

Wasserstoff auf emissionsfreien Baustellen

Daniel Fuhrer

Fachspezialist Energiespeicher SBB

Ueli Kramer

Leiter Kompetenzzentrum Energiespeicher und Antriebssysteme SBB

Ausgangslage

Die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) haben im Januar 2020 entschieden, ihre betrieblichen Treibhausgasemissionen gegenüber dem Basisjahr 2018 bis 2030 um 50 % und bis 2040 um 92 % zu senken. Was als Ambition begonnen hat, ist in der Zwischenzeit in das Konzernziel „Ökologische Nachhaltigkeit“ eingeflossen.

Mehr als ein Drittel der rund 75 000 t CO₂-Emissionen der SBB werden heutzutage durch die rund 700 Schienenfahrzeuge mit eigenem Dieselantrieb verursacht. Diese werden überall dort eingesetzt, wo eine Energieversorgung via Fahrleitung nicht oder nur beschränkt möglich ist. Typische Beispiele sind Baustellen, Rangierbahnhöfe, Lösch- und Rettungszüge sowie Zustellungen von Güterwagen auf Anschlussgleisen.

Um das anspruchsvolle Ziel zu erreichen, wurde verfügt, dass sämtliche Neu- und Ersatzbeschaffungen auf erneuerbare Energieträger statt fossile Kraftstoffe ausgerichtet werden müssen.

Emissionen können am wirkungsvollsten und günstigsten reduziert werden, indem Verbrennungs- durch Elektromotoren ersetzt werden. Es entsteht zusätzlich ein grosser Mehrwert der Dekarbonisierung durch die konsequente Elektrifizierung, wenn neben der Verringerung der CO₂-Emissionen auch Lärm und Abgase (Feinstaub) vermindert und dadurch die Gesundheit des Personals verbessert oder potentielle Lärmlagen reduziert werden.

In [4] wurde ausführlich über die Eigenschaften von Wasserstoff (chemisches Element H₂) und dessen Verwendung in der schienen-

gebundenen Mobilität berichtet. Für die SBB ist klar, dass der wasserstoffelektrische Antrieb im Personenverkehr in der Schweiz aus heutiger Sicht kein Thema ist. Ein bisher weniger erwähntes Einsatzgebiet von Wasserstoff im Bahnumfeld ist die Nutzung als Energieträger auf Baustellen. Mit der Unterstützung aus dem Programm „Energiesstrategie 2050 im öffentlichen Verkehr“ (ESöV 2050) wurde 2020 ein Projekt zur Auslotung der Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff auf Bahnbaustellen aufgesetzt.

Quervergleich Strasse

Im Strassenverkehr zeichnet sich die Elektrifizierung bei den Personenwagen bereits deutlich ab. Elektrofahrzeuge sind verfügbar, technologisch weit fortgeschritten und bezüglich Gesamtkosten mindestens gleich-

Energieversorgung von Baustellen

Die Ablösung des Diesel-Generators zur Energieversorgung von Baustellen ist eine Herausforderung, die früher oder später die ganze Baubranche betrifft. Erfreulich ist, dass zunehmend fossilfreie Produkte auf den Markt drängen. Angeboten werden reine Batterielösungen, hybride Lösungen mit kleinem integriertem Diesel-Generator und auch Wasserstoff-Generatoren. Allen gemeinsam ist die Batterie, welche die Lastspitzen abdeckt, und dass der Dieselmotor oder die Brennstoffzelle oft nur zum Nachladen in der Funktion eines Range-Extenders eingeschaltet ist.

Bei den SBB hat der Ersatz der kleinsten Diesel-Generatoren durch reine Batterielösungen bereits begonnen. Ab der Leistungsklasse 10 bis 15 kVA ist der Ersatz durch reine Batterielösungen anspruchsvoll wegen der umständlichen Energiezuführung auf die Baustelle. Betriebliche Optimierungen und die konsequente Einführung effizienter Betriebsmittel (zum Beispiel der Ersatz von Halogen- durch LED-Beleuchtungen) reduzieren zwar den Energie- und Leistungsbedarf, es bleibt aber ein Restbestand an grösseren Generatoren, für den bislang keine praktische Lösung vorhanden ist. Hier bietet Wasserstoff eine mögliche Variante.

Um neben den bereits gemachten Erfahrungen mit mobilen Batteriespeichern auch Erfahrungen im Umgang mit Wasserstoff auf Baustellen zu sammeln, wird im laufenden Jahr ein Wasserstoff-Generator (auch H₂-Genset genannt) von Auto AG Truck aus Rothenburg angemietet und auf einer Baustelle erprobt.

In einer ersten Phase wird der Wasserstoff-Generator unter freiem Himmel aufgestellt und im realen Umfeld auf einer Baustelle betrieben. Der Fokus liegt dabei auf der Praxistauglichkeit und Robustheit des Generators sowie der Betankung im Bahnumfeld, insbesondere auf Baustellen im Gleisfeld. Die Ergebnisse sollen aber auch eine Grundlage sein, um die Frage zu klären, ob und unter

welchen Bedingungen Wasserstoff bei Untertagearbeiten eingesetzt werden kann.

Nach Artikel 93 der Verordnung über die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer bei Bauarbeiten vom 18. Juni 2021 (Bauarbeitenverordnung, BauAV, SR 832.311.141) dürfen bei Untertagearbeiten keine Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, die mit Kraftstoffen mit niedrigem Flammpunkt betrieben werden (Benzin- und Flüssiggasmotoren).

Der Flammpunkt eines Stoffes ist die niedrigste Temperatur, bei der sich über dem Stoff ausreichend brennbare Gase bilden, damit mit einer Zündquelle eine Verbrennung stattfinden kann.

Alle Stoffe, die einen Flammpunkt unter der Raumtemperatur haben (zum Beispiel Benzin bei minus 25 °C) gelten als leichtentzündlich. Bei Wasserstoff liegt der Flammpunkt bei minus 240 °C.

Der Flammpunkt ist nicht zu verwechseln mit der Zündtemperatur (Selbstentzündungstem-

peratur), die bei Wasserstoff mit 560 °C deutlich höher liegt als bei Benzin (220 – 460 °C) und Dieselmotorkraftstoff (255 °C).

