

VDB-LEITFADEN

## **EMISSIONSFREIE MOBILITÄT –**

eine Strategie für den Einsatz von batterieelektrischen Triebzügen und Ladeinfrastruktur in Deutschlands Schienenpersonennahverkehr

**Redaktion:**

Davide Amelia  
Verband der Bahnindustrie in Deutschland e.V.

Nyascha Thomas Wittemann  
Technische Universität Dresden

Ulrich Zimmermann  
Technische Universität Berlin

**Autorenschaft:**

Carl-Roman Culemann, M. Sc.  
TU Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge

Dr.-Ing. Felix Dschung  
Furrer+Frey AG

Andreas Frixen  
Alstom Transport Deutschland GmbH

Dipl.-Ing. Sven Klein  
Stadler Pankow GmbH

Dipl.-Betriebsw. Daniel Lichtenberg  
Alstom Transport Deutschland GmbH

Katrin Seeger, M. Sc.  
Siemens Mobility GmbH

Dr.-Ing. Carsten Söffker  
Alstom Transport Deutschland GmbH

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan  
TU Dresden, Professur für Elektrische Bahnen

Stefan von Mach, M. Sc.  
Alstom Transport Deutschland GmbH

Heiko Wirth, M. Sc.  
Siemens Mobility GmbH

Dipl.-Ing. Nyascha Thomas Wittemann  
TU Dresden, Professur für Elektrische Bahnen

Ulrich Zimmermann, M. Sc.  
TU Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb

## **INHALT**

	Vorwort	5
1	Was spricht für den Einsatz von batterieelektrischen Triebzügen in Deutschland?	7
2	Können batterieelektrische Triebzüge bereits heute im Regionalverkehr eingesetzt werden?	9
3	Wie sieht ein Netz für kombinierten Oberleitungs- und Batteriebetrieb aus?	12
4	Wie wird die Energieversorgung sichergestellt?	15
5	Benötigen wir einen erweiterten Regelungsrahmen?	18
6	Welche Betreibermodelle gibt es für den Einsatz batterieelektrischer Triebzüge?	20
7	Ist die kombinierte Oberleitungs- und Batterie-technologie wirtschaftlich und wettbewerbsfähig?	23
8	Fazit	27
9	Was ist zu tun für die Einführung des batterieelektrischen Betriebs?	29
	Fachartikel – Laden von Batteriezügen mit 50 Hz	31
	Quellenverzeichnis	40





## **VORWORT VON VDB-HAUPTGESCHÄFTSFÜHRER DR. BEN MÖBIUS UND VDB-GESCHÄFTSFÜHRER AXEL SCHUPPE**

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,  
der Verkehrsträger Schiene blickt aufregenden Zeiten entgegen. Der Klimawandel und die konjunkturelle Lage erfordern ein emissionsarmes und leistungsfähiges Transportmittel, um damit Klimaschutz und Konjunkturochlauf weiter voranzutreiben. Dies gilt in Anbetracht des aktuellen politischen Fahrplans in Deutschland und ebenso international. Alternative Antriebe im Schienenpersonennahverkehr sind ein essentieller Beitrag zur Erfüllung der Klimaschutzziele des Verkehrssektors und zum Konjunkturochlauf. Bereits heute hat die Bahnindustrie ein breites Spektrum an umweltfreundlichen Technologien und Lösungen im Angebot. Dazu gehören u. a. batterieelektrisch und mit Wasserstoff angetriebene Züge, um den Schienenverkehr von morgen noch umweltfreundlicher zu gestalten. Batterieelektrische Triebzüge für den Schienenpersonennahverkehr stellen eine dieser Lösungen dar. An sich ist das nichts Neues. Bereits in den Anfangsjahren der jungen Bundesrepublik verkehrten Akkutriebwagen im Norden Deutschlands. Doch heute ergeben sich aus der Kombination von modernster Energiespeichertechnik und digitaler Steuerung ungeahnte neue Möglichkeiten. Wie das immer ist: Mit neuen Technologien entstehen neue Fragen, die Erklärung und Antworten für das Voranbringen benötigen. Deshalb hat sich unter Federführung des VDB ein Expertenkreis gebildet, in dem Wissenschaft, Bahnindustrie und weitere Akteure eng zusammenarbeiten. Zunächst wurden die zur Einführung batterieelektrischer Triebzüge relevanten Fragen – mit dem Schwerpunkt Ladeinfrastruktur – diskutiert und anschließend wurde ein Hintergrund- und Positionspapier dazu verfasst.

