

# Stand der Technik von Antriebskonzepten für Rangier- und Streckenlokomotiven

Durch die Entwicklung von neuartigen Antriebskonzepten für Lokomotiven entstehen neben Chancen, wie ein geringerer Energiebedarf, auch Risiken im Hinblick auf einen ökonomischen Betrieb. Dieser Artikel beschreibt derzeitige Entwicklungstendenzen von Antriebskonzepten für Rangier- und Streckenlokomotiven und stellt eine Methode zur Entscheidungsunterstützung vor, welches Antriebskonzept bezogen auf das jeweilige Anforderungsprofil sich als optimal darstellt.

## EINFÜHRUNG

Eisenbahnverkehrsunternehmen stehen heute durch den voranschreitenden technischen Fortschritt und den damit verbundenen neuen Möglichkeiten im Bereich der Energiespeicher und Antriebssysteme stärker denn je unter Zugzwang, ihre bisherigen Fahrzeuge auf betriebswirtschaftliche Kostenoptimierung zu prüfen, und gegebenenfalls durch neue umweltfreundlichere, günstigere und leistungsoptimierte Systeme zu ersetzen.

Bei der Entscheidung, eine neue Lokomotive für den Rangier- und/oder Streckendienst im Güterverkehr anzuschaffen, sind verschiedene Vorüberlegungen zu berücksichtigen. Das schließt zum einen die Betrachtung der Lebenszykluskosten (LCC = Life Cycle Costs) mit ein, zu denen

- die Anschaffungskosten mit ihren Treibern Entwicklungs-, Herstellungs- und Zulassungskosten,
- die Kosten in der Besitzphase (z.B. Energie-, Instandhaltungs- und Re-Investitionskosten von Teilkomponenten) und
- die Kosten für die Entsorgung

gehören. Zum anderen sind die Einsatzarten und die Infrastruktur für die Wirtschaftlichkeit eines Antriebssystems ausschlaggebend. Gleichzeitig führen verschärfte Umweltrichtlinien und Gesetze dazu, dass der Einsatz in bestimmten Bereichen und Arbeitsumfeldern für Lokomotiven mit hohem Schadstoffausstoß eingeschränkt oder verboten ist. Soll die Lokomotive vermehrt innerhalb von Produktionshallen oder in Tunneln, bspw. für Instandhaltungsmaßnahmen oder Rettungsmaßnahmen eingesetzt

werden, so müssen teilweise Grenzen für lokale Emissionen eingehalten werden, die aus Gründen der Arbeitssicherheit deutlich unterhalb der gesetzlichen Vorgaben liegen. Dies betrifft insbesondere Schadstoffe wie Stickoxide, Feinstaub und Kohlenstoffmonoxid. Neben den Schadstoffemissionen können je nach Einsatzzweck auch die Schallemissionen während des Betriebs eine entsprechende Entscheidungsgrundlage für die Auswahl einer Lokomotive bzw. eines bestimmten Antriebskonzepts darstellen, wenn z.B. die Begrenzung von Schallimmissionen in der Nähe von Wohngebieten erforderlich ist.

## ALTERNATIVE ANTRIEBSSYSTEME FÜR LOKOMOTIVEN

Alternative Antriebs- und Energiespeichersysteme werden vermehrt auf Streckenabschnitten eingesetzt, die nicht oder nur teilweise elektrifiziert sind. Hier besteht gegenüber der bisher eingesetzten Dieselantriebstechnik einerseits das Potential der Energieeinsparung und lokaler Emissionsverringerung durch streckenweise Nutzung der Oberleitung oder Einsatz von Hybridsystemen zur Energierückgewinnung. Andererseits können neuartige Antriebskonzepte betrieblich mehr Flexibilität schaffen, wenn z.B. auf ein Umspannen der Loks verzichtet werden kann. Es stellt sich die Frage, welche Vorteile die unterschiedlichen Antriebssysteme bieten, und für welchen Einsatzbereich welches Antriebskonzept die optimale Wahl ist [1].

Ein **Hybrid-Antriebssystem** besteht aus zwei unterschiedlichen Antriebsleistungsquellen, die beide gleichzeitig zum Fahr-



**Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Benedikt Scheier M.Sc.**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Institut für Verkehrssystemtechnik  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Benedikt.Scheier@dlr.de



**Dipl.-Ing. Holger Dittus**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Institut für Fahrzeugkonzepte  
Gruppenleiter Energiemanagement und Evaluation  
Holger.Dittus@dlr.de