Obwohl in der Verordnung der Wasserstoff nicht direkt ausgeschlossen ist, wird die Verordnung als Verbot für Wasserstoff aufgefasst. Auch in der EKAS-Richtlinie 6514 „Untertagearbeiten“, die aufzeigt, wie die Schutzziele aus den Vorschriften der Arbeitssicherheit zur Verhütung von Unfällen und Berufskrankheiten und der oben erwähnten BauAV erreicht werden können, ist Wasserstoff noch nicht erwähnt.

Wie bei neuen Technologien üblich, müssen zuerst die Grundlagen geschaffen und Einsatzbedingungen definiert werden. Die Forschungsergebnisse aus „HyTunnel-CS“⁴² sind auch für Wasserstoff-Generatoren auf Tunnelbaustellen entsprechend relevant.

Konstruktive Vorgaben, Sensorik und regelmässige Inspektion sind Massnahmen auf der Geräteseite. Bei der Nutzung von Wasserstoff ist aber auch das Umfeld in Betracht zu ziehen. Im Unterschied zu Strassentunneln haben die meisten Bahntunnel keine forcierte Lüftung, sondern nur einen natürlichen Luftzug, der jederzeit seine Richtung und Geschwindigkeit ändern kann und damit eine entweichende Wasserstoff-Wolke nicht zuverlässig verdünnt und abführt. Andererseits sind die Lüftermotoren bei Strassentunneln noch selten explosionsgeschützt und stellen bei einer entweichenden Wasserstoff-Wolke eine Gefährdung dar. Solche und ähnliche Fragen sind zu klären.

In Zusammenarbeit mit Fachexperten für Wasserstoff-Sicherheit und einer benannten Stelle (NoBo) mit Erfahrung in der Anwendung von Wasserstoff werden die Risiken ermittelt und begutachtet. Die Ergebnisse übernimmt der Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfachs (SVGW) als Grundlage zur Ausarbeitung einer Branchenlösung für den Umgang mit Wasserstoff bei Untertagearbeiten.

Wasserstoff-Generator. Dauerleistung 10 kW, Wasserstoff-Speicherkapazität 14,6 kg, Speicherdruck 700 bar, integrierte Batterie, Anschlüsse 230/400 V AC, 50 Hz (Bild: Auto AG Truck).



Baudiensttraktor Tm 234-4 (Foto: SBB).

wertig im Vergleich zu konventionellen thermischen Antrieben. Im Schwerverkehr hingegen stoßen rein batterieelektrische Antriebe noch an ihre Grenzen. Bei Transporten grosser Lasten über weite Strecken mit Tagesfahrleistungen von mehr als 500 Kilometern und ohne längere Unterbrüche der Fahrt sind batterieelektrische Antriebe noch im Nachteil. In den nächsten Jahren wird in diesem Bereich dank des raschen technischen Fortschritts eine Zunahme der rein batterieelektrischen Antriebe erwartet.

Eine Alternative beim Schwerverkehr ist Wasserstoff, der via Brennstoffzelle den Strom für den Antrieb direkt auf dem Fahrzeug produziert, so dass ebenfalls ein elektrischer Antrieb realisiert werden kann. Mit der Tankfüllung eines Lkw von 32 kg Wasserstoff bei 350 bar kann heutzutage eine Reichweite bis 400 km erreicht werden, wobei die effektive Gesamtssystemgrösse eines wasserstoffelektrischen Antriebs wegen seiner Umsysteme nicht zu unterschätzen ist. Eine weitere Möglichkeit sind synthetische Kraftstoffe (SynFuels). Diese können als Eins-zu-eins-Ersatz von Dieseldieselkraftstoff in den bestehenden Antriebssystemen mit Verbrennungsmotor und mit vorhandener Tankinfrastruktur genutzt werden. Allerdings bestehen SynFuels unter anderem auch aus Wasserstoff, und die Produktion ist mit hohen Umwandlungsverlusten verbunden. Sie sind aufgrund der sehr hohen Produktionskosten und der nicht absehbaren Verfügbarkeit nur dort sinnvoll eingesetzt, wo eine direkte Elektrifizierung nicht möglich ist. Aus diesem Grund schliessen die SBB SynFuels vorerst aus und fokussieren sich auf verfügbaren paraffinischen Dieseldieselkraftstoff (HVO) als Übergangslösung (siehe [7]). Auch Wasserstoff wird für lange Zeit ein rares Gut bleiben, das dort genutzt werden muss, wo es keine Alternativen gibt. Der Aufbau einer Elektromobilität zieht in jedem Fall den Ausbau einer Lade- und Tankinfrastruktur für erneuerbare Energie nach sich.

Wasserstoff im Schienenverkehr

Im Rahmen einer Artikelserie wird in diesem Beitrag ein weiteres Mal das Handlungsfeld „Dieseltraktion“ aufgenommen, das vom Kompetenzzentrum „Energiespeicher und Antriebssysteme“ (CoC EAS) der SBB geführt wird. In den letzten Beiträgen [5], [6], [7] wurde aufgezeigt, wie eine emissionsfreie Baustelle aussehen könnte, dass die Verabschiedung des Verbrennungsmotors bevorsteht und welchen Stellenwert alternative Kraftstoffe als Übergangslösung haben.

Der aktuelle Beitrag soll inhaltlich für das Thema Wasserstoff sensibilisieren und anhand des Beispiels „Baudiensttraktor“ die technische Systemauslegung eines wasserstoffelektrischen Antriebs aufzeigen sowie Aspekte der Sicherheit, Zulassungsfähigkeit und Kostenfolgen beleuchten. Im Sinne eines Ökosystems wird die benötigte Wasserstoff-Infrastruktur ebenfalls betrachtet. Die Ausführungen geben einen gesamtheitlichen Einblick, zu welchen Ergebnissen die SBB bisher gekommen sind und woran noch gearbeitet wird. Zusätzlich wird im Kasten auf der linken Seite auf eine Energieversorgung von Baustellen mit einem Wasserstoff-Generator eingegangen.



Die erarbeiteten Studien und die erworbenen Kenntnisse werden der gesamten Branche zur Verfügung gestellt.

Entscheidungsgrundlagen schaffen

In der Fülle von Forschungsergebnissen, Medienberichterstattungen, politischen Statements und Berichten ist eine Aufarbeitung der Fakten dringend notwendig.