Seit Entstehung der Idee zu diesem Projekt sind viel Zeit, arbeitsintensive Sitzungen und noch intensivere Diskussionen vergangen. Das Produkt unserer Arbeit halten Sie nun in Ihren Händen. An dieser Stelle möchten wir all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zur Realisierung dieses Hintergrund- und Positionspapieres beigetragen haben. Ein besonderer Dank gebührt den Technischen Universitäten Berlin und Dresden, die durch tatkräftige wissenschaftliche und redaktionelle Unterstützung einen bedeutenden Beitrag geleistet haben. Unser besonderer Dank gilt auch den Vertreterinnen und Vertretern der Unternehmen der Bahnindustrie, deren Fachwissen und Erfahrungen aus der Praxis maßgeblich in die vorliegende Broschüre eingeflossen sind.

Mit dieser Broschüre aus einer Reihe zu alternativen Antrieben im Schienenverkehr möchte der VDB Entscheidungsträgern und interessierten Akteuren für politische, rechtliche und wirtschaftliche Prozesse Informationen bereitstellen und einen Beitrag zum aktuellen Diskurs beisteuern.

Wir wünschen Ihnen eine nutzbringende und informative Lektüre.  
Berlin, Juli 2021



## 1. WARUM IST DER EINSATZ VON BATTERIEELEKTRISCHEN TRIEBZÜGEN IN DEUTSCHLAND SO WICHTIG?

Die Schiene ist Vorreiter der Elektromobilität. Bereits heute werden der Großteil der Tonnen- und Personenkilometer auf der Schiene durch elektrische Antriebstechnik erbracht. Hochleistungsfähige und kompakte Batterien ermöglichen die Nutzung dieser Vorteile jetzt über das elektrifizierte Netz hinaus.<sup>1</sup> In naher Zukunft wird es darum gehen, durch fossile Brennstoffe verursachte Emissionen schrittweise durch klimaneutrale Alternativen zu vermeiden.

Ein Großteil der Zugfahrten findet in den Nebennetzen abseits der Magistralen mit kleinen Fahrzeuggrößen und langen Taktzeiten statt. Ungefähr 2000 Dieseltriebzüge sind deutschlandweit auf circa 450<sup>2</sup> Linien<sup>3</sup> im Einsatz. Dort macht der Energiebedarf circa zwei Drittel der im gesamten Schienenverkehr benötigten – im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern sehr geringen – Menge fossilen Kraftstoffs aus. Die im Nahverkehr benötigte Dieselmenge entspricht circa 700 Millionen Kilogramm CO<sub>2</sub>-Ausstoß jährlich<sup>4</sup>. Dieses Marktsegment ist für den Einsatz von batterieelektrischen Triebzügen geradezu prädestiniert, da das Potential zur Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen enorm ist.

Gleichzeitig verliert der auf fossiler Energie basierende Schienenverkehr auf Grund verschiedener Entwicklungen (z. B. Schadstoffe, Lärm, Kraftstoffpreis) an Attraktivität. Da es sich bei Schienenfahrzeugen um langlebige Güter handelt, können und müssen bereits heute die Weichen für Akzeptanz, Wirtschaftlichkeit und optimierte Umweltfreundlichkeit des Nahverkehrs auf der Schiene für das Jahr 2030 und darüber hinaus gestellt werden. Die Verringerung von CO<sub>2</sub>- und Schadstoff-Emissionen, Lärmreduktion, die Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern sowie eine höhere Energieeffizienz sind zentrale politische und gesellschaftliche Ziele. Dies gilt besonders, da zur komfortablen und schnellen Anbindung nicht elektrifizierter Strecken an die großen Ballungsräume häufig unter der Oberleitung in die Städte hinein mit Diesel gefahren wird.