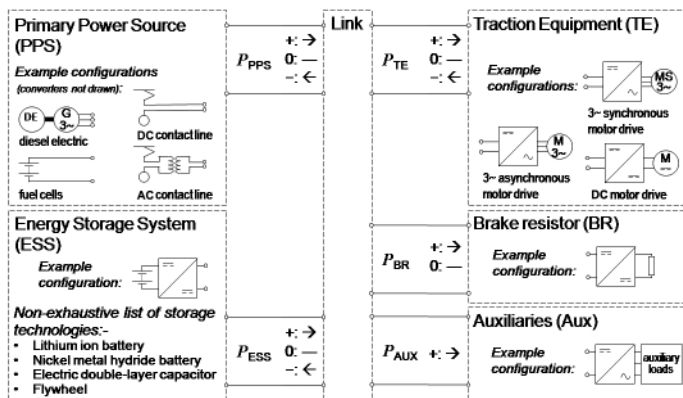


**Dipl.-Ing. Mathias Böhm**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Institut für Fahrzeugkonzepte  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Mathias.Boehm@dlr.de



**Dr.-Ing. Christian Meirich**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Institut für Verkehrssystemtechnik  
Gruppenleiter Angebotsplanung und Betrieb  
Christian.Meirich@dlr.de

zeugantrieb genutzt werden können. Hierzu zählen u.a. die Kombination aus Verbrennungsmotor und Energiespeicher oder aus Brennstoffzelle und Energiespeicher. Hybridantriebe können als serielle, parallele oder leistungsverzweigte Systeme umgesetzt werden. Für Lokomotiven werden derzeit serielle und leistungsverzweigte Hybridantriebe entwickelt. Serielle Hybride treiben das Fahrzeug über Elektromotoren an, deren Leistungsstromrichter mit der elektrischen Leistung aus beiden Leistungsquellen gespeist werden. Bei leistungsverzweigten »



**BILD 1:** Blockschaltbild eines seriellen Hybridsystems [2]

Hybriden erfolgt die Leistungsübertragung sowohl elektrisch als auch mechanisch. Parallelhybride führen die Leistungspfade beider Quellen mechanisch zusammen, was bei den großen Kräften bzw. Drehmomenten von Lokomotiven herausfordernd ist. Bild 1 zeigt ein exemplarisches Blockdiagramm für ein serielles Hybridsystem mit den fünf Hauptgruppen: Primärleistungsquelle, Energiespeichersystem, Traktionsausrüstung, Bremswiderstand und Nebenaggregate, die in unterschiedlichen Konfigurationen angeordnet sein können [2].

Für alle Hybridvarianten ergibt sich durch Kombination zweier Leistungsquellen ein zusätzlicher Freiheitsgrad beim Betrieb des Systems. Daher ist durch eine geeignete Betriebsstrategie für das Hybridsystem festzulegen, wie die Leistungsanforderung aus Traktion und Hilfsbetrieben auf die vorhandenen Leistungsquellen aufgeteilt wird. Diese Betriebsstrategie kann eine Vielzahl von Einflussfaktoren (z.B. Ladezustand Energiespeicher, aktuelle Leistungsanforderung, Außentemperatur, gewünschter Betriebsmodus) berücksichtigen und legt fest, welche Funktionen (z.B. Rekuperation, emissionsfreier Betrieb aus dem Energiespeicher) das Hybridsystem bietet. Generell ist jede Umwandlung von einer Energieform in eine andere verlustbehaftet. Auch wenn diese Verluste beim Energiespeicher verhältnismäßig gering sind, ist z.B. das Laden des Energiespeichers mit dem Dieselmotor aus umwelt-

technischen Gesichtspunkten problematisch. Hinzu kommt, dass die Batterie durch hohe Ladeströme beim Rekuperieren einen höheren Verschleiß aufweisen kann und demnach früher ersetzt werden muss. Letztendlich bestimmt also die Betriebsstrategie nicht nur, welche Energie- und Emissionseinsparungen durch ein hybrides Antriebssystem erreicht werden können, sondern auch, wie sich der Verschleiß der Komponenten über die Betriebsdauer darstellt.

Von den Hybridantrieben zu unterscheiden sind **Zweikraftfahrzeuge**, bei denen stets nur eine Leistungsquelle den Antrieb des Fahrzeugs versorgt. Ein Beispiel ist die Kombination Verbrennungsmotor und elektrischer Antrieb über Stromabnehmer. Innerhalb der Zweikraftfahrzeuge werden **DualMode-Antriebe** (beide Leistungsquellen mit ähnlich großer Leistung) und **LastMile-Antriebe** (Sekundäre Leistungsquelle mit geringerer Leistung als Hilfsantrieb für kurze Distanzen bzw. geringe Geschwindigkeiten) unterschieden.

Unabhängig von der Antriebsarchitektur nutzen die betrachteten Antriebskonzepte neben konventionellen Komponenten, wie Dieselmotor, Stromabnehmer, Trafo oder elektrische Leistungsübertragung, auch neuartige Komponenten wie Energiespeicher und Brennstoffzellen. Bei diesen besteht mangels Langzeiterfahrungen Unsicherheit hinsichtlich der Lebensdauer und der Degradation. Heute verfügbare Energiespeicher

weisen bspw. eine im Vergleich zum Verbrennungsmotor kürzere Lebensdauer von etwa acht Jahren auf, so dass das Risiko besteht, dass hohe Austauschkosten anfallen. Ob sich für eine Antriebsarchitektur ein betriebswirtschaftlicher bzw. betrieblicher Vorteil für eine Anwendung ergibt, muss also im Einzelfall genau untersucht werden. Auf der Anbieterseite ist die Umsetzung neuartiger Konzepte nicht nur technologisch, sondern auch wirtschaftlich herausfordernd, da sich die Einmalkosten für Entwicklung und Zulassung erst ab einer größeren Stückzahl amortisieren.