Getreu dem Grundsatz, dass die Anwendung die Technologie bestimmen soll, wurde mit Unterstützung von Helbling Technik eine Machbarkeitsstudie zur Elektrifizierung des Baudiensttraktors Tm 234-4 [1] durchgeführt. Der Tm 234-4 wurde gewählt, weil das Fahrzeug gut dokumentiert ist, den heutigen Nutzeranforderungen entspricht und der Energieverbrauch direkt aus der Leittechnik ermittelt werden konnte. Die Umsetzung einer Elektrifizierung ist aber derzeit nicht vorgesehen, weil es sich um ein neues Fahrzeug handelt. Der Fokus liegt auf den Neubeschaffungen. Ziel der Machbarkeitsstudie war deshalb nicht nur der nachfolgend beschriebene Erkenntnisgewinn, sondern auch eine inhaltliche Auseinandersetzung, ob Wasserstoff in der Beschaffung von emissionsfreien Baudienstfahrzeugen als Lösung in Betracht zu ziehen ist.

Mit der Machbarkeitsstudie wurden für die nächste Generation von Baudiensttraktoren die Umsetzbarkeit eines wasserstoffelektrischen Antriebs und der Vergleich mit einem batterieelektrischen Antrieb herausgearbeitet. Die Studie sollte weiter aufzeigen, ob die Komplexität beherrscht werden kann, und klärt Fragen zur Sicherheit und Fahrzeugzulassung. Auch werden die Kostenfolgen der neuen Technologie behandelt. Nicht zu unterschätzen ist der Aufbau einer Wasserstoff-Logistik zur energetischen Versorgung der Fahrzeuge. All diese Themen werden durch das CoC EAS bei den SBB vertieft, damit wichtige Technologieentscheide anhand bekannter Tatsachen gefällt werden können.

Energiebedarfsanalyse

Zur Ermittlung des Leistungsbedarfs und Energieverbrauchs wurde zu Beginn der Studie eine Energiebedarfsanalyse im realen Betrieb durchgeführt.

Das Ziel war es, aus möglichst vielen gemessenen Arbeitsschichten einen Referenz-Lastfall zu ermitteln, der das Einsatzspektrum gut repräsentiert. Der Referenz-Lastfall wurde so gewählt, dass 95 % aller gemessenen Einsatzfälle abgedeckt werden können; er weist folgende Eckwerte auf:

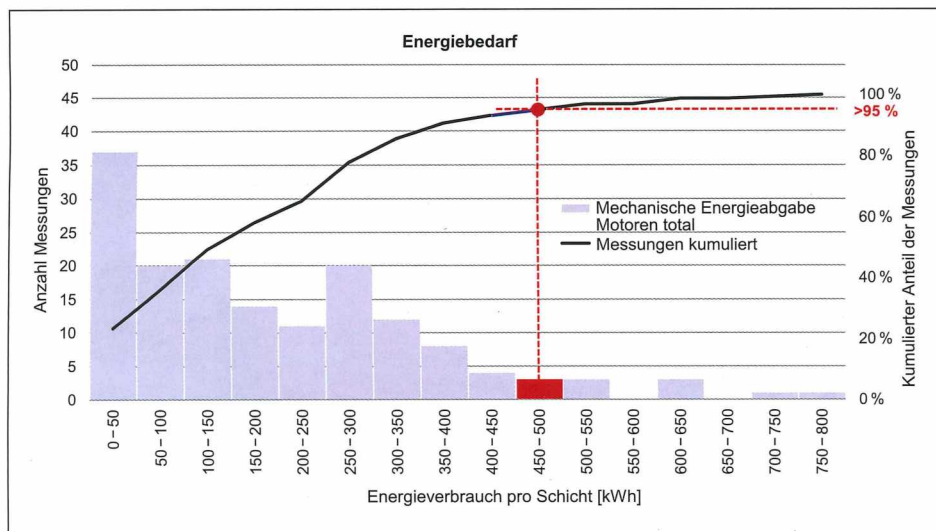
- Dauer des Arbeitseinsatzes: zirka 10 Stunden
- Mechanische Energieabgabe der Motoren: zirka 460 kWh
- Mittlere Leistungsabgabe der Motoren: zirka 46 kW
- Dieselölverbrauch: zirka 130 l

Die Einsatzfälle der Fachbereiche und betrieblichen Anforderungen seitens Anwender an die nächste Generation von Baudiensttraktoren sind im Betriebs- und Einsatzkonzept [3] des Betreibers formuliert. Relevant für die Wahl des Energiespeichers ist die zur Verfügung stehende Zeit zur Regeneration (Betankung) zwischen den Schichten von maximal einer Stunde und die minimale Schichtdauer von acht Stunden (Autarkiezeit). Aus den gemessenen und berechneten Energieflüssen wurde der Energiebedarf ermittelt, der durch die Energieversorgung des Fahrzeugs (Batterie, Wasserstoff) gedeckt werden muss. Daraus ergaben sich verschiedene Varianten des Antriebs- und Energiespeichersystems, von denen nachfolgend der wasserstoffelektrische Antrieb betrachtet wird.

Antriebs- und Energiespeichersystem

Aus dem oben ermittelten Energiebedarf ergibt sich eine Energiemenge, die mit erneuerbarer Energie gedeckt werden muss. Im Vergleich zum bestehenden Antriebskonzept kann durch den Entfall der hydraulischen Leistungsübertragung und den Einbau von rein elektrischen Komponenten (Bordnetzumrichter, Elektromotoren) der Energiebedarf der Systeme deutlich gesenkt werden, von zirka 460 kWh auf rund 270 kWh.

Herzstück des wasserstoffelektrischen Antriebs sind die Brennstoffzelle [4] und eine Hochvolt-Batterie zur Abdeckung von Last-



spitzen und zur Rekuperation beim Bremsen. Weil Brennstoffzellen eher träge reagieren, kommt die Dynamik aus der Batterie. Ein Niedertemperatur-PEM¹-Brennstoffzellen-Stack mit 100 kW Leistung und eine Batterie mit einer Kapazität von 200 kWh sind vorgesehen. Da der mittlere Leistungsbedarf des Fahrzeugs im Bereich von 30 bis 40 kW liegt, kann die Brennstoffzelle genügend Leistung für den durchschnittlichen Betrieb zur Verfügung stellen und auch die Batterie wieder aufladen.

