

Machbarkeitsstudie für einen wasserstoffbasierten Antrieb auf Rangierlokomotiven

Der klassische Dieselantrieb steht im SPNV vor der Ablösung. Nun gilt es auch die anderen Bereiche wie den Rangierbetrieb zu defossilisieren. ALSTOM hat daher gemeinsam mit der Hochschule Magdeburg-Stendal und dem Wissenschaftlich-Technischen Zentrum Roßlau (WTZ Roßlau) eine Machbarkeitsstudie zu einer wasserstoffbasierten Rangierlokomotive auf Basis der bewährten Prima H3 Hybridlokomotive durchgeführt. Die vielversprechenden Ergebnisse sollen hier vorgestellt werden.

Motivation und Problemstellung

Durch die operativen Anforderungen an die Verladung von Gütern bzw. Containern können die Schieneninfrastrukturen von Häfen, Industrieanlagen und Güterumschlagplätzen nur zum Teil oder gar nicht mit Oberleitungen überspannt werden. Dadurch ergibt sich ein zwingender Bedarf für Rangierlokomotiven mit oberleitungsunabhängigen Antrieben.

Bisher wurde dies – mit wenigen Ausnahmen in der betrachteten Leistungsklasse von Rangierlokomotiven unter 1MW Leistung – ausschließlich durch den Einsatz von Lokomotiven mit Dieselmotor realisiert.

Heute im Rangierbetrieb eingesetzte Diesellokomotiven sind häufig mehrere Jahrzehnte, teilweise sogar mehr als ein halbes Jahrhundert alt. Die lange Lebensdauer der Fahrzeuge kann dazu führen, dass im Laufe der Jahre zwar technische Neuerungen nachgerüstet werden (z.B. Rußpartikelfilter), der Dieserverbrauch und entsprechend die CO₂-Emissionen der Loks in der Regel jedoch auf hohem Niveau stagnieren.

Neuere im Markt erhältliche Lokomotiven sind mit hybrider Antriebstechnik ausgerüstet. Diese erzielen zwar geringere Emissionswerte als herkömmliche Dieselloks und ermöglichen dank ihrer Reichweite im Batteriebetrieb zum Beispiel



Prof. Dr.-Ing. Konrad Steindorff

Hochschule Magdeburg-Stendal
Lehrstuhl Getriebe und Antriebs-
technik
konrad.steindorff@h2.de



Arne Lazar

WTZ Roßlau gGmbH
Doktorand/Versuchingenieur
lazar@wtz.de



Annina Bode

WTZ Roßlau gGmbH
Konstruktive Entwicklung
bode@wtz.de



Jan Theile

WTZ Roßlau gGmbH
Dualer Masterstudent
Vormals: Bachelorstudent Alstom
Lokomotiven Service GmbH
jan.theile@outlook.de



Jörg Schulze

Alstom Lokomotiven
Service GmbH
Sales Manager Lokomotiven
joerg.schulze@alstomgroup.com



Dr. Raphael Hofstädter

Alstom Transport
Deutschland GmbH
Patent- und Innovationsmanager
raphael.hofstaedter
@alstomgroup.com

emissionsfreies Einfahren in Hallen und Produktionsstätten, stellen aber ähnlich wie im Automobilsektor aller Voraussicht nach nur eine Übergangslösung dar, die bei ausreichender Produktreife von gänzlich lokal emissionsfreien Lösungen ersetzt werden. Reine Batterielösungen scheinen aufgrund der geforderten Leistungen der Loks und der dafür erforderlichen Kapazität der Batterien durch die physikalisch bedingte Größe und das hohe Gewicht

der Batterien bisher keine Alternative darzustellen. Des Weiteren stellen die erforderlichen Ladezeiten eine Hürde für das operative Geschäft der Eisenbahnverkehrsunternehmen dar. Wasserstoff bietet somit eine Lösung für den emissionsfreien Rangierbetrieb, da alle wesentlichen Merkmale der Dieselloks wie Leistungsfähigkeit, Reichweite und Flexibilität mit einer massiven Emissionsreduzierung verbunden realisierbar erscheinen.

Hinzu kommt, dass der Dieselantrieb heute aufgrund der kontinuierlichen Verschärfung der Emissionsgrenzwerte in den letzten Jahren ein Komplexitätsniveau erreicht hat, welches sowohl technische als auch wirtschaftliche Hürden für Fahrzeug- und Motorenhersteller sowie Betreiber aufwirft: So ist ein der aktuell gültigen EU Stage V konformer Dieselmotor für den Einsatz in einer Lok zwangsläufig mit einem SCR-Katalysator und dazugehörigem AdBlue-Tank ausgestattet.

