



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

Wasserstoff auf Bahnbaustellen

Eine techno-ökonomische Einordnung für die Schweiz

Thomas Bütler (Kontakt) / Simon Müller
Helbling Technik AG, Schachenallee 29, CH-5000 Aarau, www.helbling.ch

Ueli Kramer (Kontakt) / Daniel Fuhrer
SBB AG, Kompetenz-Center Energiespeicher und alternative Antriebssysteme, Hilfikerstrasse 3,
CH-3000 Bern 65, www.sbb.ch

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)
CH-3003 Bern

Programmleiter

Stany Rochat, BAV

Projektnummer: P-214

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor-in oder sind ausschliesslich die Autoren-innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 03.12.2024

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary in Deutsch	2
Résumé en français	2
Executive Summary in English.....	3
Zusammenfassung	5
Synthèse.....	8
1 Ausgangslage	11
1.1 Dekarbonisierung des Verkehrssektors	11
1.2 Potenziale des Wasserstoffs im Bahnbereich.....	11
2 Ziel der Arbeit.....	13
3 Forschungsansatz und aktueller Wissensstand.....	14
3.1 Konzeption der Umrüstung eines Baudienstfahrzeugs	14
3.2 Projektion von Wasserstofftankanlagen der SBB	15
3.3 Energieversorgung von Baustellen	17
3.4 Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff	19
4 Ergebnisse	21
4.1 Konzepte zur Umrüstung eines Baudienstfahrzeugs	21
4.2 Zukünftige Lade- und Tankinfrastruktur	29
4.3 Energieversorgung von Baustellen und Betriebserprobung	33
4.4 Nebenprojekte	39
5 Diskussion	41
5.1 Technischer Lösungsraum bei Wasserstoffanwendungen	41
5.2 Wasserstoff-Ökosystem	42
5.3 Aktualität und Relevanz der gewonnenen Erkenntnisse.....	43
6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen	45
6.1 Wasserstoffbasierte Antriebssysteme	45
6.2 Wasserstoffproduktion und Vertrieb.....	45
6.3 Energieversorgung von Baustellen	46
6.4 Weitere Nutzungsmöglichkeiten.....	46
6.5 Aktuelle und zukünftige Entwicklungen im Wasserstoffsektor	46
7 Verzeichnisse	47
7.1 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	47
7.2 Literaturverzeichnis	48
8 Anhang	50
8.1 Ergänzungen zur Ausgangslage	50
8.2 Eigenschaften von Wasserstoff.....	52

Executive Summary in Deutsch

Heute werden auf Baustellen im Bahnunmfeld meist dieselbetriebene Baudienstfahrzeuge und Dieselaggregate eingesetzt. Im Rahmen der Ambition «Netto Null 2040» der SBB ist der aktuelle Bedarf an fossilen Treibstoffen durch nachhaltige Energieträger wie Wasserstoff zu ersetzen. Die vorliegende Studie bietet eine umfassende Einordnung der Möglichkeiten für dessen Einsatz.

Die Umrüstung eines modernen Baudienstfahrzeugs auf einen elektrifizierten Antrieb wurde eingehend geprüft. Drei mögliche Antriebsvarianten wurden ausgearbeitet, wobei sich die batterieelektrische Ausführung mit einem Stromabnehmer, aufgrund der sich dadurch ergebenden flexiblen Lademöglichkeit, als favorisierte Variante gezeigt hat. Die wasserstoffbasierten Antriebe mit Brennstoffzelle oder Wasserstoffverbrennungsmotor sind technisch mit gewissen Einschränkungen realisierbar, sind jedoch komplexer in der Umsetzung und Zulassung und zudem abhängig von einer aktuell nicht vorhandenen Betankungsinfrastruktur. Ein Umbau von Bestandsfahrzeugen ist daher nicht geplant. Aufgrund der umfangreichen Umbau- und Zulassungsschritte werden die mit der Studie gewonnenen Erkenntnisse nur für Neuaußschreibungen verwendet, wobei der Fokus in der Beschaffung auf Batteriefahrzeugen liegt. Wasserstoffantriebe können allenfalls für grosse Gleisbaumaschinen in Frage kommen, die nicht von der SBB betrieben werden.

Um Wasserstoff für ein breites Anwendungsfeld nutzbar zu machen, wäre eine Transformation der aktuellen Treibstofftankanlagen der SBB nötig. Es wurden Szenarien für eine mögliche Wasserstoff-Tankstellenverteilung erarbeitet und die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen abgeschätzt. Aufgrund der technisch aufwändigen Betankungsinfrastruktur ergeben sich im Vergleich zur direkten Verwendung von Bahnstrom oder fossilem Diesel deutlich erhöhte Kosten für Energie und Infrastruktur. Diese Mehrkosten können aktuell aus regulatorischen Gründen nicht durch Synergien mit Stakeholdern aus dem öffentlichen Verkehr oder der Industrie gesenkt werden. Der Aufbau einer SBB-eigenen Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur wird daher aktuell nicht angestrebt.

Auch die zukünftige Energieversorgung von Baustellen muss klimafreundlich erfolgen. Die Autarkieanforderung der jeweiligen Baustellenanwendung definiert, ob eine batteriestützte oder wasserstoffbasierte Versorgung zu favorisieren ist. Die heute existierenden Batteriesysteme können bereits eine grosse Bandbreite an Bedarfsfällen abdecken. Der Einsatz einer wasserstoffbasierten Versorgung bietet hauptsächlich bei langen Bauphasen mit eingeschränktem Stromnetzzugang Vorteile hinsichtlich der speicherbaren Energiemenge. Aufgrund des begrenzten Tankstellennetzes ist eine effiziente lokale Versorgung einer Baustelle kaum gegeben. Der Einsatz von entsprechenden Stromerzeugern in Tunneln ist zudem aus Arbeitssicherheitsgründen aktuell ausgeschlossen.

Die SBB konnte nach umfangreicher Prüfung aktuell keine zielführenden Anwendungen für einen grossflächigen Einsatz von Wasserstoff identifizieren, die den Aufbau eines eigenen Wasserstoffökosystems rechtfertigen. Die Entwicklung der Wasserstofftechnologie wird weiterverfolgt. Wichtige Grundlagen für den generellen Einsatz von Wasserstoff im Bahnbereich wurden geschaffen, um zukünftige Anwendungen bei sich ändernden Rahmenbedingungen – wie eine vorhandene Tankinfrastruktur, Sicherheitsvorgaben für den Einsatz von Wasserstoff im Tunnel, Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff – zu ermöglichen.

Résumé en français

Aujourd’hui, les véhicules utilisés sur les chantiers dans l’environnement ferroviaire sont généralement des modèles diesel du service des travaux et des groupes électrogènes diesel. Pour atteindre leur objectif d’émission nette nulle d’ici à 2040, les CFF doivent remplacer les carburants fossiles par des sources d’énergie durables comme l’hydrogène. La présente étude propose un aperçu complet des possibilités qu’offre l’hydrogène.

La conversion d’un véhicule moderne du service des travaux en un véhicule électrique a fait l’objet d’un examen approfondi. Trois variantes d’entraînement possibles ont été élaborées. La version ayant obtenu les meilleurs résultats combine une batterie électrique et un pantographe, et présente, de ce fait, une flexibilité de recharge. L’entraînement à l’hydrogène fonctionnant avec une pile à combustible ou un moteur à combustion interne à hydrogène est techniquement réalisable avec certaines restrictions, mais sa mise en œuvre et son homologation est plus complexe. En outre, il dépend d’une infrastructure d’approvisionnement dont les CFF ne disposent pas actuellement. La transformation de véhicules exis-

tants n'est donc pas à l'ordre du jour. En raison des étapes complexes de transformation et d'homologation, les enseignements tirés de l'étude seront uniquement appliqués aux nouveaux appels d'offres, la priorité étant donnée à l'acquisition de véhicules fonctionnant avec une batterie. L'entraînement à l'hydrogène est éventuellement envisageable pour des machines de chantier de grande taille. Les CFF n'exploitent toutefois pas ce type de machines.

Pour que l'hydrogène puisse être utilisé à grande échelle, il faudrait transformer les dépôts de combustibles ou de carburants des CFF. Des scénarios de répartition des stations à hydrogène ont été élaborés et la rentabilité de telles installations a fait l'objet d'une évaluation. L'infrastructure d'approvisionnement étant techniquement complexe, les coûts liés à l'énergie et à l'infrastructure sont nettement plus élevés que ceux induits par le recours direct au courant de traction ou au diesel fossile. Actuellement, la réglementation ne permet pas de réduire ces dépenses supplémentaires en créant des synergies avec des groupes d'intérêt des transports publics ou du secteur industriel. La mise en place d'une infrastructure d'approvisionnement en hydrogène propre aux CFF n'est donc pas souhaitable pour le moment.

À l'avenir, l'approvisionnement énergétique des chantiers devra aussi s'effectuer dans le respect de l'environnement. L'exigence d'autonomie de chaque application de chantier définit s'il faut privilégier un approvisionnement par batteries ou à base d'hydrogène. Les systèmes de batteries existants couvrent d'ores et déjà une grande partie des besoins. Du fait des quantités d'énergie que les systèmes à hydrogène permettent de stocker, le recours à un approvisionnement à base d'hydrogène est particulièrement indiqué lorsque les phases de construction sont longues et que l'accès au réseau électrique est restreint. Le réseau de stations à hydrogène étant limité, il est pour ainsi dire impossible d'assurer un approvisionnement local efficace des chantiers. En outre, pour des raisons liées à la sécurité au travail, l'utilisation de générateurs de courant dans les tunnels est actuellement exclue.

Après un examen approfondi, les CFF n'ont pas pu identifier d'applications axées sur les objectifs pour une utilisation à grande échelle de l'hydrogène qui justifieraient la mise en place de leur propre écosystème hydrogène. Nous allons toutefois continuer à suivre le développement de la technologie à l'hydrogène. D'importantes bases ont été créées pour l'utilisation généralisée de l'hydrogène dans le milieu ferroviaire. Elles permettront de mettre en place des applications futures suivant l'évolution des conditions-cadres générales (existence d'une infrastructure d'approvisionnement, prescriptions de sécurité relatives à l'utilisation de l'hydrogène dans les tunnels, disponibilité d'hydrogène vert).

Executive Summary in English

At present, diesel-powered track maintenance vehicles and diesel generator sets are used on most railway-related construction sites. As part of its "Net Zero 2040" ambition, SBB intends to fully replace fossil fuels with sustainable energy carriers such as hydrogen. The present study provides a comprehensive review of the options for hydrogen power.

The feasibility of electrification of a modern track maintenance vehicle has been the subject of a detailed study. Three potential drive configurations were developed; the battery-electric version with a pantograph was the preferred option due to its flexible charging capability. Hydrogen drive systems based on fuel cells or combustion engines are technically feasible, albeit with certain limitations. However, implementation and approval are more complex for such propulsion systems compared to battery-electric and conventional powertrains. They are also dependent on a fuelling infrastructure that does not currently exist. There are up to now no plans to convert existing vehicles for this reason. Given the extensive work involved in converting vehicles and obtaining certification, the findings of the study will only be used for new tenders, which will focus specifically on the procurement of battery-electric vehicles. Hydrogen-based propulsion might be an option for heavy railway construction machinery not operated by SBB.

SBB's existing fuelling facilities would have to be transformed to make hydrogen widely usable. Hydrogen fuelling facility distribution scenarios were developed and the cost efficiency of such facilities was estimated. Given the technical complexity of the fuelling infrastructure, the energy and infrastructure costs are significantly higher than the costs of making direct use of the catenary line or fossil diesel. At present, regulatory grounds prevent SBB from leveraging synergies with stakeholders in the public transport sector or the industry to set-off these additional costs. SBB does not, therefore, currently intend to set up its own hydrogen fuelling infrastructure.

The power supply to construction sites will also have to be climate-friendly in the future. The self-sufficiency requirements of the construction site application in question determine whether preference should be given to a battery-assisted or hydrogen-based supply. Battery systems that exist today are already capable of meeting a broad spectrum of needs. Due to its energy storage capability, a hydrogen-powered supply system is more advantageous primarily during long construction phases where access to the local energy grid or the catenary line is limited. Given the restricted network of fuelling facilities, an efficient local supply of railway construction sites is largely unfeasible. Furthermore, occupational safety considerations currently rule out the use of hydrogen-powered generators in tunnels.

After extensive investigation, SBB could not identify any useful applications that would be suitable for large-scale hydrogen deployment and justify the creation of its own hydrogen ecosystem. SBB will continue to follow developments in hydrogen technology. Significant progress has been made in laying the groundwork for the general use of hydrogen in the railway sector to enable future applications under changing conditions. These include the availability of an existing refuelling infrastructure, safety requirements for the use of hydrogen in tunnels and the availability of green hydrogen.

Zusammenfassung

Wasserstoff kann als Langzeitspeicher und universeller Grundbaustein für weitere Energieträger eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung der Industrie und des Transportsektors durch den Ersatz fossiler Brennstoffe einnehmen. Das primäre Ziel der vorliegenden Aktivitäten besteht darin, durch das Zusammentragen von Informationen und die erfolgreiche Demonstration im Feld die Grundlagen für den Einsatz von Wasserstoff als Ergänzung zur batterieelektrischen Energieversorgung bei der Bahn und auf Bahnbaustellen zu schaffen.

Ein wesentlicher Teil der Arbeit besteht darin, mögliche Einsatzfelder für Wasserstoff zu erkennen und die damit verbundenen Herausforderungen zu analysieren. Dazu wurden verschiedene Detailstudien durchgeführt. Diese beinhalten die Identifikation der Faktoren und Rahmenbedingungen, die für eine erfolgreiche Umrüstung von Fahrzeugen und Anlagen notwendig sind. Ebenso werden die Anforderungen und Bedingungen beleuchtet, die für eine generelle Umstellung auf Wasserstofftechnologie beachtet werden müssen. Diese umfassen sowohl technische Spezifikationen als auch regulatorische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen.

Die Sicherheit von Wasserstoffsystmen wird oft diskutiert, ist jedoch technologisch gegeben und in vielen, tendenziell unsichtbaren Sektoren, wie der Stahlindustrie und der chemischen Industrie, wird Wasserstoff in grossen Mengen eingesetzt. Bereichsspezifische Regularien für Anwendungen in der Breite wie mobile Maschinen und Energieversorgungen sind noch in Ausarbeitung. Bis diese etabliert sind, dominiert die Unerfahrenheit im Umgang mit dem Thema Wasserstoff, was für die weitere Verbreitung von Wasserstoff hinderlich ist.

Baudienstfahrzeug mit Wasserstoffantrieb

Dieselbetriebene Schienenfahrzeuge der SBB verbrauchen über 11 Millionen Liter Diesel pro Jahr. Baudienstfahrzeuge sind dabei für knapp einen Drittels des Dieselverbrauchs verantwortlich und weisen einen schweizweiten Aktionsradius auf. Der Baudienstraktor Tm 234 Serie 4 ist aktuell das modernste Fahrzeug seiner Art. Zur Abklärung der technischen Möglichkeiten für die Elektrifizierung des Antriebs sowie für die elektrische Energieversorgung des Fahrzeugs mittels Wasserstoff oder Batterien wurde eine umfangreiche Machbarkeitsstudie erstellt, um die technisch-ökonomischen Rahmenbedingungen eines solchen Umbaus genauer zu beleuchten.

Die Arbeiten und Abklärungen im Rahmen der Studie haben gezeigt, dass für den Umbau des Baudienstraktors sowohl eine batterieelektrische Version (BATT), die daraus abgewandelte batterieelektrische Variante mit Oberleitungsunterstützung (BATT-OBL) wie auch eine brennstoffzellenelektrische Antriebsvariante (H_2 -BZ) auf dem Fahrzeug technisch umsetzbar sind und gemäss dem aktuellen Stand der Kenntnisse auch zulassungsfähig sein sollten.

Ein H_2 -BZ-Fahrzeug kann in kürzester Zeit betankt werden. Bei der BATT-Variante ergeben sich nach langen Einsätzen lange Ladezeiten und entsprechende Betriebsunterbrüche. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass nicht jeder Einsatz die komplette Entladung der Batterie verursachen muss und somit die Ladezeit für kürzere Einsätze auch unterhalb einer Stunde liegen kann. Die BATT-OBL-Variante bietet hier entsprechende Vorteile, da diese Konfiguration, abgesehen von der grösstenteils vorhandenen Oberleitung, unabhängig von zusätzlicher Infrastruktur betrieben werden kann. Jedoch ist die Unterbringung der Technik im begrenzten Bauraum des untersuchten Fahrzeugs herausfordernd.

Grundsätzlich bietet sich durch den Einsatz eines Wasserstoff-Verbrennungsmotors die Möglichkeit eines kostengünstigen Fahrzeugumbaus mit einem technisch mehrheitlich bekannten Antriebskonzept. Die Zulassung ist bis auf die Wasserstofftanks vergleichbar mit den Anforderungen eines konventionellen Dieselfahrzeugs. Demgegenüber bestehen aktuell Herausforderungen bei der Integration der Wasserstofftanks in das bestehende Fahrzeug, da diese für mobile Anwendungen voluminös und vergleichsweise schwer sind. Der Bauraum für die Tanks müsste erst geschaffen werden und könnte zu weiteren betrieblichen Einschränkungen führen. Diese Herausforderungen werden mitunter durch die geringe Effizienz der hydraulischen Leistungsverteilung verursacht. Durch eine mögliche Steigerung der Effizienz des Antriebs könnten Motoren und Wasserstofftanks kleiner dimensioniert werden. Zusammen mit der technologischen Entwicklung der Motoren (Effizienzsteigerung) und der Tanksysteme (Gewichtsreduktion) kann deren Integration in die bestehende Struktur in Zukunft ermöglicht werden.

In der Kostenbeurteilung der verschiedenen Konfigurationen schneidet die batterieelektrische Antriebsvariante am kosteneffizientesten ab, wenn man nur das reine Fahrzeug betrachtet. Diese Variante kann jedoch weniger flexibel eingesetzt werden, da sie auf eine lokale kabelgebundene Ladeinfrastruktur angewiesen ist, die zusätzlich errichtet werden muss. Die längeren Standzeiten beim Laden können zu weiteren operativen Kosten führen. Bei der BATT-OBL-Variante fallen die Gesamtkosten aufgrund der

höheren Bauteil- respektive Wartungskosten durch die Stromabnehmer- und Trafo-Installationen etwas höher aus. Diese Variante bietet jedoch deutliche Vorteile hinsichtlich der zusätzlich benötigten Infrastruktur, da auf den kostspieligen Aufbau von stationärer Ladeinfrastruktur verzichtet werden kann. Zudem können höhere Ladeleistungen erzielt werden, was die Standzeit zum Laden der Batterien deutlich verkürzt und Betriebskosten eingespart werden können.

Techno-ökonomisch weist ein wasserstoffbasiertes Antriebssystem aufgrund seiner höheren Komplexität im Vergleich zu einem batterieelektrischen Antrieb erhebliche Nachteile auf. Die Spezifikation und Beschaffung der Fahrzeuge und Infrastruktur ist umfangreicher, und der Betrieb sowie die Wartung sind deutlich aufwändiger. Wird jedoch ein batterieelektrischer Antrieb um einen Stromabnehmer zur Hybridlösung ergänzt, steigt zwar auch hier die Systemkomplexität, jedoch bringt die Möglichkeit der flexiblen elektrischen Nachladung über die Oberleitung entscheidende Vorteile. Diese Hybridlösung bietet dank dem hohen Elektrifizierungsgrad des Schweizer Schienennetzes deutlich mehr Flexibilität und Unabhängigkeit von einer Tankstelleninfrastruktur, was sie im Vergleich zu Diesel- und Wasserstofffahrzeugen effizienter macht. Daher wird diese Antriebstechnologie für zukünftige Beschaffungen als vielversprechend angesehen und entsprechend weiterverfolgt.

Tank- und Ladeinfrastruktur

Der Wandel hin zu neuen Antrieben für die bisher thermisch betriebenen Fahrzeuge wie Rangierloks und Baudienstfahrzeuge muss Hand in Hand mit dem Wandel der Tankstelleninfrastruktur erfolgen, sofern der aktuelle Dieseltreibstoff durch Wasserstoff ersetzt wird. In welche Richtung sich zukünftige Fahrzeuge entwickeln (Batterie, Oberleitung, Hybrid, Wasserstoff) wird die Geschwindigkeit und Art des Wandels bestimmen.

Der Aufbau von Wasserstofftankstellen für Schienenfahrzeuganwendungen ist zum einen mit hohen Investitionskosten verbunden und zum anderen sind in Gleisnähe entsprechende Freiflächen für die Technik und zugehörige Wasserstofflogistik erforderlich. Dies ist besonders in bereits dicht genutzten Arealen herausfordernd. Zudem ist die Rentabilität eines für den Eigenbedarf der SBB aufgebauten Wasserstofftankstellennetzes nicht gegeben. Um die Rentabilität sicherzustellen, müsste eine Mehrfachnutzung durch Strassen- und Schienenfahrzeuge ermöglicht werden. Dazu müsste der Zugang zur Bahninfrastruktur für Dritte geschaffen werden. Allerdings verhindern aktuell regulatorische Vorgaben Synergien mit dem öffentlichen Verkehr oder mit der Industrie, wenn der dort verwendete Wasserstoff aus subventionierter Energie produziert wird.

Baustellenenergieversorgung

Die Umstellung auf rein elektrische Geräte und Maschinen bringt auf Baustellen eine komplexere Energielogistik mit sich. Der Transport und die Bereitstellung von grossen Batterien oder Wasserstofftanks sind anspruchsvoller als das bisherige Betanken von Dieselgeneratoren. Vor allem Wasserstoff, der unter hohem Druck gelagert und transportiert werden muss, erfordert zusätzliche Sicherheitsmassnahmen und technische Lösungen. Je nach Baustellentyp und -dauer sind grössere und leistungsfähigere Energiespeicher nötig. Entsprechende Batteriesysteme müssen über längere Zeiträume hinweg zuverlässige Energie liefern, was höhere Kapazitäten und damit grössere und schwerere Speicher erfordert. Diese Entwicklung könnte die Flexibilität und Mobilität auf Baustellen beeinträchtigen und muss bei der Planung berücksichtigt werden.

Trotz der komplexeren Energieversorgung mit Wasserstoff könnte dieser auf Baustellen in bestimmten Fällen Vorteile bieten. Ein grosses, zentrales Wasserstoffspeichersystem, das regelmässig ausgetauscht respektive in einem Depot befüllt wird, könnte eine mögliche Lösung darstellen, ähnlich wie die bisherigen Dieseltanks auf Baustellen. Diese Art der Versorgung wäre vor allem für schwere Maschinen und lange Einsätze sinnvoll, bei denen Batterien möglicherweise an ihre Grenzen stossen. Allerdings wird auch hier die Flexibilität auf der Baustelle eingeschränkt.

Der aktuelle Vergleich der Technologien auf Basis neutraler technooökonomischer Analysen zeigt Lösungsansätze für den breiteren Einsatz von Batterien. Die heute verfügbaren Systeme können bereits eine Vielzahl von Einsatzbereichen abdecken. Für einige wenige Spezialfälle werden jedoch weiterhin Alternativen benötigt. Hier könnte ein H₂-Genset als mögliche Option betrachtet werden. Es ist jedoch wichtig zu erwähnen, dass wasserstoffbasierte Systeme derzeit für Tunnelarbeiten aufgrund der regulatorischen Vorgaben hinsichtlich Arbeitssicherheit noch nicht eingesetzt werden können und die Grundlagen hierfür zuerst weiterentwickelt werden müssen.

Die Elektrifizierung von Kleingeräten stellt eine weitere Herausforderung dar. Während Batterien für diese Geräte eine praktikable Lösung darstellen, ist die Anwendung von Wasserstoff hier deutlich komplexer. Die Infrastruktur für Wasserstoffbetankung und die Integration von Brennstoffzellen in kleine,

mobile Geräte sind technologisch anspruchsvoll und kostenintensiv. Daher werden sich Batterien für Kleingeräte weiter durchsetzen, während Wasserstoff lediglich für grossformatige Sonderanwendungen wie Gleisbaumaschinen in Betracht gezogen werden könnte.

Insgesamt zeigt sich, dass die Umstellung auf alternative Energieträger sowohl technologische als auch logistische Herausforderungen mit sich bringt. Die Vorteile liegen dabei klar bei batterieelektrischen Optionen. Die Wahl zwischen Batterien und Wasserstoff wird jedoch stark von der spezifischen Anwendung und den betrieblichen Anforderungen beeinflusst. Zur Koordination der Aktivitäten könnte die SBB als Kompetenzzentrum fungieren und als zentraler Ansprechpartner sowie Wissensvermittler die Einführung von Wasserstoff in relevante Bereiche vereinfachen. Dies mit dem Ziel, zukünftige Entwicklungen zu fördern und das Wissen zu Wasserstoff zentral zu bündeln.

Synthèse

En tant que stockage à long terme et module de base universel pour d'autres sources énergétiques, l'hydrogène peut jouer un rôle clé dans la décarbonisation de l'industrie et du secteur des transports en remplaçant les combustibles fossiles. L'objectif premier des présentes recherches consiste, via la collecte d'informations et la démonstration réussie sur le terrain, à créer les bases pour l'utilisation de l'hydrogène comme complément à l'approvisionnement énergétique par batterie électrique pour les trains et sur les chantiers ferroviaires.

Une partie essentielle du travail réside dans l'identification de champs d'application possibles pour l'hydrogène et dans l'analyse des défis liés. Plusieurs études menées à cet effet détaillent l'identification des facteurs et des conditions-cadres nécessaires pour convertir efficacement les véhicules et les installations. Elles mettent également en lumière les exigences et conditions à prendre en compte dans l'optique d'une conversion généralisée à la technologie de l'hydrogène. Il s'agit de spécifications techniques et de conditions-cadres réglementaires et économiques.

La sécurité des systèmes à hydrogène fait souvent l'objet de discussions, mais elle est technologiquement acquise. L'hydrogène est d'ailleurs utilisé en grande quantité dans de nombreux secteurs traditionnellement peu exposés comme la sidérurgie ou l'industrie chimique. Des réglementations spécifiques à certains domaines sont en cours d'élaboration pour des applications à grande échelle telles que les machines mobiles et l'approvisionnement énergétique. En attendant, le manque d'expérience concernant l'hydrogène prédomine, ce qui représente un obstacle à son déploiement.

Véhicule à hydrogène du service des travaux

Les véhicules ferroviaires des CFF roulant au diesel consomment annuellement plus de 11 millions de litres de diesel. Les véhicules du service des travaux sont responsables de près d'un tiers de la consommation de diesel et leur rayon d'action couvre toute la Suisse. Le tracteur du service des travaux Tm 234 série 4 constitue à l'heure actuelle le véhicule le plus moderne de ce type. Afin de clarifier les possibilités techniques d'électrification de l'entraînement et d'approvisionnement énergétique électrique du véhicule au moyen d'hydrogène ou de batteries, une vaste étude de marché a été menée visant à préciser les conditions-cadres technico-économiques d'une telle transformation.

Les différents travaux et clarifications réalisés dans le cadre de cette étude ont montré que, pour la transformation du tracteur du service des travaux, une version avec batterie électrique (BATT), une variante modifiée avec batterie électrique et assistance via la ligne de contact (BATT-OBL), ainsi qu'une variante d'entraînement électrique avec pile à combustible (H₂-BZ) sont toutes techniquement possibles sur le véhicule et, selon l'état actuel des connaissances, susceptibles d'obtenir l'homologation.

La recharge d'un véhicule H₂-BZ s'effectue rapidement. Dans le cas de la variante BATT, une utilisation prolongée du véhicule entraîne une durée de charge plus longue et, par conséquent, des interruptions d'exploitation. Il convient toutefois de noter que la batterie n'est pas nécessairement entièrement déchargée à chaque utilisation et que la durée de charge peut donc être inférieure à une heure lors d'interventions courtes. La variante BATT-OBL offre certains avantages, car l'exploitation de cette configuration ne nécessite pas d'infrastructure supplémentaire, si l'on fait abstraction de la ligne de contact le plus souvent déjà disponible. Cependant, la difficulté réside dans l'intégration de la technologie dans l'espace limité du véhicule considéré.

En principe, le recours à un moteur à combustion interne à hydrogène permet de transformer le véhicule à peu de frais grâce à un concept technique d'entraînement largement reconnu. L'homologation est comparable aux exigences posées à un véhicule diesel conventionnel, à l'exception des réservoirs d'hydrogène. En revanche, l'intégration de ces réservoirs d'hydrogène dans le véhicule existant pose actuellement des défis, car ils sont volumineux et relativement lourds pour les utilisations mobiles. Il faudrait faire de la place pour y installer le réservoir, ce qui pourrait occasionner des restrictions d'exploitation supplémentaires. Ces complications sont parfois dues à la faible efficacité de la distribution de la puissance hydraulique. Une amélioration de l'efficacité de l'entraînement permettrait de réduire la taille du moteur et du réservoir d'hydrogène. La combinaison de l'évolution technologique des moteurs (amélioration de l'efficacité) et des systèmes de réservoir (réduction du poids) devrait à l'avenir faciliter l'intégration de ces éléments dans la structure actuelle.