Elektrischer Bahnverkehr bietet schon heute dank der Oberleitung das Potential, lokal vollständig emissionsfrei zu fahren und die Städte so von Schadstoffen zu entlasten. Gleichzeitig ist elektrischer Bahnverkehr technisch sehr zuverlässig und potentiell am schnellsten auf nahezu emissionsfreie Energieversorgung umzustellen.

Etwa 60% des gesamten deutschen Eisenbahnnetzes sind schon heute elektrifiziert. So wird unmittelbar nutzbare Traktionsenergie bei Fahrt unter Oberleitung gesichert. Doch dieses Netz bildet zugleich eine umfangreiche und leistungsfähige Ladeinfrastruktur für die Speicher batterieelektrischer Triebzüge, die bereits genormt, erprobt und zuverlässig ist. Die Elektrifizierung wichtiger Eisenbahnstrecken, welche teilweise bereits im Bundesverkehrswegeplan enthalten ist, schreitet parallel dazu weiter voran.

Im Anschluss an Oberleitungsabschnitte und zwischen elektrifizierten Strecken gibt es trotzdem noch häufig Lücken, die durch Züge mit innovativer Antriebs- und Speichertechnik

---

1 Im Rahmen dieser Publikation wird der Begriff „Batterie“ als Synonym für „Akkumulator“ verwendet.

2 Technische Universität Berlin:

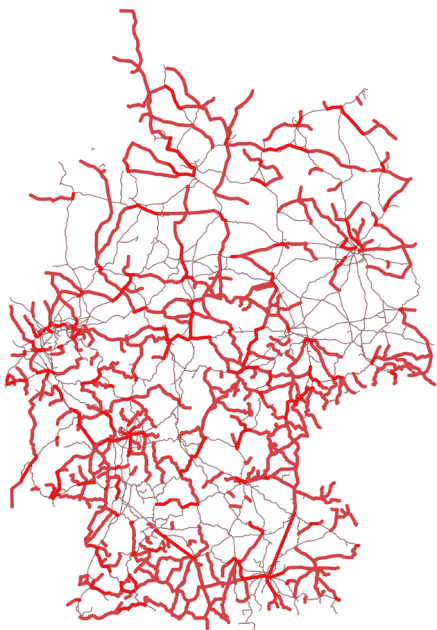
*Potentialanalyse für Batterietriebfahrzeuge im deutschen Schienennetz, unveröffentlicht.*

3 Auszug aus § 42 Personenbeförderungsgesetz: Linienverkehr ist eine zwischen bestimmten Ausgangs- und Endpunkten eingerichtete regelmäßige Verkehrsverbindung (...).

4 Hecht, Markus; Stephan, Arnd; Walther, Christoph:

*Klimapolitisches Potenzial elektrischer Schienenstrecken in Deutschland (08.10.2018).*

und die Nutzung des vorhandenen Oberleitungsnetzes als Ladeinfrastruktur überbrückt werden können. Eine Übersicht der TU Berlin zeigt, dass Dieselstrecken in der Regel kurze Abschnitte im Schienennetz sind, die häufig direkt in elektrifizierte Streckennetze übergehen. Ungefähr 80 % dieser Linien besitzen einen Zugang zum elektrischen Netz, sodass viele Linien von innovativen, schon marktreifen und erhältlichen batterieelektrischen Triebzügen befahren werden können. Würde man die Endpunkte der derzeit oberleitungslosen mit Diesel befahrenen Nahverkehrslinien (s. Abbildung 2) mit einer Ladestation ausstatten, so ließe sich bereits ein erheblicher Teil der Strecken, darunter auch viele grenzüberschreitende Verbindungen, auf vollelektrischen gänzlich emissionsfreien Betrieb umstellen.