Ein weiteres Argument, Alternativen zum Dieselantrieb in Betracht zu ziehen ist sein CO₂-Ausstoß: Da konventioneller Dieselmotorkraftstoff auch heute noch zum größten Teil auf Basis fossiler Ressourcen hergestellt wird, kann dieser proportional zum Kraftstoffverbrauch gesehen werden. Die Staaten der EU haben sich zwar in der Renewable Energy Directive II (RED II) verpflichtet, den Anteil CO₂-neutraler Kraftstoffe für den Verbrauch im Straßen- und Schienenverkehr bis 2030 EU-weit auf 14% zu erhöhen, dies bleibt aber dennoch nur ein Zwischenschritt zur vollständigen CO₂-Neutralität, so dass Alternativen wie eben der wasserstoffbasierte Antrieb ernsthaft in Betracht gezogen werden müssen.

Zielstellung der Machbarkeitsstudie

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde untersucht, ob eine Umrüstung der dieselelektrischen Prima H3 Lokomotive auf einen wasserstoffbasierten Antrieb möglich ist. Die Prima H3 Lokomotive wurde speziell für den Rangier- und leichten Streckenbetrieb gebaut und findet primär ihren Einsatz in Rangierbahnhöfen. Änderungen sollten möglichst gering gehalten werden

und möglichst im Rahmen der aktuellen Zulassung bleiben. Das neue Antriebssystem soll nach Möglichkeit die 700 kW Systemleistung der diesel-elektrischen Hybridvariante erreichen, um den Anforderungen aktueller Fahrprofile der Bestandslokomotiven gerecht zu werden. Um die Klimaschutzanforderungen zu erfüllen, sollen Schadstoff- und CO₂-Emissionen auf ein Minimum reduziert werden. Zusätzlich soll eine Reichweite von mindestens einem Tag gewährleistet werden, da dies in Rücksprache mit vielen potenziellen Betreibern einer solchen Lok den operativen Ablauf möglichst wenig stören würde. Der verfügbare Bauraum beschränkt sich auf den vorhandenen Bauraum auf der Lokomotive. Das heißt, es sollten keine Änderungen am Rahmen und den Aufbauten vorgenommen werden, die das Lichtraumprofil beeinträchtigen würden. Die Gesamtmasse der Lokomotive sollte ebenfalls beibehalten werden, um die Zulassung nicht zu gefährden. Um die Antriebskonzepte untereinander vergleichbar zu machen, wurden Berechnungen anhand fünf verschiedener realer Fahrprofile unterschiedlicher Lokomotiven durchgeführt. Die Wirtschaftlichkeit des Systems in Bezug auf Anschaffung und Lebenszykluskosten sollte ebenfalls betrachtet werden.

Um die im Rahmen der Machbarkeitsstudie zu entwickelnden technischen Varianten vergleichbar zu machen, wurde ein Bewertungssystem mit zehn Kriterien entwickelt und die Priorität der einzelnen Kriterien per Expertenbefragung unter Betreibern sowie beim Hersteller selbst durchgeführt. Im Ergebnis kann man erkennen, dass die Kriterien von Hersteller und Betreiber relativ konsistent bewertet werden (siehe Bild 1).

Der CO₂-Ausstoß wird von den Betreibern weniger gewichtet; die Kostenfaktoren stehen dort eher im Fokus, sowie die Erfüllung bestimmter Fahrprofile.

Stand der Technik

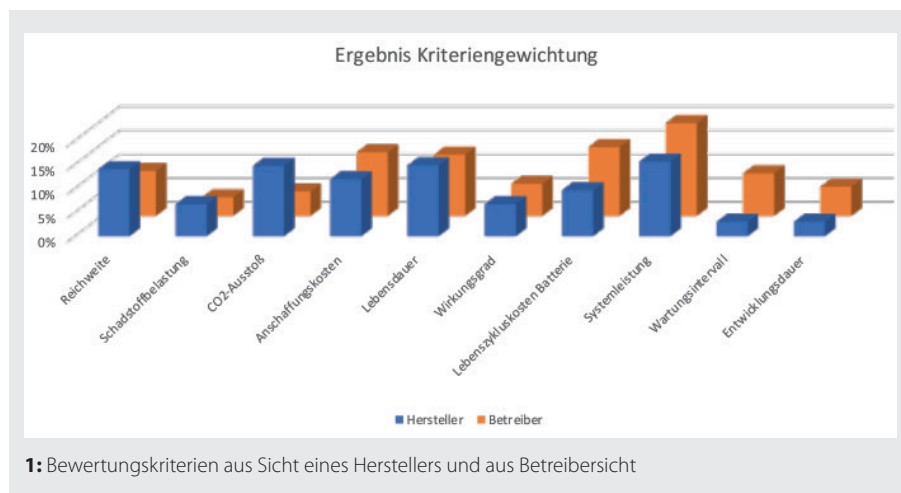
Grundsätzlich ist die Nutzung von Wasserstoff als Treibstoff auf zwei Arten denkbar. Dies ist zum einen der Einsatz einer Brennstoffzelle zur Wandlung der chemischen Energie des Wasserstoffs zu elektrischer Energie, mit der wiederum ein elektrischer Antrieb gespeist werden kann. Die Alternative ist die Nutzung des Wasserstoffs in einem Verbrennungsmotor zur Wandlung in mechanische Energie – im Falle der Prima H3 zum Betrieb eines Generators, welcher wiederum elektrische Energie zur Speisung der Fahrmotoren bzw. zur Ladung der Traktionsbatterie erzeugt.