L'évaluation des coûts des différentes configurations place la variante d'entraînement à batterie électrique comme la plus intéressante sur le plan économique, à condition de considérer uniquement le véhicule. Cette variante présente toutefois un manque de flexibilité au niveau de l'utilisation, car elle nécessite la construction d'une infrastructure locale de recharge à câble. Par ailleurs, les temps d'immobilisation prolongés pour recharger le véhicule sont susceptibles de générer des coûts opérationnels

supplémentaires. S'agissant de la variante BATT-OBL, les coûts totaux sont un peu plus élevés en raison des frais plus importants liés aux composants et à la maintenance du pantographe et du transformateur. Néanmoins, cette variante offre un avantage indéniable sur le plan de l'infrastructure supplémentaire nécessaire, puisqu'il n'est nul besoin d'une station fixe de recharge onéreuse. En outre, elle permet d'obtenir des puissances de charge plus élevées, ce qui écourt nettement la durée d'immobilisation pendant la recharge des batteries et réduit les coûts d'exploitation.

D'un point de vue technico-économique, un système d'entraînement à base d'hydrogène présente des inconvénients majeurs en raison de sa plus grande complexité par comparaison à un système d'entraînement à batterie électrique. La spécification et l'acquisition des véhicules et de l'infrastructure sont plus complexes, et l'exploitation ainsi que la maintenance sont nettement plus exigeantes. En associant un entraînement à batterie électrique à un pantographe pour former une solution hybride, on augmente certes la complexité du système, mais la possibilité de recharge électrique flexible via la ligne de contact apporte des avantages déterminants. En effet, grâce au degré d'électrification élevé du réseau ferroviaire suisse, cette solution hybride offre une grande flexibilité ainsi que l'autonomie d'une infrastructure d'approvisionnement, ce qui la rend plus efficace par rapport à des véhicules fonctionnant au diesel ou à l'hydrogène. C'est pourquoi cette technologie d'entraînement s'annonce-t-elle prometteuse pour les acquisitions futures. Par conséquent, son développement mérite d'être suivi.

Infrastructure d'approvisionnement et de recharge

La conversion aux nouveaux entraînements pour les véhicules actuels à moteur thermique tels que les locomotives de manœuvre et les véhicules du service des travaux doit se dérouler en même temps que la transformation de l'infrastructure d'approvisionnement, dans la mesure où le carburant diesel utilisé actuellement est remplacé par de l'hydrogène. La rapidité et le type de la transformation détermineront l'évolution que connaîtront les véhicules à l'avenir (batterie, ligne de contact, système hybride, hydrogène).

La construction de stations à hydrogène destinées aux applications pour véhicules ferroviaires entraîne, d'une part, des coûts d'investissement élevés et nécessite, d'autre part, des surfaces disponibles à proximité des voies pour accueillir la technique et la logistique liée à l'hydrogène. Ce dernier point relève du défi dans les zones présentant déjà une forte densité de constructions. Qui plus est, la rentabilité d'un réseau de stations à hydrogène mis en place pour les besoins propres des CFF n'est pas garantie. Pour cela, il faudrait faire en sorte que les stations soient compatibles avec les véhicules routiers et ferroviaires et aménager des accès à l'infrastructure ferroviaire pour des tiers. Cependant, les prescriptions réglementaires actuelles empêchent les synergies avec les transports publics ou l'industrie si l'hydrogène utilisé sur les sites concernés provient d'énergie subventionnée.

Approvisionnement énergétique des chantiers

Le passage à l'utilisation exclusive d'appareils et machines électriques est synonyme de logistique énergétique plus complexe sur les chantiers. Le transport et la mise à disposition de batteries ou de réservoirs d'hydrogène de grande taille sont plus compliqués que le processus actuel d'approvisionnement des générateurs diesel. L'hydrogène, en particulier, qui doit être stocké et transporté sous haute pression, nécessite la mise en place de mesures de sécurité et de solutions techniques complémentaires. Selon le type de chantier et la durée des travaux, il convient de recourir à des installations de stockage d'énergie plus grandes et plus puissantes. Les systèmes de batteries correspondants doivent être en mesure de fournir de manière fiable de l'énergie sur des périodes plus longues, ce qui est lié à des capacités plus importantes et exige donc des installations de stockage plus grandes et plus lourdes. Ces paramètres susceptibles de restreindre la flexibilité et la mobilité sur les chantiers doivent être pris en compte dans la planification.

Malgré la complexité accrue de l'approvisionnement énergétique en hydrogène, il se pourrait que ce dernier soit, dans certains cas, plus avantageux sur les chantiers. Un grand système centralisé de stockage d'hydrogène, régulièrement remplacé ou rempli dans un dépôt, pourrait constituer une solution envisageable, similaire aux réservoirs diesel utilisés actuellement sur les chantiers. Ce type d'approvisionnement serait surtout indiqué pour les machines lourdes et les longues interventions, qui sollicitent fortement les batteries. Toutefois, la question de la flexibilité restreinte sur le chantier se pose ici aussi.

La comparaison actuelle des technologies sur la base d'analyses technico-économiques neutres fait apparaître des pistes de solutions pour une utilisation plus large des batteries. Les systèmes disponibles aujourd'hui couvrent d'ores et déjà un grand nombre de domaines d'application. Des alternatives restent néanmoins nécessaires dans quelques cas spécifiques. Un H₂-Genset pourrait par exemple constituer une option acceptable. Il convient toutefois de mentionner que les systèmes à base d'hydrogène ne

peuvent pas encore être utilisés pour les travaux dans les tunnels en raison des prescriptions réglementaires en matière de sécurité au travail et que les bases en ce sens doivent d'abord être élaborées.

L'électrification des petits appareils n'en est pas moins un défi. Si les batteries constituent une solution viable pour ce type d'appareils, l'utilisation d'hydrogène est nettement plus compliquée. L'infrastructure d'approvisionnement en hydrogène et l'intégration de piles à combustible dans de petits appareils mobiles sont technologiquement ambitieuses et très coûteuses. Aussi les batteries resteront-elles la norme pour les petits appareils, alors que le recours à l'hydrogène pourra être considéré exclusivement pour les applications spéciales de grande envergure telles que les machines de chantier.

Dans l'ensemble, il apparaît que le passage à des sources d'énergie alternatives s'apparente à un défi autant sur le plan technologique que logistique. Les différents arguments penchent clairement en faveur des options à batterie électrique. Le choix entre les batteries et l'hydrogène est toutefois fortement influencé par l'application spécifique et les exigences opérationnelles. Pour coordonner les activités, les CFF pourraient faire office de centre de compétences et, en leur qualité d'interlocuteur central et de diffuseur de connaissances, faciliter l'introduction de l'hydrogène dans les secteurs pertinents. Ceci dans le but de promouvoir les évolutions futures et de centraliser les connaissances sur l'hydrogène.

1 Ausgangslage

1.1 Dekarbonisierung des Verkehrssektors

Die Schweiz hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2050 Netto-Null-Emissionen zu erreichen. Dies bedeutet, dass die Treibhausgasemissionen so weit wie möglich zu reduzieren sind und die verbleibenden Emissionen durch geeignete Massnahmen kompensiert werden müssen. [1]

Die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) tragen im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln nur einen kleinen Teil zu den CO₂-Emissionen bei. Dank der weitgehenden Elektrifizierung des Schienennetzes und dem Einsatz von erneuerbaren Energien ist der Schienenverkehr in der Schweiz wesentlich umweltfreundlicher als der Strassen- oder Luftverkehr, die hauptsächlich auf fossilen Energieträgern basieren. [2]

Gemäss dem Klima- und Innovationsgesetz müssen bundesnahe Unternehmen wie die SBB bereits bis 2040 ihre direkten Emissionen im sogenannten Scope 1 sowie die indirekten Emissionen im Scope 2 vollständig eliminieren. Gemäss Begleitstudien des Projekts «BAHN 2050» können die grössten Reduktionen durch den Ersatz fossiler Gebäudeheizungen sowie die Umrüstung und Neubeschaffung von Dieselschienenfahrzeugen erzielt werden. [3] Aufgrund des hohen Elektrifizierungsanteils von über 99 Prozent ist bei der SBB aktuell lediglich ein kleiner Anteil an Rangier-, Bau- oder Spezialfahrzeugen auf Dieseltreibstoff angewiesen, welche über neue Antriebstechnologien dekarbonisiert und mit erneuerbarer Energie betrieben werden müssen. Neben erneuerbarem Strom kann die Verwendung von nachhaltig erzeugtem Wasserstoff einen Beitrag für das Erreichen des Netto-Null-Zieles leisten.

Im Thesenpapier des Bundesamts für Energie von 2022 wird empfohlen, dass Wasserstoff nur dort verwendet werden soll, wo erneuerbarer Strom nicht direkt genutzt werden kann. [4] Ein wesentlicher Grund für diese Empfehlung sind die signifikanten Umwandlungsverluste, die bei der Erzeugung von Wasserstoff auftreten. Zudem ist die Erzeugungsart entscheidend für die Beurteilung der Nachhaltigkeit und ob bei der Nutzung dieses Wasserstoffs eine effektive Dekarbonisierung stattfindet. Die Einteilung in grünen, blauen, türkisen oder grauen Wasserstoff dient dazu, die Herstellungsarten und letztlich das Mass der Klimawirkung des entsprechend erzeugten Wasserstoffs zu unterscheiden, wobei nur der grüne Wasserstoff als klimafreundlich erachtet werden kann. Aktuell wird jedoch fast ausschliesslich grauer Wasserstoff hergestellt und industriell genutzt. [5]

Der Transportsektor ist für den Wasserstoffmarkt derzeit eher unbedeutend. [6] Der Verbrauch von Industrie und Raffinerien im Speziellen übersteigt den prognostizierten Bedarf des Transportsektors bis 2030 um ein Vielfaches. Dabei sind die Raffinierung von Rohöl, die Ammoniak- und Methanol-Produktion in der chemischen Industrie sowie die Direktreduktion von Eisen in der Stahlindustrie die wichtigsten Nutzungsfelder des Wasserstoffs. [7]

1.2 Potenziale des Wasserstoffs im Bahnbereich

Zur Dekarbonisierung fossiler Antriebe stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, welche die technische Reife für einen grossflächigen Einsatz besitzen. Jedoch bietet jede dieser Optionen auch eigene Herausforderungen, die genauer evaluiert und einander gegenübergestellt sowie bewertend verglichen werden müssen. Hinsichtlich der grossen Ersatzbeschaffungen der dieselbetriebenen Rangier- und Baustellenfahrzeuge mussten die nötigen Evaluierungen technologieneutral durchgeführt werden.

Die SBB hat dazu verschiedene Programme gestartet, um die nötigen Grundlagen für den Einsatz neuer Energieträger und Antriebe zu erarbeiten. Neben alternativen Treibstoffen wie HVO-Biodiesel für die Umsetzung kurzfristiger Dekarbonisierungsmassnahmen wurden auch längerfristige Massnahmen wie Batterie- und Wasserstoffsysteme im Detail untersucht. Bereits im Jahr 2017 wurde das Potenzial von Wasserstoff identifiziert und entsprechende Aktivitäten wurden aufgenommen.

Untersuchungen im Bereich der Wasserstoffproduktion und -nutzung sind für die SBB aus mehreren Gründen relevant. Erstens wird das Bahnnetz in der Schweiz zu über 90 Prozent mit erneuerbarer Energie aus Wasserkraft gespeist [8], wodurch die Produktion von grünem Wasserstoff innerhalb des Netzes generell möglich ist. Für die Nutzung des Wasserstoffs müsste neben den erforderlichen Fahrzeugbeschaffungen auch das bestehende Tankstellennetz umgebaut werden. Zudem würde eine entsprechende Infrastruktur die Chance bieten, allfällige überschüssige Energie in Form von Wasserstoff zu speichern. Auch die Sektorenkopplung wäre denkbar, indem der Wasserstoff in anderen Bereichen des öffentlichen Verkehrs eingesetzt werden könnte. Unabhängig vom Eigenbedarf muss der Transport von Wasserstoff sowohl innerhalb der Schweiz als auch grenzüberschreitend sichergestellt werden, um eine breite Verfügbarkeit für verschiedene Anwendungen zu sichern.

Die Kombination der verschiedenen Handlungsfelder für Wasserstoff im Bahnbereich würde grundsätzlich die Schaffung eines Wasserstoff-Ökosystems ermöglichen, das alle Aspekte von der Produktion bis zur Nutzung abdeckt und eine ideale Nutzung von Synergieeffekten ermöglicht. Für eine ganzheitliche Evaluierung eines solchen Ökosystems sind jedoch umfangreiche Grundlagen nötig.

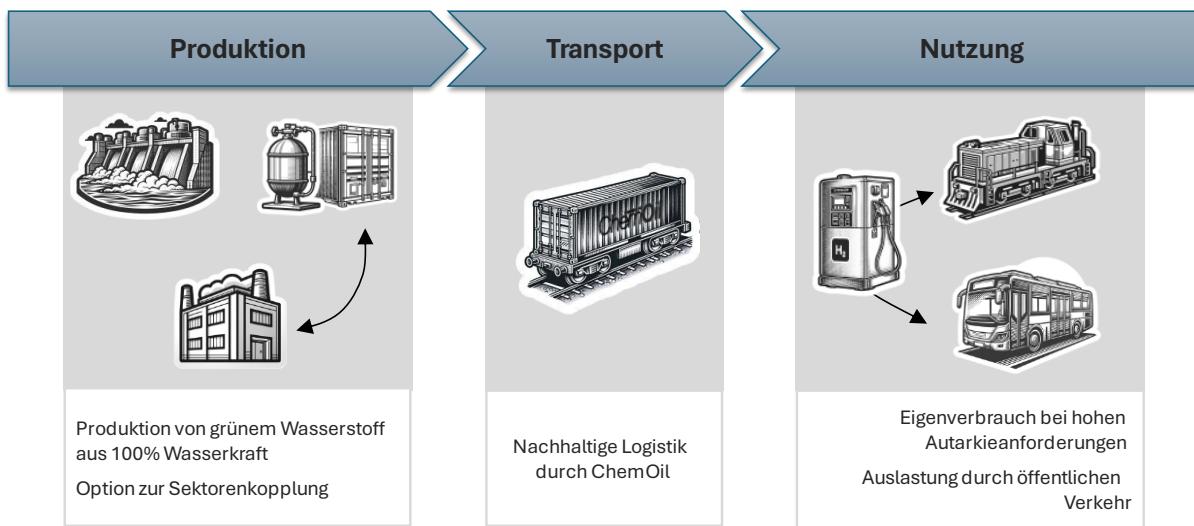


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines angedachten SBB-H₂-Ökosystems.

2 Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist es, das Programm «Energiestrategie im öffentlichen Verkehr 2050» des BAV zu unterstützen, indem eine umfassende Analyse zum Einsatz von Wasserstoff im Schienenverkehr erarbeitet wird. Ein wesentlicher Teil der Arbeiten bestand darin, mögliche Einsatzfelder für Wasserstoff zu erkennen, die damit verbundenen Aspekte und Herausforderungen zu analysieren und so für die SBB und die Branche eine klare Einordnung von Wasserstoff im Bahnumfeld zu ermöglichen. Dies beinhaltet die Identifikation der Faktoren und Rahmenbedingungen, die für eine erfolgreiche Umrüstung von Fahrzeugen, deren Tankanlagen und der zugehörigen Wasserstofflogistik notwendig sind. Dies umfasst sowohl technische Spezifikationen als auch regulatorische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden verschiedene Detailaspekte in mehreren Teilpaketen beleuchtet.

Einen zentralen Punkt spielten dabei die Abklärungen zur Transformation des bestehenden Dieseltankstellennetzes zu einer zukunftsorientierten Lade- und Tankinfrastruktur, die den effizienten Einsatz von Wasserstoff ermöglichen soll. Dabei wurde auch ein besonderes Augenmerk auf den Energiebedarf auf Baustellen gelegt, um im Unterhalt der Bahninfrastruktur ebenfalls eine verlässliche und nachhaltige Energieversorgung sicherzustellen.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Arbeit war die Prüfung der Umrüstung eines Baudienstfahrzeugs. In diesem Zusammenhang wurde die Nutzung eines Wasserstoff-Brennstoffzellenantriebs untersucht, wobei auch Aspekte des Wasserstoff-Verbrennungsmotors als Antriebsvariante aufgegriffen wurden. Die Untersuchung umfasste sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte, um die Praxistauglichkeit und die Effizienz einer solchen umfassenden Umrüstung zu gewährleisten. Durch erweiterte regulatorische Abklärungen im Rahmen eines fiktiven Zulassungskonzepts mit Behörden und Industrieverttern soll die Grundlage für die Anwendung dieser Technologie geschaffen werden.

Neben diesen mehrheitlich theoretischen Betrachtungen wurde zudem ein Demonstrator zur wasserstoffbasierten Baustellenenergieversorgung erprobt. Dieses Demonstrationsprojekt dient dazu, die praktische Anwendung und die Vorteile von Wasserstoff auf Baustellen zu veranschaulichen.

Ergänzend zu den aufgeführten Kernfragestellungen wurden im Zusammenhang mit einem allfälligen Wasserstoff-Ökosystem weitergehende Fragestellungen in Nebenprojekten erarbeitet, deren Ergebnisse auch in die Gesamtbeurteilung eingeflossen sind.

- Studie mit Pilotanwendung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) mit einer Brennstoffzelle als Energieerzeuger zur Versorgung eines Bahntechnikgebäudes der SBB.
- Untersuchung zur Sektorenkopplung einer PV-Anlage, einer Wasserstofferzeugung und deren Anbindung an das Bahnstromnetz.
- Abklärungen zum Transport von Wasserstoff mit der Bahn.
- Prüfung von Synergieeffekten bei der Wasserstoffbetankung an Bahnhöfen.
- Erarbeitung einer Machbarkeitsstudie zur Brechung von Leistungsspitzen einer Tunnellüftung in Kombination mit einer lokalen Wasserstoffproduktion.
- Kompatibilitätsprüfung der Erdgas-Weichenheizungen mit Erdgaswasserstoffgemischen.
- Mitarbeit der SBB im Sounding-Board des BFE zur Erarbeitung einer Wasserstoffstrategie für die Schweiz.

Mit dieser Kombination von theoretischen Untersuchungen, Abklärungen mit Industrie und Ämtern und praktischen Demonstrationen soll ein umfassendes Verständnis der Möglichkeiten und Herausforderungen im Einsatz von Wasserstoff im Bahnbereich entwickelt werden, woraus sich zum einen umfangreiche Erkenntnisse rund um das Wasserstoff-Ökosystem und zum anderen Handlungsempfehlungen für den Schienenverkehr in der Schweiz ableiten lassen.

3 Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

Um die Umsetzbarkeit einer Wasserstoffinfrastruktur als Ergänzung zur batterieelektrischen Energieversorgung aufzuzeigen, müssen sowohl die Verbraucherseite, also Fahrzeuge und Anlagen, als auch die Angebotsseite wie Tankstellen respektive die Energiebereitstellung genauer beleuchtet werden. Ein Vergleich des aktuellen Stands der Technik deutet darauf hin, dass Wasserstoffsysteme generell grösser und komplexer ausfallen als batterieelektrischen Systeme. In Kombination mit potenziell höheren Kosten, einer möglichen Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzung und Vibrationen sowie der Abhängigkeit von einer Wasserstoffversorgungsinfrastruktur sind die möglichen Anwendungsfelder im Detail zu prüfen.

Im Rahmen unterschiedlicher Arbeitspakete wurden zur genaueren Beurteilung Grundlagenaspekte erarbeitet. Diese reichen vom Vergleich des Wasserstoffs mit anderen Energieträgern über Top-Down-Treibstoffbedarfsanalysen verschiedener Fahrzeugtypen bis hin zu Bottom-Up-Umbau- und Betriebskostenabschätzungen für ein Baudienstfahrzeug. Begleitet werden diese Untersuchungen durch konsequente Risikobetrachtungen, die speziell für den Feldeinsatz eines Demonstrators für die wasserstoffbasierte Energiebereitstellung für eine Baustelle von grossem Stellenwert sind.

Zu den erarbeiteten Arbeitspaketen wurden umfangreiche Einzelberichte erstellt. Auf die wichtigsten Aspekte dieser Grundlagen und den angewendeten Methoden wird in diesem Bericht eingegangen. Weiterführende Informationen sind in den entsprechenden Einzelberichten aufgeführt. [9], [10], [11]

3.1 Konzeption der Umrüstung eines Baudienstfahrzeugs

Zur Abklärung der technischen Möglichkeiten für die Elektrifizierung des Antriebs eines Baudienstfahrzeugs sowie für die elektrische Energieversorgung des Fahrzeugs mittels Wasserstoff oder Batterien wurde eine umfangreiche Machbarkeitsstudie erstellt. Zusätzlich wurde eine Antriebsvariante mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor in die Betrachtungen miteinbezogen. Das Ziel war es aufzuzeigen, welche verschiedenen alternativen Antriebe im Falle eines Umbaus des Fahrzeugs, einem sogenannten Refit, unter Berücksichtigung der technischen und ökonomischen Randbedingungen umgesetzt werden können. Als zu untersuchendes Fahrzeug wurde der modernste Baudienstraktor der SBB, der Tm 234 Serie 4, gewählt, da dieses Fahrzeug umfassend dokumentiert ist. Die Umrüstung des Baudienstrektors wurde nie in Betracht gezogen, da das Fahrzeug erst vor kurzem eingeführt wurde.

In einer ersten Grobauslegungsphase wurde untersucht, ob der zur Verfügung stehende Bauraum die Integration eines batterieelektrischen oder eines brennstoffzellenelektrischen Antriebs grundsätzlich ermöglicht. Dies unter Berücksichtigung der bestehenden Anforderungen an Dauer- und Spitzenleistung sowie Autonomie des aktuellen Fahrzeugs. Mithilfe von Lastprofilanalysen und Bauraumuntersuchungen konnten die dimensionierenden Parameter bestimmt werden.

In einem zweiten Schritt wurden die umsetzbaren Konzeptentwürfe hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit weiter analysiert mit dem Ziel, Antriebsvarianten mit Umsetzungspotenzial zu identifizieren. Ausgehend von einer detaillierten Antriebsauslegung und spezifischen Komponentenevaluationen wurden technisch umsetzbare Konfigurationen abgeleitet.

In einem dritten Schritt wurde die Wirtschaftlichkeit eines Fahrzeugumbaus geprüft mit dem Ziel, die Kosten eines regulären Refits mit einem umfangreicheren Antriebsumbau zu vergleichen. Als Resultat wurde eine Beurteilung der verschiedenen Umsetzungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung der Umsetzungsrisiken und ersten Zulassungsabklärungen erstellt.

3.1.1 Bestimmung des Energiebedarfs eines alternativen Antriebssystems

Die Methodik zur Bestimmung des Energiebedarfs eines alternativen Antriebssystems und der Energieflüsse in den Fahrzeugsystemen basiert auf der Rückwärtsberechnung des Leistungsflusses. [12]

Dabei werden bestehende Daten wie Dieselverbräuche und aufgezeichnete Antriebsleistungen zur Berechnung des mechanisch anfallenden Leistungs- respektive Energiebedarfs verwendet. Sind die abzugebenden Leistungen bestimmt, können über Wirkungsgradannahmen (qualifizierte Annahmen oder Werte aus Datenblättern) der Subsysteme die Energiebedarfsmengen für die alternative Energiezufuhr berechnet werden.

Diese Methodik kommt auch im Mobilitätsbereich zur Anwendung. Der wichtigste Unterschied zu anderen Fahrzeugen wie Autos besteht jedoch darin, dass neben dem Radantrieb auch der Antrieb des hydraulischen Arbeitssystems berücksichtigt werden muss. Bei mobilen Maschinen würde eine Analyse des Antriebsstrangs selbst durch eine typische Simulation der Fahrzeuglängsdynamik auf der Grund-

lage von Geschwindigkeit und Steigung nur die Fahreinsätze (Rangieren, Materialüberführung) berücksichtigen. Bei mobilen Maschinen werden jedoch häufig die Arbeitshydraulik und der Antriebsstrang gleichzeitig verwendet. Im Fall des Tm 234 Serie 4 kann man als Beispiel den gleichzeitigen Betrieb der Kranhydraulik und die langsame Fahrt des Fahrzeugs beim Be- und Entladen nennen.

3.1.2 Kostenschätzung für Umbau und Betrieb

Im Rahmen der Umrüstungsstudie wurden lediglich die direkt das Fahrzeug betreffenden ökonomischen Aspekte betrachtet und weitere technische Rahmenbedingungen zur Bewertung der Total Cost of Ownership (TCO) festgelegt, wobei der Fokus auf den Umrüstungs- und Betriebskosten lag.

Zusätzliche Aufwendungen wie die Infrastruktur (Aufbau von Energieversorgungsinfrastruktur, Umrüstung von Werkstätten, Spezialwerkzeug) wurden nicht im Detail erläutert und nicht in die Kostenaufstellung aufgenommen. Diese müssen an anderer Stelle betrachtet werden.

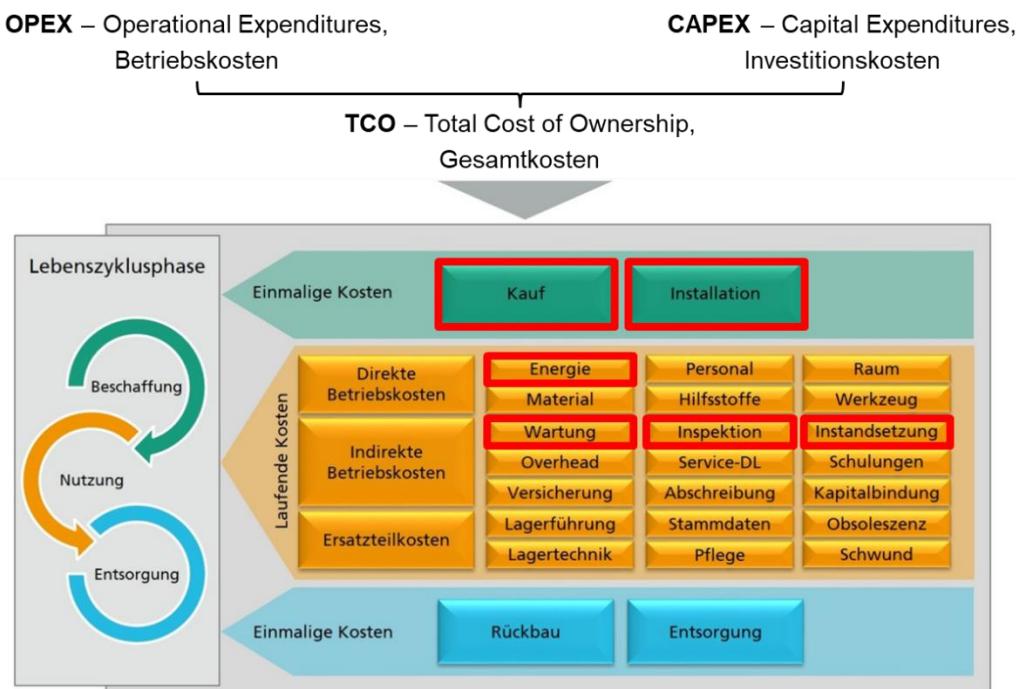


Abbildung 2: Übersicht der Zusammensetzung der TCO einer Anlage. Für die Bewertung der Umrüstungs- und Betriebskosten wurden für diese Studie nur die rot eingerahmten Bereiche betrachtet (adaptierte Darstellung aus [13]).

Die erstellten Kostenschätzungen setzen sich zusammen aus den Beschaffungs- respektive Umbaukosten der Fahrzeuge (CAPEX) und den Betriebskosten für 25 Jahre Betrieb (OPEX). Zur Ermittlung dieser Kosten wurde der Aufwand für die Entwicklung, Umsetzung und Zulassung eines Prototyps in verschiedenen Detailstufen abgeschätzt. Aus den Prototypenkosten wurden – unter Berücksichtigung von Erfahrungsgewinn und Mengenrabatten – die Umbaukosten für die restlichen Fahrzeuge abgeleitet. Die Betriebskostenabschätzung setzt sich hauptsächlich aus Wartungs- und Instandhaltungskosten und den Treibstoff- respektive Energiekosten zusammen. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten wurden aus bisherigen Erfahrungswerten der dieselbetriebenen Fahrzeuge abgeleitet, wobei die sich verändernden Aufwände aufgrund der geänderten Antriebstechnologie berücksichtigt wurden (Mehr- und Minderkosten). Zur Bestimmung der Energiekosten wurden die zuvor ermittelten Energiebedarfswerte als Basis verwendet.