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Antriebssysteme lassen sich grundsätzlich auch danach unterscheiden, ob im Betrieb lokale Emissionen entstehen oder die Leistung lokal emissionsfrei bereitgestellt wird. Diese Unterscheidung wird im Folgenden vorgenommen.

### VERBRENNUNGSMOTOR-BASIERTE ANTRIEBSSYSTEME

Verbrennungsmotoren werden in Lokomotiven überwiegend mit Diesel betrieben und sind als Traktionsantriebssysteme seit vielen Jahrzehnten bekannt und zuverlässig im Einsatz. Vorteile sind u.a. die flächendeckende Verfügbarkeit des Energieträgers Diesel, die schnelle und einfache Betankung und die aus der hohen Energiedichte des Kraftstoffs resultierende große Reichweite der Fahrzeuge. Bild 2 zeigt zwei aktuelle Beispiele, in denen Dieselmotoren gemeinsam mit anderen Leistungsquellen eingesetzt werden, z.B. als Hybrid- und Zweikraftfahrzeuge.

### DIESELHYBRIDLOKOMOTIVEN, SERIELL UND LEISTUNGSVERZWEIGT

Dieselhybridlokomotiven kombinieren den Verbrennungsmotor mit einem Energiespeicher. Im Rangierbetrieb kann diese Kombination in Abhängigkeit des Einsatzprofils Vorteile beim Energiebedarf und bei den



**BILD 2:** Auf der InnoTrans 2018 vorgestellte Beispiele von verbrennungsmotorbasierten Antriebssystemen: Vossloh DE 18 SmartHybrid (links) [3], Stadler Eurodual (rechts) [4]

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für DLR / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DVV Media Group, 2019.

Schallemissionen bieten. Mit einem solchen Antriebskonzept sind auch Streckenfahrten möglich. Je nach Auslegung der beiden Leistungsquellen kann aber die mögliche Distanz gegenüber einer konventionellen Diesellokomotive stark limitiert sein, da der Energiespeicher nur eine begrenzte Energiemenge zur Verfügung stellen kann und es so zu Beschränkungen der nutzbaren Traktionsleistung kommt. In diesem Fall ist die Lok allein auf ihren Verbrennungsmotor angewiesen, der wegen des Platzbedarfs und der Masse des Energiespeichers häufig kleiner ausfällt.

Vorteile des seriellen Hybrids sind u.a., dass durch den Energiespeicher zusätzliche Funktionen wie Rekuperation, Leistungsboost und rein elektrischer Betrieb realisiert werden können und dass eine Entkopplung des Betriebspunkts des Dieselgenerators von der aktuellen Leistungsanforderung erfolgen kann, wodurch dieser wirkungsgrad- und/oder emissionsoptimiert betrieben werden kann. Nachteile der seriellen Anordnung sind z.B. die mehrfache Wandlung der Energieform, die Notwendigkeit, alle Komponenten des dieselektrischen Pfads auf die maximal auftretende Leistung auslegen und die größere Komplexität des Antriebssystems. Tabelle 1 listet exemplarisch einige Fahrzeuge mit ihren charakteristischen Eigenschaften auf und verdeutlicht, dass hier verschiedene Energiespeichertechnologien und Energieinhalte zum Einsatz kommen. Die installierte Dieselgeneratorleistung ist in allen gezeigten Fällen im Vergleich zu rein dieselektrischen Fahrzeugen mit gleicher Zugkraft kleiner.

Beim leistungsverzweigten Hybrid wird nur ein Teil der mechanischen Dieselmotorleistung in elektrische Leistung umgewandelt, der andere Teil wird mechanisch übertragen. Leistungsverzweigte Hybrid-

Hersteller, Fahrzeug	Anfahrzugkraft	max. Systemleistung am Rad	Dieselmotor	Energiespeicher, -inhalt nominell	Status
Alstom H3 Hybrid	240 kN	700 kW	350 kW	NiCd, 100 kWh	im Einsatz
Alstom H4 Hybrid	300 kN	k. A.	900 kW	NiCd, k. A.	k. A.
Gmeinder DE60C Hybrid	200 kN	435 kW	354 kW	Lilon, k. A.	Prototyp
Railpower GG20B	k. A.	1500 kW	224 kW	Blei-Säure, 840 kWh	im Einsatz
CRRC Hybrid AC Drive Shunting Loco	100 kN	400 kW	k. A.	Lilon	Prototyp

TABELLE 1: Kenndaten von Dieselhybridlokomotiven, seriell [5-10]