Die PEM-Brennstoffzelle hat sich aufgrund ihrer niedrigen Betriebstemperaturen und der Möglichkeit, den notwendigen Sauerstoff direkt aus der Umgebungsluft zu beziehen, als praktikabelster Brennstoffzellentyp für mobile Anwendungen erwiesen. Aus den iLint-Projekten kann ALSTOM hier auf einen breiten Erfahrungsschatz bauen. Brennstoffzellen weisen einen besseren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren auf und stoßen im Betrieb keine Schadstoffe aus, nichtsdestotrotz sprechen Argumente wie die Verfügbarkeit, die Investitionskosten und ein auf die Wartung von Verbrennungsmotoren spezialisiertes Werkstattnetz für den Wasserstoffverbrennungsmotor.

Stand der Technik bei Rangierlokomotiven sind dieselelektrische Lokomotiven bzw. dieselelektrische Hybridlokomotiven. Zur Reduzierung von CO₂-Emissionen wird bei beiden Typen mit Start-Stop-Automatik bzw. mit hybriden Antrieben gearbeitet. Von Hybridisierung spricht man, wenn der Verbrennungsmotor durch eine Batterie als zumindest Parallelhybrid elektrisch unterstützt wird. Stand der Technik in Deutschland:

- Vossloh DE18¹⁾: dieselelektrische 4-achsige Lokomotive für den schweren Rangierbetrieb und leichten Streckendienst mit einer Leistung von 1800 kW aus dem Dieselmotor. In der neuesten Ausbaustufe ebenfalls mit Hybridtechnik ausgestattet („Smart Hybrid“)

1) Vossloh-Locomotives (www.vl-rs.com/de/traktion-nach-mass/de-18/de-18.html)



1: Bewertungskriterien aus Sicht eines Herstellers und aus Betreibersicht

- Gmeinder DE75 BB Hybrid²⁾: dieselelektrische 4-achsige Lokomotive für den schweren Rangierbetrieb, verfügbar als Dual-Engine bzw. als Dieselhybrid – Leistung von 600 kW am Rad
- Alstom Prima H3: dieselelektrische 3-achsige Lokomotive für den leichten bis mittelschweren Rangierbetrieb – Leistung von 555 kW am Rad

Bezüglich der Umsetzung von Wasserstoff-Antrieben gibt es bereits mehrere verschiedene technische Lösungen, die teilweise auch schon für den Bahnbetrieb zugelassen sind. So hat die Firma Alstom mit dem Coradia iLint einen zugelassenen Personentriebzug im Produktionsportfolio, welcher mit einer Brennstoffzelle Wasserstoff verarbeitet. Darüber hinaus gibt es am Markt in Deutschland³⁾, Belgien⁴⁾ und Österreich⁵⁾ Anbieter, welche Wasserstoff-Verbrennungsmotoren planen.

Es gibt bisher auch mehrere Beispiele von Herstellern oder Anwender-Konsortien, die sich an der Entwicklung von Wasserstoff-Lokomotiven beteiligen. Dabei sind zu nennen aus China die Firma CRRC⁶⁾, welche ihren Prototyp im Januar 2021 vorstellte, sowie aus Polen die Firma Pesa⁷⁾, welche einen Prototyp im September 2021 vorstellte.

Eine NOW-Studie aus dem Jahr 2021 kommt zu dem Schluss, dass bei Fahrzeugen mit einer Leistungsanforderung von mehr als 350 kW der Wasserstoff-Verbrennungsmotor einen wirtschaftlichen und technischen Vorteil haben dürfte⁸⁾. Eine Studie der e-mobil BW kommt zu dem

Schluss, dass bei schweren Nutzfahrzeugen beide Technologien zu fördern und tiefer zu betrachten wären⁹⁾.