3.2 Projektion von Wasserstofftankanlagen der SBB

Um den Übergang zu alternativen Antriebstechnologien zu unterstützen, müssen die bestehenden Dieseltankanlagen durch moderne Wasserstofftankanlagen beziehungsweise Ladeinfrastrukturen für Batteriefahrzeuge ersetzt werden. Um diese Transformation zu analysieren und die damit verbundenen Herausforderungen zu identifizieren, wurde eine Studie zur Lade- und Tankinfrastruktur der SBB durchgeführt.

Ziel der Studie war es, neben den technischen und finanziellen Aspekten dieser Transformation auch die Standortfaktoren für die Lade- und Tankanlagen zu beurteilen. Wasserstofftankstellen und Ladeinfrastrukturen müssen strategisch so platziert sein, dass sie eine optimale Erreichbarkeit für Nutzer gewährleisten und dabei auch rentabel betrieben werden können. Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Datenanalysen zur aktuellen Nutzung der heutigen Dieseltankstellen und des Dieserverbrauchs durchgeführt. Aus diesen Analysen wurde unter Einbezug von Optimierungsalgorithmen die Projektierung der möglichen Wasserstofftankanlagen vorgenommen.

Eine solche Transformation führt zudem zu organisatorischen Veränderungen. Bestehende Sicherheitsstandards müssen allenfalls neu definiert und entsprechende Schulungen für Nutzer und Personal durchgeführt werden. Auch diese Aspekte wurden in die Studie aufgenommen.

3.2.1 Grundsätze der Wasserstoff-Betankung

Für stationäre Wasserstofftankstellen gibt es verschiedene Möglichkeiten von Systemkonfigurationen, die hauptsächlich durch die Art der Wasserstoffbereitstellung definiert sind. Im Rahmen der Studien wurden hauptsächlich die Varianten mit komprimiertem, gasförmigem Wasserstoff (CGH_2) betrachtet, da die dazugehörige Tankstellentechnologie bereits in der Breite umgesetzt wird. Hier kann der Wasserstoff einerseits mit LKWs an die Tankstelle geliefert werden, andererseits kann der Wasserstoff auch direkt vor Ort bei der Tankstelle erzeugt werden. Zur Versorgung einer Fahrzeugflotte müssten Tankstellen an strategisch wichtigen Punkten im SBB-Netz aufgebaut werden, wobei immer auch die Versorgungslogistik betrachtet werden muss.

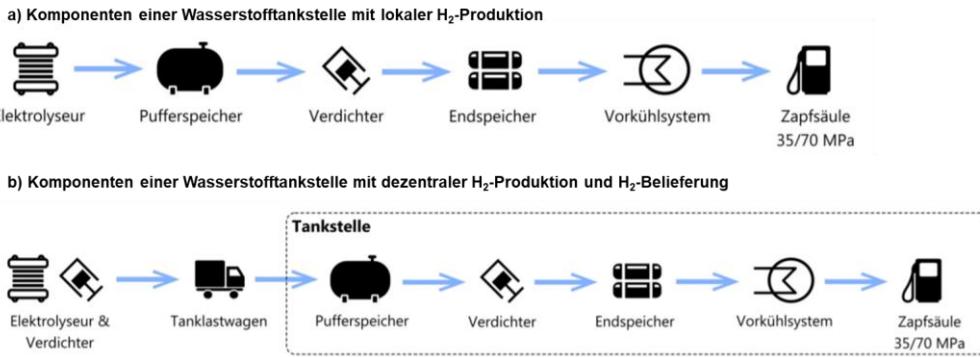


Abbildung 3: Hauptkomponenten einer Wasserstoff-Tankstelle mit (a) lokaler Wasserstoffproduktion oder mit (b) Wasserstoffzulieferung. [14]

Im Vergleich zu einer konventionellen Dieseltankstelle sind Tankstellen für gasförmige Treibstoffe einiges komplexer in ihrem Aufbau. Wird zusätzlich zur Wasserstoff-Tankstelle auch eine lokale Elektrolyse zur Produktion des Wasserstoffs aufgebaut, nimmt neben der Komplexität auch der Flächenbedarf zu.

3.2.2 Kostenbewertung einer Wasserstofftankstelle

Zur Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten wurde auf Basis verschiedener europäischer Studien ([15], [16], [17], [18], [19], [20], [21]) ein Kostenmodell erarbeitet. Das Modell berechnet die Kosten für eine definierte Konfiguration einer Wasserstofftankstelle für die wichtigsten Komponenten und berechnet unter Berücksichtigung der Energiepreise den effektiven Wasserstoffpreis in Schweizer Franken pro Kilogramm, der sämtliche Anlagenkosten deckt.

Auf Basis dieser Parameter wurden die spezifischen Wasserstoffkosten (CHF/kg H_2) für Produktions- respektive Absatzmengen von bis zu 500 kg Wasserstoff pro Tag zusammengestellt. Werte über 500 kg pro Tag werden durch die Datengrundlage [15] nicht mehr abgedeckt. Für solche Absatzmengen ist jedoch nicht mehr die Infrastruktur der Kostentreiber für den Wasserstoffpreis, sondern die Energiekosten für dessen Herstellung [22] und die allfälligen Transportkosten. Ein PKW bezieht vergleichsweise pro Betankung rund 6 kg und ein LKW etwa 30 kg pro Betankung. Für Transportwege unter zirka 130 km ist der Transport per CGH_2 -LKW-Trailer kosteneffizient. Bei längeren Wegen und grossen Mengen könnten Pipelines die bevorzugte Option für den Transport sein, zumindest auf der Übertragungsebene, wo der Wasserstofftransport in grossem Massstab durch ein grossflächiges Verteilnetz erfolgt. [21]

Für die Wasserstoffproduktion vor Ort wurde die Verwendung von Bahnstrom angenommen. Dies setzt jedoch voraus, dass der so produzierte Wasserstoff nur für Traktionsanwendungen für Schienenfahrzeuge der SBB verwendet werden darf.

3.2.3 Verteilung neuer Lade- und Tankinfrastruktur

Ausgehend vom für 2030 prognostizierten Energiebedarf kann die Verteilung der für diese Flotte benötigten Diesel- oder Wasserstoff-Tankstellen optimiert werden. Ziel ist dabei, die Fahrdistanz von allen Punkten auf dem Normalspurnetz zur nächstgelegenen Tankstelle zu minimieren. Dabei werden sämtliche Punkte gemäss dem lokal ermittelten Energiebedarf gewichtet.

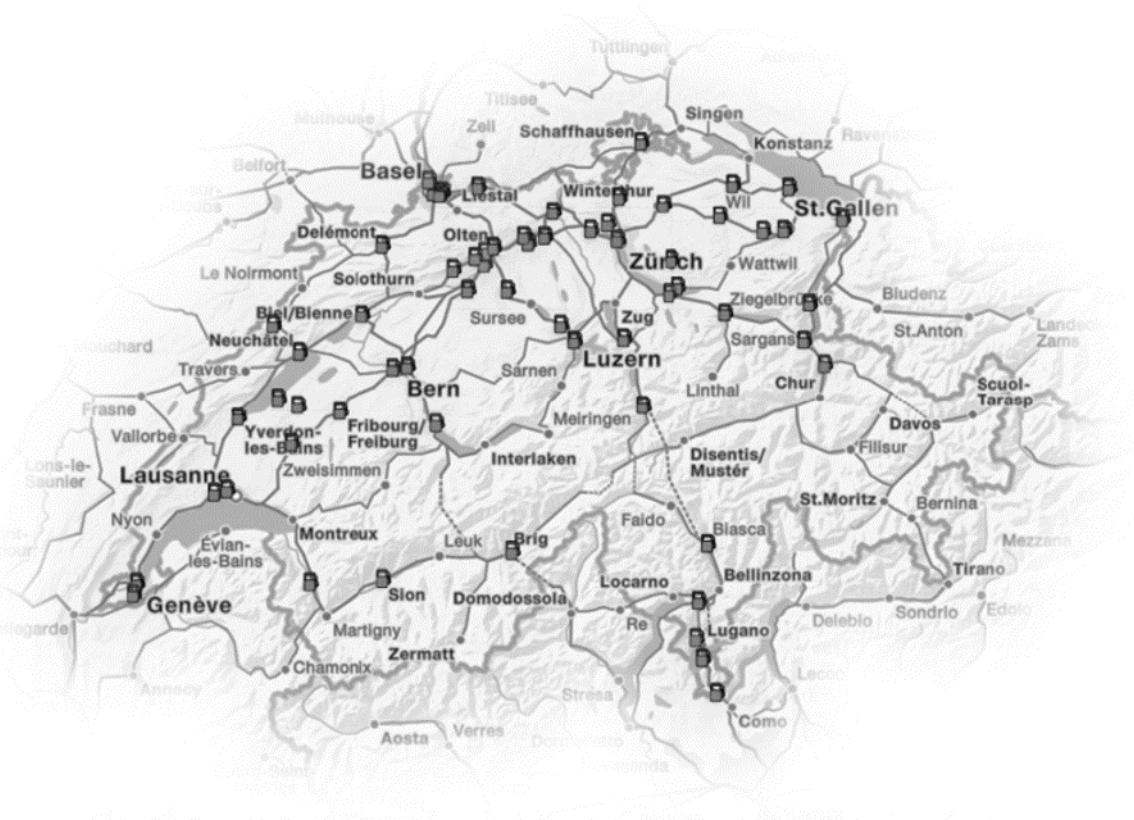


Abbildung 4: Karte der Treibstoff-Tankanlagen (TTA) der SBB. Stand 2024.

Für die mathematischen Optimierungen werden zunächst für eine festgelegte Anzahl von Tankstellen zufällige Standorte auf dem Schienennetz ausgewählt. Danach wird jeder Punkt auf dem Schienennetz bezüglich der Distanz respektive der Fahrzeit der nächstgelegenen Tankstelle zugeordnet, wodurch Gruppen von Streckenabschnitten entstehen, die jeweils einer bestimmten Tankstelle zugewiesen sind. Anschliessend wird jede Tankstelle in das errechnete Zentrum ihrer zugeordneten Streckenabschnitte verschoben, um die mittlere Fahrzeit respektive -distanz zu dieser Tankstelle zu minimieren. Dieser Vorgang der Zuordnung und Zentrierung wird so lange wiederholt, bis sich die Positionen der Tankstellen nicht mehr verändern.

Wird dieses Vorgehen für eine variable Anzahl von Tankstellen durchgeführt, können verschiedene Parameter in Abhängigkeit der Anzahl Tankstellen verglichen und ein allfälliges Optimum identifiziert werden. So ist es möglich, betriebliche Aspekte wie die Minimierung der Fahrzeit zur nächsten Tankstelle und kommerzielle Aspekte, darunter Investitionskosten pro Tankstelle oder Energiekosten an der Tankstelle, aufeinander abzustimmen respektive zu optimieren.

3.3 Energieversorgung von Baustellen

Neben dieselbetriebenen Fahrzeugen sind auf Bahnbaustellen viele Kleingeräte mit Verbrennungsmotor im Einsatz, bei denen neben der Dekarbonisierung auch weitere Aspekte neuer Antriebe im Fokus stehen. Die Mitarbeitenden und das Baustellenumfeld sind beim Betrieb dieser Maschinen hohen Lärm- und Schadstoffemissionen ausgesetzt. Durch alternative Antriebe basierend auf Wasserstoff oder durch direkte Elektrifizierung über Batterien lassen sich diese Umweltauswirkungen eingrenzen.

Die auf Bahnbaustellen zu bewältigenden Arbeiten sind sehr vielseitig. Im Bereich Wartung und Gleisunterhalt können die Aufgaben für Mitarbeitende und Werkzeuge grob in die Hauptaktivitäten Gleis- und Gleisbettbearbeitung, Böschungspflege, Beleuchtung und Warnanlage unterteilt werden. Während bei den ersten beiden Aktivitäten hauptsächlich handgeführte Geräte ortsgebunden zum Einsatz kommen, sind Beleuchtungsanlagen üblicherweise stationär. Alle Geräte haben aber gemein, dass sie entweder nach dem Gebrauch oder permanent im Betrieb mit Energie versorgt werden müssen. Aktuell werden dafür Generatoren verwendet, die in Zukunft durch alternative Versorgungsmöglichkeiten ersetzt werden sollen.

3.3.1 Energiebedarf auf Baustellen

Der Treibstoffverbrauch einer Baustelle ist ein wichtiger Faktor für die Planung und Optimierung der zugehörigen Energieversorgungsinfrastruktur. Jedoch ist kaum eine Baustelle gleich, und die Verbrauchsdaten der eingesetzten Geräte sind nicht umfangreich dokumentiert. Daher wurde zur Ermittlung des Treibstoffverbrauchs einer Baustelle eine Methodik angewendet, deren Grundlage das Emissionsinventar für Non-Road-Maschinen des Bundesamts für Umwelt (BAFU) ist. [23]

Die Abschätzung des Energiebedarfs verschiedener Baustellenklassen erfolgte dabei in mehreren Schritten:

- Erhebung der Daten über die Anzahl, die Leistungsklasse und die Einsatzzeiten der Baumaschinen auf verschiedenen Baustellen anhand SBB-interner Materialbestellungen und Erfahrungswerten.
- Berechnung des spezifischen Treibstoffverbrauchs pro Stunde für die verschiedenen Baumaschinenklassen anhand der Angaben in der Non-Road-Datenbank des BAFU.
- Berechnung des Gesamtverbrauchs pro Tag für die Baustellen durch Multiplikation der spezifischen Verbrauchswerte mit den Einsatzzeiten und den Mengengerüsten der verwendeten Geräte.

Dem Energiebedarf der Baustellenklassen konnten im Anschluss mögliche Versorgungstechnologien auf Basis von Wasserstoff und Batterien gegenübergestellt werden. Hierbei spielt die Betrachtung der benötigten Leistung und der benötigten Energie für eine Arbeitsschicht respektive für die Dauer des Bestehens einer Baustelle eine Rolle. Die Versorgungsmöglichkeiten können so in Klassen eingeteilt und den ermittelten Baustellenkategorien gegenübergestellt werden.

Im Rahmen aller Arbeiten zur Dekarbonisierung wird zunächst stets die Effizienzsteigerung des Gesamtsystems analysiert und, wo möglich, optimiert, bevor eine Elektrifizierung oder Systemumstellung erfolgt. Betriebliche Massnahmen wie die Einführung effizienter Betriebsmittel – beispielsweise der Austausch von Halogen- durch LED-Beleuchtungen – tragen dazu bei, den Energie- und Leistungsbedarf nachhaltig zu reduzieren.

3.3.2 Demonstrator eines Wasserstoff-Brennstoffzellen-Generators

Die Ablösung der Diesel-Generatoren zur Energieversorgung von Baustellen ist eine Herausforderung, die früher oder später die ganze Baubranche betrifft. Erfreulich ist deshalb, dass zunehmend fossilfreie Produkte auf den Markt verfügbar sind. Angeboten werden reine Batterie-Lösungen, hybride Lösungen mit kleinem integriertem Diesel-Generator und Wasserstoff-Brennstoffzellen-Generatoren. Allen gemeinsam ist die Pufferbatterie, welche die Lastspitzen abdeckt, sodass der Dieselmotor oder die Brennstoffzelle oft nur zum Nachladen in der Funktion eines Range-Extenders eingeschaltet ist. Durch die konstante Last beim Aufladen können die Generatorsysteme im optimalen Wirkungsgradbereich betrieben werden.

Bei der SBB hat der Ersatz der kleinsten Diesel-Generatoren unter 10 kVA durch reine Batterie-Lösungen bereits begonnen. Ab der Leistungsklasse 10–15 kVA ist der Ersatz aber wegen der umständlichen Energiezuführung auf die Baustelle anspruchsvoll (Kabel, Versetzen von Generatoren bei wandernder Baustelle). Trotz dem Einsatz von effizienten Betriebsmitteln bleibt ein Restbedarf an grösseren Generatoren, für welche bis heute keine praktische Lösung vorhanden ist. Hier bietet Wasserstoff eine mögliche Variante für die Zukunft.

Um neben den bereits gemachten Erfahrungen mit mobilen Batteriespeichern auch Erfahrungen im Umgang mit Wasserstoff auf Baustellen zu sammeln, wurde ein Wasserstoff-Generator (H_2 -Genset) von Auto AG gemietet und auf einer Baustelle erprobt. [24]



Abbildung 5: 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 Group, h2-genset.com).

3.4 Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff

3.4.1 Eigenschaften von Wasserstoff

In der Schweiz wird Wasserstoff aufgrund seiner Eigenschaften als Gefahrgut klassifiziert, was für seinen Transport und seine Lagerung spezielle Vorschriften nach sich zieht. Die lange Erfahrung im Umgang mit Wasserstoff in der Industrie zeigt, dass mit den festgelegten Sicherheitsmassnahmen und mit der Einhaltung der geltenden Standards ein sicherer Umgang mit diesem Energieträger gewährleistet werden kann. [25], [26]

Für die korrekte Einordnung von Risiken im Umgang mit Wasserstoff müssen drei Szenarien betrachtet werden: [11]

- 1) **Austritt ohne Zündung:** Austretender Wasserstoff steigt bei einem Leck schnell in die Atmosphäre auf. Während sich Wasserstoff im Freien also schnell verflüchtigt, kann er sich in geschlossenen Räumen und Behältern unter der Decke sammeln und explosive Konzentrationen erreichen. Dies ist durch entsprechende Schutzmassnahmen zu verhindern.
- 2) **Austritt mit Brand:** Wasserstoff ist in einem breiten Bereich von Mischungsverhältnissen mit minimaler Zündenergie entflammbar. Das bedeutet, dass sogar statische Elektrizität oder kleine Funken ausreichen können, um ein Wasserstoff-Luft-Gemisch zu entzünden und einen Brand zu verursachen. Die Problematik beim Wasserstoffbrand ist, dass er wegen der beinahe unsichtbaren Flamme schwierig zu sehen ist.
- 3) **Austritt mit Explosion:** Je nach Mischungsverhältnis kann es zu einem schnelleren Verbrennungsvorgang mit Verpuffung (Deflagration) oder zu einer Explosion (Detonation) mit deutlich höheren Druck- und Temperaturgradienten kommen. Durch Überwachung der vorliegenden Wasserstoffkonzentration in einem Havariefall können solche Zustände vermieden werden.

Es ist wichtig zu betonen, dass Wasserstoffsysteme so ausgelegt sind, dass keines der genannten Szenarien ohne äussere Einflüsse wie mechanische Beschädigungen oder externe Erwärmung eintreten kann.

Eine weitere Eigenschaft von Wasserstoff ist das Eindringen in Metalle und andere Materialien durch Diffusion, was zu einer Verschlechterung der Materialeigenschaften durch Versprödung führen kann. Normative Vorgaben stellen sicher, dass bereits bei der Bauteilauslegung auf die Materialwahl geachtet werden muss, zum Beispiel bei Speichern, Leitungssystemen und Dichtungen.

3.4.2 Sicherheitseinrichtungen von Wasserstoffsystemen

Brennstoffzellensysteme sind so überwacht, dass bei einer Wasserstoffleckage die Wasserstoffzufuhr automatisch abgeschaltet wird. Das Wasserstofftanksystem (Druckgastank) ist mit mehreren Sicherheitseinrichtungen versehen, die kritische Zustände des Systems nahezu verunmöglichen und die Auswirkungen bei einem Unfall oder Brand reduzieren.

Sollte eines der Systeme den Wasserstoff aus dem Tank ablassen, wird dieser über die Sammelleitung an eine möglichst unkritische Stelle geleitet. Dort kann der Wasserstoff entweder austreten und sich verflüchten oder kontrolliert abbrennen. Diese Sicherheitsmaßnahme dient grundsätzlich dazu, die Risiken durch austretenden Wasserstoff zu reduzieren. Bei Arbeiten in Tunnel kann dies jedoch zu zusätzlichen Herausforderungen führen, da das Abblasen respektive das Abbrennen des Wasserstoffs neue Risiken birgt.

3.4.3 Schadensfall und Intervention

Ein Wasserstoffsystem kann einerseits durch ein bereits vorhandenes Feuer in Brand geraten, andererseits kann unbeobachtet austretender Wasserstoff ein Feuer verursachen. Sollte es zu einem Zwischenfall kommen, ist die richtige Reaktion der Fahrzeugführer und Anlagenbetreiber entscheidend. Generelle Handlungsempfehlungen sind hierbei:

- Fahrzeug im Schadens- oder Brandfall, wenn möglich, an einer gut zugänglichen Stelle im Freien abstellen.
- Flammen zum Beispiel mittels Besen (fängt Feuer) oder Wärmebildkamera [27] ausfindig machen.
- Brandstelle, Wasserstofftanks und Umgebung mit viel Wasser kühlen.
- Bei austretendem, nicht brennendem Wasserstoff für genügend Lüftung sorgen.
- Wenn möglich eine Sicherheitszone von 50 bis 150 m einrichten.

Obwohl solche generellen Empfehlungen nützlich sind, genügen sie nicht immer, um komplexe Zwischenfallszenarien zu meistern. Um die Sicherheit von Wasserstoffanwendungen zu erhöhen, sind spezifische Schulungen und Richtlinien für Betreiber und Einsatzkräfte erforderlich. Solche Fragestellungen sind Schwerpunktthemen der mittlerweile abgeschlossenen Projekte «HyResponder» [28] und «HyTunnel-CS» [29], welche die Europäische Union finanzierte. Die Lieferobjekte dieser Projekte beinhalten wichtige Aspekte für den allgemeinen Umgang mit Wasserstoff, Risikoanalysen für den Einsatz von Wasserstoff in Tunnels und Schulungsgrundlagen für Interventionskräfte.

3.4.4 Wasserstoff in Tunnels

Die Akkumulation von Wasserstoff bei einem Austritt ohne Verbrennung in einem Tunnel stellt ein erhöhtes Risiko dar. Ein zusätzliches Gefahrenpotenzial weisen ältere Tunnel auf, die oft nur eingleisig ausgeführt sind, einen kleinen Querschnitt aufweisen und über keine aktive Belüftung verfügen.

Nicht nur in Verbindung mit Wasserstoff spielt die Ventilation eine entscheidende Rolle für die Steigerung der Sicherheit in Bahntunneln. Bisher wurde bei grossen Bauarbeiten eine zusätzliche Belüftung installiert, um Abgase von Baugeräten gezielt abzuleiten. Eine solche forcierte Belüftung kann zwar die Verdünnung von allfällig austretendem Wasserstoff beschleunigen, jedoch auch den möglichen Explosionsbereich vergrössern. In der Praxis ist es schwierig, eine ausreichend wirksame Belüftung mit genügend Luftzirkulation zu realisieren. Zudem sind die Lüftermotoren bei Tunnelanlagen noch selten explosionsgeschützt ausgeführt und stellen daher bei einer entweichenden Wasserstoffwolke eine Gefährdung dar (potenzielle Zündquelle).

Neben Lüftungsmaßnahmen hat auch das Tunnelprofil mit einem Kulminationspunkt einen starken Einfluss auf die Konzentration von allfällig austretendem Wasserstoff. Eine vorteilhafte Tunnelsteigung liegt vor, wenn der tiefste Punkt des Tunnels im Tunnel selbst liegt und der Wasserstoff ungehindert gegen die Ausgänge abströmen kann. Wenn der höchste Punkt in der Mitte des Tunnels liegt, kann sich dort Wasserstoff an der Tunneldecke ansammeln und gefährliche Konzentrationen erreichen.

Im Allgemeinen stellt der Tunnel ein erhöhtes Risiko dar, da Wasserstoff im Falle eines Zwischenfalls mehr zurückgehalten wird als im Freien. Dies kann im Schadensfall zu einer vermehrten Bildung eines zündfähigen Gemisches führen. Allerdings werden grössere Mengen Wasserstoff benötigt, um eine entsprechend gefährliche Konzentration zu erreichen.

Nach Artikel 93 der Verordnung über die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer bei Bauarbeiten [30] dürfen bei Untertagearbeiten keine Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, die mit Treibstoffen mit niedrigem Flammpunkt betrieben werden. Obwohl in der Verordnung der Wasserstoff nicht direkt ausgeschlossen ist, wird sie aktuell als Verbot für Wasserstoff aufgefasst. Auch in der Richtlinie zu «Untertagearbeiten» [31] der Eidgenössischen Koordinationskommission für Arbeitssicherheit (EKAS) ist Wasserstoff noch nicht erwähnt.

4 Ergebnisse

4.1 Konzepte zur Umrüstung eines Baudienstfahrzeugs

Zur Bewertung der Umsetzungsmöglichkeiten für alternative Antriebe des modernen Baudienstraktors Tm 234 Serie 4 wurden die Eckwerte für die Leistungsanforderungen, für den Energiebedarf und für den zur Verfügung stehenden Bauraum ermittelt. Darauf basierend wurde die Integrationsmöglichkeit der verschiedenen Antriebsvarianten erarbeitet. Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Studie sind in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

4.1.1 Bauraum für neue Antriebstechnologien

Aus verfügbaren Unterlagen wurde ein grobes 3D-Bauraummodell abgeleitet, um den maximal verfügbaren Bauraum zu ermitteln, wobei wichtige Rahmenstrukturen berücksichtigt wurden. Im resultierenden Bauraum sind im aktuellen Fahrzeugkonzept praktisch alle antriebsrelevanten Komponenten untergebracht, die ein Gesamtgewicht von zirka 10 Tonnen aufweisen. Der Bauraum für den Antrieb dieses multifunktionellen Fahrzeugs ist bereits heute sehr dicht ausgenutzt. Die neu zu verbauende Antriebstechnologie darf diese Gewichtsmarke nicht überschreiten, da die zulässigen Achslasten respektive das zulässige Gesamtgewicht des Basisfahrzeugs bereits fast vollständig ausgenutzt sind.

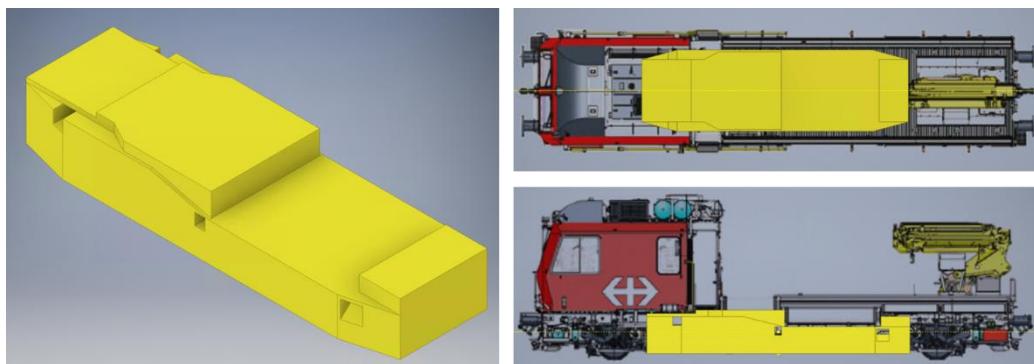


Abbildung 6: Zur Verfügung stehender Bauraum als 3D-Modell.

4.1.2 Antriebsarchitektur und Speichergrößen

Basierend auf der Referenzmessung wurde gemäss der Beschreibung in Kapitel 3.1.1 der Energiebedarf möglicher alternativer Antriebe ermittelt. Es wurden verschiedene Fahrzeugarchitekturen betrachtet, darunter auch hybride Antriebssysteme in verschiedenen Konfigurationen. Der Fokus lag auf den vollelektrischen Antriebsvarianten, bei denen zwei verschiedene Energiespeicherkonzepte betrachtet wurden.



Abbildung 7: Schematische Darstellung des Antriebssystems des Basisfahrzeugs mit zwei Verbrennungsmotoren und der hauptsächlich hydraulischen Leistungsverteilung (links); Antriebsschema des vollelektrischen Antriebs, wo bei als Energiequelle eine Batterie oder eine Wasserstoff-Brennstoffzelle eingesetzt werden kann (rechts).

Zum einen kann die Energie direkt aus einer extern aufladbaren Batterie bereitgestellt werden. Zum anderen kann die Energie aus einem System bestehend aus Brennstoffzelle, Tanksystem und Pufferbatterie bezogen werden, wobei die Energie dem Fahrzeug durch Nachtanken von Wasserstoff zugeführt wird. Auch der Einsatz eines Wasserstoff-Verbrennungsmotors wurde betrachtet, wobei das Fahrzeug und seine Antriebe im Grundaufbau in dieser Betrachtung unverändert blieben und lediglich die Dieselmotoren durch äquivalente Wasserstoff-Verbrennungsmotoren ausgetauscht wurden.

Tabelle 1: Den Varianten zuzuführende Energiemengen, hergeleitet aus dem Referenzlastfall (gerundet auf ganze Kilowattstunden):

Antriebssystem	Energiequelle	Energiebedarf	Verbrauchsmenge
Verbrennungsmotor mit hydraulischem Antrieb	Diesel (Referenz)	1277 kWh	129.9 l
	Wasserstoff (Verbrennungsmotor)	1272 kWh	38.2 kg H ₂
Vollelektrischer Antrieb	Wasserstoff (Brennstoffzelle)	573 kWh	17.2 kg H ₂
	Elektrische Energie (Batterie)	287 kWh	287 kWh

4.1.3 Energieversorgungsmöglichkeiten

Neben der Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs ist es zudem wichtig, dass es nach einem Einsatz innert nützlicher Frist für die nächste Schicht bereitsteht. Als Zielwert für die Wiederaufnahme der Aktivitäten nach einer Schicht wurde eine Stunde festgelegt. Diese Zeitkonstante ist besonders für den Lade- respektive Betankungsvorgang entscheidend.