**Abbildung 2:** Darstellung der SPNV-Linien in Deutschland, welche mit Dieselfahrzeugen betrieben werden.<sup>5</sup>

Eine Studie der TU Dresden, der TU Berlin und der PTV AG für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) der Bundesregierung hat gezeigt, dass eine Elektrifizierung des noch oberleitungslosen Netzes mindestens 21 Milliarden Euro<sup>6</sup> kosten würde. Demgegenüber lassen Betrachtungen unter Nutzung batterieelektrischer Triebzüge erwarten, dass eine Kombination von ambitionierter Elektrifizierung durch Oberleitung und durch alternative Lösungen wie batterieelektrische Fahrzeuge erheblich geringere Kosten umfasst. Wo die Energiebereitstellung und -verteilung aus den vorhandenen Oberleitungsanlagen nicht ausreicht, werden im Bedarfsfall ergänzende Elektrifizierungen bzw. Ladestationen vorgesehen. Elektrischer Betrieb wird also dank innovativer Antriebe ohne vollständige Streckenelektrifizierung möglich.

---

<sup>5</sup> Technische Universität Berlin: *Potentialanalyse für Batterietriebfahrzeuge im deutschen Schienennetz*, unveröffentlicht.

<sup>6</sup> Hecht, Markus; Stephan, Arnd; Walther, Christoph: *Klimapolitisches Potenzial elektrischer Schienenstrecken in Deutschland* (08.10.2018).



## 2. KANN DIE BAHNINDUSTRIE IN DEUTSCHLAND INNOVATIVE BATTERIEELEKT-RISCHE TRIEBZÜGE FÜR DEN REGIONALVERKEHR SCHON HEUTE LIEFERN?

Schiene 4.0 ist die nächste Mobilitätsrevolution. Und sie kann heute beginnen. Denn hochinnovative Antriebslösungen wie die batterieelektrische Mobilität auf der Schiene werden durch ehrgeizige Forschung, Entwicklung und Erprobung permanent und mit hohem Aufwand optimiert. Doch die Bahnindustrie kann dank dieses Entwicklungsaufwands schon heute liefern. Batterieelektrische Triebzüge – neuester Stand „made in Germany“ – waren auf der InnoTrans 2016 und 2018 zu bestaunen – und sind heute einsatzbereit. Und auch die Nachladeinfrastruktur ist heute schon verfügbar. Deshalb geht es um beides zugleich: implementieren und optimieren.

### Nachladung

Für die externe Nachladung von batterieelektrischen Triebzügen wird hauptsächlich die bereits bestehende Oberleitungsinfrastruktur genutzt, sowohl während der Fahrt bis zur Fahrzeug- und Streckenhöchstgeschwindigkeit als auch im Stand. Innerhalb weniger Minuten werden die Traktionsbatterien auf elektrifizierten Bahnhofsgleisen und Streckenabschnitten nachgeladen. Die Leistungsfähigkeit von Infrastruktur, Stromabnehmer und Traktionsbatterien ist so ausgelegt, dass die Nachladung ohne Einschränkungen des bestehenden Betriebsablaufes gelingt. Der Triebfahrzeugführer kann auf „Knopfdruck“ den Stromabnehmer heben und dadurch die Batterie aufladen. Die dafür notwendigen betrieblichen Regelungen existieren und sind Stand der Technik. Zur Erhöhung der Energieeffizienz kann durch Nutzung des elektrischen Antriebsstranges zusätzlich die Bremsenergie zum Laden der Batterien genutzt werden.