In Tabelle 1 sind die exemplarischen Verbräuche einer potenziellen Wasserstoff-Rangierlok im Vergleich zu Hybrid-Rangierloks und zu klassischen Dieselrangierloks dargestellt. Aus der Darstellung ist zu entnehmen, dass eine konventionelle dieselhydraulische Lokomotive etwa 98 m³ Diesel pro Jahr verbraucht und damit ca. 260 t CO₂ ausstößt. Mit dem aktuellen Stand der Technik einer Diesel-elektrischen Hybrid-Lokomotive lässt sich der Diesel-Verbrauch auf 35 m³ pro Jahr reduzieren, was 92 t CO₂ entspricht. Mit einer wasserstoffbetriebenen Lokomotive lässt sich der CO₂-Ausstoß auf beinahe Null reduzieren, unter der Annahme der Betankung mit grünem Wasserstoff. Über den Lebenszyklus einer Lokomotive betrachtet, entspricht dies einem Reduktionspotential von ca. 10 000 t CO₂ pro Lokomotive. Auch die NO_x-Emissionen lassen sich mit einer Brennstoffzelle nahezu eliminieren; bei einem Wasserstoff-Verbrennungsmotor ist von einer deutlichen Reduktion im Vergleich zum Diesel auszugehen. Die gesetzlichen Grenzwerte werden dabei deutlich unterschritten.

In der Studie wurden verschiedene Möglichkeiten der Speicherung von Wasserstoff auf der H3 untersucht.

Generell gibt es mehrere Möglichkeiten, Wasserstoff zu speichern: Zum einen kann Wasserstoff als Gas verdichtet und in Druckbehältern gespeichert werden, wobei sich für den mobilen Einsatz zwei mögliche Druckstufen, 350 und 700 bar, etabliert haben. Um Wasserstoff auf einen Druck von 700 bar zu verdichten, müssen circa 15 % der zu speichernden Energie

aufgebracht werden, bei 350 bar ist es weniger. Eine weitere Möglichkeit ist die Speicherung von Wasserstoff in seiner flüssigen Form. Dabei wird der Wasserstoff auf Temperaturen unter –253 °C herabgekühlt und in Kryobehältern gespeichert. Für die Verflüssigung muss eine Energie von circa 20 bis 30 % des Heizwertes der zu verflüssigenden Wasserstoffmenge aufgebracht werden. Des Weiteren müssen bei der kryogenen Speicherung die zeitabhängigen Verluste durch Erwärmung, damit einhergehende Druckzunahme und notwendiges Ablassen des gasförmigen Wasserstoffes („Blow off gas“) berücksichtigt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die flüssige Speicherung in Form von LOHC¹⁰⁾, bei der der Wasserstoff in einer organischen Trägerflüssigkeit bei Umgebungsdruck und -temperatur gebunden wird, weshalb die Lagerung ähnlich zu Diesel erfolgen kann. Das Einlagern und Ausdampfen des Wasserstoffs erfolgt in einem Katalysator unter Zuführung von Energie.

Im Rahmen dieser Studie wurden dem 350 bar-Drucktank die in Summe günstigsten Eigenschaften für den Betrieb auf der Prima H3 attestiert, auch aufgrund der Verfügbarkeit von Alternativen.

Untersuchte Betriebskonzepte mit Brennstoffzelle oder Verbrennungsmotor

Für die Ausrüstung der Prima H3 mit einem wasserstoffbasierten Antrieb wurden für die weiteren Untersuchungen Varianten definiert, welche auf dem vorhandenen, elektrischen Traktionssystem der Lok aufsetzen, siehe Bild 2.