Die benötigten 21 kg Wasserstoff für eine Arbeitsschicht werden gasförmig in Druckgasflaschen mit 350 bar gespeichert. Das gewählte Wasserstoff-Speichersystem hat nach Herstellerangaben eine Speicherdichte von zirka 40 kg/kgH₂ (Typ-3-Behälter). Bei der Speichermenge wird zusätzlich eine Reserve mitberücksichtigt, weil Druckgaspeicher nicht komplett entleert werden dürfen oder bei der Betankung nicht die maximale Füllmenge erreicht wird. Gründe sind die Tank- und Umgebungstemperatur und der Füllstand der Pufferspeicher mit hochverdichtetem Wasserstoff in der Tankstelle.

Eine weitere Verwendung von Wasserstoff im Antriebssystem ist der Wasserstoff-Verbrennungsmotor. Diese Technologie wird seit längerer Zeit als Übergangslösung zum dekarbonisierten Weiterbetrieb bestehender Fahrzeugflotten gesehen. Der Wirkungsgrad beträgt im optimalen Arbeitspunkt 30 bis 40 % und ist vergleichbar mit Dieselmotoren, wobei sich die Technologie im Bereich der Schienenfahrzeuge noch im Entwicklungsstadium befindet [9].

Der Mehrbedarf an Wasserstoff für den Verbrennungsmotor erfordert die Auslagerung des Speichers auf einen angehängten Flachwagen (Energie-Tender). Betrieblich gesehen sind geschobene oder fixe Wagen hinter dem Kranaufbau ein Hindernis.

Die Investitionskosten betragen aufgrund der geringeren Systemkomplexität aber nur rund die Hälfte eines wasserstoffelektrischen Antriebs; dagegen sind die Energiekosten höher. Diese Variante und auch hybride Varianten mit teilweisem Ersatz der Dieselmotoren werden nicht weiterverfolgt.

Sicherheitseinrichtungen

Wasserstoff ist das kleinste Molekül im Universum und 14mal leichter als Luft (85 g/m³ bei 15 °C und 1 bar). Wasserstoff ist farblos,

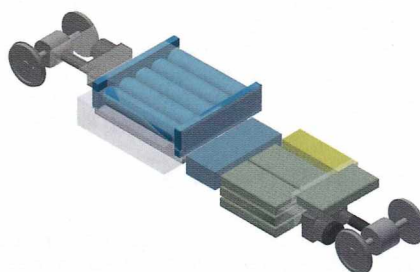
geruchslos und ungiftig. Wegen seiner Molekülgröße kann Wasserstoff durch ungeeignete Materialien diffundieren (Permeation) und das Material verspröden. Wasserstoff ist bei einem Mischverhältnis mit Luft von 4 bis 75 % zündfähig. Eine Mindestzündenergie von 0,02 mJ – beispielsweise der Funken einer statischen Aufladung – genügt, um ein zündfähiges Gemisch zu entzünden. Wenn Wasserstoff brennt, entsteht eine Flamme, die im ultravioletten Bereich strahlt und für das menschliche Auge unsichtbar ist.

Die Hauptrisiken bei Wasserstoff sind das Bersten durch Überdruck im Druckgaspeicher wegen umgebender Hitze (Feuer), ein Leck durch äussere Einwirkung mit Bildung einer explosionsfähigen Gaswolke oder die direkte Entzündung mit einer Stichflamme. Diesen Risiken und Besonderheiten des Wasserstoffs muss mit Sicherheitsvorkehrungen begegnet werden.

Bei Auslegung der Anlagenteile und Verbindungen nach der Definition „auf Dauer technisch dicht“ ist im Normalbetrieb keine Freisetzung von Wasserstoff zu erwarten. Dadurch ergeben sich keine explosionsgefährdeten Bereiche (Ex-Zonen): Einstufung explosionsgefährdeter Bereiche).

Neben Brandschutzeinrichtungen und Sensoren werden die Druckgasflaschen mit Überdruckventilen (PRD), temperaturabhängigen Druckentlastungsventilen (TPRD) und Berstscheiben ausgerüstet. Bei einer Beschädigung des Leitungssystems verhindert

Mögliche Speicheranordnung mit fünf Druckgasflaschen vor dem abgesetzten Ladeboden. Die nutzbare Wasserstoffmenge beträgt zirka 22 kg. Bauteile: Antriebsstromrichter (hellgrau), Motoren (grau/schwarz), Hochvolt-Batterien (grün), Resthydraulik (gelb), Brennstoffzellen-System mit Speicher (blau) (Grafik: Helbling).



Bestimmung des Referenz-Lastfalls. Die roten Markierungen zeigen die Einordnung der Referenzmessung (Grafik: SBB).

ein Durchflussmengenbegrenzer die schlagartige Entleerung.

Wegen der Flüchtigkeit des Wasserstoff-Moleküls entweicht austretender Wasserstoff rasch nach oben. In geschlossenen Räumen kann sich unter der Raumdecke ein explosionsfähiges Gemisch mit Luft bilden. Insbesondere für geschlossene Räume gibt es in der Zwischenzeit neue Erkenntnisse aus dem europäischen Forschungsprojekt „HyTunnel-CS“² bezüglich risikominimierender Massnahmen. Der Auslöser für dieses Forschungsprojekt im Jahr 2019 war die zunehmende Anzahl wasserstoffbetriebener Strassenfahrzeuge. Bis 2022 wurden von zwölf Forschungseinrichtungen aus mehreren europäischen Ländern die Gefahren von Wasserstoff in geschlossenen Räumen mit Simulationen und realen Versuchen untersucht.

Aus den Ergebnissen sind Empfehlungen für technische Lösungen und Normierungen entstanden, die nun an konkreten Projekten angewendet und erprobt werden. Konkret handelt es sich um Empfehlungen für die Ausrichtungen der Austrittsöffnung des TPRD, die im Fall einer Auslösung einen entscheidenden Einfluss auf die Bildung eines zündfähigen Gemischs im beschränkten Volumen des Tunnelprofils hat. Weiter bestimmt die Wahl der Blendengrösse der Austrittsöffnung des TPRD direkt die austretende Menge und beeinflusst damit die Länge einer Stichflamme. Die Folge der Stichflamme sind Beschädigungen an Tunnelwand, Strukturelementen und technischen Einrichtungen. Weiter wurde das vielversprechende Prinzip eines Gasbehälters entwickelt, der unter hoher Temperatureinwirkung durchlässig wird und den Wasserstoff kontinuierlich entweichen lässt. Dadurch ist kein TPRD mehr notwendig (TPRD-less). Dieser Behälter ist jedoch auf dem Markt noch nicht verfügbar.