Hersteller/Fahrzeug	Anfahrzugkraft	max. Systemleistung am Rad	Dieselmotor	Energiespeicher, -inhalt nominell	Status
DB HELMS BR294	k. A.	750 kW	1000 kW	Lilon/SCiB, 92 kWh	Prototyp in Entwicklung

TABELLE 2: Kenndaten Dieselhybridlokomotive, leistungsverzweigt [11]

antriebe koppeln die Kombination aus Verbrennungsmotor, Generator und elektrischer Antriebsmaschine meist über zwei Planetengetriebesätze. Elektrischer Motor und Generator arbeiten dabei als elektrisches Getriebe. Vorteilhaft daran ist, dass die elektrischen Maschinen nicht auf die volle Leistung des Dieselmotors ausgelegt werden müssen und auch ein Teil der Umwandlungsverluste eingespart und somit zumindest theoretisch ein größerer Wirkungsgrad der Leistungsübertragung erreicht wird. Nachteile sind u.a. die steuerungstechnische Komplexität, da zwischen den Drehzahlen von Rad, Verbrennungsmotor und den beiden elektrischen Maschinen Abhängigkeiten bestehen. Somit ist es erforderlich, nicht nur die Drehmomente, sondern auch die Drehzahlen der Komponenten zu steu-

ern. Weiterhin ist der Verbrennungsmotor mechanisch mit den Rädern verbunden, wodurch ohne zusätzliche Entkopplungs- oder Dämpfungsmaßnahmen Stöße und Schwingungen durch die Anregung im Rad-Schiene-Kontakt bis zum Motor transferiert werden. Während diese Art des Hybrids im Automobilbereich z.B. im Toyota Prius eingesetzt wird, ist die Anwendung im Bahnbereich bisher nur am Beispiel der von einem Konsortium aus Deutsche Bahn AG, Toshiba, und Henschel entwickelten „HELMS“-Lok (s. Tabelle 2) bekannt. Bemerkenswert ist hier, dass die Leistung des Dieselmotors größer als die Radleistung ist, obwohl zu erwarten wäre, dass die kombinierte Leistung von Diesel und elektrischen Maschinen am Rad eine größere Leistung zulässt, als der Dieselmotor alleine bereitstellen kann.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für DLR / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DVV Media Group, 2019.

**FRÄNKISCHE**  
INDUSTRIAL PIPES

FIPSYSTEMS® Standardwellrohre mit HL3

Unsere Wellrohre aus Polyamid 12 decken die höchste Brandgefährdungsstufe HL3 nach EN45545-2 ab und erfüllen die Norm NFPA 130. Das erreichen wir bei höchster Dauerflexibilität, hervorragenden mechanischen Eigenschaften sowie bester Alterungs- und Witterungsbeständigkeit. Vor allem bei Anwendungen mit extremen brandschutztechnischen Anforderungen - wie dem Kabelschutz für Schienenfahrzeuge - bieten unsere Wellrohre höchste Sicherheit und Beständigkeit für den Dauereinsatz in rauen Umgebungen. In Verbindung mit unseren FIPLOCK® ONE-Verschraubungen erfüllt das System die höchsten Dichtheitsstufen mit IP66/IP67/IP68 (5bar) und IP69.



www.fipsystems.com

Hersteller, Fahrzeug	Anfahrzugkraft	max. Systemleistung am Rad	Stromsystem(e)	Dieselmotor	Status
CAF Bitrac CC3600	300 kN	4450 kW	3 kV DC	2x1800 kW	im Einsatz
Siemens Vectron DualMode	300 kN	2000 kW	15 kV AC	2400 kW	k. A.
Stadler Euro Dual	500 kN	7000 kW	15/25 kV AC	2800 kW	im Einsatz

TABELLE 3: Kenndaten von Zweikraft OL-Diesellokomotiven (DualMode) [12], [13], [4]

Hersteller, Fahrzeug	Anfahrzugkraft	max. Systemleistung am Rad	Stromsystem(e)	Dieselmotor	Status
Stadler Eem923	150 kN	1500 kW	15/25 kV AC	290 kW	im Einsatz
Bombardier TRAXX LastMile	300 kN	5600 kW	15/25 kV AC	180 kW	im Einsatz
Siemens Vectron LastMile	300 kN	5200 - 6400 kW	15/25 kV AC, 3 kV DC	180 kW	k. A.

TABELLE 4: Kenndaten von Zweikraft OL-Diesellokomotiven (LastMile) [14-17]

Hersteller, Fahrzeug	Anfahrzugkraft	max. Systemleistung am Rad	Dieselmotor	Energiespeicher, -inhalt nominell	Status
Vossloh DE18 SmartHybrid	300 kN	1800 kW	1800 kW	Lilon, 120 kWh	in Entwicklung

TABELLE 5: Kenndaten von Diesel- Energiespeicherlokomotiven [3]

**ZWEIKRAFT OL-DIESELLOKOMOTIVEN: DUALMODE UND LASTMILE**

Werden Strecken befahren, die über einen hohen Anteil an Elektrifizierung verfügen, bietet sich die Nutzung des Stroms aus der Oberleitung an. In nicht elektrifizierten Bereichen kann ein Dieselmotor die Energieversorgung übernehmen. Je nach Anforderung können beide Antriebssysteme auf ähnlich großen (DualMode-Betrieb) oder der Sekundärtrieb auf sehr viel kleineren Leistungsbedarf (LastMile-Betrieb) ausgelegt werden.