Die speziell für die SBB entwickelten Diesel-Zapfanlagen für Rangierloks und Baudienstfahrzeuge bieten einen Durchfluss von 160 l/min. Der Tank des Tm 234 Serie 4 mit 760 Liter Fassungsvermögen kann so in knapp unter 5 Minuten aufgefüllt werden, beziehungsweise der verbrauchte Diesel einer Referenzschicht (zirka 130 Liter) in unter einer Minute nachgefüllt werden kann.

Bei Wasserstoffsystemen stellt komprimierter, gasförmiger Wasserstoff (CGH₂) die etabliertesten Speicher- respektive Betankungsmethode dar. Bei gasförmigem Wasserstoff wird der Treibstoff über ein Druckgefälle aus einem stationären Druckspeicher in den Fahrzeugtank überströmt. Um unerwünschte Bauteilbelastungen wie Druckschläge oder erhöhte Tanktemperaturen aufgrund des Druckanstiegs und der durch den Joule-Thomson-Effekt [32] verursachten Temperaturveränderungen zu vermeiden, wird der Durchfluss bei der Betankung begrenzt. Bei PKW-Anwendungen (700 bar Speicherdruck) wird der Wasserstoff zudem vorgekühlt, um eine entsprechende Übertemperatur im Fahrzeugtank zu vermeiden. Zukünftig dürfte die Vorkühlung auch im Nutzfahrzeugbereich (350 bar Speicherdruck) zum Einsatz kommen, um schnellere Betankungsgeschwindigkeiten zu erzielen. Mit aktuellen Betankungseinrichtungen lassen sich im Bahnbereich Durchflüsse von bis zu 7 kg/min. erreichen. [33] So können je nach Tankgröße Betankungszeiten erreicht werden, die mit aktuellen Dieselfahrzeugen vergleichbar sind. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die fahrzeugseitig gespeicherte Energie deutlich kleiner ausfällt als mit aktuellen Dieseltanks dieser Fahrzeuge. Alternative Wasserstoffspeichersysteme basierend auf Metallhydrid oder flüssigem Wasserstoff werden in verschiedenen Industriebereichen eingesetzt. Für mobile Anwendungen sind Metallhydridspeicher jedoch zu schwer und die Speicherung von flüssigem Wasserstoff zu komplex.

Neben den Abklärungen im Umrüstungsprojekt wurden im Rahmen weiterer Betrachtungen im Projekt «Netto-Null 2040» der SBB die Eckwerte für die heute geplanten technischen Möglichkeiten der Batterieladung zusammengestellt. Die stationäre Ladeinfrastruktur für reine Batteriefahrzeuge besteht aus Standard-GIFAS-Steckdosenverteilern, die ab dem 50-Hz-Netz gespiesen werden. Derzeit entsteht zudem ein Prototyp mit einer Speisung ab Fahrleitung über einen Weichenheiztrafo. Als Schnittstelle zum Fahrzeug wurde der CEE32A-Stecker festgelegt, der maximal 22 kVA Leistung für die Batterieladung zur Verfügung stellen kann. Weiter wurde zusammen mit der Flottentechnik die Bauzugleitung spezifiziert, womit sich die Fahrzeuge im Bauzug ab dem Zugfahrzeug laden lassen. Mit dem CEE63A-Stecker als Standard stehen hierbei maximal 44 kVA zur Verfügung, die sich auf die Anzahl angehängter Fahrzeuge aufteilt. Größere Batterien ab zirka 200 kWh lassen sich mit diesen Leistungen nicht innerhalb vernünftiger Zeit laden. Durch das Laden der Batterie über einen fahrzeugeigenen Stromabnehmer mit entsprechendem Trafo und Umrichter kann auf zusätzliche stationäre Ladeinfrastruktur verzichtet und die Ladezeit deutlich verkürzt werden. Diese flexible Lademöglichkeit benötigt jedoch deutlich mehr Bauraum und führt zu einem erhöhten Fahrzeuggewicht, was bei der Grundauslegung entsprechend zu berücksichtigen ist.

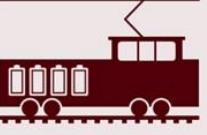
		200 – 800+ kWh
Stromabnehmer (15 kV 16,7 Hz)	 <p>»»» fahrend</p>  <p>● stehend</p>	<ul style="list-style-type: none"> Ladezeit: 15 – 60 min für Vollladung. Limitierend sind je nach System, Batterietechnologie oder Leistungselektronik.
CEE 32A (50 Hz, 400 V)	 <p>Elektrant 50 Hz</p> 	<ul style="list-style-type: none"> Analog zu fahrend. Max. 80 A (1.2 MW).
CEE 63A (50 Hz, 400 V)	 <p>Verteiler 16.7 Hz</p>  <p>Elektrische Versorgungsleitung</p>	<ul style="list-style-type: none"> Nur zur Not (z.B. Schwebeladungen). Lange Ladezeiten → z.B. bis zu 20 h für 300 kWh.
		<ul style="list-style-type: none"> Ladezeit zum Nachladen für eine normale Schicht („Teilladung“): ca. 2-5 h. Ladezeit für entladene Batterie: ca. 5-10 h. Ladeleistung limitiert durch 50 Hz Netz (32 A). Fahrzeugseitige Energieeffizienz ist entscheidend und wirkt sich direkt auf die Ladezeit aus.
		<ul style="list-style-type: none"> Maximal 44 kW, je nach Anzahl angehängter Wagen. Lastmanagement notwendig. Ladung während Fahrt zur Baustelle oder bei Abstellung möglich.

Abbildung 8: Fahrzeugkonfigurationen und zugehörige Lademöglichkeiten [34]; es gilt zu beachten, dass die kabelgebundene Lademöglichkeit über den CEE32A-Stecker bei der Variante mit Oberleitungszugang nur als Backup-Lademöglichkeit gedacht ist. Bei Fahrzeugen mit kleiner Batterie ist eine Steckerlösung ausreichend.

4.1.4 Variantenkonfiguration

Eine erste Variantenbewertung der Umbaumöglichkeiten wurde anhand vereinfachter Bauraumbetrachtungen und auf Basis einer groben Gewichtsbilanz erstellt. Dabei hat sich gezeigt, dass sich hybride Antriebsvarianten aufgrund der Überschreitung der zulässigen Achslasten und des zur Verfügung stehenden Bauraums nicht auf dem Fahrzeug realisieren lassen. Der Umbau der Drehgestelle zu einem vierachsigen Fahrzeug zur Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts überschreitet den Umfang eines normalen Fahrzeugumbaus. Bei einer Neubeschaffung kann das Fahrzeugkonzept entsprechend angepasst werden.

Gemäss der Variantenbewertung lassen sich im Fahrzeug der batterieelektrische Antrieb (abgekürzt BATT) sowie der brennstoffzellenelektrische Antrieb (abgekürzt H₂-BZ) realisieren. Da der batterieelektrische Antrieb noch Gewichtsreserven aufweist, wurde im weiteren Verlauf des Projekts geprüft, ob ein elektrisches Zweikraftfahrzeug mit Batteriespeicher und Oberleitungsstromversorgung (abgekürzt BATT-OBL) bei maximaler Ausreizung des Fahrzeuggewichts umgesetzt werden könnte.

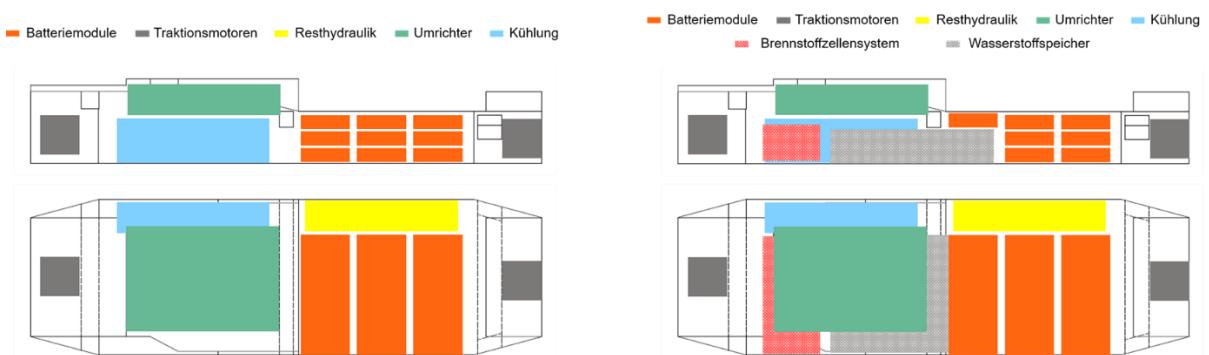


Abbildung 9: Bauraumdarstellung der Komponenten für die Variante BATT (links) und H₂-BZ (rechts); die Linienzeichnung im Hintergrund symbolisiert den zur Verfügung stehenden Bauraum.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die bestehenden Dieselmotoren durch Wasserstoff-Vergummungsmotoren (H₂-VM) auszutauschen. Bei Verwendung eines Wasserstofftanks mit komprimiertem Wasserstoff (CGH₂, 350 bar) reicht die Gewichtskapazität des Fahrzeugs knapp nicht aus; zudem ist der Bauraum für einen entsprechend grossen Speicher nicht vorhanden. Zukünftige Entwicklungen wie

leichtere Wasserstofftanks oder effizientere Motoren können dazu führen, dass der Wasserstoff-Verbrennungsmotor dennoch eine mögliche Refit-Alternative darstellt. Daher wird diese Variante dennoch in gewissen Punkten genauer betrachtet. [35]

4.1.4.1 Batterieelektrisches Fahrzeug (BATT)

Das Batteriesystem wurde so dimensioniert, dass genügend Energie für den Referenzlastfall zur Verfügung steht und die Alterungseffekte der Batterie aufgefangen werden können. Dazu wird auf den Referenzenergiebedarf 25 Prozent Reserve gerechnet, um auch bei Streuungen des Energiebedarfs eine Vollentladung der Batterie zu vermeiden. Zudem muss berücksichtigt werden, dass Batterien über ihre Nutzungsdauer bis zu 20 Prozent ihrer Kapazität durch die Alterung der Zellen einbüßen können. So ergibt sich bei einem Bedarf von 287 kWh und unter Berücksichtigung der auf dem Markt für Bahnanwendungen verfügbaren Batterie-Module, etwa 33 kWh pro Modul, eine Gesamtkapazität von 460 kWh. In dieser Variante bleibt bei der Anordnung der Bauteile am meisten Bauraum frei, was gewisse Flexibilitäten in der Anordnung der Module ermöglicht.

Die verschiedenen betrachteten Anordnungsoptionen bleiben zirka 1100 kg unter der maximalen Auslegungsmasse inklusive Zuladung und die Achslasten sind ausgeglichen.

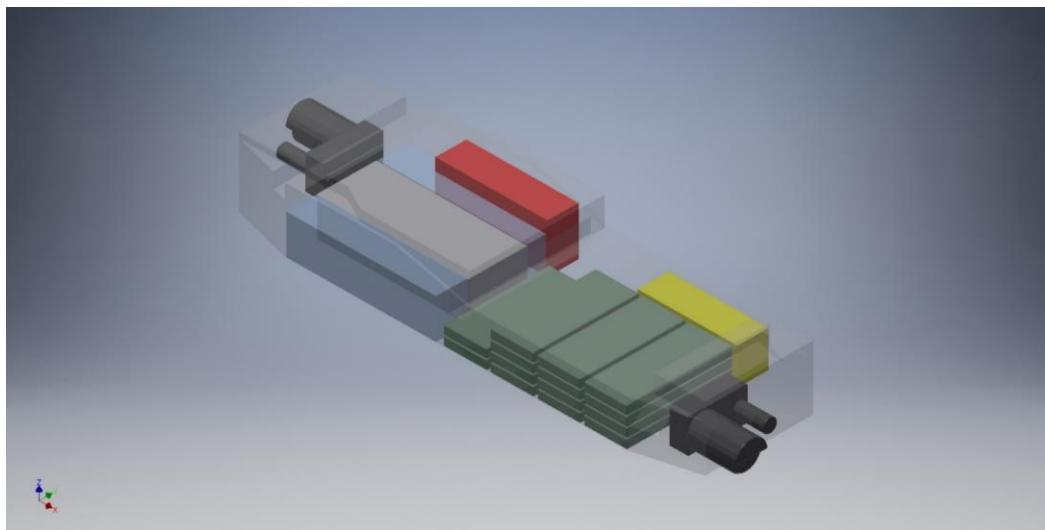


Abbildung 10: BATT-Layout: Die Batterie-Module sind kompakt angeordnet und bestehen aus 14 sogenannten Strings. Bauteile: Antriebsstromrichter (Bauteil in grau, blaue Bereiche für Servicezugang), Motoren (schwarz), Batterien (grün), Resthydraulik (gelb), Kühlssystem (rot).

4.1.4.2 Brennstoffzellelektrisches Fahrzeug (H₂-BZ)

Für diese Ausführung des Fahrzeugs wird eine Brennstoffzelle mit 100 kW Leistung und ein dazugehöriger Wasserstoffspeicher als Energielieferant eingesetzt. Als Puffer und zur Bereitstellung von zusätzlicher Leistung werden Batterie-Module mit erhöhter Spitzenleistung eingesetzt. Die zusätzlichen Batteriemodule werden benötigt, da die Installation mehrerer Brennstoffzellen zur Deckung der Spitzenleistung weder bauraumtechnisch möglich noch finanziell sinnvoll ist. Der Batteriespeicher kommt so auf eine Gesamtkapazität von 214 kWh mit einer möglichen Dauerleistung von rund 540 kW. Für den Betrieb werden zirka 21 kg Wasserstoff benötigt (17.2 kg für eine Schicht, inklusive 20 Prozent Reserve). Der Wasserstoffspeicher fasst aufgrund der Flaschenkonfiguration je nach Ausführung 22 kg respektive 25 kg Wasserstoff. Dadurch steht genügend Energie zur Verfügung, um die Referenzschicht ohne Tankstopp zu bewältigen.

In dieser Variante wird ein grosser Teil des Bauraums durch den Wasserstoffspeicher (350 bar) beansprucht. Betrachtet wurden zwei Arten von Speicherflaschen, sogenannte Typ 3 respektive Typ 4.

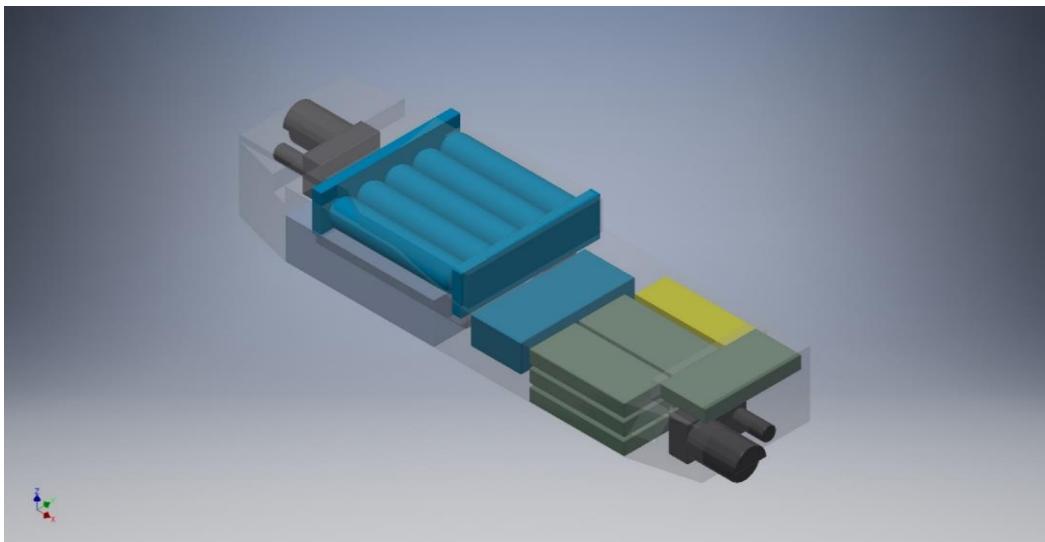


Abbildung 11: Speicheranordnung Typ 3: Es sind 5 Speicherflaschen im Bereich vor dem abgesetzten Ladeboden untergebracht. Nutzbare Wasserstoffmenge: zirka 22 kg. Bauteile: Antriebsstromrichter (Bauteil in grau, blaue Bereiche für Servicezugang, verdeckt), Motoren (schwarz), 7 Batteriemodule (grün), Resthydraulik (gelb), Kühlsystem (rot, verdeckt), Brennstoffzellensystem mit Speicher (dunkelblau).

Beide Speichertypen bleiben unter der maximalen Auslegungsmasse inklusive Zuladung. Bei der Ausführung mit Typ-3-Speicherflaschen beträgt die Reserve zirka 700 kg, bei der Ausführung mit den etwas leichteren Typ-4-Flaschen beträgt die Reserve knapp 900 kg. Durch die Anordnung der Wasserstoffspeicher liegt hier das Gewicht eher auf der vorderen Achse.

4.1.4.3 Batterieelektrisches Fahrzeug mit Oberleitungsstromversorgung (BATT-OBL)

Diese Ausführung des Fahrzeugs gleicht der batterieelektrischen Variante. Um für die Komponenten des Oberleitungssystems genügend Gewichtsreserven zu schaffen, werden lediglich 9 Batterie-Module als Energiespeicher eingesetzt. Der vorhandene Bauraum bietet in der Anordnung noch gewisse Flexibilitäten. Der Batteriespeicher kommt so auf eine Gesamtkapazität von zirka 300 kWh. Die Spitzenleistung der Batterie beträgt damit 450 kW. Diese Konfiguration reicht aus, um im Baustellenbetrieb genügend Kapazität und Leistung zur Verfügung zu stellen. Im Streckenbetrieb wird die Batterie durch die Oberleitung unterstützt beziehungsweise geladen, wenn nicht die gesamte Leistung der Oberleitung für Traktionszwecke verwendet wird. Der Trafo kann über den Stromabnehmer etwa 450 kW Leistung zur Verfügung stellen. Es handelt sich somit nicht um eine volle Traktionsausrüstung, da der Trafo die vom Fahrzeug geforderte Spitzenleistung nicht ohne die Unterstützung der Batterie decken kann. Diese Konfiguration bietet den Vorteil, dass die Batterie über die Oberleitung auch im Stand aufgeladen werden kann. Bei dieser Variante gilt es zu beachten, dass die Klimaanlage und die Druckluftbehälter auf dem Dach versetzt werden müssen. Dieser Versatz ist in der Gewichtsbilanz mitberücksichtigt.

Die beschriebene Variante reizt die maximale Auslegungsmasse komplett aus, und es bleiben kaum Reserven übrig. Das System wurde so ausgelegt, dass die maximal mögliche Batteriekapazität mit der kleinsten sinnvollen Trafogröße kombiniert wird, um das Maximalgewicht nicht zu überschreiten. Aufgrund dieser Gewichtslimitierungen musste das kombinierte Gewicht von Trafo und Batterieausrüstung unter 4500 kg liegen (siehe Abbildung 13). Als weitere Einschränkung kam hinzu, dass gemäß Lieferanten- und Expertengesprächen gewisse Trafogrößen nicht verfügbar respektive finanziell ineffizient sind.

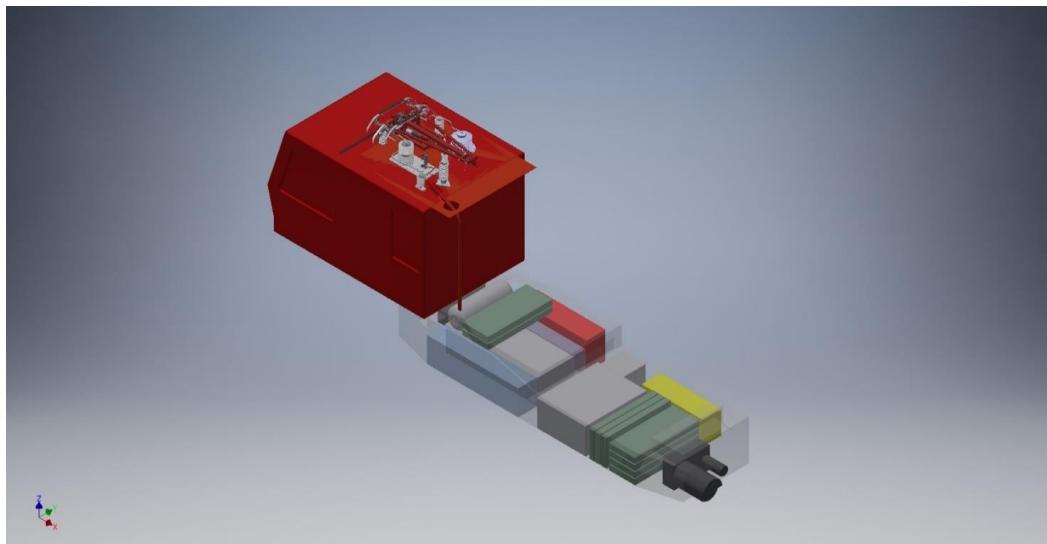


Abbildung 12: Bauteilanordnung Oberleitungsvariante mit Dachgarten und Trafo. Die abgesetzten Batterie-Module dienen zum Ausgleich der Achslasten. Bauteile: Antriebsstromrichter (Bauteil in grau, blaue Bereiche für Servicezugang, verdeckt), Motoren (schwarz), Batteriemodule (grün), Resthydraulik (gelb), Kühlssystem (rot, verdeckt), Trafo (dunkelgrau) und Kabine mit Dachgarten.

Mit der optimalen Kombination können von der Oberleitung kontinuierlich 450 kW bezogen werden. Höhere Anforderungen im Fahrbetrieb (bis zu 480 kW am Rad gemäss Referenzzyklus) werden durch die zusätzliche Batterieunterstützung ermöglicht.

Im normalen Beladungsfall beträgt die Achslast der Achse 2 zirka 20'160 kg, das Gesamtgewicht bleibt unter den 40 Tonnen.

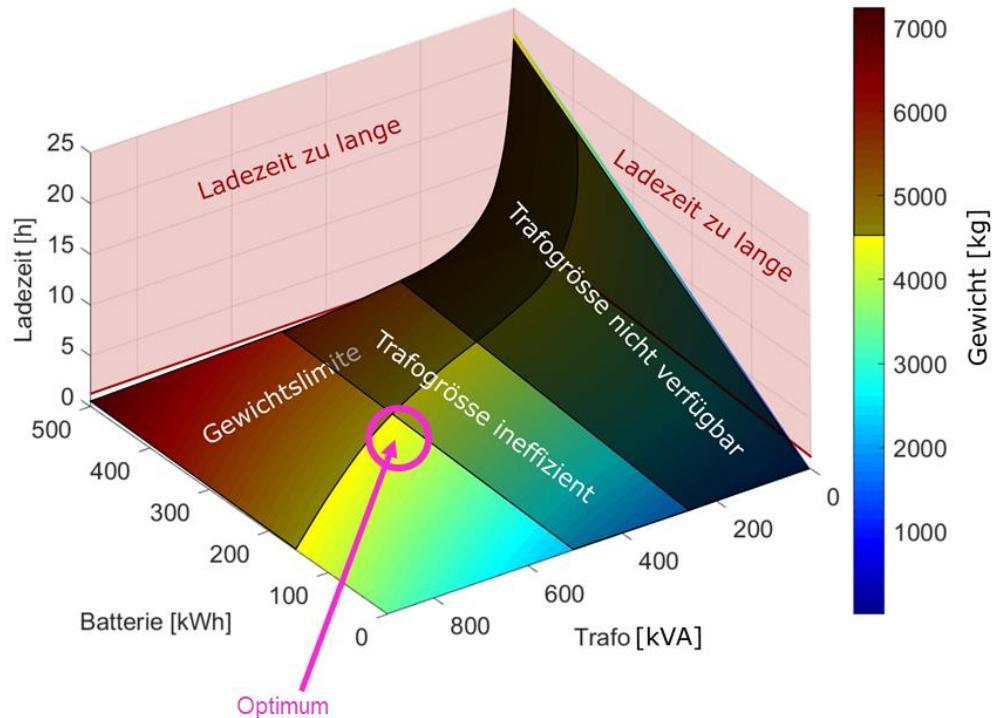


Abbildung 13: Einschränkungen in der Oberleitungs-Systemkonfiguration aufgrund des maximalen Gewichts, der Komponentenverfügbarkeit und der maximalen Ladedauer von einer Stunde. Die gewählte Konfiguration entspricht der maximal möglichen Batteriekapazität mit dem kleinstmöglichen Transformer.

4.1.4.4 Fahrzeug mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor (H₂-VM)

Für ein Fahrzeug mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor wird für eine Schicht etwa 38 kg Wasserstoff benötigt. Unter Berücksichtigung benötigter Reserven müsste ein Wasserstoffspeicher mit einer Kapazität von mindestens 45 kg installiert werden. Der Bauraum des ausgebauten Dieseltanks ist für die Unterbringung des Druckgasspeichers ungeeignet. Die Tanks müssten daher an anderen Positionen untergebracht werden, was jedoch zu grösseren Umbauaufwand (Abbildung 14, Option 1) respektive zu Nutzungseinschränkungen (Option 2) führen würde. Diese Einbauoptionen bieten jedoch lediglich Platz für zirka 37 kg nutzbare Wasserstoffkapazität an Bord. Somit müsste während einer langen Arbeitsschicht mindestens einmal nachgetankt werden.

Neben der Bauraumsituation stellen auch die resultierenden Fahrzeuggewichte eine aktuell kaum zu überwindende Herausforderung dar. Beide Optionen überschreiten bei maximaler Zuladung das zulässige Fahrzeuggewicht, und die Achslasten sind sehr grenzgängig respektive werden deutlich überschritten. Neue, sich in der Entwicklung befindende Wasserstofftanksysteme können diese Nachteile allenfalls in Zukunft kompensieren. [35]

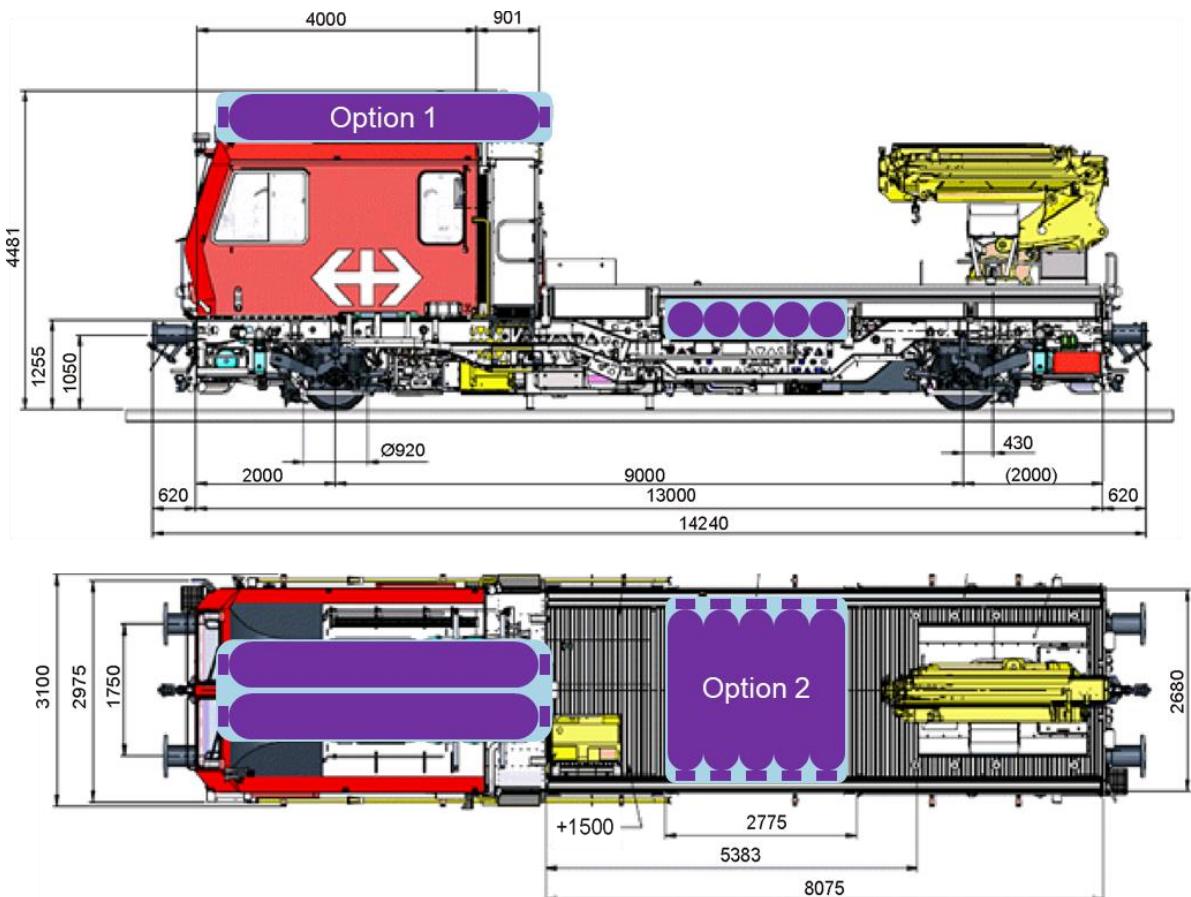


Abbildung 14: Mögliche Anordnungen der Wasserstofftanks: Option 1 auf dem Kabinendach (250 bar Speicher), Option 2 durch Erhöhung des Ladebodens (350 bar Speicher).