In diesem Forschungsprojekt hat auch die International Fire Academy (IFA) aus Balsthal mitgewirkt; sie konnte dabei die Perspektive der Feuerwehren einbringen. Die Entwicklung passender Einsatztaktiken für die Feuerwehr bei Strassentunneln ist dringend und hat begonnen.

Zwischenfazit: Die Sicherheit beim Betrieb eines Fahrzeugs mit wasserstoffelektrischem Antrieb kann im Baustellenumfeld gewährleistet werden. Im Unterschied zu durchfahrenden Wasserstoff-Zügen stellt Wasserstoff bei stillstehenden und arbeitenden Baudiensttraktoren im Tunnel zusätzliche Anforderungen an die Fahrzeugtechnik und das Umfeld.

Zulassungsfähigkeit

Im nahen Ausland sind erste Wasserstoff-Personenzüge bereits zugelassen und im Betrieb oder befinden sich im Zulassungsprozess. In der Schweiz ist die Zulassung eines Fahrzeugs mit wasserstoffelektrischem Antrieb noch Neuland. Zur Vorbereitung auf mögliche zukünftige Fahrzeugprojekte wurden in Absprache mit dem Bundesamt für Verkehr (BAV) ein fiktives Zulassungskonzept für die Umrüstung des Tm 234-4 auf einen wasserstoffelektrischen

Antrieb eingereicht und einige grundlegende Fragen zur Einstufung der Änderung erörtert. Das Regelwerk (TSI, Normen) für Wasserstoff in Bahnanwendungen ist noch am Entstehen, und es existieren auch noch keine vergleichbaren Referenzsysteme. Daher muss zur Ermittlung der Risikoakzeptanz eine Risikoabschätzung nach RTE 49100 durchgeführt werden. Die Risikoanalyse wird auf der Ebene des wasserstoffführenden Systems und des Batteriesystems durchgeführt. Betrachtet werden die Schnittstellen des Antriebssystems zum Fahrzeug und die Fehlermöglichkeiten der neuen Komponenten. In einer übergeordneten Risikoanalyse des Fahrzeugs werden die Beziehungen zum Umfeld (Betrieb, Betankung und Wartung) durchleuchtet.

Zwischenfazit: Die Zulassungsfähigkeit ist nicht in Frage gestellt; beim ersten realen Projekt ist aber eine verlängerte Bearbeitungszeit für die Nachweisführung einzuplanen.

Kostenschätzung für Umbau und Betrieb

Neben der technischen Machbarkeit und der Zulassungsfähigkeit für den Vergleich der verschiedenen Antriebsvarianten ist auch die finanzielle Einordnung des Umbau- und Betriebsaufwands ein wichtiger Faktor. Da der Umbau nicht realisiert wird, handelt es sich nur um eine grobe Kostenschätzung.

Die geschätzten Kosten für Komponenten und Umbau belaufen sich auf etwa 1,6 Millionen Franken.

Bei den Betriebskosten wird grundsätzlich eine Reduktion des Wartungsaufwands durch Wegfall des thermischen Antriebs erwartet. Gegenüber einem rein batterieelektri-

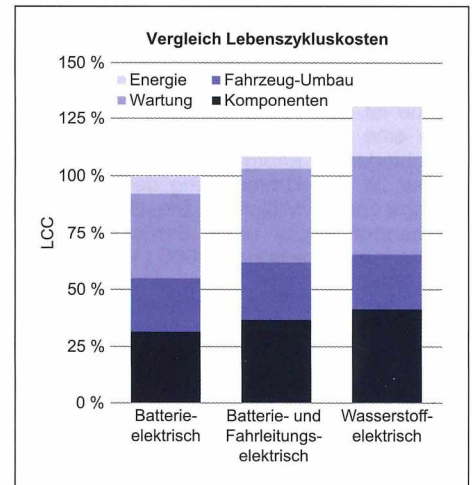
schen Antrieb wird aber der Wartungsaufwand rund 15 % höher sein. Grund dafür sind höhere Wartungs- und Reparaturkosten für das Brennstoffzellensystem und die zugehörigen Hilfssysteme (Filter, Pumpen, Kühlung und Heizung) sowie auch die Einrichtung besonderer Arbeitsplätze für Tätigkeiten an gasführenden Komponenten. Dazu kommt die Umschulung des Wartungspersonals, die bei allen Varianten der Elektrifizierung nötig sein wird. Gegenüber einem rein batterieelektrischen Antrieb sind die Energiekosten deutlich höher.

Ökobilanz

Bei der Einordnung des CO₂-Fussabdrucks von Antriebsvarianten scheiden sich die Geister. Gegenwärtig und in den nächsten Jahren wird Wasserstoff noch mehrheitlich mit Erdgas gewonnen, und die Batteriefabriken laufen heute nicht mit ausschliesslich erneuerbarer Energie. Verschiedene neutrale Studien zeigen unabhängig voneinander auf, dass der initiale Fussabdruck der batterieelektrischen und wasserstoffelektrischen Fahrzeuge leicht höher ist als bei einem reinen thermischen Fahrzeug. Über die Nutzungsdauer verschiebt sich der Gesamt-fussabdruck aber rasch zugunsten der elektrischen Antriebe. Aufgrund politischen Drucks und des Ausbaus der erneuerbaren Energiegewinnung sowie der hohen Recyclingquote wird der Fussabdruck der elektrischen Antriebe rasch besser.

Wichtige und oft vernachlässigte Aspekte in den Diskussionen zur Ökobilanz sind unter anderem:

- Auslegung nach Bedarf und nicht überdimensioniert;
- Systemeffizienz, die bis anhin bei Baufahrzeugen leider oft vernachlässigt wurde;



Zusammensetzung der Lebenszykluskosten über 25 Jahre ab Umrüstung für verschiedene Antriebsvarianten. Der batterieelektrische Antrieb ist die Betrachtungsbasis (Grafik: SBB).