Tabelle 3 listet DualMode-Antriebssysteme auf, deren großer Vorteil darin besteht, dass sie sowohl auf elektrifizierten wie auf nicht-elektrifizierten Strecken Transport-

aufgaben mit großem Leistungsbedarf und großer Reichweite erfüllen können. Der betriebliche Vorteil besteht darin, dass kein Umspannen notwendig ist. Es wird deutlich, dass diese Systeme zwar sowohl im elektrischen als auch im dieselmotorischen Betrieb große Leistungen bereitstellen, aber in beiden Betriebsarten nicht mit rein elektrischen Lokomotiven mithalten können. Weiterhin ist zum Teil keine Mehrsystemfähigkeit gegeben, einige Loks sind nur unter einem Stromsystem einsetzbar. Für den Käufer einer solchen Zweikraftlokomotive ergibt sich ein höherer Anschaffungspreis, da zwei unterschiedliche Antriebssysteme mit jeweils großer Leistung eingesetzt werden.

Hersteller, Fahrzeug	Anfahrzugkraft	max. Systemleistung am Rad	Stromsystem(e)	Energiespeicher, -inhalt nominell	Status
CAF RATP	k. A.	1000 kW	k. A.	NiCd	Auslieferung 2019
Stadler RHB	75 kN	500 kW	k. A.	Lilon	Auslieferung 2020

TABELLE 6: Kenndaten von Zweikraft OL-Batterielokomotiven (Last Mile) [18], [19]



**BILD 3:** Beispiele lokal emissionsfreier Antriebssysteme, CAF RATP [18] (links), Stadler RHB [19] (rechts)

Der überwiegende Einsatzzweck der in Tabelle 4 zusammengefassten LastMile-Fahrzeuge ist die Fahrt unter Fahrdrat, daher ermöglichen alle Fahrzeuge die Nutzung verschiedener Stromsysteme und können in diesem Betrieb große Traktionsleistungen bereitstellen. Bei TRAXX und Vectron handelt es sich um vollwertige E-Loks, die als Option zusätzlich mit einem LastMile-Modul ausgerüstet werden können. Dieser Dieselgenerator hat in beiden Fällen nur eine geringe Leistung und wird daher lediglich für kurze Strecken bei kleinen Geschwindigkeiten sinnvoll einsetzbar sein.

Der überwiegende Einsatzzweck der in Tabelle 4 zusammengefassten LastMile-Fahrzeuge ist die Fahrt unter Fahrdrat, daher ermöglichen alle Fahrzeuge die Nutzung verschiedener Stromsysteme und können in diesem Betrieb große Traktionsleistungen bereitstellen. Bei TRAXX und Vectron handelt es sich um vollwertige E-Loks, die als Option zusätzlich mit einem LastMile-Modul ausgerüstet werden können. Dieser Dieselgenerator hat in beiden Fällen nur eine geringe Leistung und wird daher lediglich für kurze Strecken bei kleinen Geschwindigkeiten sinnvoll einsetzbar sein.

**ZWEIKRAFT DIESEL-ENERGIESPEICHERLOKOMOTIVEN**

Diese Zweikraftlokomotiven beinhalten in der Regel einen großen Dieselmotor und einen im Verhältnis kleineren Energiespeicher. Die Vorteile bestehen in der Möglichkeit eines lokal emissionsfreien Betriebs, jedoch mit geringen Geschwindigkeiten, aber einer großen Anfahrzugkraft und der Möglichkeit eines Betriebs auf nicht-elektrifizierten Abschnitten. Das Energiespeichersystem der in Tabelle 5 dargestellten DE 18 ist ähnlich wie der LastMile-Diesel als Zusatzoption zum vollwertigen Dieselantriebssystem konzipiert. Rekuperation und Leistungsboost sind dabei nicht vorgesehen. Durch den aus-

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für DLR /  
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten  
 genehmigt von DVV Media Group, 2019.

schließlichen Betrieb mit Dieselmotor oder Batterie besteht die Möglichkeit ohne komplexe Leistungselektronik die Batterie direkt mit dem Traktionsstrang zu koppeln und es ermöglicht eine Nachrüstung bestehender DE 18 mit einem Batteriespeicher. Betriebswirtschaftliche Vorteile ergeben sich dabei durch die Vermeidung von hohen Leerlaufzeiten des Dieselmotors im Rangierverkehr.