Die Systemstruktur entspricht einem seriell angeordneten Hybridantrieb, der

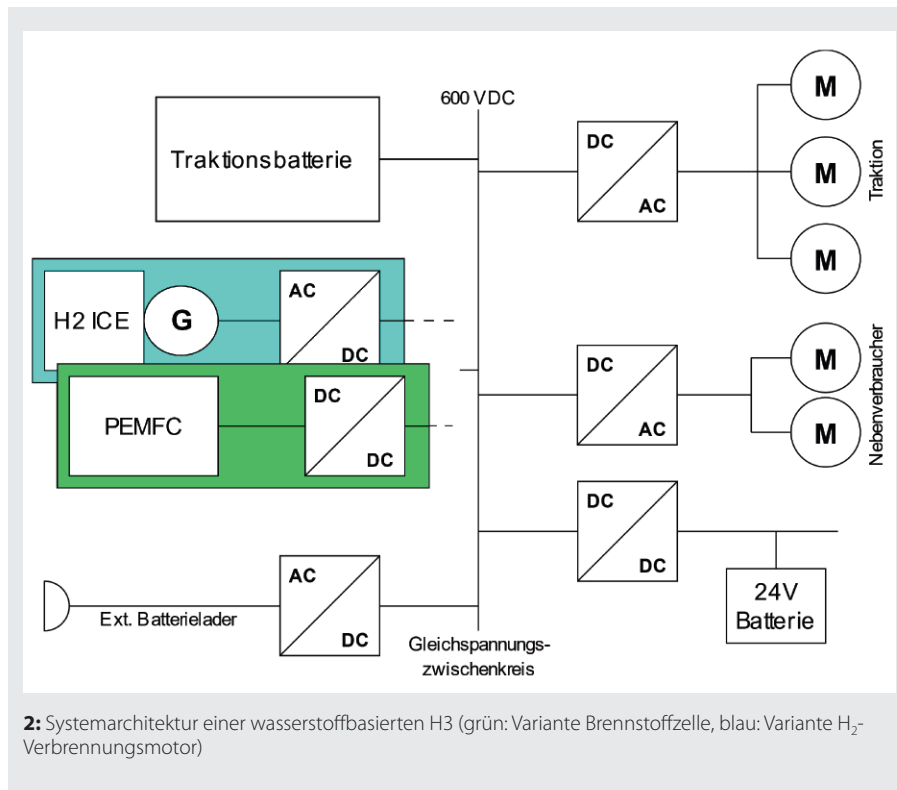
2) DE75 BB HYBRID (www.zagro-group.com/produkte/lokomotiven/de75-bb-hybrid.htm)
 3) DEUTZ AG: Der Wasserstoffmotor von DEUTZ ist reif für den Markt (www.deutz.com/media/pressemitteilungen/der-wasserstoffmotor-von-deutz-ist-reif-fuer-den-markt)
 4) Neue Generation belgischer Dieselmotoren auch mit Wasserstoff – GrenzEcho (www.grenzecho.net/42223/artikel/2020-09-18/neue-generation-belgischer-dieselmotoren-auch-mit-wasserstoff)
 5) INNIO Jenbacher Gasmotoren bereit für Wasserstoff... Pressemitteilung (<https://www.innio.com/de/news-media/pressemitteilungen/innio-jenbacher-gasmotoren-bereit-fuer-wasserstoff>)
 6) China-developed hydrogen fuel-cell hybrid locomotive rolls off assembly line – Global Times (<https://www.globaltimes.cn/page/202101/1214215.shtml>)
 7) Hydrogen shunting locomotive unveiled | News | Railway Gazette International (<https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/hydrogen-shunting-locomotive-unveiled/59966.article>)
 8) NOW_Metastudie_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf (www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/10/NOW_Metastudie_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf)

9) e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf (www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf)

10) Aktueller Stand LOHC-Wasserstoffspeicher (<https://blogs.fz-juelich.de/ilec/2021/09/23/aktueller-stand-lohc-wasserstoffspeicher/>)

Tabelle 1: Einsparpotential Wasserstoff-Lok gegenüber konventionellen und Hybrid-Lokomotiven bei 3500 Betriebsstunden pro Jahr

Einheit	Wasserstoff-Rangier-Lokomotive mit BSZ pro Jahr	Wasserstoff-Rangier-Lokomotive mit ICE pro Jahr	DE-Hybrid-Lokomotive pro Jahr	Konventionelle DH-Lokomotive pro Jahr	Einsparpotential H ₂ -Lok ggü. Bestandsfahrzeugen pro 40 Jahre Betrieb
Fossiler Kraftstoffverbrauch [l]	0	0	35 000	98 000	3 920 000
CO ₂ [t]	0	<0,7	92	259	10 349
NO _x [t]	0,0	<0,8	2,6	7,26	290



Verbrennungsmotor treibt direkt den Generator an, welcher die elektrische Energie für die Fahrmotoren und die Nebenverbraucher bereitstellt, sowie für das Laden der Batterie zuständig ist. Die Traktionsbatterie dient als Booster, falls die benötigte Leistung der Dieselmotor-Einheit nicht ausreicht. Wird der Dieselmotor durch eine Brennstoffzelle vergleichbarer Leistung ersetzt, entsteht bei ansonsten gleicher Systemstruktur ein „brennstoffzellendominanter Antrieb“.