- Langlebigkeit der Komponenten, was eine richtige Dimensionierung und Systemauslegung bedeutet;
- Reparaturfähigkeit, um die Rohstoffe möglichst lange im Kreislauf zu behalten.

Wasserstoff-Tankstellen

Alternative Antriebssysteme sind auf eine neue Betankungs- oder Ladeinfrastruktur angewiesen; ausgenommen davon sind SynFuels. Dazu wurde mit Helbling Technik eine weitere Machbarkeitsstudie zur Lade- und Tankinfrastruktur der Zukunft [2] durchgeführt.

Speicherung von Wasserstoff

Im folgenden werden einige Speichersysteme für Wasserstoff beschrieben. Die spezifischen Kennzahlen sind Durchschnittswerte, die je nach Quelle etwas abweichen können.

Gasförmiger Wasserstoff

Gasförmiger Wasserstoff wird in Druckgasflaschen gespeichert, die aus einem dünnwandigen Innenbehälter bestehen und mit Kohlenstoffasern umwickelt werden (Typ-3). Als Druckniveaus haben sich 700 bar bei Personenkraftwagen und 350 bar beim Schienenverkehr etabliert, wobei zur Erhöhung der Reichweite die Tendenz in Richtung 700 bar geht. Gasförmiger Wasserstoff hat „unverpackt“ eine hohe gravimetrische Energiedichte² von 33,33 kWh/kg. Im Speichersystem sinkt der Wert je nach Typ der Druckgasflaschen auf 0,8 bis 2 kWh/kg. Dazu kommt noch das Brennstoffzellensystem.

Auf Basis von Herstellerangaben aus [1] nachfolgend ein Vergleich der Energiedichten von Wasserstoff und Batterien auf Systemebene. Beim Gesamtgewicht des Speicher- und Brennstoffzellensystems von 1300 kg (22 kg Wasserstoff) bleiben von den chemischen 33,33 kWh/kg nach Speicherung 0,6 kWh/kg übrig. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads von 50 % steht nach der Energiewandlung noch eine Energiedichte von 0,3 kWh/kg (elektrisch) zur Verfügung, die als Strom an der Klemme abgegriffen werden kann. Zum Vergleich bewegt sich die gravimetrische Energiedichte eines Batteriesystems (mit Gehäuse, Kühlung, Heizung,

Batteriemangement) bei 0,8 bis 1,5 kWh/kg. Der sehr hohe Wert der gravimetrischen Energiedichte von Wasserstoff wird etwas relativiert.

Flüssiger Wasserstoff

Flüssiger Wasserstoff bei minus 253 °C bietet eine weitere Möglichkeit der Speicherung, ist jedoch im Handling deutlich aufwendiger und bei der Kühlung sehr energie- und kostenintensiv.

Metallhydrid-Speicher

Alternativen zur direkten Speicherung von Wasserstoff sind Metallhydrid-Speicher, die Wasserstoff durch Druck chemisch in einem Metallpulver einlagern. Durch Zufuhr von Wärmeenergie wird der Wasserstoff kontinuierlich wieder freigesetzt. Dies ist eine sehr sichere Art der Wasserstoffspeicherung; sie weist jedoch ein höheres Gewicht auf als die Speichervarianten für gasförmigen Wasserstoff. Metallhydrid-Speicher haben heutzutage auf Systemebene eine gravimetrische Energiedichte von zirka 0,33 kWh/kg.

LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier)

LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) ist ein Trägeröl, das durch einen chemischen Prozess hydriert, also mit Wasserstoff beladen werden kann. Durch Zufuhr von Wärmeenergie wird der Wasserstoff wieder freigesetzt und kann so genutzt werden. Durch die flüssige Form ist LOHC einfach zu transportieren und durch seine chemischen Eigenschaften sehr sicher. Das Trägeröl kann mit

bestehender Infrastruktur verteilt werden. Der Nachteil besteht darin, dass die Flüssigkeit, wenn sie den Wasserstoff abgegeben hat, auch wieder zurück zu einer Wasserstoffquelle transportiert werden muss. Daher vergrößert sich der Logistikaufwand deutlich. Das Trägeröl kann aufbereitet und danach wieder mit Wasserstoff hydriert werden. LOHC hat eine gravimetrische Energiedichte von 2 kWh/kg.

Ammoniak

Ammoniak ist bei Umgebungstemperatur und einem Druck von 10 bar flüssig und wird noch fast ausschliesslich aus grauem Wasserstoff [4] sowie Stickstoff aus der Luft hergestellt. Es hat eine gravimetrische Energiedichte von 5,2 kWh/kg. Ammoniak ist die Basis für die Produktion von Düngemitteln und hat ein grosses Potential als Wasserstoffträger für den Transport über grosse Distanzen (Schiff, Pipeline). Zur direkten Verwendung in einem Verbrennungsmotor gibt es im Bahnbereich erste Pläne bei der Deutschen Bahn.

Methanol

Methanol ist ein flüssiger Energieträger und wird noch überwiegend aus grauem Wasserstoff und einer CO₂-Quelle produziert. Es hat eine gravimetrische Energiedichte von 5,5 kWh/kg (Diesel 11,8 kWh/kg) und kann wie herkömmliche Kraftstoffe verteilt werden. Es wird in Verbrennungsmotoren verwendet und heute erst in kleinen Brennstoffzellen eingesetzt.

Um den Logistikaufwand einer Wasserstoff-Versorgung zu ermitteln, wurde ein Eins-zu-eins-Ersatz des Dieseldiesels durch Wasserstoff angenommen. Diese Annahme ist auch dem Umstand geschuldet, dass eine parallele Logistik von mehreren verschiedenen Energieträgern nicht finanzierbar ist. Die Umrechnung des jährlichen Bedarfs von 10 Millionen l Dieseldiesels in Wasserstoff ergibt unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads zirka 2000 t Wasserstoff. Das entspricht der Jahresproduktion des geplanten 15-MW-Elektrolyseurs in Brugg zur Versorgung von 300 Lastwagen und Bussen.