### LOKAL EMISSIONSFREIE ANTRIEBSYSTEME OHNE VERBRENNUNGSMOTOR

Für bestimmte Anwendungen und Arbeitseinsätze in sensiblen Umgebungen ist es notwendig, auf Antriebssysteme zurückzugreifen, die zeitweise oder dauerhaft schadstofffrei eingesetzt werden können. Hierzu zählen Zweikraftfahrzeuge die unter Oberleitung fahren und zusätzlich mit einem Energiespeicher ausgerüstet sind, aber auch rein batteriebetriebene (Bild 3) und wasserstoffbetriebene Fahrzeuge.

### ZWEIKRAFT OL-BATTERIELOKOMOTIVEN (LAST MILE)

Typischer Einsatzzweck dieser Lokomotiven ist der Betrieb unter Oberleitung. In nicht-elektrifizierten Bereichen kann der Betrieb über kurze Strecken aus dem Energiespeicher erfolgen. Somit ist ein kostengünstiger Betrieb auf elektrifizierten Abschnitten möglich. Auch die Verwendung eines Leistungsboost ist bei solchen Lokomotiven möglich. Im Vergleich zum Oberleitungsbetrieb sind im Batteriemodus neben der geringen Reichweite auch nur geringere Geschwindigkeiten möglich (vgl. Tabelle 6).

### BRENNSTOFFZELLEN-HYBRIDANTRIEB- UND BATTERIELOKOMOTIVEN

Brennstoffzellen-Hybridlokomotiven bieten den Vorteil, dass ihr Wasserstoffspeicher schnell betankt und dass eine große Reichweite realisiert werden kann. Von den Einsatzmöglichkeiten sind sie vergleichbar mit den heutigen Diesellokomotiven. Im Vergleich zum Diesel ist die Energiedichte der Wasserstoffspeicherung auf dem Fahrzeug geringer, was in einem größeren Tankvolumen resultiert (Bild 4). Weiterhin sind für die Einführung der Wasserstofftechnologie zusätzliche Kosten für die Betankungsanlagen und deren Betrieb aufzuwenden. Eine geeignete Standortwahl und optimierte Auslegung bieten hier das Potential, den Einfluss auf die Fahrzeugenergiekosten zu senken.

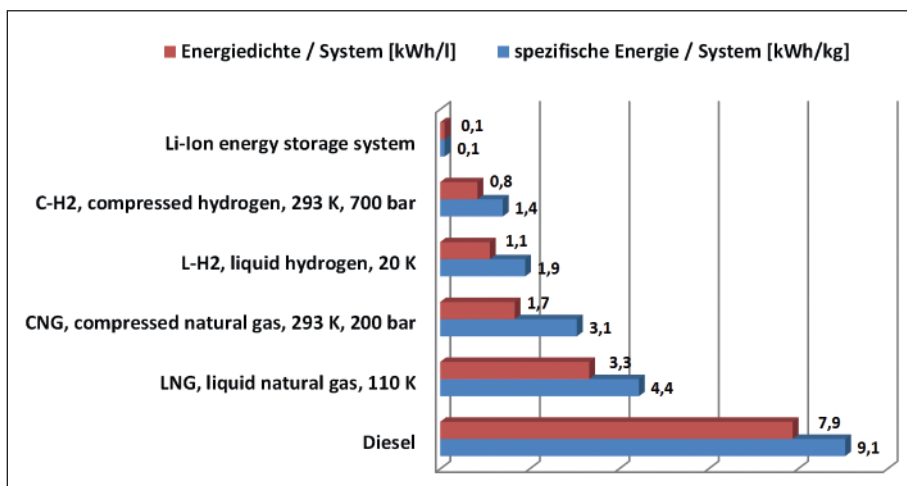


BILD 4: Vergleich Energiedichte verschiedener Energieträger auf Tank-/ Systemebene (Fahrzeug) [20]

Der Einsatzbereich von Batterie-lokomotiven (Tabelle 7) ist aufgrund der verhältnismäßig geringen Energiedichte heutiger Batterien eingeschränkt. Hinzu kommt, dass für eine reine Batterie-lokomotive eine leistungsfähige Ladeinfrastruktur geschaffen werden muss, um die Ladezeiten in einem praktikablen Bereich halten zu können.

### VERGLEICH ZUM KONVENTIONELLEN DIESELANTRIEB

Die Diesellokomotive stellt aufgrund der hohen Energiedichte des Diesels (vgl. Bild 4) den Fahrbetrieb in nicht oder nur teilelektrifizierten Bereichen sicher, in denen sich eine Elektrifizierung aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht rechnet.



## EURODUAL

Die vielseitige, effiziente und leistungsstarke Lokomotive ist mit Spitzentechnologien ausgestattet, die keine Wünsche offen lässt, und bietet Bahnunternehmen zahlreiche wirtschaftliche und ökologische Vorteile.  
[www.stadlerail.com](http://www.stadlerail.com)

**STADLER**

Hersteller, Fahrzeug	Anfahrzugkraft	max. Systemleistung am Rad	FuelCell	Energiespeicher, -inhalt nominell	Status
BNSF Fuel Cell	k. A.	1000 kW	240 kW	Blei-Säure	k. A.
Alstom H3 Akku	240 kN	600 kW	nicht vorhanden	NiCd, 200 kWh	k. A.