Es besteht auch die Möglichkeit, die Batteriekapazität zu erhöhen und eine kleinere Brennstoffzelle zu wählen. In dem Fall kann man von einem „Range Extender“ sprechen. Dabei speist die Brennstoffzelle ausschließlich die Traktionsbatterie, die wiederum für die Traktion und die Versorgung aller Nebenverbraucher zuständig ist.

Die Varianten „brennstoffzellendominanter Antrieb“ und „Range Extender“ weisen die gleiche Systemstruktur auf, diese ist in Bild 2 grün gekennzeichnet.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, den Dieselmotor durch einen Wasserstoffverbrennungsmotor zu ersetzen, dies entspricht der blau gekennzeichneten Variante in Bild 2.

Die Systemstrukturen eines parallelen oder eines leistungsverzweigten Hybridantriebs wurden nicht in Betracht gezogen, da bei diesen Strukturen eine mechanische Verbindung des Antriebsaggregates mit der Antriebsachse notwendig ist, was bei der Prima H3 nicht der Fall ist. Betrachtet wurden daher die Varianten brennstoffzellendominanter Antrieb oder Brennstoffzellen-Range Extender sowie H₂-Verbrennungsmotor.

Für die Variante Wasserstoff-Verbrennungsmotor wurden mögliche Konzepte für einen Betrieb der Prima H3-Lok unter Beibehaltung des vorhandenen Generatorsystems erarbeitet. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale waren dabei einerseits Anzahl und Größe der Motoren sowie andererseits Leistung und Kapazität des Batteriesystems:

- Die geringsten Änderungen am Gesamtsystem entstehen bei der Variante „Verbrennungsmotor Standard Hybrid“, wobei lediglich der Dieselmotor auf Wasserstoff umgerüstet wird, das Batteriesystem dagegen unverändert bleibt.
- Weiterhin kann die Batterie im Konzept „Verbrennungsmotor Dual Hybrid“ deutlich verkleinert werden, indem ein zweiter H₂-Motor derselben Bauart ergänzt wird.
- Letzteres Konzept wäre alternativ auch als „Verbrennungsmotor Big Hybrid“ mit einem großen anstatt zwei kleinen Motoren möglich.
- Durch die Weiterentwicklung der Direkt-Einblasseysteme (DI) kann die nötige Systemleistung in Zukunft wahrscheinlich auch durch zwei kleine bzw. einen großen Motor gänzlich ohne Batterie erreicht werden, wodurch sich die Konzepte „Verbrennungsmotor Dual Engine“ und „Verbrennungsmotor Big Engine“ ergeben.

Die Machbarkeit dieser Lösungen wurde zum einen über eine Einbaustudie und zum anderen über eine Systemanalyse mithilfe von Simulationsrechnungen überprüft, welche nachfolgend beschrieben werden.

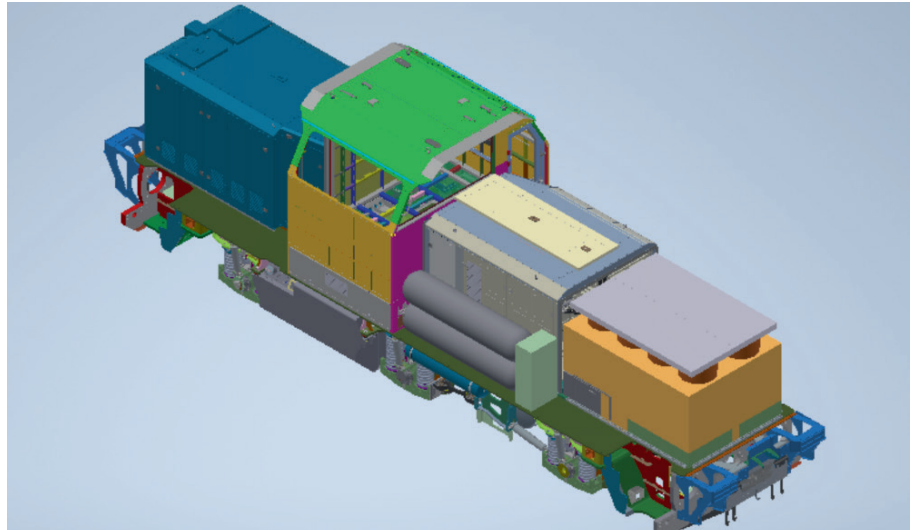
Einbaustudie

Neben der Erarbeitung der Betriebskonzepte war ebenfalls eine Recherche

der Randbedingungen des Tanksystems erforderlich. Dazu wurden geeignete Druckspeichersysteme und die wesentlichen Grenzen bezüglich Sicherheit und Zulassung recherchiert. Besondere Bedeutung kam den Faktoren Verfügbarkeit, Größe, Gewicht und Speicherkapazität zu.