4.1.5 Umrüstungs- und Betriebskosten

Für die Abschätzung der Umrüstungs- und Betriebskosten der verschiedenen Antriebsvarianten wurden ausgewählte Aspekte betrachtet. Die einbezogenen einmaligen Kosten umfassen die Entwicklung, den Umbau, die Zulassung und die Inbetriebnahme eines Prototyps sowie den Umbau der Serienfahrzeuge. Für die laufenden Kosten wurden die Energiekosten für den Betrieb des Fahrzeugs sowie Aufwände für Wartung, Inspektion und Instandhaltung berücksichtigt. Diese Punkte bieten eine grundlegende Basis, um die finanziellen Belastungen und die Rentabilität der unterschiedlichen Antriebsvarianten zu bewerten.

Für das Basisfahrzeug wurde anstelle der Umbaukosten eine einfache Abschätzung der Refit-Aufwendungen des Fahrzeugantriebs vorgenommen. Dazu wurden anhand vorhandener Wartungstabellen die Kosten für die Revision und den Ersatz von verschiedenen Diesel-Antriebskomponenten zusammengetragen, die nicht im normalen Wartungsumfang berücksichtigt sind, respektive nach einer Einsatzdauer

von 25 Jahren ausgetauscht werden müssen. Um nicht nur die Komponenten, sondern auch die Arbeitsleistung zu berücksichtigen, wurde die Summe der Komponentenkosten mit dem Faktor 1.5 multipliziert. Durch die komplette Revision des Fahrzeugs soll die Einsatzfähigkeit für weitere 25 Jahre gesichert werden.

Es gilt zu beachten, dass die grundsätzlich erwartete Genauigkeit solcher Schätzungen in der Konzeptphase im Bereich von -20 Prozent bis +30 Prozent liegt. [36] Diese kann in Abhängigkeit von nicht betrachteten Umfängen und technologischen Unsicherheiten auch stärker abweichen.

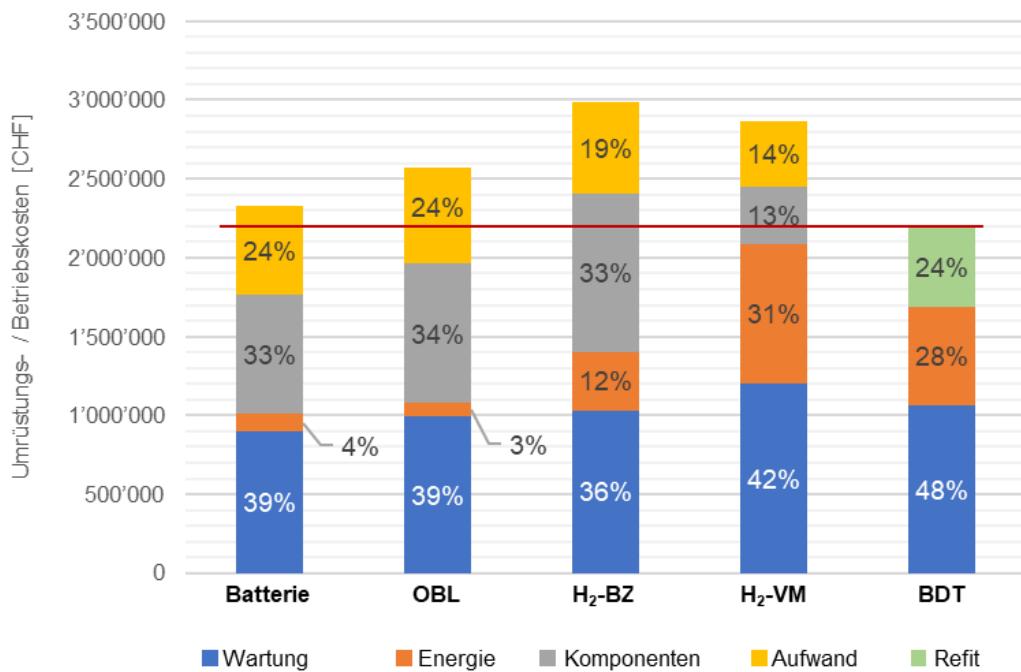


Abbildung 15: Zusammensetzung der Umrüstungs- und Betriebskosten für die verschiedenen Antriebsvarianten. Bei den Betriebskosten wurden hauptsächlich Energie- und Wartungskosten berücksichtigt. Die erwartete Genauigkeit solcher Schätzungen in der Konzeptphase liegt im Bereich von -20 Prozent bis +30 Prozent.

Für die Variante mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor (H₂-VM) ist zu beachten, dass diese Konfiguration aufgrund von Gewichtsüberschreitungen und betrieblichen Einschränkungen aktuell nicht umsetzbar ist und erst mit weiterentwickelten Komponenten (Tanksystemen, Motoren) realisiert werden kann.

Um zu überprüfen, wie steigende Komponenten- und Wartungskosten oder abweichende Umbauaufwendungen die errechneten Kostenschätzungen beeinflussen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wurden die Kostenanteile für die Komponenten des Umbaus, die Umbaukosten sowie die Wartungs- und Energiekosten jeweils einheitlich um 50 Prozent erhöht, um die Auswirkungen auf die Umrüstungs- und Betriebskosten zu bewerten. Der prozentuale Betrag wurde bei allen Fahrzeugen gleich gewählt, um zu prüfen, welche Variante die grösste Sensitivität aufweist. Aufgrund der unterschiedlichen technischen Reifegrade der verbauten Komponenten können in allen Bereichen auch grössere Abweichungen eintreten.

Tabelle 2: Auswirkungen auf die berechneten Umrüstungs- und Betriebskosten für die verschiedenen Einflussparameter bei einer einheitlichen Veränderung von +50 Prozent.

	BATT	BATT-OBL	H₂-BZ	H₂-VM	Basis (BDT)
Umbau	+12%	+12%	+10%	+7%	+4%
Komponenten	+16%	+17%	+17%	+6%	+8%
Wartung	+19%	+19%	+17%	+21%	+24%
Energie	+2%	+2%	+7%	+15%	+14%

Eine Umrüstung auf Batterie- oder Batterie-OBL-elektrische Antriebsvarianten kann sich bei steigenden Energie- oder Treibstoffkosten und höheren Wartungskosten lohnen. Diese Varianten sind durch die Vollelektrifizierung weitgehend von fossilen Energiepreisen unabhängig. Die Abschätzung der Umrüstungs- und Betriebskosten ist robust gegenüber unvorhergesehenen Kostensteigerungen einzelner Punkte, jedoch könnte eine Kumulation dieser Sensitivitäten grössere Auswirkungen haben.

4.1.6 Entwicklungs- und Umsetzungsrisiken

Die schwerwiegendsten Risiken betreffen die Nichteinhaltung von Gewichts- und Performance-Anforderungen. Ein Überschreiten der Gewichtslimiten verunmöglicht die Fahrzeugzulassung. Sind die Performance-Anforderungen nicht gewährleistet, wird das Einsatzgebiet des Fahrzeugs eingeschränkt. Eine gewissenhafte Planung des komplexen Umbauvorhabens und die ständige Überwachung der Gewichtsentwicklung sind wichtig. Bereits zu Beginn müssen alle am Projekt beteiligten Parteien einbezogen werden, um Terminpläne und technische wie auch normative Anforderungen dieser umfangreichen Umbauten genau zu spezifizieren und gemeinsam die Einhaltung der Anforderungen zu gewährleisten.

4.1.7 Zulassungskonzept

Für die zwei wichtigsten, mit den meisten Neuerungen behafteten Antriebsvarianten (batterieelektrisch und brennstoffzellenelektrisch) wurden entsprechende provisorische Zulassungsunterlagen vorbereitet und ein fiktives Zulassungskonzept beim BAV eingereicht. Der Schlüssel zum Umfang des Zulassungsaufwands ist die Einstufung des Umbauvorhabens nach zulassungsseitig vorgegebenen Kriterien. Die erste Einstufung der Änderung für beide Antriebe führt zum Ergebnis, dass mindestens eine «wesentliche Änderung» vorliegt. Die Einstufung als «wesentliche Änderung» bedeutet, dass die Risikoanalyse detailliert nachgeführt werden muss und die grundsätzliche Zulassungsfähigkeit gegeben ist. Hierzu kann eine Risikomoderation durch einen externen Risikoexperten hilfreich sein. Besonders im Zusammenhang mit neuen, teilweise im Bahnbereich noch weniger bekannten Antriebssystemen ist es daher wichtig, sich frühzeitig mit der Aufsichtsbehörde abzustimmen und ein gemeinsames Vorgehen zu definieren. Das BAV steht solch innovativen Vorhaben positiv gegenüber.

4.2 Zukünftige Lade- und Tankinfrastruktur

Zur Abklärung der technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen für eine zukunftsorientierte Lade- und Tankinfrastruktur wurde eine Studie für die Versorgung von Fahrzeugen und Baugeräten mit Energie aus erneuerbaren Quellen erarbeitet. Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene Energieträger charakterisiert, die aktuelle Fahrzeug- und Tankstellensituation analysiert und Lösungsansätze für die Versorgung von Schienenfahrzeugen und Baustellen unter Einbezug personeller Aspekte aufgezeigt. Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Studie sind in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

4.2.1 Kostenbetrachtungen Wasserstofftankstelle

Da bei einer Wasserstoff-Tankstelle viele Systeme – darunter Anzahl Zapfsäulen, Grösse des Pufferspeichers, Betankungsdruck, Jahresauslastung – variabel definiert werden können, wurden zum Kostenvergleich der Wasserstofftankstelle mit und ohne lokale Wasserstoffproduktion eine einfache Hardware-Konfiguration definiert. Auf Basis dieser Konfiguration wurde ein Kostenvergleich bezüglich der spezifischen Wasserstoffkosten (CHF/kg H₂) für Produktions-, respektive Absatzmengen von bis zu 500 kg Wasserstoff pro Tag zusammengestellt.

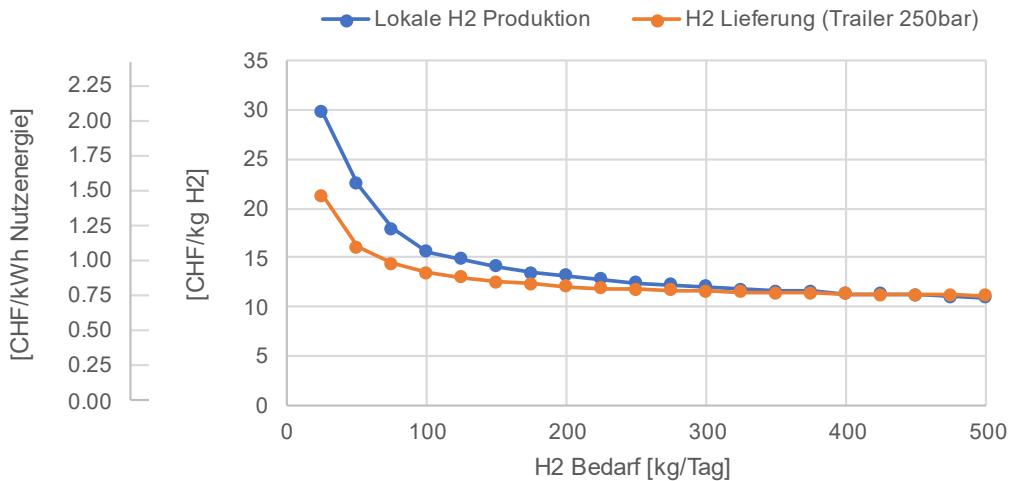


Abbildung 16: Kostenvergleich spezifische Wasserstoffkosten in CHF/kg H₂ respektive in CHF/kWh Nutzenergie (zweite y-Achse).

Die Kostenschätzung der gewählten Konfiguration zeigt, dass es bei einem lokalen Wasserstoffbedarf von weniger als 450 kg pro Tag günstiger ist, den Wasserstoff extern von einer Grossanlage zu beziehen. Um einen Überblick über die Zusammensetzung der Kosten zu bekommen, wurden die Kosten bei einem fixen Bezugswert von 200 kg Wasserstoff pro Tag miteinander verglichen und in Abbildung 17 gegenübergestellt.

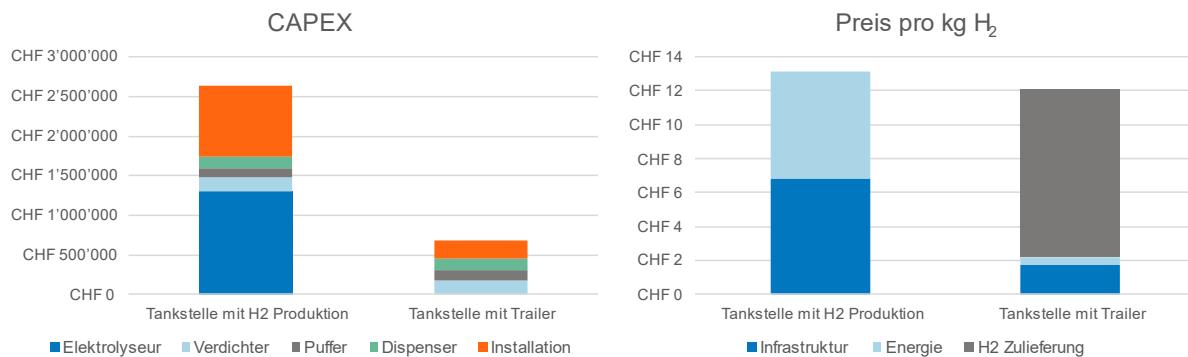


Abbildung 17: Aufteilung der Infrastruktur- und der Wasserstoffkosten.

Bei den Investitionskosten (Abbildung 17, links) ist ersichtlich, dass der Elektrolyseur einen beträchtlichen Anteil ausmacht und daher die infrastrukturbedingten Kosten pro Kilogramm Wasserstoff dementsprechend hoch sind. Bei einer Wasserstoff-Tankstelle, die per LKW beliefert wird, sind zirka 80 Prozent des Wasserstoffpreises auf die externen Kosten zurückzuführen; diese beinhalten die Produktion und den Transport. Bei der lokalen Wasserstoffproduktion sind die Kosten für die Infrastruktur und die Energie für die Wasserstofferzeugung nahezu gleich hoch. Kann für die Produktion des Wasserstoffs kein Bahnstrom eingesetzt werden, steigen die Kosten für die Energie um zirka 45 Prozent an (Stand 2022), wodurch sich der so produzierte Wasserstoff massiv verteuern würde.

4.2.2 Kostenbetrachtungen Ladeinfrastruktur

Um die spezifischen Energiekosten in CHF/kWh-Bezug in Abhängigkeit des mittleren Energiebezugs pro Ladung zu ermitteln, wurden auch gewisse Parameter in der Konfiguration der Ladeinfrastruktur fixiert. Dabei ist zu beachten, dass davon ausgegangen wird, dass Ladestationen an das lokale Stromnetz angeschlossen werden und nicht Bahnstrom beziehen. Dies wirkt sich entsprechend auf den Energiepreis aus. Als Basis für die Betrachtungen wurden die Energiepreise bei Erstellung des Berichts verwendet (ElCom, 07.10.2021).

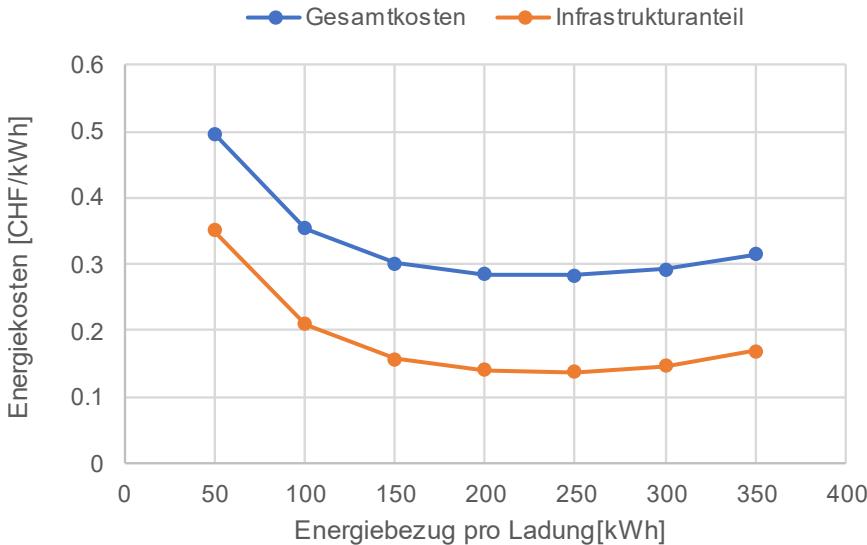


Abbildung 18: Spezifische Stromkosten (inkl. Infrastrukturstarkosten) für eine Ladestation in Abhängigkeit des mittleren Energiebezugs pro Ladung bei vier Ladungen pro Tag.

Ab 150 kWh pro Ladung sind die Kosten pro nachgeladener kWh vergleichsweise konstant und setzen sich zu einer Hälfte aus den effektiven Stromkosten und zur anderen Hälfte aus den Infrastrukturstarkosten zusammen. Die Kosten steigen bei höheren Energiemengen leicht an, da die Infrastruktur aufgrund der höheren benötigten Ladeleistung zur Einhaltung der Ladezeit teurer wird.

4.2.3 Vergleich der Nutzenergiekosten inklusive Infrastruktur

Im Bereich der Kostengleichheit zwischen der Wasserstoff-Tankstelle mit und ohne eigene Wasserstoffproduktion liegen die errechneten Wasserstoff-Kosten bei 11.14 CHF/kg. Werden die Kosten mit der Methodik gemäss Kapitel 3.1.1 unter Berücksichtigung der Antriebs- und Umwandlungseffizienzen in die Kosten pro kWh Nutzenergie berechnet, ergeben sich für den Wasserstoffpfad Kosten von 75.9 Rp./kWh Nutzenergie. Im Vergleich dazu liegen die Kosten einer Schnellladeinfrastruktur mit einer Ladestation pro kWh abgegebener Energie bei 29.5 Rp./kWh. Unter Berücksichtigung der Antriebseffizienzen ergeben sich dabei rund halb so hohe Kosten von 35.5 Rp./kWh Nutzenergie.

Anhand der Schätzungen und der angenommenen Parameter zeigt sich, dass die Energiekosten mit Berücksichtigung der Infrastruktur für Wasserstoff etwa 2.1-mal so hoch sind wie jene für elektrische Energie von einer Schnellladestation. Wird das Laden ab Bahnstrom in die Bewertungen einbezogen, liegt der Faktor aufgrund der geringeren Stromkosten sogar noch höher.

Durch einen höheren Bedarf an Wasserstoff respektive Strom ab Schnellladestation könnten die Auswirkungen der Infrastrukturstarkosten auf die Gesamtkosten weiter gesenkt werden. Dies könnte beispielsweise erreicht werden, wenn auch Busse, LKW oder PKW die Ladestationen oder Wasserstofftankstellen nutzen. Da die Ladestationen respektive Wasserstoffzapfsäulen für Bahnanwendungen zwingend in Gleisnähe stehen müssen, ist eine gleichzeitige Zugänglichkeit für Straßenfahrzeuge jedoch eher selten gegeben. Um die Zugänglichkeit zu verbessern, wären zusätzliche Ladestationen respektive Wasserstoffzapfsäulen in Strassennähe erforderlich, die an die bestehende Infrastruktur angeschlossen würden.

Die errechneten Zahlen wurden auf der Preisbasis des Berichtsjahres Anfang 2022 berechnet. In den Jahren zwischen 2022 und 2024 unterlagen die Energiepreise deutlichen Schwankungen. Da sich der Preis von grünem Wasserstoff an den Kosten von erneuerbarem Strom orientiert, hat sich dessen Marktpreis teilweise mehr als verdoppelt. [37]

4.2.4 Verteilung neuer Lade- und Tankinfrastruktur

Auf Basis der durchgeföhrten Datenanalysen wurden zunächst die streckenbezogenen Verbrauchsdaten, hochgerechnet auf das Jahr 2030, als Grundlage für die Optimierung der Tankstellenpositionierung aufbereitet.

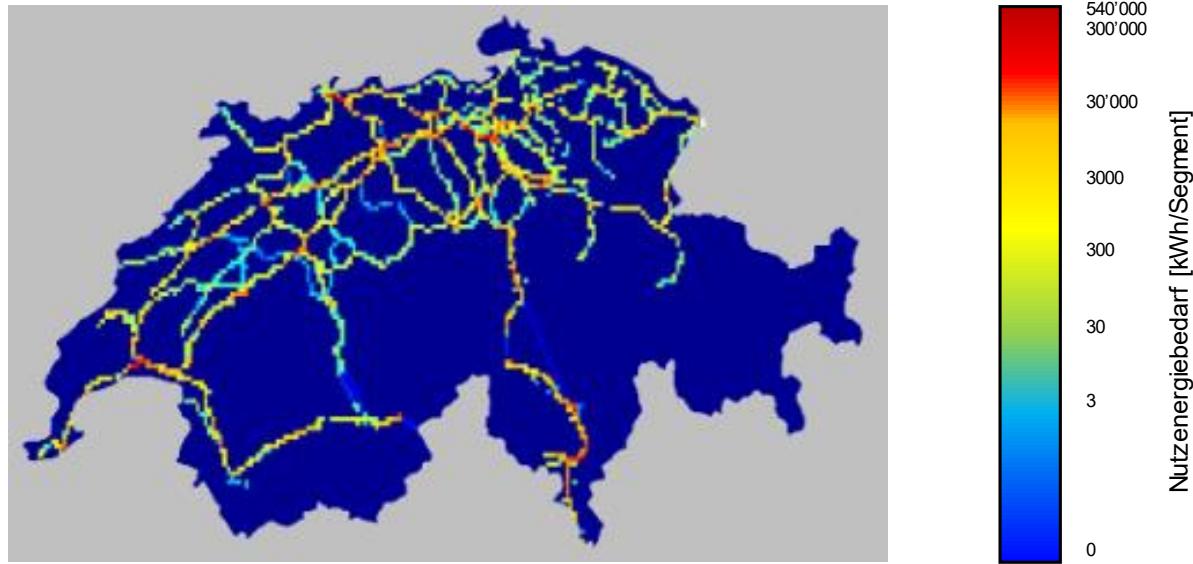


Abbildung 19: Prognostizierter Nutzenergiebedarf in kWh pro Segment im Jahr 2030 mit differenzierter Farbgebung zur Visualisierung der Bedarfsunterschiede. Den Tunneln (Lötschberg- und Gotthardtunnel oder dem Simplontunnel) können keine Verbräuche zugeordnet werden, da im Berg die GPS-Abdeckung fehlt. Entsprechend sind sie in neutralem Blau aufgeführt. Dunkelblaue Zonen liegen ausserhalb des Streckennetzes.

Bei diesen theoretischen Szenarien ist jedoch zu beachten, dass in der Realität nicht alle Tankstellenstandorte frei gewählt werden können. Gewisse Tankstellen sind – wie in Biasca beim Gotthard-Basistunnel – strategisch in der Nähe von Unterhaltsteams oder Spezialfahrzeugen positioniert, um eine schnelle Einsatzfähigkeit sicherzustellen. Diesen Umstand gilt es bei der Verteilung der realen Tankstellenstandorte auch in Zukunft zu berücksichtigen. In den folgenden theoretischen Betrachtungen wurde dies zur Vereinfachung jedoch weggelassen.

4.2.5 Analyse der möglichen zukünftigen Tankstellenverteilung

Unter Anwendung der Methodik gemäss Kapitel 3.2.3 wurde durch die schrittweise Erhöhung die ideale Anzahl Tankstellen anhand von zwei Optimierungskriterien ermittelt:

- Minimierung der mittleren Fahrzeit zur nächsten Tankstelle unabhängig von der Position auf dem ganzen Streckennetz.
- Minimierung der mittleren Fahrzeit zur nächsten Tankstelle in Abhängigkeit der Streckenabschnitte mit dem höchsten Dieselverbrauch (Streckenabschnitte mit hoher Anzahl Fahrbewegung von Dieselfahrzeugen).

In der Abbildung 20 sind die Resultate der mittleren Fahrzeit in Abhängigkeit von der Anzahl Tankstellen dargestellt. Es wird ersichtlich, dass der Nutzen jeder zusätzlichen Tankstelle ab einer Anzahl von gut 40 Tankstellen deutlich abnimmt.

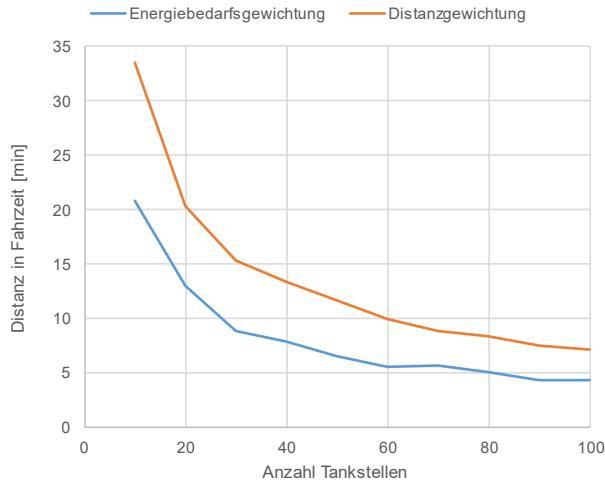


Abbildung 20: Durchschnittliche Distanz in Fahrzeit von jedem Punkt auf dem SBB-Schiennennetz zur nächstgelegenen Tankstelle (orange) und gewichtet nach Energieverbrauch (blau).

Aufgrund der Informationen zu den Kostenabhängigkeiten zeigt sich, dass bei einem Szenario von 45 Tankstellen lediglich 10 Prozent der Tankstellen so ausgelastet sind, dass Wasserstoff zu kommerziell interessanten Konditionen angeboten werden kann. Weiter zeigt sich, dass der grösste Teil der Tankstellen für eine Wasserstoffnachfrage von unter 100 kg pro Tag ausgelegt werden müsste. Dies führt dazu, dass die fixen Kosten der Tankstelle auf eine geringe Menge Wasserstoff abgerechnet werden muss, was zu einem deutlich überhöhten lokalen Wasserstoffpreis führt. Um die Tankstellen idealer auszulasten, müsste deren Anzahl reduziert werden, was wiederum zu längeren Anfahrtswegen und grösseren Ausfallzeiten führt.

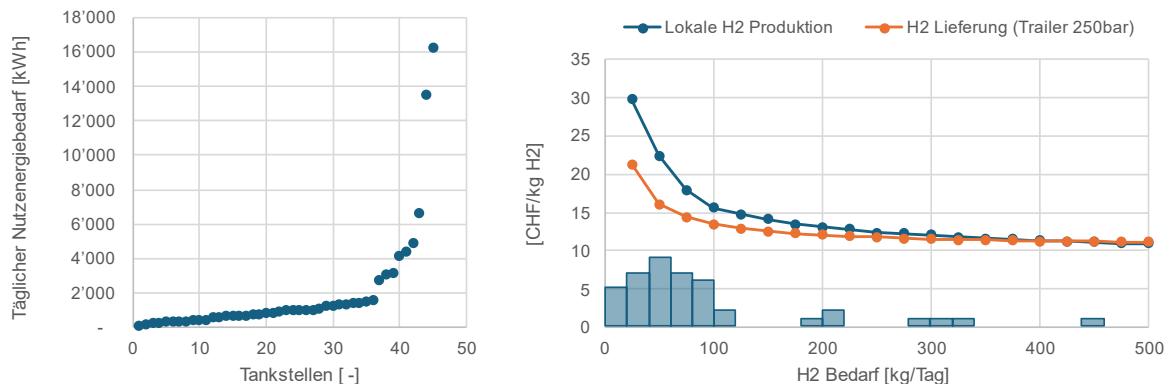


Abbildung 21: Tankstellen aufsteigend geordnet nach täglichem Energiebedarf für ein Szenario mit 45 Tankstellen (links) und Einordnung der Tankstellenanzahl und täglicher Absatz in die Kostenrechnung (rechts, die zwei grössten sind nicht auf der Grafik abgebildet).

4.3 Energieversorgung von Baustellen und Betriebserprobung

4.3.1 Zukünftige Energieversorgung von Baustellen

Baustellen werden noch weitgehend durch fossil betriebene Generatoren mit Energie versorgt. Batterien und Wasserstoff, unter Berücksichtigung ihrer spezifischen Vor- und Nachteile, könnten bei der Dekarbonisierung von Baustellen eine zentrale Rolle übernehmen.