TABELLE 7: Kenndaten von Brennstoffzellen-Hybridantrieb- und Batterielokomotiven [21], [6]

Durch die Unabhängigkeit von der Oberleitung ist ein länderübergreifender Verkehr ohne Umstellung zwischen verschiedenen Spannungssystemen möglich. Ebenfalls kann die Diesellok für Sondereinsätze eingesetzt werden, um gegebenenfalls schwere Personenzüge aus Bereichen zu bergen, in denen die Oberleitung ausgefallen ist, oder Gleisbauarbeiten zu bewerkstelligen sind bei denen noch keine Oberleitung installiert wurde.

Diese Flexibilität und Vielseitigkeit kann derzeit keines der alternativen Antriebskonzepte in vollem Umfang zu vergleichbaren Kosten bieten. Werden ältere Lokomotiven mit dieselhydraulischem Antrieb (DH) mit modernen dieselelektrischen Lokomotiven (DE) verglichen, so ergibt sich aus dem gesteigerten Wirkungsgrad moderner DE-Loks ein deutlich geringerer Treibstoffverbrauch. Bei dem Einsatz mit niedrigen Geschwindigkeiten und hohen Zugkräften fallen die Wirkungsgrade der DH Lok sehr niedrig aus. Dies bedeutet, dass bei DE-Loks weniger CO<sub>2</sub> ausgestoßen wird. Im Gegensatz zu älteren Diesellokomotiven, verfügen modernere Lokomotiven über effiziente Abgasreinigungssysteme, die den lokalen Schadstoffausstoß auf ein Minimum beschränken. So sind z. B. in Deutschland viele der älteren dieselhydraulischen Lokomotiven im Einsatz, die nicht an neue Abgasnormen gebunden sind und über eine unzureichende Schadstofffilterung verfügen. Die Antriebskonzepte der Diesellokomotive werden kontinuierlich verbessert, um sowohl den Vorteil ihrer Flexibilität weiterhin nutzen zu können, als auch die Nachteile der Emissionen auszugleichen und die verschärften gesetzlichen Schadstoffemissionsgrenzwerte zu erfüllen.

Hierzu kann auch die Verwendung alternativer Kraftstoffe beitragen, die auch aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden können [22].

Die Entwicklung von brennstoffzellen- und energiespeicherbasierten Antriebssystemen für Schienenfahrzeuge steht am Beginn, für die Zukunft sind Steigerungen von Energieeffizienz, Energie- und Leistungsdichte sowie Kostensenkung aufgrund von Skaleneffekten zu erwarten. Herausforderungen sind die umweltfreundliche und kostengünstige Bereitstellung von Wasserstoff und die Steigerung der Lebensdauer von Energiespeichern.

## METHODE ZUR BEWERTUNG VON ANTRIEBSKONZEPTEN FÜR SPEZIFISCHE ANFORDERUNGSPROFILE

Für die detaillierte Auslegung von Antriebssystemen, -komponenten (Dieselgenerator, Energiespeicher, Brennstoffzelle, ...) sowie die Entwicklung geeigneter Betriebsstrategien und Regelungskonzepte für hybride Antriebssysteme ist eine umfassende Betrachtung und Bewertung der Lokomotive von der betrieblichen Analyse bis hin zum Systems-Engineering abzudecken. Das betreiberspezifische Anforderungs- und Einsatzprofil ist dabei die maßgebliche Randbedingung.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) bietet die Möglichkeit, Einsatzprofile exakt abzubilden und mit Hilfe numerischer Simulationen Betriebsverhalten und Betriebskosten im Voraus zu bestimmen. Die gesamtheitliche Auslegung und Bewertung von Fahrzeug und Energieinfrastruktur erfolgt mittels einer produktübergreifenden Toolkette innerhalb des DLR, für die unter anderem die Toolkomponenten SUMO, MODELICA, MATLAB, Railonomics® und DFSimu Anwendung finden. So können spezifische Einsatzszenarien berechnet und ein fahrdynamisches Beanspruchungsprofil erstellt werden. Die resultierende Nutzwertanalyse und Investitionsrechnung bilden die maßgebliche Entscheidungsgrundlage für die Spezifikation und Anschaffung von neuen Triebfahrzeugen. [1], [20], [22-25]. ◀