Bild 3 zeigt beispielhaft eine vereinfachte Darstellung der oben beschriebenen Variante „Verbrennungsmotor Dual Hybrid“ mit zwei Verbrennungsmotoren und verkleinerter Batterie im Unterflur, dem Bauraum des ehemaligen Dieseltanks. In dieser Variante können Wasserstofftanks mit einer Kapazität von voraussichtlich 70 bis 80 kg verbaut werden.

In Bild 4 ist dagegen exemplarisch eine Darstellung der Brennstoffzellen-Variante „Brennstoffzellen-dominanter Antrieb“ gezeigt. In dieser Variante können Wasserstofftanks mit einer Kapazität von voraussichtlich 40 bis 50 kg integriert werden, was durch eine höhere Effizienz der gleichen Reichweite wie beim Verbrennungsmotor entspricht.



4: Vereinfachte Darstellung der „Brennstoffzellen-dominanter Antrieb“ Variante

Tabelle 2: Wasserstoff-Verbrauchsübersicht der betrachteten Fahrprofile (gerundet) bei 15°C

Kenngroße	Diesel	Verbrennungsmotor	Brennstoffzelle
Verbrauchsdurchschnitt je Betriebsstunde	6 – 10 [l/h]	1,4 – 2,5 [kg/h]	0,8 – 1,5 [kg/h]
Verbrauch für 24 Stunden Einsatz	150 – 240 [l]	33 – 59 [kg]	19 – 36 [kg]



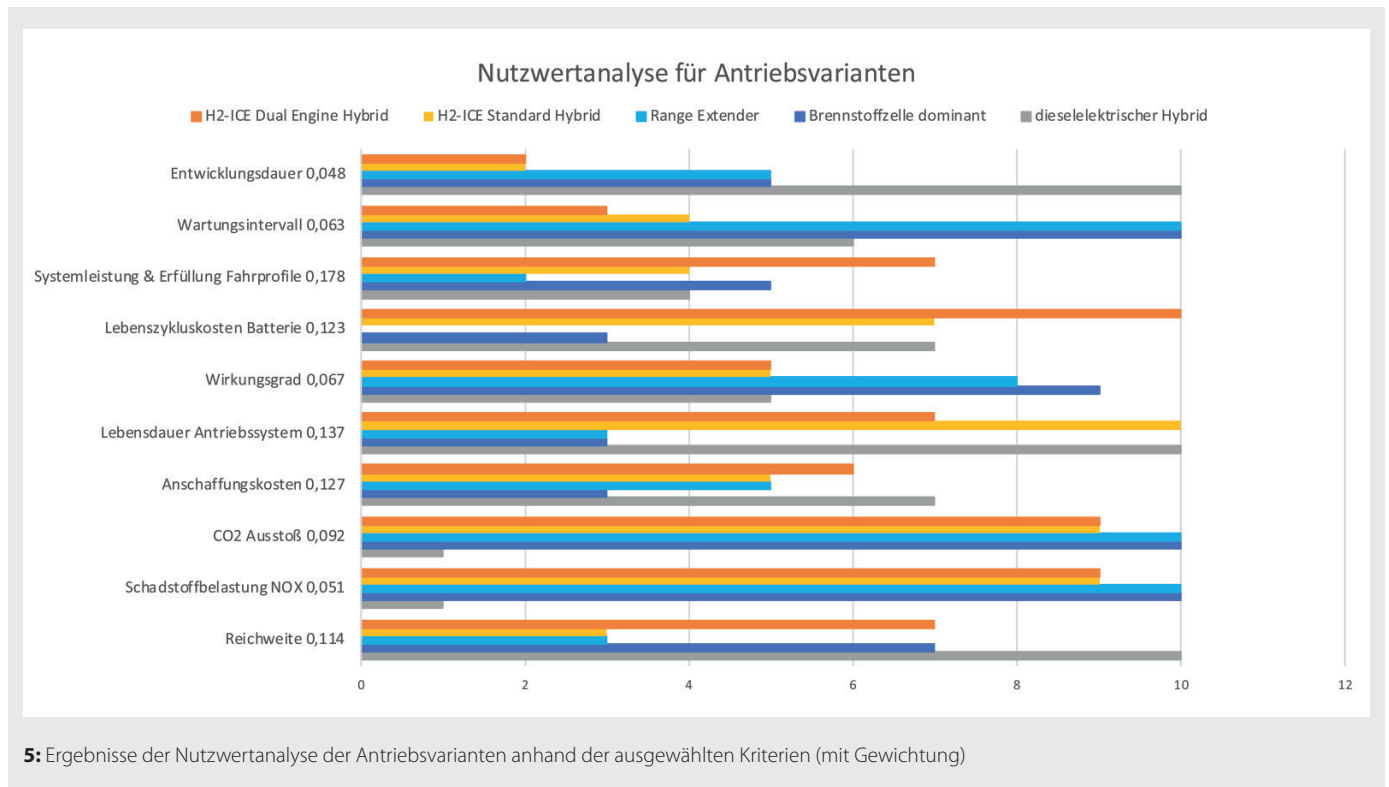
ALBERT FISCHER GmbH
 Heilswannenweg 53 ■ 31008 Elze
 Tel. 05068 / 9290-0 ■ Fax -40
 info@albert-fischer.de
 www.albert-fischer.de