Die aktuelle Energieversorgung einer Baustelle erfolgt mehrheitlich über einen chemischen Energieträger wie Diesel oder Benzin, der entweder direkt in den Geräten genutzt oder über Generatoren in elektrische Energie umgewandelt wird. In Zukunft dürfte hauptsächlich elektrische Energie für den Betrieb der Baustelle benötigt werden. Dafür sind batteriebasierte Lösungen und wasserstoffbasierte Energieversorgungsmöglichkeiten verfügbar.

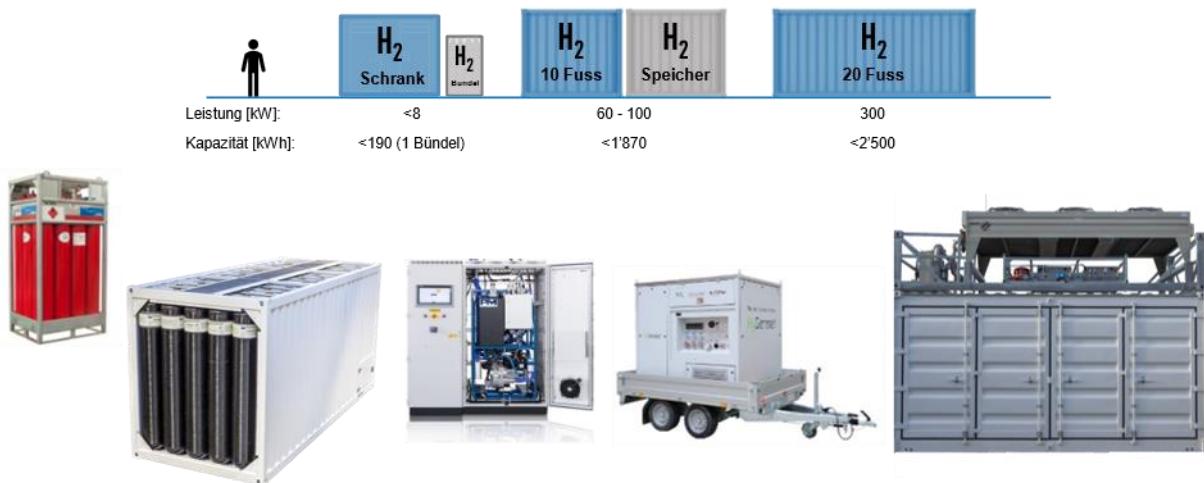


Abbildung 22: Energieversorgung für Baustellen mit Wasserstoff anhand von Produktbeispielen. [38]



Abbildung 23: Batteriespeicher zur Baustellenenergieversorgung anhand von Produktbeispielen. [39]

4.3.1.1 Größenklassen

Die Leistungsfähigkeit der bisherigen Energieversorgung wird anhand der maximalen Generatorleistung definiert, wobei meistens Leistungsklassen unterhalb von 50 kW zum Einsatz kommen. Anhand der Leistungsangaben in den verschiedenen Darstellungen ist ersichtlich, dass die Leistungsfähigkeit der neuen Systeme höher ausfällt und somit nicht limitierend ist. Der dem Generator beigestellte Dieselspeicher definiert die nutzbare elektrische Kapazität der bisherigen Energieversorgung. Abbildung 24 zeigt, dass der Diesel durch seine Energiedichte viel Kapazität auf kleinem Raum bereitstellt und alternative Systeme deutlich grösser ausfallen. Die volumenbezogene Energiedichte der neuen Systeme ist somit deutlich tiefer.

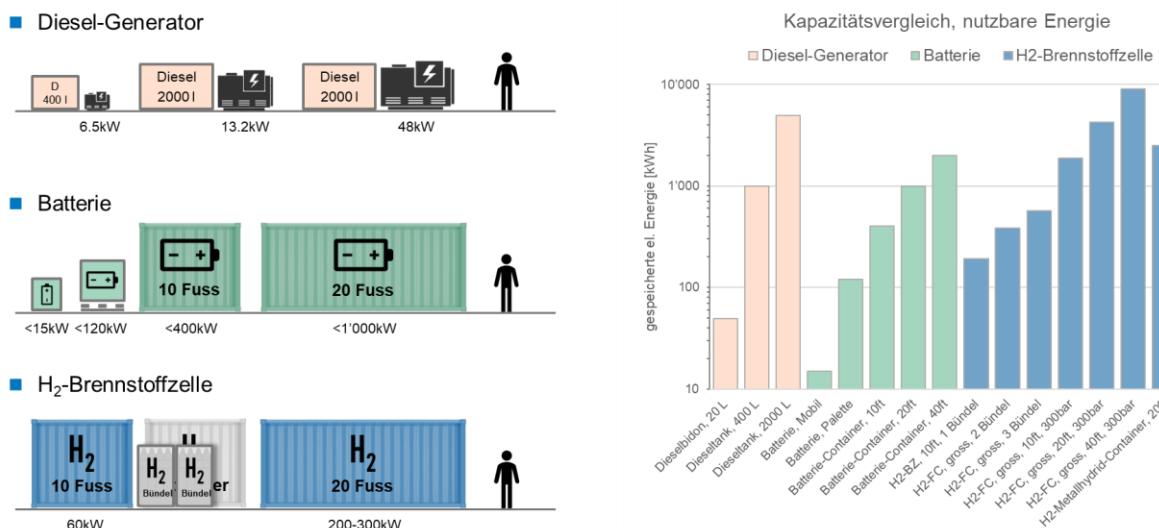


Abbildung 24: Vergleich der nutzbaren elektrischen Kapazität. Die y-Achse ist im logarithmischen Massstab dargestellt. Der 20-Fuss-H₂-Container beinhaltet eine Brennstoffzelle und den Speicher.

Bestehende Lösungen auf Wasserstoffbasis fallen bei kleinen Kapazitäten deutlich grösser aus als die Ausführungen als Batterie-Varianten. Dies liegt hauptsächlich am Größenverhältnis des Speichers zur Brennstoffzelle. Daher dürften wasserstoffbasierte Versorgungssysteme erst bei grösseren Speicher-Kapazitäten interessant sein. Abbildung 25 gibt einen Überblick, wie sich die Kapazitäten der unterschiedlichen Varianten in Größenklassen einteilen lassen.

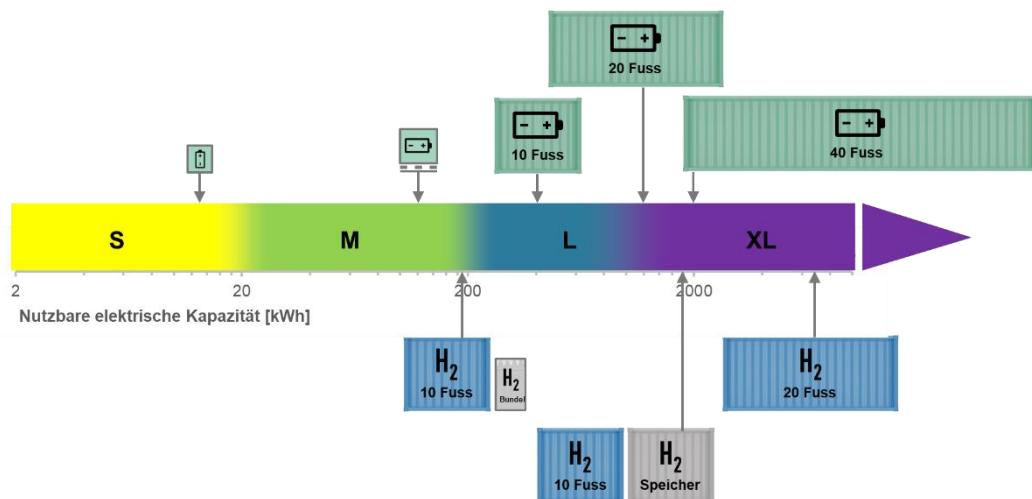


Abbildung 25: Vergleich und Größenklassierung der unterschiedlichen Baustellen-Energieversorgungskonzepte anhand ihrer nutzbaren elektrischen Kapazität (logarithmische Skala beachten).

Generell können auch die im Rahmen der Studie hergeleiteten Energiebedarfswerte für exemplarische Baustellen auf der Skala eingeordnet werden. Die Farbeinteilung entspricht dabei auch der Einteilung der nutzbaren elektrischen Energie. Dabei ist zu beachten, dass bei dieser Darstellung davon ausgegangen wird, dass der Speicher zwischen den Schichten nicht gefüllt/geladen wird. Somit zeigt diese Grafik auf, welche Speichergrösse nötig ist, um einen komplett energieautarken Betrieb sicherzustellen.

Die bisherige Erfahrung zeigt, dass durch Batteriespeicher der Größenklasse «S» eine Vielzahl von Baustellsituationen abgedeckt werden kann. Diese Systeme bieten die Möglichkeit, dass sie für die Bereitstellung grösserer Energiemengen modular kombiniert werden können, was die Bandbreite der Einsatzmöglichkeiten dieser Systeme erhöht. Bei höherem Bedarf können Speichersysteme der Klasse «M» oder «L» ergänzt werden. Grosse «XL»-Speicher dürften eher selten zum Einsatz kommen. Zum einen ist das Bedürfnis der kompletten Autarkie, also die Unabhängigkeit von einem lokalen Stromnetz, über längere Zeit selten. Zum anderen sind die Dimensionen solcher Speicher bereits beträchtlich und

ein entsprechender Stellplatz könnte je nach Baustellsituation schwer einzurichten sein. Wasserstoffspeicher können grössere Kapazitäten auf kleinerem Raum und netzunabhängig zur Verfügung stellen, sind jedoch abhängig von einer Wasserstoff-Versorgungsinfrastruktur.

4.3.1.2 Kostenvergleich grosser Speichersysteme

Bei kleineren benötigten Kapazitäten sind Batteriespeicher deutlich im Vorteil. Erst bei grösseren Anlagen in der Grössenordnung von rund 2 MWh können wasserstoffbasierte Anlagen grössentechnische und finanzielle Vorteile bringen.

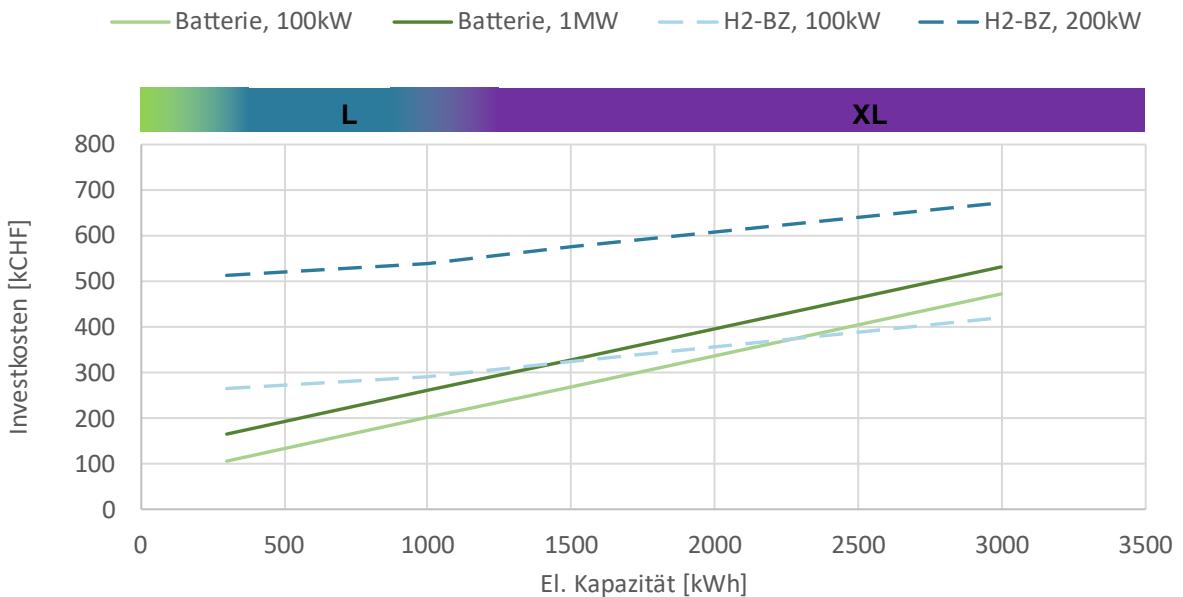


Abbildung 26: Investitionskostenvergleich von Batterie- und Wasserstoff-Brennstoffzellen-Systemen zur Baustellenenergieversorgung, basierend auf [40] ohne Infrastrukturstarkosten für die Energiebereitstellung.

Der Vergleich zeigt, dass die anschlussleistungsbedingten Kostenanteile von Wasserstoffsystemen (Brennstoffzellen) die Gesamtkosten deutlich stärker beeinflussen, als dies bei Batteriesystemen (Umrichter) der Fall ist. Erst bei kleinem Leistungsbedarf und hohen Kapazitätsanforderungen sind die Anschaffungskosten von Wasserstoffsystemen leicht im Vorteil. Jedoch gilt auch hier zu beachten, dass Wasserstoffsysteme auf zusätzliche Infrastruktur – Wasserstoffproduktion, Betankungsinfrastruktur, Ex-Schutz-Massnahmen – angewiesen sind. Sollten die Kosten für Brennstoffzellensysteme deutlich sinken und die entsprechende Wasserstoff-Versorgungsinfrastruktur vorhanden sein, gilt es die Verhältnisse neu zu bewerten.

4.3.2 Vergleich Energieversorgung von Baugeräten mit Batterien oder Wasserstoff

Grundsätzlich zeigt sich, dass mobile Geräte künftig hauptsächlich über Batterien mit Energie versorgt werden. Technisch bestehen auch Möglichkeiten, solche Geräte mit Wasserstoff als Energieträger zu betreiben. Zum Vergleich der beiden Möglichkeiten wurde eine Übersicht der dabei zu erwartenden Baugrößen erstellt.

- Batteriesysteme mit elektrischer Speicherkapazität



- Brennstoffzellensysteme mit chemischer Speicherkapazität

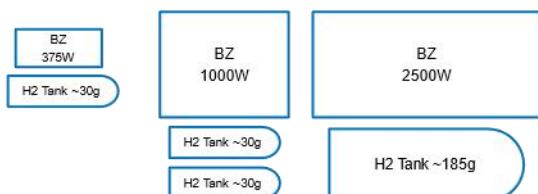


Abbildung 27: Links: Vergleich von Batterie- und Wasserstoffsystemen zur Baugeräteversorgung hinsichtlich des Bauraums; beschriftet sind die nutzbaren Kapazitäten. Rechts: optischer Vergleich zwischen den Versorgungsmöglichkeiten von Baugeräten. Oben: Batterie [41]. Unten: H₂-Brennstoffzelle [42] mit Speicherflasche.

Abbildung 27 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden Systeme mit vergleichbar nutzbaren elektrischen Energiemengen. Beim Brennstoffzellensystem können 30 g Wasserstoff mit einem chemischen Energiegehalt von zirka einer Kilowattstunde in etwa 400 Wattstunden elektrisch nutzbare Energie umgewandelt werden. Die Brennstoffzellen sind so dimensioniert, dass sie dieselbe Leistung zur Verfügung stellen können wie die Batteriesysteme, wenn sie moderat belastet werden. Wie bei den grossen Energieversorgungen setzt sich auch ein kleineres System aus einer Brennstoffzelle und einem Speicher zusammen. Zusätzlich zu diesen Komponenten sind weitere Bauteile wie Leitungen, Steuerungen, Batterie und gegebenenfalls Spannungswandler zum Zusammenschluss des Systems nötig. Zur Vereinfachung wurden diese Komponenten jedoch nicht dargestellt.

Um die Umsetzbarkeit einer brennstoffzellelektrischen Tirefonneuse (Schraubmaschine) zu prüfen, wurde mit einer Machbarkeitsstudie ein entsprechendes Konzept erstellt. Das System besteht aus einem sogenannten Powerpack, das die Brennstoffzelle, eine Batterie und die Steuerung beinhaltet. Die Brennstoffzelle verfügt über eine Leistung von 500 Watt und die zugehörige Batterie hat eine Kapazität von einer Kilowattstunde. Kombiniert wird das Powerpack mit einem Metallhydridspeicher, der bei einem Systemgewicht von 30 kg zirka 300 g Wasserstoff speichern kann. Dies ermöglicht eine maximale Einsatzdauer von etwa 8 Stunden. Generell wurde das System als machbar eingestuft, da aber auf dem Markt zu diesem Zeitpunkt bereits erste batterieelektrische Geräte verfügbar waren, wurde kein Prototyp umgesetzt.

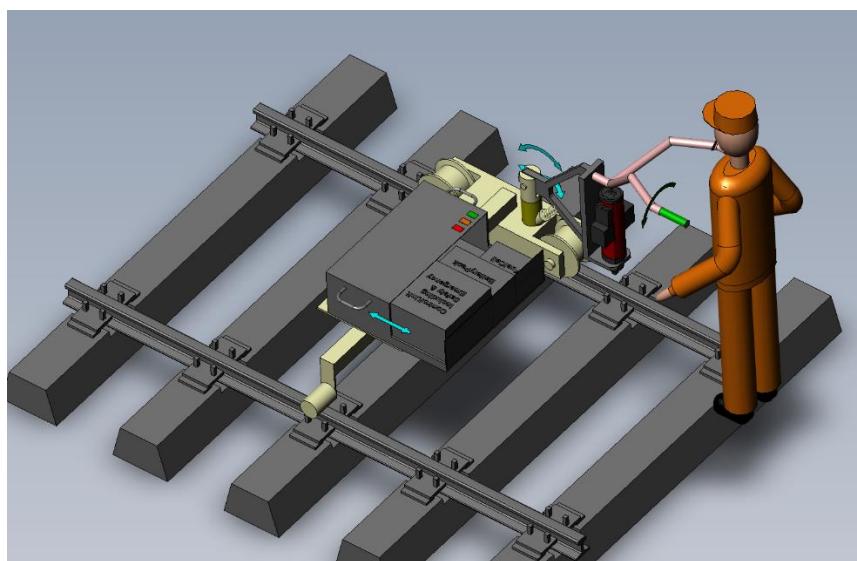


Abbildung 28: Konzeptdarstellung der Tirefonneuse im Einsatz mit Bediener.

4.3.3 Baustellenerfahrung mit dem Wasserstoff-Brennstoffzellen-Generator

Ergänzend zu den meist theoretischen Betrachtungen der verschiedenen Studien sollen im Rahmen eines weiteren Projekts auch praktische Erfahrungen im Umgang und der Nutzung von Wasserstoff im Baustellenumfeld gewonnen werden. Da in diesem Bereich bereits erste Lösungen auf dem Markt verfügbar waren, hat sich die Gelegenheit ergeben, ein H₂-Genset zu mieten und damit eine Betriebserprobung durchzuführen. Auf eine anfänglich angedachte Eigenentwicklung konnte daher verzichtet werden. Der Vorteil der Lösung liegt in der vermeintlich einfacheren Energiezuführung. Anstelle von zwei bis drei Batterien, die in einem Tauschprinzip nachgeladen werden, soll durch das H₂-Genset schneller und flexibler die nötige Energie zugeführt werden können.

Im Laufe des Projekts hat sich gezeigt, dass bereits der Einsatz unter freiem Himmel eine aufwändige Vorbereitung mit sich bringt. Insbesondere weil die Anwendung neuartig ist und Gefahreneinschätzungen im Vergleich zu bestehenden Technologien – beispielsweise hat sich die Gefahr von Gasflaschen als «akzeptabel» etabliert – aufwändiger geführt werden. Zusammen mit dem Hersteller des H₂-Gensets wurde eine FMEA zu möglichen technischen Störungen im Baustellenbetrieb durchgeführt, wobei die risikominimierenden Massnahmen des Systems in die Betrachtungen mit einbezogen wurden. Zur Absicherung wurde zu dieser FMEA zusätzlich ein Bericht eines Gutachters mit Wasserstoff-Erfahrung verfasst. Des Weiteren wurde eine separate Risikoanalyse zu den Gefährdungen für die Personen im nahen Umfeld des Geräts im Betrieb erarbeitet und zusätzlich eine Risikoanalyse aus Sicht des Arbeitsschutzes mit Massnahmen erstellt. Diese war initial nötig und kann nun für zukünftige Einsätze als Grundlage genutzt werden.

Die organisatorischen Vorbereitungen und der eigentliche Betrieb auf einer konkreten Baustelle wurden in einem Betriebserprobungskonzept festgehalten. Die Betriebserprobung konnte in die Baustelle zur Erneuerung einer Weiche in Dulliken integriert werden. Die Akzeptanz und der Support der Verantwortlichen vor Ort sind von entscheidender Bedeutung. Nachdem die Bauplanung der Baustelle abgeschlossen war, wurde der zu erwartende Energiebedarf abgeschätzt. Anhand der ermittelten Werte wurde die Konfiguration der Energieversorgung abgeleitet, wobei sich der Betrieb des H₂-Genset als Range Extender zusammen mit einem grossen Batteriespeicher als die am besten geeignete Lösung ergeben hat. Die Laufzeit einer Wasserstofffüllung wurde mit zwei bis drei Schichten abgeschätzt. Da die Baustelle etwa vier Wochen dauern sollte, war die Sicherstellung der Wasserstoffversorgung von zentraler Bedeutung. Das auf einem Anhänger aufgebaute H₂-Genset konnte zur Betankung zu einer nahegelegenen Wasserstofftankstelle gefahren werden. Damit verbunden war ein logistischer Aufwand, der zwischen den Schichten eingeplant werden musste. Bei der aktuellen Abdeckung der Wasserstofftankstellen in der Schweiz, war es bei diesem Erprobungsstandort eher zufällig, dass eine Wasserstofftankstelle in Reichweite der Baustelle lag.



Abbildung 29: H₂-Genset (im Hintergrund) als Range-Extender für einen mobilen Batteriespeicher (im Vordergrund) auf einer Bahnbaustelle für einen Weichenersatz.

Die Betriebserprobung ist Stand Mitte November 2024 noch nicht abgeschlossen. Ein Erfahrungsbericht wird zu gegebener Zeit erstellt und kann auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden. Zusammenfassend lässt sich aktuell festhalten, dass für diese Betriebserprobung aufgrund des hohen Innovationsgrads und der damit einhergehenden begrenzten Erfahrung umfassende Vorbereitungsarbeiten notwendig waren. Mit steigender Erfahrung ist jedoch von einer Reduktion des Aufwands auszugehen.

4.4 Nebenprojekte

Ergänzend zu den untersuchten Kernfragestellungen wurden im Rahmen von Nebenprojekten weitergehende Aspekte eines potenziellen Wasserstoff-Ökosystems beleuchtet. Deren Haupterkenntnisse werden an dieser Stelle kurz zusammengefasst.

4.4.1 Pilotanwendung unterbrechungsfreie Stromversorgung

Bereits vor der vorliegenden Studie wurde in Rekingen (Aargau) als Pilotanwendung eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) mit einer Brennstoffzelle als Energieerzeuger zur Stromversorgung des Bahntechnikgebäudes der SBB realisiert. Bei Ausfall des 50-Hz-Stromnetzes wird die Brennstoffzelle mit erneuerbarem Wasserstoff versorgt und erzeugt unterbrechungsfrei die benötigte Energie für den sicheren Betrieb der technischen Bahnanlagen (Stellwerk, Telekom, Weichen). Die SBB hat in den letzten fünf Jahren umfangreiche Erfahrungen gesammelt. Erhöhte Unterhaltskosten, ungenügende Systemzuverlässigkeit und fehlender Support führten dazu, dass die Anlage ausser Betrieb genommen wurde. Die wertvollen Erfahrungen werden festgehalten und bei allfälligen zukünftigen weitere Anwendungen miteinbezogen. Neue Projekte stehen aktuell nicht bevor.

4.4.2 Sektorenkopplung

Mit einem Grossverteiler, der ein Distributionslager mit einer grossen PV-Anlage ausgerüstet hat und damit Wasserstoff für seine H₂-LKW erzeugen wollte, wurde eine Machbarkeitsstudie für eine gemeinsame Nutzung durchgeführt. Da ein Elektrolyseur mehr als nur während den Sonnenstunden betrieben werden muss, um wirtschaftlich zu sein, wurde geprüft, ob mit einem Stromtausch tagsüber überschüssiger Solarstrom ins Bahnstromnetz gespiesen werden könnte. Im Gegenzug sollte in der Nacht Strom aus dem Bahnnetz zum Betrieb des Elektrolyseurs bezogen werden können. Die Aktivitäten zu diesem Projekt sind aktuell unterbrochen und stehen vor der Herausforderung regulatorischer Hürden, die vor einer Weiterführung zuerst gelöst werden müssen. Die Bestimmungen für die Nutzung von Bahnstrom sowie dem daraus erzeugten Wasserstoff ausserhalb der Bahninfrastruktur müssen angepasst werden.

4.4.3 Wasserstofftransport mit der Bahn

Der Transport von Wasserstoff auf der Bahn wurde mit ChemOil, einem auf den Transport von Chemikalien spezialisierten Tochterunternehmen von SBB Cargo, im Rahmen verschiedener Abklärungen geprüft. Das Ergebnis ist, dass Wasserstoff ohne Einschränkungen mit der Bahn transportiert werden darf. Es bedingt jedoch für den Bahntransport zugelassene Wagen, die nur von Drittanbietern zur Verfügung stehen. Hinderungsgründe für solche Transporte sind aktuell zum einen der per Bahn eher unflexible Abtransport bei Verzögerungen an den Wasserstoff-Produktionsstandorten. Zum anderen ist beim Importverkehr die lange Laufzeit des Bahntransports hinderlich, wenn bei Produktions-, respektive Lieferunterbrüchen innerhalb der Schweiz die Bedarfsspitzen rasch aus dem Ausland abgedeckt werden müssen.

4.4.4 Synergieeffekte bei Wasserstoffbetankung an Bahnhöfen

Mit einem Unternehmen des öffentlichen Verkehrs wurde geklärt, ob sich Bahnhöfe für die Betankung von Wasserstoff-Bussen eignen könnten. Zum einen ist die Lage der Bahnhöfe meist zentral und erfordert oft ohnehin einen Aufenthalt des Fahrzeugs an diesem Verkehrsknotenpunkt. Zum anderen wäre die Anlieferung des Wasserstoffs per Bahn einfach möglich. So könnten weitere Synergien und sich durch die Mehrfachnutzung ergebende finanzielle Vorteile genutzt werden. Lokale Abklärungen haben stattgefunden, die räumliche Situation für die Installation eines solchen Wasserstoff-Hubs in Bahnhofs-nähe ist jedoch herausfordernd. Die Abklärungen haben zudem gezeigt, dass auch wenn Raum vorhanden wäre, ein solches Vorhaben zur gleichzeitigen Nutzung von Wasserstoff für Bahn und öffentlichen Verkehr an den regulatorischen Vorgaben scheitern würde. Die Bestimmungen für die Nutzung von Bahnstrom sowie dem daraus erzeugten Wasserstoff ausserhalb der Bahninfrastruktur müssen angepasst werden.

4.4.5 Machbarkeitsstudie zur Brechung von Leistungsspitzen

Eine Machbarkeitsstudie zur Prüfung der technischen Möglichkeiten zum Brechen von 50-Hz-Leistungsspitzen der Tunnellüftung in den Wartungsfenstern am Wochenende im Gotthard-Basistunnel wurde durchgeführt. Die ursprüngliche Idee war es, eine Art Ökosystem in Kombination mit einer Wasserstoffproduktion von Energie Uri aufzubauen. Die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

4.4.6 Kompatibilitätsprüfung der Weichenheizungen

Die SBB betreibt auch Weichenheizungen mit Erdgas. In den kommenden Jahren wird die Beimischung von Wasserstoff in das lokale Erdgasnetz an Bedeutung gewinnen. Deshalb wurde angestossen, die Wasserstoffverträglichkeit von Armaturen, Verrohrungen und Brennern rechtzeitig zu prüfen. Die Abklärungen haben ergeben, dass die Kompatibilität der Komponenten bis zu einer Beimischung von 20 Prozent Wassersoff im Erdgas gegeben ist. Bei den erdgasbetriebenen Gebäudeheizungen stellt sich diese Frage nicht, da alle Erdgasheizungen sukzessive abgelöst werden.

4.4.7 Sounding Board des BFE zur Wasserstoffstrategie

Das Bundesamt für Energie (BFE) erarbeitet derzeit eine umfassende Wasserstoffstrategie für die Schweiz. Die SBB hat Einstieg in einem eigens vom BFE dazu eingerichteten Sounding Board. Dessen Ziel ist es, die Wasserstoffgesamtstrategie in alle Richtungen mit den nötigen Stakeholdern abzustützen.