An einem Grossteil der ungefähr 70 SBB-Tankstellen liegen die durchschnittlichen Bezugsmengen pro Dieseldieseltankung bei weniger als 350 l. Die höchsten Bezugsmengen fallen naturgemäss in Rangierbahnhöfen an. Pro Betankung werden dort im Durchschnitt zwischen 710 und 1230 l bezogen.

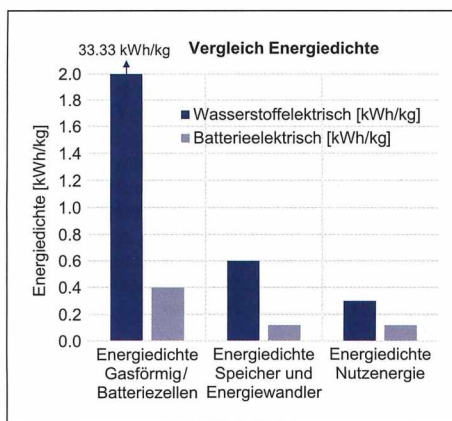
In verschiedenen Szenarien wurde die mögliche Verteilung zukünftiger Wasserstoff-Tankstellen analysiert. Die Tankstellen wurden so verteilt, dass die Fahrzeit zur jeweiligen Tankstelle minimiert wird. Bei 70 neuen Tankstellen würden viele kleine und mittlere Tankstellen entstehen, die aufgrund des geringen Kraftstoffumsatzes und der hohen Infrastrukturkosten kaum wirtschaftlich betrieben werden könnten. Für ein präziseres Bild der Zukunft müssten in einem nächsten Schritt auch betriebliche Faktoren wie Trassenbelegungen und -preise, Standorte, die nicht auf einen neuen Kraftstoff umgestellt werden sollen (aufgrund lokal eingesetzter Spezialfahrzeuge), und weitere Parameter in den Szenarien berücksichtigt werden.

Speicher künftiger Antriebssysteme werden aufgrund von begrenzten Platz- und Gewichtsverhältnissen auf den Fahrzeugen von der Energiemenge her limitiert sein. Dies wird dazu führen, dass die Betankungsfrequenz pro Fahrzeug generell zunimmt und die dabei übertragenen Energiemengen, aufgrund der fahrzeugseitig begrenzten Speichermengen, abnehmen.

Bei einem Transport mit einem 18-Tonnen-Lastwagen können zirka 11 t Dieseldiesels befördert werden. Ein moderner Wasserstoff-Trailer fasst je nach Ausführung zirka 350 kg Wasserstoff. So müssen acht bis neun Wasserstoff-Transporte durchgeführt werden, um dieselbe Energiemenge wie mit dem Dieseldieseltransport von A nach B zu bringen. Um den durchschnittlichen täglichen Wasserstoffbedarf an den bestehenden Tankstellenstandorten zu decken, müsste jede der mehr als 70 Tankstellen mit mindestens einem Trailer ausgerüstet werden. Pro Tag müssten im Schnitt zirka 17 dieser Trailer ausgetauscht oder gefüllt werden. Um den jährlichen Bedarf an Wasserstoff zu decken, müssten die Trailer zusammengezählt zirka 6000mal gefüllt respektive ausgetauscht werden, was wiederum höhere Betriebskosten bedeutet.

Bei einer Wasserstoff-Tankstelle können die Anzahl Zapfsäulen, die Grösse des Pufferspeichers und der Betankungsdruck skaliert werden. Auch kann der Wasserstoff je nach Gegebenheit vor Ort oder in einer Grossproduktion hergestellt werden.

Durch einen höheren Bedarf an Wasserstoff können die Auswirkungen der Infrastruktur-



Vergleich der gravimetrischen Energiedichte von Wasserstoff und Batterie auf Systemebene (Grafik: SBB).

kosten auf die Gesamtkosten gesenkt werden. Um dies zu erreichen, ist eine Mehrfachnutzung (zusätzliche Nutzung der Infrastruktur, zum Beispiel durch Busse, Lkw oder Pkw) von Wasserstoff-Tankstellen notwendig. Da jedoch die Wasserstoff-Zapfsäulen für Bahnanwendungen zwangsläufig in Gleisnähe stehen, ist eine gleichzeitige öffentliche Zugänglichkeit für Strassenfahrzeuge kaum realisierbar. Um die Zugänglichkeit zu verbessern, wären zusätzliche Wasserstoff-Zapfsäulen in Strassennähe erforderlich, die an die bestehende Infrastruktur angeschlossen würden.

Da in der Schweiz auch in Zukunft der schienengebundene Regionalverkehr keinen Wasserstoff benötigt, können auch in diesem Bereich keine Synergien genutzt werden.

Bei einer Wasserstoff-Tankstelle, die mit Lkw beliefert wird, sind zirka 80 % des Wasserstoffpreises auf die externen Kosten wie Produktion, Transport und Trailer zurückzuführen. Wenn der Wasserstoff vor Ort produziert wird, fällt ein grosser Teil der Gesamtkosten auf den Elektrolyseur. Wird er aus Bahnstrom hergestellt, sind die Kosten pro Kilogramm Wasserstoff nahezu gleich gross wie bei der Produktion in einer Grossanlage und Anlieferung per Lastwagen.

Die grösste Auswirkung auf den CO₂-Fussabdruck einer Wasserstoffproduktion hat die Herkunft der Energie. Naheliegender wäre die Verwendung von Solar- und Windenergie.

Andererseits sind die Anzahl Produktionsstunden des Elektrolyseurs massgebend für die Produktionskosten des Wasserstoffs. Für konkurrenzfähige Wasserstoffpreise sind heutzutage mindestens 5000 Vollaststunden pro Jahr nötig. Die Sonnenstunden in Mitteleuropa (1200 h) reichen demnach für einen wirtschaftlichen Betrieb mit Solarenergie nicht aus.

Die Investitionskosten (CAPEX) einer Wasserstoff-Tankstelle ohne lokale Produktion belaufen sich je nach Grösse und Ausstattung auf 0,8 bis 1,8 Millionen Franken, gegenüber einer konventionellen Dieseldiesels-Tankstelle mit 0,5 Millionen Franken. Die Betriebskosten (OPEX) werden grossteils von den Energiekosten bestimmt.

Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads wasserstoffelektrischer Fahrzeuge sind die

Energiekosten ab einer Wasserstoff-Tankstelle pro verbrauchte Kilowattstunde dreimal höher als für die gleiche Energie ab einer Batterie-Ladestation.