- Gleis- und Stadtbahnbau
- Hallen- und Industriebau
- Erd- und Bahnsteigbau
- Straßen- und Kanalbau
- Ingenieur- und Wasserbau



Albert Fischer GmbH – Alle Bauleistungen aus einer Hand!

Genehmigt für Alstom, WZ Rosslau, Hochschule Magdeburg /
 Genehmigt für ein
 Recht für ein
 Genehmigt / © DV



Systemanalyse

Die betrachteten Varianten wurden in einer Systemanalyse anhand von zuvor aufgezählten Lastzyklen des Rangierbetriebs auf ihre Nutzbarkeit hin untersucht. Das Ziel dieser Untersuchungen war, die relevanten Größen wie z.B. den Primärenergiebedarf und die Auslastung der Hauptkomponenten Brennstoffzelle/Verbrennungsmotor und Batterie zu ermitteln. Dazu wurde ein Rechenmodell verwendet, welches für die künftige, weitergehende Entwicklung in ein konstruktionsbegleitendes Simulationsmodell überführt werden wird.

Es wurden Fahrprofile aus dem Kundenbetrieb analysiert, deren Verbrauchsübersicht in Tabelle 2 dargestellt ist. Mithilfe dieser Daten konnte in Verbindung mit der oben beschriebenen Einbaustudie anschließend die Reichweite abgeschätzt werden.

Fazit und nächste Schritte

Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse sind in Bild 5 zusammengefasst. Die Machbarkeitsstudie hat gezeigt, dass eine 3-achsige-Rangierlokomotive sowohl mit Brennstoffzellen- als auch mit Wasserstoff-

Verbrennungstechnologien betrieben werden kann und eine Reichweite von einem Tag im Vollbetrieb machbar ist.

- Vorteile des Brennstoffzellen-Antriebssystems: emissionsfrei in Bezug auf NO_x und CO_2 , geringerer Wasserstoffverbrauch, längere Wartungsintervalle, das System ist auf dem Markt erhältlich und die Anwendung ist bewiesen
- Vorteile des Wasserstoffmotors: Verbrennungsmotoren sind eine gut etablierte Technologie, geringere Wartungskosten wegen vorhandenem Wartungsnetz, voraussichtlich geringere Anschaffungskosten und längere Lebenserwartung
- Alstom prüft die Fortführung des Projektes für Neubauprojekte sowie Nachrüstprojekte, also den Umbau bestehender Dieselloks.

Aus Sicht der Hersteller-Industrie besteht bei den Betreibern ein Investitionsstau; die Betreiber hingegen warten auf neue Innovationen, um nicht in Übergangstechnologien wie Diesel-Hybrid investieren zu müssen. Aus diesem Grund besteht eine realistische Möglichkeit, dass der Markt für Rangierlokomotiven nach der Einführung

einer neuen, sicheren und zukunftsweisen Technologie wächst.

Zur finalen Entscheidung, welche Technologie auf einer dreiachsigen Lokomotive eingesetzt werden sollte, sind weitergehende Kosten-Nutzen-Analysen notwendig. Dabei müssen neben den Beschaffungskosten auch die Lebenszykluskosten für Brennstoffzellen und Wasserstoffmotoren einbezogen werden.

Summary

Feasibility study for a hydrogen-based drive on shunting locomotives

The classical diesel engine used in the regional rail passenger transport is coming to an end. Now, it is also necessary to de-fossilise other sectors such as shunting operations. Therefore, ALSTOM together with the Magdeburg-Stendal University of Applied Science and the Scientific-Technical Center Roßlau (WTZ Roßlau), has carried out a feasibility study for a hydrogen-based shunting locomotive based on the proven Prima H3 hybrid locomotive. The promising results are to be presented in this article.