5 Diskussion

5.1 Technischer Lösungsraum bei Wasserstoffanwendungen

5.1.1 Systemkomplexität von Wasserstoffsystmen

Ein Fahrzeug, das mit Brennstoffzellen und einem entsprechenden Wasserstofftanksystem ausgerüstet ist, muss systembedingt umfänglich elektrifiziert werden. Dies umfasst neben dem Antrieb auch die zugehörigen Nebenaggregate. Um gleichzeitig die Anforderungen an den Gesamtenergiebedarf und die erforderliche Spitzenleistung abzudecken, ist in Kombination immer ein Batteriesystem zu ergänzen. Dies ist nötig, um betriebsbedingte Leistungsspitzen mit hoher Dynamik abzudecken, da Brennstoffzellensysteme im Vergleich zu Batterien ihre Leistungsabgabe eher träge variieren können.

Ein wasserstoffbasiert Antrieb für ein solches Fahrzeug ist daher immer deutlich komplexer als ein rein batterieelektrischer Antrieb. Neben der Basiselektrifizierung wird ein zusätzlicher Energiewandler in Form der Brennstoffzelle benötigt. Zur Energiebereitstellung muss ein zusätzlicher, in der Grösse erheblicher Speicher in Form von Wasserstofftanks und Anbauteilen mitgeführt werden.

Die Zuverlässigkeit respektive die Verfügbarkeit von Wasserstoff-Brennstoffzellensystemen, wie sie in mobilen Anwendungen eingesetzt werden, weisen noch nicht den Reifegrad eines rein batterieelektrischer Antriebs aus. Aufgrund dieser und der weiteren genannten Faktoren wird in aktuellen Anwendungen meist auf letzteren ausgewichen. Vermehrt wird auch der Wasserstoff-Verbrennungsmotor als Option aufgeführt. Eine Maschine mit bisher Diesel-hydraulischem Antrieb könnte zukünftig als Ausführung mit einem Wasserstoff-Verbrennungsmotor verfügbar sein. Dadurch bleibt die antriebstechnische Systemkomplexität auf bekanntem Niveau und wird lediglich durch die Wasserstoffversorgung mit einem Wasserstoff-Tanksystem ergänzt. Bei einem solchen System wird die Verfügbarkeit aufgrund der mehrheitlich bekannten Verbrennungsmotorentechnologie als besser eingeschätzt. Für die Beurteilung der Gesamtsystemkomplexität ist jedoch auch bei dieser Variante des Wasserstoffantriebs die zugehörige Tankstelleninfrastruktur zu berücksichtigen. Zudem gilt es zu beachten, dass der Reifegrad der Wasserstoffverbrennung noch nicht den Anforderungen des Bahnumfelds entspricht.

5.1.2 Technologietrends

Batterie- wie Brennstoffzellentechnologien entwickeln sich weiter und die zunehmende Industrialisierung ermöglicht das Potenzial für sinkende Preise beider Technologien. Betrachtet man die technischen Aspekte, haben sich beide Technologien in den vergangenen Jahren unterschiedlich entwickelt.

Die Skalierung und Serienproduktion von Brennstoffzellensystemen ist derzeit im Vergleich zu Batteriesystemen noch nicht so weit fortgeschritten. Aktuell fliessen mehr Investitionen in die Weiterentwicklung der Batterietechnologie als in die Brennstoffzellentechnologie, weshalb bisher antizipierte Skaleneffekte bis anhing ausgeblieben sind.

Bei Batterien nehmen die Energiedichte und die Zyklusfestigkeit durch technische Weiterentwicklungen stetig zu. Bei Wasserstoffsystmen bestehend aus Brennstoffzellen, Wasserstofftanks und optional benötigten Batteriesystemen sind hinsichtlich der erreichbaren Steigerung der Energiedichten Limitierungen gesetzt. Die gasförmige Speicherung von Wasserstoff ist die in der Mobilität am weitesten entwickelte Speicherform. Die zylinderförmigen Drucktanks schränken die Flexibilität bei der Unterbringung der Speicher ein, was besonders bei Anwendungen mit kompakten Raumforderungen zusätzliche Herausforderungen mit sich bringt. Dies wird sich auch durch weitere Entwicklungen kaum ändern. Auch wenn flüssiger Wasserstoff ein entsprechendes Potenzial aufweist, sind das Handling und die Lagerung deutlich umständlicher.

Bei der Betankung von gasförmigem Wasserstoff wurden Fortschritte erzielt sowie neue Technologien und Betankungsprotokolle für eine schnellere Betankung für den Bahnbereich entwickelt. Jedoch sind auch hier die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit entsprechender Tankanlagen noch nicht auf dem erforderlichen Reifegrad.

5.1.3 Fahrzeugumrüstungen

Von der SBB eingesetzte Fahrzeuge werden generell nach der Hälfte ihrer Lebensdauer modernisiert, um die Fahrzeuge für die zweite Nutzungsphase zu ertüchtigen. In Rahmen dieser Modernisierung, dem sogenannten Refit, ist auch eine Überarbeitung des Antriebs möglich.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Energiedichte von Wasserstoff- respektive Batteriesystemen gegenüber dem bisherigen Dieselantrieb ist die Integration der benötigten Energiemenge in Bestandsfahrzeuge mit eingeschränkten Bauraummöglichkeiten zum Erreichen einer vergleichbaren Autarkie oft

nicht möglich. Die Machbarkeitsstudie hat gezeigt, dass eine batterieelektrische Lösung bei Systemen mit grossen Batteriekapazitäten und Oberleitungszugang zielführender ist, da die Schweiz einen sehr hohen Elektrifizierungsgrad des Schienennetzes aufweist. Systeme mit grosser Batteriekapazität und Oberleitungszugang können zudem Synergieeffekte bieten, zum Beispiel die Netzstabilisierung zum Abfedern von Lastspitzen wie sie im Projekt BIENE (Batterieschwarm im Bahnstromnetz) detailliert untersucht wurde. [43] Für grosse Maschinen mit energieintensivem Betrieb, wie er bei grossen Gleisbaumaschinen üblich ist, können wasserstoffbasierte Antriebe eine Option zur Dekarbonisierung im Rahmen einer Neubeschaffung darstellen. Gleisbaumaschinen bestehen meist aus mehreren Wagen, so dass die Ergänzung dieses Verbunds um einen Energiewagen denkbar ist. Aufgrund der für den Betrieb benötigten Energiemengen sind die Lösungsmöglichkeiten für Batteriespeicher eingeschränkt. Außerdem bringt die Energielogistik und Infrastruktur zum Aufladen solcher Batterien grössere Herausforderungen mit sich, als dies für kleine Batteriesysteme der Fall ist.

Bestehende Fahrzeuge im Rahmen ihrer Ertüchtigung bei Lebenshälfte von Dieselantrieben auf elektrifizierte Antriebe umzurüsten, ist mit hohen technischen und zulassungsspezifischen Herausforderungen verbunden: Diese stehen nicht im idealen Verhältnis zum zukünftigen Nutzen des Fahrzeugs, weshalb die gewonnenen Erkenntnisse hauptsächlich für künftige Neubeschaffungen genutzt werden.

5.1.4 Kleingeräte

Generell besteht die Möglichkeit, auch Kleingeräte mit Wasserstoff als Energieträger zu verwenden. Die entsprechenden Technologien sind vorhanden und eine Anwendung wurde in einer Konzeptstudie untersucht.

Die Thematik der Systemkomplexität unterscheidet sich bei Kleingeräten kaum von grossen Maschinen. Die zu speichernde Wasserstoffmenge ist im Vergleich zum Systemgewicht, bestehend aus Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicher, sehr klein. Das potenziell erhöhte Gewicht verschlechtert bei den meistens handgeführten Geräten die Bedienbarkeit. Zudem sind die sensiblen Brennstoffzellen besonders in Kleingeräten anspruchsvollen Umgebungsbedingungen wie Vibrationen und staubiger Luft ausgesetzt. Überdies ist auch bei diesen Systemen je nach Grösse ein System zum Speichertausch oder eine komplexe Betankungsinfrastruktur nötig. In den in Frage kommenden Anwendungen stehen bereits batteriebasierte Geräte zur Verfügung, die bezüglich der zu erwartenden Systemkosten vorteilhafter sind.

Auch bei mit Batterien betriebenen Geräten ist die Energieversorgung sicherzustellen. Besonders wenn grössere Geräte zum Einsatz kommen und eine lange Autarkie gefordert ist, kann die Netzkapazität zur Energieversorgung gegebenenfalls nicht ausreichen. Um dies zu bewältigen, werden Pufferspeicher benötigt. Dies wäre mit wasserstoffbasierten Anlagen möglich. Eine Lösungsmöglichkeit in Form eines H₂-Gensets wird im Herbst 2024 im Baustelleneinsatz erprobt (siehe Kapitel 4.3.3).

5.2 Wasserstoff-Ökosystem

5.2.1 Wasserstofferzeugung und Sektorenkopplung

Der Transportsektor ist für den Wasserstoffmarkt derzeit eher unbedeutend. Der Verbrauch von Industrie und Raffinerien im Speziellen übersteigen den prognostizierten Bedarf des Transportsektors bis 2030 um ein Vielfaches.

Wenn in bestimmten Fällen der Einsatz von Wasserstoff für Bahnanwendungen sinnvoll ist, muss es aus Klimasicht zwingend grüner Wasserstoff sein. Genau dieser grüne Wasserstoff ist aktuell nicht in grossen Mengen verfügbar, wird jedoch in verschiedensten Industriebereichen mit wesentlich höherem Bedarf benötigt, um deren Dekarbonisierungsbestrebungen voranzutreiben. Daher entsteht ein grosser Konkurrenzkampf um diesen grünen Wasserstoff, was sich wiederum im Preis dieses Energieträgers niederschlägt. Bis der gesamte Industrieverbrauch an Wasserstoff aus nachhaltiger Quelle stammt, sind grosse Transformationsaktivitäten und Investitionen nötig, die Jahrzehnte dauern dürften.

Grundsätzlich ist die Wasserstoffproduktion durch die SBB zur Deckung des Eigenbedarfs möglich und bietet so die Chance, Einfluss auf die Preisstrukturen zu nehmen. Da aber aufgrund der technischen Einschätzungen die Nutzungsfelder von Wasserstoff für die SBB begrenzt bleiben, ist die Wirtschaftlichkeit nur bei der Nutzung von Synergieeffekten mit der Industrie und anderen Stakeholdern des öffentlichen Verkehrs möglich. Ein Verkauf von Wasserstoff an Dritte ist nicht möglich, sofern dieser aus Bahnstrom hergestellt wird und ausserhalb des Bahnnetzes genutzt werden soll (siehe auch Kapitel 4.4.4). Aus diesen technischen und regulatorischen Gründen scheint die Sinnhaftigkeit für die Eigenproduktion nicht gegeben.

5.2.2 Transport und Distribution

Die Wasserstofflogistik ist für die verbreitete Nutzung des Energieträgers essenziell. Europaweit wird mit verschiedenen Initiativen die Ertüchtigung beziehungsweise der Ausbau von bestehender Pipelineinfrastruktur geprüft, um die zukünftige Verteilung von Wasserstoff zu unterstützen.

Die in diesen Initiativen entwickelten Umrüstungskonzepte von bestehenden Pipelines sind noch sehr vage, und es konnten erst begrenzte Praxiserfahrungen gesammelt werden. Meist wird bei der Umrüstung von bestehenden Erdgaspipelines in einem ersten Schritt lediglich mit einer Beimischung von Wasserstoff zum Erdgas gearbeitet. Die direkte Nutzung von reinem Wasserstoff ist so ohne deutlichen technischen Mehraufwand nicht möglich. Eine Umstellung der Pipelineinfrastruktur für den Transport von reinem Wasserstoff ist mit hohen Investitionen in Anlagen und Werkstoffe verbunden.

Für die Versorgung von Verbrauchern im Bahnbereich, bei der SBB oder bei Dritten spielt der Transport mittels Pipeline aus aktueller Sicht eher eine untergeordnete Rolle. Vielmehr ist der Transport in einem konventionellem Drucktank per LKW zurzeit die bevorzugte Beförderungsart in der Schweiz. Abklärungen haben gezeigt, dass die SBB einen angestrebten Wasserstoffbackbone durch Transportleistungen auf der Schiene ergänzen kann.

5.2.3 Wasserstoff-Tankstellennetz

Die SBB konnte keinen Anwendungsfall identifizieren, der die Umsetzung eines wasserstoffbasierten Antriebs erfordert oder begünstigt. Dies bedeutet wiederum, dass ein zugehöriges Wasserstoff-Tankstellennetz ebenso wenig im Fokus zukünftiger Entwicklungen steht.

Auch die Rentabilität eines Tankstellensystems für den Eigenbedarf konnte nicht aufgezeigt werden. Zur Kostenoptimierung müsste ein solches Netz mehreren Nutzungszwecken dienen können, um die erforderliche Auslastung sicherzustellen. Durch regulatorische Vorgaben sind jedoch Synergien mit dem öffentlichen Verkehr oder der Industrie nicht möglich, sofern der dort bereitgestellte Wasserstoff aus subventionierter Energie erzeugt wurde. Dabei wäre es gerade diese Energie aus den eigenen Kraftwerken, die den Business Case für die Erzeugung von grünem Wasserstoff positiv beeinflussen könnte.

5.2.4 Ökosysteme im Ausland

Das hochelektrifizierte Bahnnetz in der Schweiz führt dazu, dass für die wenigen Fahrzeuge, die sich abseits der Fahrleitung bewegen, batterieelektrische Lösungen im Vordergrund stehen. Im europäischen Umland bleibt die Elektrifizierung des Schienennetzes eine Herausforderung. Der aktuelle Elektrifizierungsgrad im EU-Durchschnitt liegt bei etwa 54 Prozent, was bedeutet, dass fast die Hälfte der Bahnstrecken noch mit Dieselloks betrieben werden. Wasserstoff stellt dort eine mögliche Alternative zur Elektrifizierung und den Dieselloks dar. [44] Hier sind nicht nur die Spezialfahrzeuge auf eine ausgebauten Wasserstoffinfrastruktur angewiesen. Der Initiator ist in diesen Fällen der Personenverkehr, wodurch ein ökonomisch sinnvoller Betrieb möglich scheint.

5.3 Aktualität und Relevanz der gewonnenen Erkenntnisse

Die in diesem Dokument referenzierten Projekte wurden in den Jahren 2021 bis 2024 erarbeitet, gewisse Aktivitäten dauern noch an. Blickt man fünf Jahre zurück, waren damals sowohl die Politik als auch die Industrie an einem Startpunkt neuer Aktivitäten. Die weiteren Entwicklungen der bahnspezifischen Batterietechnologie waren bezüglich Kosten, Qualität und Verfügbarkeit nur schwer abzuschätzen. Zu diesem Zeitpunkt war es richtig und aus heutiger Sicht auch wichtig, Wasserstoff als Schwerpunktthema genauer zu betrachten.

Hinsichtlich der Hardwarekosten und der Verfügbarkeit hat sich in den vergangenen Jahren die Anzahl der Anbieter entsprechender Technologien verbreitert, sowohl für Wasserstoff als auch in der Batterietechnologie. Durch die Erhöhung der Stückzahlen konnten Kosteneinsparungen erzielt werden, was sich positiv auf entsprechende Umsetzungsprojekte ausgewirkt hat. In diesem Zeitraum wurden jedoch im In- und Ausland verschiedene Förderprogramme aus unterschiedlichen Gründen zurückgefahren respektive eingestellt. Dadurch ist die Investitionsbereitschaft in Wasserstofftechnologien deutlich gesunken, was den Ausbau entsprechender Infrastruktur verzögert.

Im Zeitraum dieses Projekts haben sich die Rahmenbedingungen auf dem Energiemarkt deutlich verändert. Die Energiekosten waren in den letzten Jahren starken Schwankungen unterworfen. Besonders die inländische Produktion von grünem Wasserstoff wurde davon negativ beeinflusst, was zu einer Versteuerung des Wasserstoffs geführt hat. Damit zusammenhängende Projekte wurden dadurch erschwert.

Im Rahmen der Projekte wurde der Austausch zwischen Nutzern und Ämtern initiiert und wichtige Hürden zur Nutzung von Wasserstoff im Schweizer Schienenverkehr wurden identifiziert. Durch die geschaffenen Kontakte kann der Austausch zu Themen wie Arbeitssicherheit und Verwendung von Bahnstrom ausserhalb des Bahnnetzes weitergeführt werden.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

6.1 Wasserstoffbasierte Antriebssysteme

Die gesamtheitlich durchgeführten Analysen im Bereich der Wasserstoffantriebe haben wichtige Erkenntnisse zutage gefördert und erlauben die Einordnung der Möglichkeiten im Bahnumfeld in der Schweiz. Innerhalb der SBB wird Wasserstoff nach der vertieften Betrachtung nicht als geeignete Antriebstechnologie für Fahrzeuge weiterverfolgt. Dies gilt sowohl für Refit-Projekte als auch für Neubeschaffungen. Zusammenfassend haben folgende Hauptargumente zu dieser Einschätzung beigetragen:

- Techno-ökonomisch hat ein wasserstoffbasiertes Antriebssystem aufgrund der höheren Komplexität gegenüber einem batterieelektrischen Antrieb grosse Nachteile. Die Beschaffung gestaltet sich umfangreicher, und der Betrieb sowie die Wartung sind aufwändiger. Wird ein batterieelektrischer Antrieb mit einem Stromabnehmer zu einer Hybridlösung ergänzt, nimmt die Komplexität dieses Antriebssystems ebenfalls zu. Aber durch die so ermöglichte flexible elektrische Nachladung der Batterie über die Oberleitung ergeben sich im hochelektrifizierten Bahnnetz der Schweiz deutliche Vorteile gegenüber den von einer Tankstelleninfrastruktur abhängigen Diesel- und Wasserstoff-Fahrzeugen. Deshalb wird diese batterieelektrische Antriebstechnologie mit Stromabnehmer für zukünftige Beschaffungen als zielführend erachtet.
- Der Betrieb einer (temporären) Mischflotte bestehend aus Diesel- und Wasserstoff-Fahrzeugen führt unweigerlich zu einer parallel geführten Tankinfrastruktur, die wirtschaftlich kaum tragbar wäre. Die heute 65 Dieseltankstellen der SBB müssten mit wachsender Wasserstoffflotte sukzessive durch Wasserstoftankanlagen ersetzt werden. Da sich gleichzeitig auch reine batterieelektrische Schienenfahrzeuge weiter etablieren werden, müssten die hohen Kosten für den Unterhalt dieser komplexen Tankanlageninfrastruktur auf wenige Fahrzeuge abgewälzt werden. Zudem stellt die benötigte Wasserstofflogistik zur Versorgung der Tankstellen signifikante Herausforderungen dar.
- Weitere Hürden sind die hohen Sicherheitsanforderungen, insbesondere beim Einsatz von Wasserstoff und wasserstoffbasierten Antrieben in Tunnels. Diese zusätzlich zu treffenden Sicherheitsmaßnahmen erhöhen die Kosten und den technischen Aufwand im Vergleich zu anderen Antriebsformen.

Die aufgeführten Hauptargumente sind die Schlussfolgerungen aus den SBB-internen Betrachtungen. International gibt es etwa im Gleisbaumfeld begründete Anwendungsszenarien für den Einsatz von Wasserstoff. Gleisbaumaschinen oder ähnlich grosse schienengebundene Baumaschinen weisen einen hohen Energiebedarf bei gleichzeitig hohen Autarkieanforderungen auf. Je nach Baustellensituation kann die Kapazität des Stromnetzes für das Aufladen allfälliger Batterien an seine Grenzen stossen. Daher scheint hier der Einsatz von Wasserstoff denkbar. Die SBB will den sich in diesem Sektor ergebenden Markt nicht einschränken und wird diesen daher weiter beobachten. Die im Rahmen dieser Arbeiten erstellten Grundlagen sollen weiter gepflegt werden, um den Einsatz von Wasserstoff durch Dritte möglich zu machen. Die SBB ist bereit, die nötigen Diskussionen im Rahmen von konkreten Angeboten und Anfragen zu besprechen.

6.2 Wasserstoffproduktion und Vertrieb

Die Analysen der Haupt- und Nebenprojekte zum Gesamtsystem in Bezug auf Produktion und Vertrieb von grünem Wasserstoff haben im SBB-Umfeld ein nicht erschlossenes Potenzial aufgezeigt. Insbesondere der unterschiedliche Tagesgang der Energieerzeugung und der Nutzung im Bahnbetrieb würden die netzstabilisierende Produktion von Wasserstoff begünstigen. Vielseitige Abklärungen zusammen mit interessierten Stakeholdern aus der Industrie haben weitere regulatorische Hürden erkennbar gemacht, die ein solches Wasserstoff-Ökosystem selbst dann behindern würden, wenn der im Bahnsystem produzierte Wasserstoff dem restlichen öffentlichen Verkehr diskriminierungsfrei zur Verfügung gestellt werden könnte. So ist aktuell lediglich eine Wasserstoffproduktion zum Eigenbedarf möglich, wobei sich im Laufe der Studien gezeigt hat, dass die SBB keinen Bedarf zu decken hat. Aktuell ist keine Wasserstoffproduktion zur Bereitstellung an Dritte geplant.

Eine Wasserstofflogistik auf dem Netz der SBB wäre bereits heute realisierbar. Zusammen mit ChemOil wurden die nötigen Grundlagen dazu erarbeitet, sodass ChemOil eine entsprechende Dienstleistung erbringen kann.

6.3 Energieversorgung von Baustellen

Die Energieversorgung auf Bahnbaustellen mit teils langen Autarkieanforderungen und schwierigen Zuführungsbedingungen ist herausfordernd und zeigt das Bedürfnis flexibler Lösungen. Für schienengebundene Spezialfahrzeuge ist der Netzzugang über einen Stromabnehmer eine vielversprechende Lösung. Sonstige Werkzeuge und grössere Baumaschinen wie Bagger oder Kransysteme haben diese Möglichkeit nicht und sind auf eine kabelgebundene Lösung angewiesen. Eine reine Versorgung über Batteriespeichersysteme ist aufgrund der sich daraus ergebenden Energilogistik schwierig. Oberleitungsanschlüsse über entsprechende Trafos und Niederspannungsverteiler müssen aufwändig installiert werden. Auf Baustellen, bei welchen der Netz- oder Oberleitungszugriff eingeschränkt ist, müssen aufwändige Logistikprozesse zum Austausch der leeren Batteriespeicher etabliert werden. Hier bieten wasserstoffbasierte Energieversorgungssysteme interessante Vorteile. Zur genauen Auslotung dieser Vorteile und zur Schaffung der Grundlagen wurde eine entsprechende Lösung in Form des H₂-Gensets im Herbst 2024 erprobt, wobei die ersten Ergebnisse bereits in dieses Dokument und dessen Schlussfolgerungen eingeflossen sind.

Der aktuelle Vergleich der Technologien auf Basis neutraler technο-ökonomischer Analysen zeigten Lösungsmöglichkeiten für den breiteren Einsatz von Batterien in diesem Bereich. Die heute existierenden Systeme können bereits eine grosse Bandbreite an Bedarfsfällen abdecken. Für die wenigen, aber dennoch vorhandenen Spezialfälle werden Alternativen benötigt. In diesen Fällen kommt ein H₂-Genset als mögliche Option hinzu. Jedoch bleibt hier zu erwähnen, dass Tunnelarbeiten mit wasserstoffbasierten Systemen aktuell aufgrund der regulatorischen Vorgaben hinsichtlich Arbeitssicherheit noch ausgeschlossen sind und die Grundlagen dafür weiter erarbeitet werden müssen.

6.4 Weitere Nutzungsmöglichkeiten

Neben den besprochenen Hauptaspekten wurden weitere Anwendungsfälle untersucht. Diese wurden jedoch nach gründlicher Prüfung verworfen. So würde zum Beispiel die Nutzung von Wasserstoff als Langzeitspeicher zur Stabilisierung der Bahnstromversorgung enorme Wasserstoffmengen im MWh-Bereich erfordern. Diese Mengen zwischenzuspeichern und im Bedarfsfall die benötigte Leistung zur Verfügung zu stellen, ist weder finanziell noch organisatorisch umsetzbar.

Hier gilt es hervorzuheben, dass diese Erkenntnisse keine allgemeine Gültigkeit haben und lediglich für die Betrachtungen in der Schweiz gelten. Bahnnetze im Ausland, wie zum Beispiel in Deutschland und in den USA, stehen aufgrund der deutlich tieferen Elektrifizierungsrate ihrer Schienennetze vor einer anderen Ausgangslage, was die Beurteilung von Wasserstoff erheblich beeinflusst. Die SBB beobachtet dies konsequent weiter, um Trends und Erkenntnisse in die stete Überprüfung der internen Beschlüsse einfließen zu lassen.

6.5 Aktuelle und zukünftige Entwicklungen im Wasserstoffsektor

Über den Zeitraum der Erarbeitung der Studieninhalte haben sich viele Rahmenbedingungen für den Einsatz von Wasserstoff verschoben. Schwankende Energiepreise und teilweise eingeschränkte Verfügbarkeit von Wasserstoff und finanzieller Fördermittel im Umland führen aktuell zu Verzögerungen in der Weiterentwicklung der Technologie für Bahnanwendungen. Die Schlussfolgerungen der in diesem Dokument aufgeführten Aktivitäten bleiben auch unter Einbezug dieser Aspekte unverändert.

Diese Effekte zeigen jedoch auch, dass der Markt weiter zu beobachten ist. Die Technik wird sich weiter entwickeln und an Zuverlässigkeit zunehmen. Durch Skaleneffekte können die Komponenten der Wasserstoffsysteme kosteneffizienter werden. Der Energiemarkt wird sich durch den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien wandeln und dies kann auch die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff beeinflussen. Regulatorische Hürden hinsichtlich Arbeitssicherheit und Verwendung von Bahnstrom durch Dritte wurden identifiziert und können im gemeinsamen Austausch Schritt für Schritt abgebaut werden.

Bei grösseren Veränderungen der genannten Rahmenbedingungen sind getroffene Entscheide systematisch zu hinterfragen und anhand der geänderten Voraussetzungen neu zu bewerten. Die SBB ist bereit, wo sinnvoll, Wasserstofftechnologien auch in Zukunft zu erproben und den durch die aktuellen Studien geschaffenen Erfahrungsschatz zu erweitern.