Fazit

Auf den ersten Blick scheint Wasserstoff zur Dekarbonisierung von Baudienst-Fahrzeugen eine überzeugende, fossilfreie Lösung zu sein. Da es sich im Vergleich zu einem batterieelektrischen Fahrzeug (möglicherweise auch mit Stromabnehmer) aber um eine vor allem durch Umwandlungsverluste und Kosten sowie wegen der Systemgrössen verhältnismässig ineffiziente Technologie handelt, ist eine vertiefte Prüfung notwendig.

Für die Produktion von grünem Wasserstoff wird viel zusätzliche und noch länger nicht im Überfluss vorhandene erneuerbare Energie benötigt. Bei der Rückverstromung auf dem Fahrzeug kommt noch der niedrige Wirkungsgrad von maximal 50 % dazu. Im Hinblick auf knapper werdende Energie und steigende Energiekosten ist der Effizienz ein grosser Stellenwert beizumessen, was sich wiederum in den Gesamtkosten niederschlägt.

Die Brennstoffzellen-Technologie, im Bahnbereich vorzugsweise PEM, hat bei einigen Fahrzeug-Projekten die technische Reife im Betrieb gezeigt. Durch die zusätzliche Systemkomplexität gegenüber einem reinen batterieelektrischen Antrieb resultieren höhere Wartungskosten (zirka plus 15 %).

Wasserstoffelektrische Fahrzeuge können gleich schnell wie herkömmliche Dieseldieselfahrzeuge betankt werden. Es wird jedoch eine vollständig neue und massiv aufwendigere Tankinfrastruktur benötigt, die noch komplett fehlt. Bei der verhältnismässig niedrigen Auslastung resultiert durch die Fixkosten und Abschreibungen ein hoher Preis für Wasserstoff an den Tankstellen.

Ausblick

Bei den SBB werden in naher Zukunft kaum wasserstoffelektrische Fahrzeuge beschafft. Es sind keine Fahrzeuge im Einsatz, die wegen übermässigen Energiebedarfs diesen Schritt rechtfertigen würden. Die Einsatzfälle lassen sich mit einem batterieelektrischen Antrieb abdecken. Beim Vergleich der Varianten eines Antriebs- und Energiespeichersystems für emissionsfreie Baudienstfahrzeuge [1] hat sich allerdings gezeigt, dass bei batterieelektrischen Fahrzeugen trotz gut ausgebauter Ladeinfrastruktur lange Ladezeiten resultieren würden. Als Folge davon könnten die Übergangszeiten zwischen den Arbeitsschichten nicht eingehalten werden, und ein Mehrbedarf an Fahrzeugen wäre die Folge.

Deshalb wird die Variante mit Traktionsbatterien und der Nutzung der Fahrleitung zur schnellen Ladung über einen Stromabnehmer weiterverfolgt. Diese Kombination stellt für Baudiensttraktoren eine ideale Lösung dar und ist auch betrieblich realisierbar. Damit kann die knappe Energie effizient genutzt werden, und die Traktionsbatterien stehen zusätzlich für netzdienliche Zwecke zur Verfügung (mehr Informationen dazu in [10]).

Hingegen ist ein Wasserstoffantrieb bei Spezialanwendungen (Gleisumbauzug) mit

extrem hohem Energiebedarf unter ausgeschalteter Fahrleitung durchaus denkbar. Für nicht elektrifizierte Strecken hat die Firma Linsinger aus Österreich kürzlich die wasserstoffelektrische Schienenfräsmaschine MG11-H2 [8] zum Reprofilieren des Längs- und Querprofils des Schienenkopfs vorgestellt.

Es stellt sich also nicht die Frage ob, sondern wann Fahrzeuge mit wasserstoffelektrischem Antrieb auf dem Schweizer Schienennetz auftauchen. Unabhängig davon, was die SBB tun. Genau deshalb bereiten wir uns auch darauf vor.

Literaturverzeichnis

[1] Machbarkeitsstudie Umrüstung des Baudiensttraktors Tm 234 Serie 4 auf batterie- oder wasserstoffelektrischen Antrieb. Helbling 2021.

[2] Machbarkeitsstudie Lade- und Tankinfrastruktur. Helbling 2022.

[3] Betriebs- und Einsatzkonzept Baudiensttraktor (Ersatz Tm 234 1.+2. Serie). SBB 2021.

[4] Kling, Wolfgang: Mit Wasserstoffzügen das Klima retten? Schweizer Eisenbahn-Revue / Eisenbahn-Revue International Deutschland-Ausgabe / Eisenbahn Österreich 7/2022, S. 353 – 357.

[5] Vögtli, Christian; Kramer, Ueli: Klimaneutrale SBB – Emissionsfreier Baustellenbetrieb. SER 8–9/2020.

[6] Meier, Marco; Kramer, Ueli: Klimaneutrale SBB – Verabschiedung des fossilen Antriebs. SER/ERI/EÖ 11/2020, S. 565.

[7] Haudenschild, Philipp; Meier, Marco; Kramer, Ueli: Alternative Kraftstoffe im Schienenverkehr. SER/ERI/EÖ 4/2021, S. 192 – 198.

[8] MG11-H2 – Emissionsfreie Gleisbaumaschine. ZEV Rail. Jahrgang 146. Tagungsband SFT Graz 2022.

[9] H2-Verbrennungsmotor und H2-Niederdruckspeicher für die Eisenbahn. ZEV Rail. Jahrgang 146. Tagungsband SFT Graz 2022.

[10] BIENE – Batterieschwarm im Bahnstromnetz. Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr. Projekt P-218. BAV. 2022.
<https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/allgemeine-themen/forschung-innovation/foerderprogramme/ESoeV2050/laufende-abgeschlossene-projekte.html>. Abgerufen 1.1.2023.

¹ PEM: Polymer-Elektrolyt-Membran

² HyTunnel-CS: „Hy“ steht für Hydrogen beziehungsweise Wasserstoff und „CS“ für confined spaces, zum Beispiel Tunnel oder Tiefgaragen

³ Gravimetrische Energiedichte ist ein Mass für die Energie pro Masse eines Stoffes. Wird oft bei Mobilitätsanwendungen verwendet.