-site/Downloads/Publikationen/Nachhaltigkeit/Nachhaltigkeitsbericht-2017-18.pdf (Zugriff am 14.03.2019).
- [4] H. Eichlseder und M. Klell. *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung und Anwendung*. 4. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag, 2018.
- [5] Europäische-Kommission. *Climate strategies and targets*. 2018. URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en (Zugriff am 21.05.2019).
- [6] R. Frischknecht und M. Tuchschnid. *Primärenergiefaktoren von Energiesystemen*. ESU-services GmbH, fair consulting in sustainability, 2008.
- [7] A. Frixen. *Wasserstoff auf der Schiene - Der Coradia iLint und sein geplanter Einsatz auf oberleitungsfreien Strecken in Deutschland*. 2017. URL: https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20170221-fachkonferenz-elektromobilitaet-vorort/1_16_frixen_wasserstoff.pdf (Zugriff am 02.09.2019).
- [8] A. Hoffrichter. „Hydrogen as an energy carrier for railway traction“. Diss. University of Birmingham, 2013. URL: <http://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/4345> (Zugriff am 17.03.2019).
- [9] Hydrogenics. *Hydrail: Hydrogen Fuel Cell Trains*. 2019. URL: <https://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/fuel-cell-power-systems/hydrail/> (Zugriff am 14.08.2019).
- [10] Hydrogenics. *HyPM-HD POWER MODULES*. 2018. URL: <http://www.hydrogenics.com/wp-content/uploads/HyPM-HD-Brochure.pdf?hsCtaTracking=46ea698a-c05f-4d13-8f66-fe4bb161c0d0%7Cc024ca25-58c7-477c-a118-1ac541f14a03> (Zugriff am 14.08.2019).
- [11] IEA. *Hydrogen - A key part of a clean and secure energy future*. International Energy Agency. 2019. URL: <https://www.iea.org/topics/hydrogen/> (Zugriff am 15.08.2019).
- [12] *Klimafonds Dossier Wasserstoff. Hat Wasserstoff eine Zukunft*. 2019. URL: <https://www.klimafonds.gv.at/dossier/wasserstoff-dossier/hat-wasserstoff-eine-zukunft/> (Zugriff am 15.08.2019).
- [13] R. Kothari, D. Buddhi und R. Sawhney. „Comparison or environmental and economic aspects of various hydrogen production methods.“ In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008), S. 553–563.
- [14] T. G. Kym. *Weltpremiere im Zillertal: Stadler Rail liefert Wasserstoff-Züge nach Österreich*. St. Galler Tagblatt. 2018. URL: <https://www.tagblatt.ch/wirtschaft/stadler-rail-faehrt-auf-wasserstoff-ab-ld.1021485> (Zugriff am 16.08.2019).
- [15] G. Marin, G. Naterer und K. Gabriel. „Rail transportation by hydrogen vs. electrification – Case study for Ontario Canada, I: Propulsion and storage“. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 35.12 (2010), S. 6084–6096. ISSN: 0360-3199. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910006129>.

- [16] T. Nawrocki. „Brennstoffzellenfahrzeuge in Niedersachsen“. In: *Verkehr und Technik* (Feb. 2018), S. 55–60.
- [17] R. Paschotta. *Windenergieanlage*. 2018. URL: <https://www.energie-lexikon.info/windenergieanlage.html> (Zugriff am 31.08.2019).
- [18] M. Pieren. „Pilotprojekt: Infraserb soll Taunusbahnen antreiben“. In: *Frankfurter Neue Presse* (2019). URL: <https://www.fnp.de/frankfurt/pilotprojekt-infraserb-soll-taunusbahnen-antreiben-11731058.html> (Zugriff am 22.05.2019).
- [19] T. Riis, E. Hagen, P. Vie und O. Ulleberg. „Hydrogen Production and Storage“. In: *Hydrogen Implementing Agreement* (2006). URL: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/hydrogen.pdf> (Zugriff am 30.07.2019).
- [20] Y. Ruf, T. Zorn, P. A. D. Neve, P. Andrae, S. Erofeeva, F. Garrison und A. Schwillig. *Study on the use of fuel Cells and hydrogen in the railway environment*. Shift2Rail. 2019. URL: <https://shift2rail.org/publications/study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment/> (Zugriff am 27.05.2019).
- [21] W. Schnurnberger, H. Janßen und U. Wittstadt. „Wasserspaltung mit Strom und Wärme“. In: *FVS Themen 2004* (2004).
- [22] H. Schreiner und N. Fleischhacker. „Zillertalbahn 2020+ Energieautonom mit Wasserstoff“. In: *ETR Austria* (6 Juni 2018), S. 66–71. URL: <https://www.zillertalbahn.at/data.cfm?vpath=ma-wartbare-inhalte/ma-downloadfiles/quelle-etr-juni-2018-nr-6-wwweureilpresse-etr> (Zugriff am 22.05.2019).
- [23] G. Strobl. *Zillertalbahn will als Wasserstoff-Pionier durchstarten*. 2019. URL: <https://www.derstandard.at/story/2000109792438/zillertalbahn-will-als-wasserstoff-pionier-durchstarten>.
- [24] P. Tschernutter. „Konstruktiver Wasserbau I und Grundlagen für KW II“. Skriptum.
- [25] Umweltbundesamt. *Nettostromerzeugung im Jahr 2016 in Deutschland*. 2017. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/bild/strommix-in-deutschland> (Zugriff am 02.09.2019).
- [26] Unbekannt. *Acht Wasserstoff-Züge kosten Zillertalbahn 80 Mio. Euro*. Tiroler Tageszeitung. 2018. URL: <https://www.tt.com/wirtschaft/standorttirol/14420615/acht-wasserstoff-zuege-kosten-zillertalbahn-80-mio-euro> (Zugriff am 01.06.2019).
- [27] Unbekannt. *Technology*. Appalachian State University. -. URL: <https://hydrail.appstate.edu/technology> (Zugriff am 27.05.2019).
- [28] T. Werth. *Netzberechnung mit Erzeugungsprofilen - Grundlagen, Berechnung und Anwendung*. Hrsg. von D. Fröhlich. Springer Vieweg, 2016.
- [29] H. Zechmann, B. Schwaiger, A. Mar, F. Jakob, J. Jaklin und P. Fischer. *Naturwissenschaften I/II HTL: Physik - Chemie*. 2. Auflage. Linz: Trauner Verlag, 2013.