7 Verzeichnisse

7.1 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom
BATT	Batterieelektrische Antriebsvariante des Baudienstraktors
BATT-OBL	Batterieelektrische Antriebsvariante des Baudienstraktors mit Oberleitungsstromversorgung
BAFU	Bundesamts für Umwelt
BAV	Bundesamt für Verkehr
BDT	Baudienstraktor (in diesem Kontext meist der Tm 234 Serie 4)
BFE	Bundesamt für Energie
BIENE	BatterIeschwarm im BahnstromNETz, SBB Projekt
BMS	Batterie-Management-System
BZ	Brennstoffzelle
CAPEX	Capital Expenditures, Investitionsausgaben
CGH ₂	Compressed Gaseous Hydrogen, gasförmiger Wasserstoff unter Druck
CO	Kohlenmonoxid, toxisches Gas
CO ₂	Kohlendioxid, Klimagas
EKAS	Eidgenössischen Koordinationskommission für Arbeitssicherheit
EICOM	Eidgenössischen Elektrizitätskommission
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
GWP	Global Warming Potential, Erderwärmungspotenzial
H ₂	Wasserstoff
H ₂ -BZ	Brennstoffzellenelektrische Antriebsvariante des Baudienstraktors
H ₂ -VM	Variante des Baudienstraktors mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor
HEMU	Hydrogen Electric Multiple Unit, Zug mit Wasserstoffantrieb
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil, erneuerbarer Diesel aus Abfällen und Reststoffen
Hz	Frequenz, im Zusammenhang mit der Frequenz im Stromnetz
KVA	Kilovoltampere, gesetzliche SI-Einheit der elektrischen Scheinleistung
kW / MW	Kilowatt resp. Megawatt, Leistungsangabe
kWh / MWh	Kilowattstunde resp. Megawattstunde, Energieangabe
OPEX	Operational Expenditures, Betriebsausgaben
PV	Photovoltaikanlage (auch PV-Anlage), Solarstromanlage
Refit	Umbauten von bestehenden Fahrzeugen zur Modernisierung
Scope	Bereiche, denen Treibhausgasemissionen zugeordnet werden können
Scope 1	direkte Emissionen eines Systems, wie Abgase von Verbrennungsmotoren
Scope 2	indirekte Emissionen, wie aus ausserhalb erzeugtem und eingekauftem Strom
TCO	Total Cost of Ownership
TTA	Treibstoff-Tankanlage
USV	unterbrechungsfreie Stromversorgung
V	Volt, elektrische Spannung

7.2 Literaturverzeichnis

- [1] **Netto-Null-Ziel 2050**; Bundesamt für Umwelt; <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/emissionsverminderung/verminderungsziele/ziel-2050.html>; aufgerufen am 11.06.2024
- [2] **Klimaschutz SBB**; SBB; <https://company.sbb.ch/de/ueber-die-sbb/verantwortung/nachhaltigkeit/umweltschutz/klimaschutz.html>; aufgerufen am 06.06.2024
- [3] **Perspektive BAHN 2050, Studie zu Kernsatz 8**; SBB Energie; <https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/aktuell-startseite/berichte/perspektive-bahn-2050/energieeffizienz-treibhausgasreduktion-erneuerbare-energien.pdf>; aufgerufen am 07.10.2024
- [4] **Thesen zur künftigen Bedeutung von Wasserstoff in der Schweizer Energieversorgung**; BFE; 27.09.2022
- [5] **The European hydrogen market landscape**; European Hydrogen Observatory; Februar 2024; <https://observatory.cleanhydrogen.europa.eu/sites/default/files/2024-02/Report%2001%20-%20The%20European%20hydrogen%20market%20landscape%20-%20February%20update.pdf>; aufgerufen am 07.10.2024
- [6] **Power-to-hydrogen and hydrogen-to-X energy systems for the industry of the future in Europe**; Genovese, Matteo & Schlüter, Alexander & Scionti, Eugenio & Piraino, Francesco & Corigliano, Orlando & Fragiacomo, Petronilla; (2023); International Journal of Hydrogen Energy; 10.1016/j.ijhydene.2023.01.194
- [7] **Global Hydrogen Review 2023**; International Energy Agency; <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023#overview>; aufgerufen am 07.10.2024
- [8] **Stromkennzeichnung**; Schweizerische Bundesbahnen SBB – Geschäftseinheit Energie; <https://www.strom.ch/de/service/stromkennzeichnung/schweizerische-bundesbahnen-sbb-geschaeftseinheit-energie>; aufgerufen am 05.11.2024
- [9] **Machbarkeitsstudie «Umrüstung des Baudienstraktors Tm 234 Serie 4»**; Bericht im Auftrag der SBB, Thomas Bütler, Simon Müller, Helbling Technik AG Aarau, 2021
- [10] **Machbarkeitsstudie «Lade- und Tankinfrastruktur»**; Bericht im Auftrag der SBB, Thomas Bütler, Simon Müller, Helbling Technik AG Aarau, 2022
- [11] **Technischer Bericht – Bewertung der Wasserstoffsicherheit auf Bahntunnelbaustellen**; Bericht im Auftrag der SBB, Dr.-Ing. David Wenger, Manfred Greisel, Dr. Rune Bahlo, Malte Radecke, Wenger Engineering GmbH, 2022
- [12] **Electrified powertrains for wheel-driven non-road mobile machinery**; Automot. Engine Technol. 6, 1–13; 2021; <https://doi.org/10.1007/s41104-020-00072-z>
- [13] **Definitionen TCO von wlw («Wer liefert was»)**; <https://www.wlw.de/de/inside-business/praxiswissen/strategischer-einkauf/tco>; aufgerufen am 08.08.2024
- [14] **BFE-Projekt «Aufbau und Betrieb der ersten Wasserstoff-Tankstellen in der Schweiz mit einem Nenndruck von 70 MPa»**; Schlussbericht vom 09.12.2019; <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=36922>
- [15] **Techno-economic calculations of small-scale hydrogen supply systems for zero emission transport in Norway**; Ostein Ulleberg, Ragnhild Hancke; International Journal of Hydrogen Energy; 1201 – 1211; 2020; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.170>
- [16] **Techno-economic Study of Hydrogen as a Heavy-duty Truck Fuel**; Janis Danebergs; Department of Energy Technology, KTH Stockholm; 2019; <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1372698/FULLTEXT01.pdf>
- [17] **Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs**; Monterey Gardiner, Sunita Satyapal; Department of Energy USA; 2009; https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf?Status=Master
- [18] **Energieaufwand für Gaskomprimierung**; Institut für Energietechnik; HSR Hochschule für Technik Rapperswil; 2014 https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/technik/3.7.1_erneuerbare_energien_und_umwelttechnik/iet/power-to-x/06_energie_fuer_gaskomprimierung.pdf
- [19] **Perspectives of Power-to-X technologies in Switzerland, White Paper**; Kober et al; SCCER Joint Activity 2019; https://www.psi.ch/sites/default/files/2019-07/Kober-et-al_WhitePaper-P2X.pdf
- [20] **Optimization of Hydrogen Cost and Transport Technology in France and Germany for Various Production and Demand Scenarios**; Amin Lahnaoui, Christian Wulf, Didier Dalmazzone; Energies; 14,744; 2021
- [21] **Hydrogen Road Transport Analysis in the Energy System: A Case Study for Germany through 2050**; Markus Reuss, Paris Dimos, Aline Léon, Thomas Grube, Martin Robinius, Detlef Stolten; Energies; 14,3166; 2021
- [22] **E-Bridge Kompetenz in Energie**; <https://e-bridge.de/#hydexmodal>, aufgerufen für die Studie [L+T] im September 2021
- [23] **BAFU Bericht «Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Non-road-Sektors»**; 2015; Nummer UW-1519-D; <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/energieverbrauch-und-schadstoffemissionen-des-non-road-sektors.html>
- [24] **H₂Genset**; Wasserstoff-Energieversorgung für mobile und semi-stationäre Anwendungen, <https://autoaq.ch/zukunftsprojekte/mobiler-wasserstoff-generator/>; aufgerufen am 13.06.2024
- [25] **Sicherheit in der Anwendung von Wasserstoff**; Schmidtchen U. & Wurster R., Springer Verlag, 2017
- [26] **Wasserstoff: Eigenschaften, Sicherheit, Gefahren**; TÜV-Nord, <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/wasserstoff-eigenschaften-sicherheit-gefahren/#:~:text=Wasserstoff%20ist%2C%20seinen%20physikalischen%20und,wie%20Explosionen%20oder%20Wasserstoffverspr%C3%B6dung%20drohen>, aufgerufen am 18.06.2024
- [27] **Beispiel eines Wärmebilds einer Wasserstoffflamme**; <https://www.butterfly.com/shop/pl/blog-posts/flir-thermal-imaging-hydrogen-flame-detection-monitoring>; aufgerufen am 05.11.2024
- [28] **HyResponder**; European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders, <https://hyresponder.eu/>; aufgerufen am 13.06.2024
- [29] **HyTunnel-CS**; Pre-normative research for safety of hydrogen driven vehicles and transport through tunnels and similar confined spaces, Project No. 826193, <https://hytunnel.net/>; aufgerufen am 13.06.2024

- [30] **Bauarbeitenverordnung, BauAV**; SR 832.311.141, 18. Juni 2021, <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2021/384/de>; aufgerufen am 05.11.2024
- [31] **EKAS Richtlinie 6514 «Untertagarbeiten»**; Ausgabe Oktober 2005, <https://www.suva.ch/de-ch/download/richtlinien-und-gesetze/untertagarbeiten--ekas/untertagarbeiten--ekas--6514.D>; aufgerufen am 05.11.2024
- [32] **Joule-Thomson-Effekt**; <https://de.wikipedia.org/wiki/Joule-Thomson-Effekt>; aufgerufen am 05.11.2024
- [33] «**Auf dem Weg zur Emissionsfreiheit im Zugverkehr**»; Studie im Auftrag des BMVI koordiniert durch die NOW GmbH; 2016; https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/broschuer_wasserstoff-infrastruktur-fuer-die-schiene_online-version.pdf; aufgerufen am 05.11.2024
- [34] **Klimaneutrale SBB 2030; Betrachtung und Empfehlungen für Schienenfahrzeuge Infrastruktur – Update 2023**; S. 33, Kapitel 5.1 – Technische Aspekte: Lademöglichkeiten und -Lösungen; Marco Meier (I-NAT-TO-EAS); Internes Dokument, veröffentlicht am 24.5.2024
- [35] **Counter report on H2 combustion in feasibility study Tm 234-4** (SBB_report_Tm234_4_V2.1.pdf); SeSi, heia-fr, 2022
- [36] **Regional Express Rail Program, Hydrail Feasibility Study Report**; CPG-PGM-RPT-245, Revision B; February 2, 2018
- [37] **H2 Barometer**; E-Bridge Consulting GmbH; Issue 1, May 2024; https://e-bridge.com/wp-content/uploads/2024/05/E_Bridge_Hydrogen-Barometer_1-2024.pdf; aufgerufen am 11.06.2024
- [38] **Produkte zur wasserstoffbasierten Baustellenenergieversorgung**; <https://www.proton-motor.com/produkte/>, <https://autoag.ch/zukunftsprojekte/mobiler-wasserstoff-generator/>, <https://grz-technologies.com/>, <https://www.worthingtonindustries.eu/de/losungen/hochdruck/container/>; aufgerufen am 08.08.2024
- [39] **Produkte zur batteriebasierten Baustellenenergieversorgung**; <https://instagrid.co>, <https://emost.com>; ; aufgerufen am 08.08.2024
- [40] **SBB interner Bericht «Gotthard Basistunnel**; 16 kV Versorgungsnetz Sektor Mitte / Sedrun», Version 3.1, 08.09.2021; Dokument bereitgestellt durch die SBB
- [41] **Beispielprodukte für Werkzeugbatterien**; <https://www.robel.com/de/maschinen-werkzeuge/akkutechnik/produkt/akku-1/>; zuletzt abgerufen am 01.03.2022
- [42] **Beispielprodukt einer kleinen Brennstoffzelle**; <https://www.spectronik.com/fuel-cell>; aufgerufen am 01.03.2022
- [43] **BIENE – BatterIEschwarm im BahnstromNETZ**; BAV Bericht P218; 31.03.2022; <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=50621>; aufgerufen am 11.06.2024
- [44] **Mit der ElektroBahn klimaschonend in die Zukunft – Das Bahn-Elektrifizierungsprogramm des Bundes**; Bundesministerium für Digitales und Verkehr; 2021; <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-aktuell/elektroBahn-klimaschonend-zukunft-bahn-elektrifizierungsprogramm.html#:~:text=61%20%25%20des%20Schienennetzes%20sind%20elektrifiziert,1>; aufgerufen am 06.06.2024
- [45] **Hydrogen Production**; European Hydrogen Observatory; 2022; <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/hydrogen-production>; aufgerufen am 13.06.2024
- [46] **Northwest European Hydrogen Monitor 2024**; International Energy Agency; 2024; <https://www.iea.org/reports/northwest-european-hydrogen-monitor-2024>; aufgerufen am 10.10.2024
- [47] **Wasserstoffspeicherung: Möglichkeiten im Überblick**; TÜV Nord; Hamburg; <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/wasserstoffspeicherung/>; aufgerufen am 11.06.2024
- [48] **Wasserstoff. Auslegeordnung und Handlungsoptionen für die Schweiz**; Der Bundesrat; Schweizerische Eidgenossenschaft; Bern,2020; <https://www.news.admin.ch/newsd/message/attachments/84123.pdf>
- [49] **H2 SpeTransLeit: Grundlagen zu Wasserstoff-Speicher- und Transportleitungen**; BFE (SI/502246-01); 01.12.2023
- [50] **Global Hydrogen Review 2023**; International Energy Agency; <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023#overview>
- [51] **Hydrogen fuel cell electric trains: Technologies, current status, and future**; Daniel Ding, Xiao-Yu Wu; Applications in Energy and Combustion Science; 100255; Februar 2024
- [52] **EU's FCH2Rail hydrogen train project finishes testing in Portugal**; Noah Bovenizer; Railway Technology; 17.04.2024; <https://www.railway-technology.com/news/eu-fch2rail-hydrogen-train-testing-portugal/?cf-view>; aufgerufen am 11.06.2024
- [53] **Werk Stendal: Alstom präsentiert von Diesel auf Wasserstoff umgerüstete Rangierlok**; Eurailpress; November 2022; <https://www.eurailpress.de/nachrichten/fahrzeuge-komponenten/detail/news/werk-stendal-alstom-praesentiert-von-diesel-auf-wasserstoff-umgeruestete-rangierlok.html>; aufgerufen am 11.06.2024
- [54] **PESA SM42-6Dn**; <https://pesa.pl/en/produkty/lokomotyw/sm42-6dn-hydrogen/>; aufgerufen am 10.10.2024
- [55] **Linsinger RAIL MILLING TRAIN MG11 HYDROGEN**; Linsinger Maschinenbau Gesellschaft m.b.H.; <https://www.linsinger.com/portfolio/rail-milling-train-mg11-hydrogen/>; aufgerufen am 24.06.2024;
- [56] **Weltpremiere: Erstes Netz mit 14 Wasserstoffzügen nimmt in Niedersachsen Betrieb mit Passagieren auf**; Alstom; August 2022; <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2022/8/weltpremiere-erstes-netz-mit-14-wasserstoffzuegen-nimmt-niedersachsen>; aufgerufen am 11.06.2024
- [57] **H2goesRail, Grüne Mobilität dank Wasserstoff**; Deutsche Bahn AG 2024; <https://nachhaltigkeit.deutsche-bahn.com/de/massnahmen/wasserstoff/H2goesrail>; abgerufen am 07.08.2024
- [58] **Wasserstoffzüge (HEMU)**; DB; <https://www.dbregio.de/innovationen/alternative-antriebe-kraftstoffe/hemu-wasserstoff-zuege>; aufgerufen am 10.10.2024
- [59] **Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis**; intergovernmental panel on climate change ipcc; https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-3-6.html, abgerufen am 09.08.2024
- [60] **Gesamtwasserbedarf für die Wasserelektrolyse**; Florencia Saravia, Stefan Gehrmann, Stefanie Schwarz, Marie-Ann Koch, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs, Bonn, 2024

8 Anhang

8.1 Ergänzungen zur Ausgangslage

8.1.1 Produktionskapazitäten Wasserstoff

Im Jahr 2022 produzierte Europa rund 11.3 Millionen Tonnen Wasserstoff. Der Grossteil (>95 Prozent) davon wird durch konventionelle Verfahren wie die Dampfreformierung von Erdgas hergestellt (grauer Wasserstoff). Als Nebenprodukt aus anderen Prozessen, zum Beispiel in der Petrochemie, fallen 0.97 Millionen Tonnen an. Die Produktion von grünem Wasserstoff in Europa ist gering, liegt aber im Bereich von etwa 29'000 Tonnen pro Jahr. Bis 2030 soll die Produktionskapazität für grünen Wasserstoff auf etwa 10 Millionen Tonnen pro Jahr steigen. Die Produktion von blauem Wasserstoff lag im Bezugsjahr 2022 bei 19'000 Tonnen. [45]

In der Schweiz waren 2024 etwa 10.5 MW von Elektrolyseuren im Einsatz. Bis 2030 könnte die Produktionskapazität auf 100 MW gesteigert und somit 20 Kilotonnen grüner Wasserstoff produziert werden. [46]

8.1.2 Transport von Wasserstoff

In der Wasserstofflogistik kommen verschiedene Speicher- und Transportmethoden zum Einsatz.

Wasserstoff kann unter hohem Druck (in der Regel von 200 bis 900 bar) in speziellen Druckgastanks gespeichert werden. Diese Methode ist weit verbreitet und wird sowohl für mobile als auch für stationäre Anwendungen genutzt. Eine andere Möglichkeit besteht darin, Wasserstoff auf etwa -253 Grad Celsius abzukühlen und in flüssiger Form zu speichern. Flüssig hat Wasserstoff eine höhere Energiedichte als gasförmig, was den Transport in grösseren Mengen ermöglicht. Jedoch sind die technischen Anforderungen und Energieaufwände sowie die zugehörigen Kosten für die Verflüssigung hoch. [47]

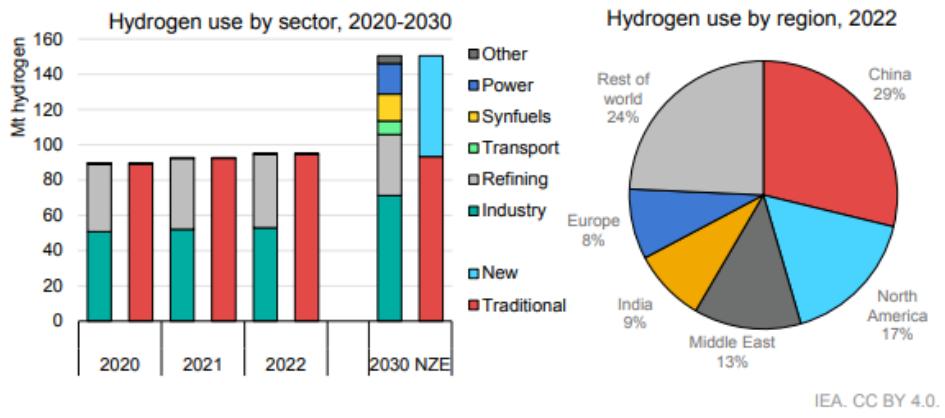
Wasserstoff kann mittels speziell ausgerüsteter Lastwagen transportiert werden, die entweder Druckgastanks für gasförmigen Wasserstoff oder Kryotanks für tiefkalten flüssigen Wasserstoff nutzen. Diese Methode bietet Flexibilität und eignet sich besonders für die Versorgung von abgelegenen Gebieten oder kleineren Verbrauchern. Für den grossflächigen und kontinuierlichen Transport von Wasserstoff sind Pipelines die effizienteste Methode. Wasserstoffpipelines sind jedoch aufgrund des flüchtigen Charakters des Gases und der Notwendigkeit spezieller Materialien und Dichtungen kostenintensiv in der Errichtung und Wartung. [48]

Die Ertüchtigung des bestehenden Gasnetzes respektive die Erstellung neuer Gasleitungen zum effizienten Transport von Wasserstoff ist daher ein zentraler Punkt bei der Schaffung eines H₂-Ökosystems. [49]

8.1.3 Wasserstoffverbrauch

Wasserstoff wird in unterschiedlichen Sektoren benötigt. Der grösste Nutzungssektor ist die Industrie. Dabei sind die Raffinierung von Rohöl, die Ammoniak- und Methanol-Produktion in der chemischen Industrie sowie die Direktreduktion von Eisen in der Stahlindustrie die wichtigsten Nutzingsfelder des Wasserstoffs. Die Lebensmittelindustrie, die Glasindustrie, die Elektronikindustrie, die Energieversorgung, der Transportsektor, die Raumfahrtindustrie und die Pharmazeutische Industrie setzen ebenfalls Wasserstoff ein. [50]

Der Transportsektor ist für den Wasserstoffmarkt derzeit eher unbedeutend. Der Verbrauch von Industrie und Raffinerien im Speziellen übersteigt den prognostizierten Bedarf des Transportsektors bis 2030 um ein Vielfaches.



Notes: NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario. "Other" includes buildings and biofuels upgrading.

Abbildung 30: Weltweiter Wasserstoffverbrauch nach Sektor und Region. [50]

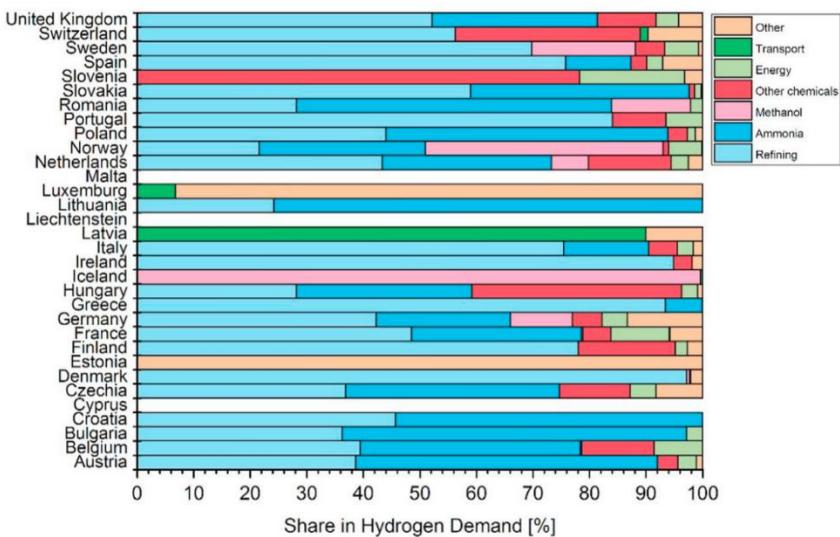


Abbildung 31: Wasserstoffnachfrage in Europa nach Land und Sektor, Stand 2022. [6]

8.1.4 Wasserstoffaktivitäten im Bahnbereich

Der Bahnverkehr spielt eine zentrale Rolle im europäischen Verkehrssystem, doch die Elektrifizierung des Schienennetzes bleibt eine Herausforderung. Der aktuelle Elektrifizierungsgrad im EU-Durchschnitt liegt bei etwa 54 Prozent, was bedeutet, dass fast die Hälfte der Bahnstrecken noch mit Dieselloks betrieben werden. Wasserstoff stellt eine mögliche Alternative zur teuren Streckenelektrifizierung dar. [44]

In Europa werden verschiedene Tests durchgeführt, um die Kommerzialisierung von Wasserstoffzügen zu testen. Beispiele sind der HydroFlex in Großbritannien, der Mireo Plus H von Siemens in Bayern oder das FCH2Rail-Projekt in Portugal und Spanien. [51], [52]

Der Einsatz von Wasserstoff-Triebzügen im Personenverkehr ist bisher am ausgiebigsten getestet worden. Hingegen gibt es nur wenige Prototypen für Rangierloks, die mit Wasserstoff betrieben werden. Die hohen Leistungsanforderungen und die Einsatzdauer stellen spezielle Herausforderungen dar. Dennoch existieren Prototypen von einer umgerüsteten Alstom Rangierlok in Stendal mit Wasserstoffverbrennungsmotor und einer brennstoffzellbasierten Rangierlok der polnischen Firma PESA. [53], [54].

Neben Triebzügen für den Personentransport und Rangierlokomotiven werden auch bereits Unterhaltsmaschinen entsprechend ausgerüstet. Der 2020 präsentierte Prototyp des Schienenfräszugs Linsinger MG11 Hydrogen ist seit 2022 in Europa und den USA im Versuchseinsatz. [55]

8.1.5 Wasserstoff bei der Bahn in Deutschland

Deutschland verfügt über ein weitreichendes Bahnnetz, wovon etwa 39 Prozent nicht elektrifiziert ist. Auf diesen Strecken kommen traditionell Dieselzüge zum Einsatz. Der Wasserstoffantrieb bietet eine emissionsfreie Alternative. [44]

Ein Meilenstein im Einsatz von Wasserstoffzügen war der Start der Tests mit dem Coradia iLint von Alstom im Jahr 2016. Der Coradia iLint ist der weltweit erste wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenzug und wird auf dem Netz der Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen seit 2022 kommerziell eingesetzt. [56]

Neben der Fahrzeugtechnologie ist auch die Entwicklung und Erprobung von zugehörigen Wasserstofftankstellen ein wichtiger Aspekt. Dies nicht nur in Deutschland, sondern überall, wo Wasserstoffsysteme zum Einsatz kommen. [57]

Der Betrieb von brennstoffzellenelektrischen Mehrzweckfahrzeugen (HEMU) bei der Deutschen Bahn hat bereits verschiedene Erkenntnisse geliefert. Ein zentrales Problem ist die schlechte Zuverlässigkeit von H₂-Systemkomponenten, was zu häufigen Ausfällen und Wartungsarbeiten führt. Zudem zeigt sich, dass die tatsächliche Reichweite der Züge oft geringer ist als vom Hersteller versprochen. Ein weiteres Hindernis ist die begrenzte Anzahl an Wasserstofftankstellen, was lange Anfahrtswege für das Betanken der Züge zur Folge hat. Diese Faktoren beeinträchtigen die Effizienz und Zuverlässigkeit des Betriebs erheblich. [58]

8.2 Eigenschaften von Wasserstoff

8.2.1 Arten von Wasserstoff

Wasserstoff kann auf verschiedene Arten hergestellt werden. Dies ist entscheidend für die Beurteilung der Nachhaltigkeit und ob bei der Nutzung dieses Wasserstoffes eine effektive Dekarbonisierung stattfindet. Die Unterscheidung in grünen, blauen, türkisen oder grauen Wasserstoff dient dazu, die Herstellungsarten und letztlich das Mass an Klimaneutralität des so erzeugten Wasserstoffs zu unterscheiden, wobei lediglich der grüne Wasserstoff als klimafreundlich erachtet werden kann. Aktuell wird jedoch fast ausschliesslich grauer Wasserstoff hergestellt und industriell genutzt.

Tabelle 3: Unterschiedliche Arten der Wasserstoffproduktion und deren Klassierung. [59]

Arten von Wasserstoff	Herstellungsform
Grüner Wasserstoff	Hergestellt aus Biomasse oder durch Elektrolyse aus erneuerbarem Strom.
Blauer Wasserstoff	Hergestellt aus fossilen Energien. Das anfallende CO ₂ wird jedoch zu grossen Teilen eingefangen und gespeichert.
Türkiser Wasserstoff	Entsteht durch Methan-Pyrolyse (thermische Spaltung von Methan), wobei ein grosser Teil des entstehenden CO ₂ in festen Kohlenstoff umgewandelt und abgeschieden wird.
Grauer Wasserstoff	Wird durch die Dampfreformierung fossiler Brennstoffe wie Erdgas, Kohle oder Öl erzeugt.
Rosa Wasserstoff	Wird mittels Elektrolyse aus nicht erneuerbarem Strom von Kernkraftwerken produziert.
Weisser Wasserstoff	Wasserstoff aus natürlichen Vorkommen im Untergrund.

8.2.2 Umweltauswirkungen von Wasserstoff

Wasserstoff gilt als vielversprechender Energieträger der Zukunft, doch seine Umweltauswirkungen sind komplex. Besonders das Treibhauspotenzial vom Wasserstoff selbst (Global Warming Potential, GWP) und produktionsbedingte Auswirkungen wie Wasserbedarf und CO₂-Emissionen rücken zunehmend in den Fokus der Diskussion.

Freier Wasserstoff trägt wie CO₂ zum Treibhauseffekt in der Atmosphäre bei. Besonders in der Stratosphäre (zirka 20 bis 50 km Höhe) fördert Wasserstoff die Ansammlung von Wasserdampf, was zur Verstärkung des Treibhauseffekts beiträgt. In der Troposphäre (0 bis zirka 20 km Höhe) zeigt Wasserstoff ähnliche Wirkungen wie Kohlenmonoxid (CO), indem es die Ozonproduktion negativ beeinflusst und den Effekt von Methan verstärkt. Der freigesetzte Wasserstoff in der Atmosphäre weist ein GWP von 5.8 auf, was auch die Verstärkung von Methan einschließt. [59] Die Werte für den GWP können jedoch je nach Betrachtungsweise zwischen zirka 4.3 und 11 variieren, je nachdem welchen Zeithorizont man den Untersuchungen zugrunde legt.

Während Wasserstoff selbst bei der Nutzung kein CO₂ ausstößt, kann seine Produktion und der damit verbundene Energieaufwand je nach Verfahren erhebliche Treibhausgasemissionen verursachen. Insbesondere «grauer» Wasserstoff, der aus fossilen Brennstoffen gewonnen wird, kann eine hohe CO₂-Bilanz aufweisen.

Der Wasserbedarf bei der Elektrolyse hängt stark von der Art des eingesetzten Elektrolyseurs ab, insbesondere von der Art dessen Kühlung. Ein luftgekühltes System benötigt etwa 12 bis 13 kg Rohwasser zur Aufbereitung und kein zusätzliches Wasser zur Kühlung. Von diesem Rohwasser können ungefähr 10 kg Reinstwasser via Elektrolyse in ein Kilogramm Wasserstoff umgewandelt werden, während der Rest als Sauerstoff anfällt. Ein wassergekühltes System kann je nach Ausführung (offener oder geschlossener Kreislauf) einen höheren Wasserbedarf aufweisen. [60]

8.2.3 Vergleich der Speicherdichten von Batterien und Wasserstoff

Oftmals wird die hohe Energiedichte von Wasserstoff (33.3 kWh/kg) als einer der Vorteile hervorgehoben. Bei einer effektiven Umsetzung in einem Fahrzeug ist jedoch nicht nur die Energiedichte des Energieträgers entscheidend, sondern auch die Speicherdichte unter Berücksichtigung der Tank- und Batteriesystemgewichte. Da der Wasserstoff gasförmig in Drucktanks gespeichert wird, sind die real erreichbaren gravimetrischen Energiedichten deutlich tiefer.

Wasserstofftanksysteme kommen hierbei, je nach Typ des Druckbehälters, auf Energiedichten von 0.74 bis 1.10 kWh pro kg Speichergewicht. Batteriesysteme (bahntauglich, inklusive BMS, Kühlung, Gehäuse) kommen im Bahnbereich auf zirka 0.13 kWh pro kg Systemgewicht.

Bezieht man nun auch die Antriebs- und Umwandlungswirkungsgrade mit ein, sinken die Werte weiter ab. Beim Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb muss hier neben dem Gewicht des Speichers auch das Gewicht der Brennstoffzelle (Umwandlung von chemischer in elektrische Energie) mit eingerechnet werden. Wasserstoffsysteme kommen so, wieder je nach Typ des Druckbehälters, auf Nutzenergiedichten (elektrisch) von 0.24 bis 0.33 kWh pro kg Systemgewicht. Batteriesysteme kommen auf eine Nutzenergiedichte von rund 0.12 kWh pro kg Systemgewicht.