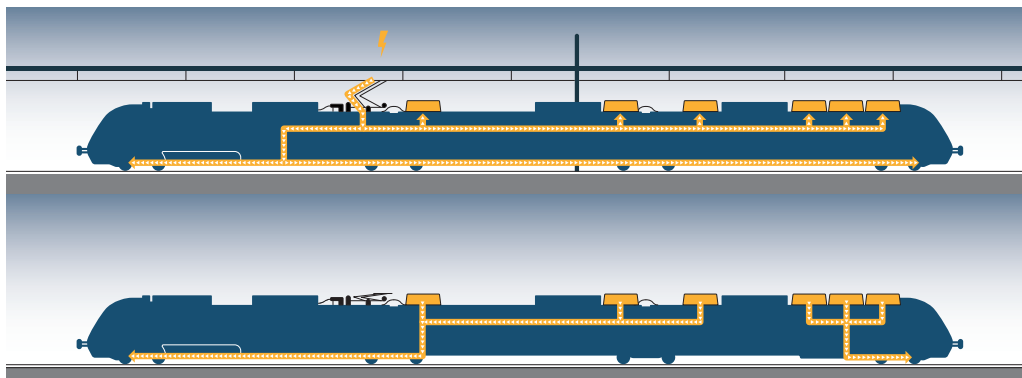


Abbildung 4: Batterieelektrischer Triebzug im Oberleitungs- (oben) und Batteriebetrieb (unten).<sup>7</sup>

Auf einigen nicht elektrifizierten Strecken werden zusätzlich Ladestationen notwendig sein. Durch standardisierte und somit kostengünstige Ladeinfrastruktur, die z. B. an nicht elektrifizierten Endbahnhöfen installiert wird, kann aus technischer Sicht nahezu jede nicht elektrifizierte Strecke mit batterieelektrischen Triebzügen betrieben werden.



## Performance und Reichweite

Das Beschleunigungsvermögen batterieelektrischer Triebzüge erreicht das Niveau rein elektrischer Triebzüge und übersteigt damit das Leistungsvermögen von Dieseltriebzügen deutlich. Durch eine geschickte Umlaufplanung oder die Installation von Ladestationen kann das bisherige Betriebsprogramm weitestgehend unangetastet bleiben oder ließe sich sogar durch den Einsatz beschleunigungsstarker batterieelektrischer Triebzüge zukünftig verbessern.

Parameter	Dieseltriebzüge	Batterieelektrische Triebzüge
Investitionskosten (pro Sitzplatz)	100 %	Ca. 120–130 %
benötigte Infrastruktur	Dieseltankstellen	Bestehende Oberleitung und eventuelle Ladestationen
Leistung	100 %	Ca. 150–300 % <sup>8</sup>
Höchstgeschwindigkeit <sup>9</sup>	Bis 140 km/h	Bis 160 km/h
Rückspeisegrad beim Bremsen	0 %	Ca. 30 %
Beschleunigung	0,55 m/s <sup>2</sup> (bis 50 km/h)	Bis zu 1,0 m/s <sup>2</sup> (bis 50 km/h)
Lokale Schadstoff-/CO <sub>2</sub> -Emissionen	100 %	0 %