### Literatur

- [1] Hoffmann, Marcus; Dittus, Holger; Falabretti, Mario; Pagenkopf, Johannes; Böhm, Mathias: Alternative Antriebskonzepte für Rangier- und Baufahrzeuge der Schweizerischen Bundesbahnen SBB. In: ZEVrail – Zeitschrift für das gesamte System Bahn 04/2017, Nr. 141, S. 125–133
- [2] Norm DIN EN 62864-1:2017-05. 2017-05. Railway applications - Rolling stock - Power supply with onboard energy storage system - Part 1: Series hybrid system (IEC 62864-1:2016); German version EN 62864-1:2016
- [3] Vossloh Locomotives GmbH: DE 18 SmartHybrid. Produktdatenblatt, 2018
- [4] Stadler Rail Group: Eurodual Lokomotive, Havelländische Eisenbahn (HVLE). Produktdatenblatt, 2018
- [5] Dittmann, Detlef: Alstom Hybridlokomotiven im Versuchsbeinsatz. Konzept und Erfahrungen im Einsatz H3 Fahrzeugplattform. Schienenfahrzeugtagung Graz, 2013
- [6] BOMKE, Thorsten: H3 Hybrid Locomotive, UIC Energy Efficiency Days 2014, Antwerpen, 2014
- [7] Wittwer, Max: Alstom Plattform H3/H4 SBB Aem 940 Lokomotive. Vortrag TST Tagung Martigny, 09. Juni 2016

- [8] Gmeinder Lokomotiven: Aus alt mach' NEU! [https://www.gmeinder-lokomotiven.de/aktuelles/details/?tx\\_news\\_pi1%5Bnews%5D=168&tx\\_news\\_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx\\_news\\_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=703a852e6b6004747c970ea5517e069](https://www.gmeinder-lokomotiven.de/aktuelles/details/?tx_news_pi1%5Bnews%5D=168&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=703a852e6b6004747c970ea5517e069), 15. Sep. 2016
- [9] Kache, Martin: Hybridprojekte – Ein globaler Überblick. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 10/2014, S. 36
- [10] CRRC: DB Hybrid shunting locomotive, Inntrans Präsentation, Berlin, 2018
- [11] Toshiba: Toshiba Hybrid System. Produktdatenblatt, 2016
- [12] Railway Gazette: Electro-diesel loco offers flexible traction, 06 Feb. 2017
- [13] Siemens Mobility GmbH: Vectron Dual Mode. Produktdatenblatt, 2018
- [14] Stadler Rail Group: Zweikraft-Lokomotive Butler, SBB Cargo Schweiz. Produktdatenblatt, 2016
- [15] Bombardier Transportation: TRAXX AC optional with Last Mile. Produktdatenblatt, 2018
- [16] Siemens AG: Vectron. Die Lok, die neue Wege schafft. Produktdatenblatt, 2016
- [17] Aschaber, A.: Herausforderungen bei der Entwicklung eines Diesel Power Modules (DPM) zur Elektrifizierung der letzten Meile. Schienenfahrzeugtagung Graz, 2016
- [18] Railway Gazette: Paris orders battery-overhead electric locomotives, 03 Jan. 2008
- [19] Rhätische Bahn AG: 7 neue Rangierlokomotiven für die RhB. <https://www.rhb.ch/de/news-events/news/details/7-neue-rangierlokomotiven-fuer-die-rhb> 03 Sep. 2018
- [20] Hoffmann, Marcus; Dittus, Holger; Pagenkopf, Johannes; Böhm, Mathias: Alternative Antriebskonzepte für Rangier- und Baufahrzeuge – Vorstudie SBB: Projektbericht, DLR Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, 2015
- [21] Ballard Power Systems: Fuel Cells for Rail Applications. Hydrail Conference Birmingham, 05 Jul. 2016
- [22] Hoffmann, Marcus; Böhm, Mathias; Dittus, Holger: Alternative Kraftstoffe in Schienenfahrzeugen – Eine Betrachtung von Forschungsprojekten der vergangenen 20 Jahre. In: ZEVrail - Zeitschrift für das gesamte System Bahn 03 (2017), Nr. 141, S. 91–97
- [23] Institut für Verkehrssystemtechnik: SUMO – Simulation of Urban Mobility : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. URL <http://sumo.dlr.de/>, abgerufen am 08.08.2018
- [24] Schumann, Tilo: Increase Of Capacity On The Shinkansen High-Speed Line Using Virtual Coupling. In: Brebiba, Carlos A. (Hrsg.): International Journal of Transport Development and Integration. Southampton, UK : WIT Press Southampton, UK, 2017 (4), S. 666–676
- [25] Schürmann, Werner; Wießner, Evamarie; Blank, Christian; Scheier, Benedikt: Energieverbrauch von Diesellokomotiven im Vergleich. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (2016), Nr. 9, S. 101–117

## ► SUMMARY

### Drive-concepts in state-of-the art technology for shunting and line locomotives

So far, the focus of alternative drive concepts for locomotives is mainly on combustion- properties based systems. At the moment, only few emission-free drive systems are being developed resulting from the disadvantages of low energy storage density and the nonexistent charging and refueling infrastructure.

In addition to use a multi-system locomotive universally in the shunting and line service, a line specific analysis is necessary, to evaluate if the carriage of an additional drive system is efficient.