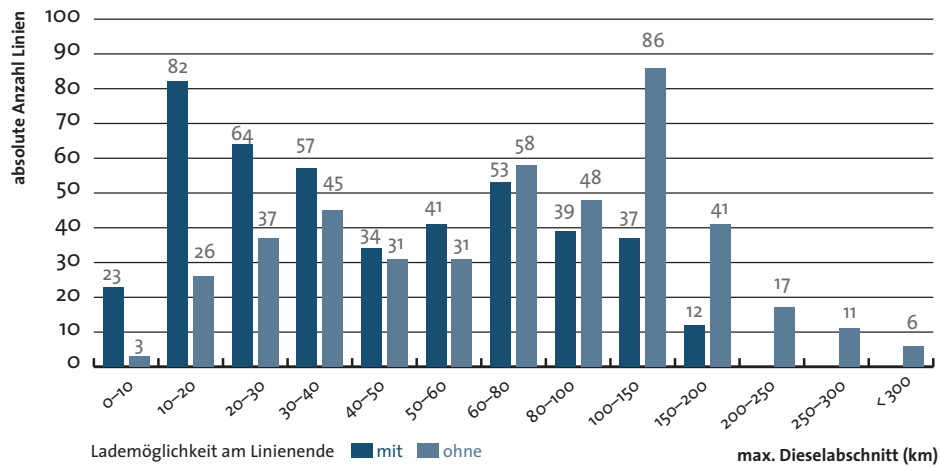
**Tabelle 1:** Fahrzeugparameter

Ein zentrales Thema im Blick auf batteriebetriebene Fahrzeuge ist die Reichweite. Bisher wird die Reichweite von Dieselfahrzeugen so bemessen, dass die tägliche Laufleistung mit einer Tankfüllung bewältigt werden kann. Demgegenüber muss ein batterieelektrischer Triebzug nur die Strecke bis zum nächsten Oberleitungsabschnitt oder Nachladeplatz überbrücken. Diese Strecken sind also mit den schon verfügbaren hocheffizienten Batterietechnologien inklusive der Ladeinfrastruktur – auch unter Berücksichtigung etwaiger Störungsszenarien – zu bewältigen. Des Weiteren sind etwa 80 % aller Diesellinien an einem Endpunkt bereits elektrifiziert, sodass dort ohne infrastrukturelle Erweiterungen nachgeladen werden kann. Doch konkrete Aussagen in Bezug auf Fahrzeiten und Batteriekapazitäten können für jede Linie nur im Rahmen einer detaillierten Analyse der jeweiligen betrieblichen, topographischen und infrastrukturellen Gegebenheiten getroffen werden.

<sup>8</sup> Die angegebenen Leistungsangaben beziehen sich im oberen Bereich auf den elektrischen Betrieb bei vorhandener Oberleitung und im unteren Bereich auf den elektrischen Betrieb durch Akkumulatoren.

<sup>9</sup> Abgesehen von Neigetechnikzügen.

### Längste nicht elektrifizierte Abschnitte im deutschen SPNV-Netz.



**Abbildung 5:** Jede Linie ist in dieser Statistik genau einmal mit ihrem jeweils längsten nicht elektrifizierten Abschnitt vertreten.<sup>10</sup>



<sup>10</sup> Technische Universität Berlin: Potentialanalyse für Batteriebetriebene Fahrzeuge im deutschen Schienennetz, unveröffentlicht. Der Begriff Linie definiert eine vom Aufgabenträger vergebene Schienenverkehrsleistung wie beispielsweise den RE 1 von Frankfurt (Oder) nach Magdeburg.

### 3. WIE SIEHT EIN NETZ FÜR HOCHEFFIZIENTEN KOMBINIERTEN OBERLEITUNGS- UND BATTERIEBETRIEB AUS?

Die heutigen Ausschreibungsnetze sind in den meisten Fällen streng nach Elektro- bzw. Dieselbetrieb getrennt. Durch die speziellen Eigenschaften eines batterieelektrischen Tribzuges, der gleichermaßen sowohl unter Oberleitung als auch auf oberleitungsfreien Strecken elektrisch fahren kann, ist diese Trennung nicht mehr notwendig und in vielen Fällen auch nicht zielführend. Heutige Elektro- und Diesellinien können mithin neu kombiniert werden, um neue attraktive Verbindungen zu schaffen.

#### Chancen der Batterietechnologie

Für die zukünftige Gestaltung von Nahverkehrsnetzen lassen sich die Vorteile von batterieelektrischen Tribzügen nutzen, um neue Potentiale zu erschließen und SPNV-Angebote spürbar weiter zu verbessern.

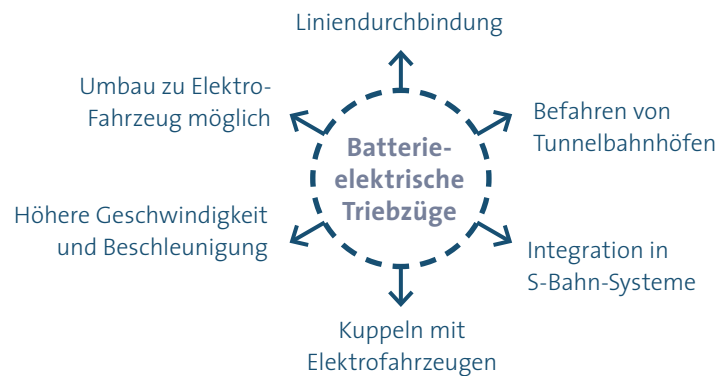


Abbildung 6: Potentiale des Bahnbetriebs mit kombinierten Oberleitungs- und batterieelektrischen Tribzügen



## Gruppierung der Linien und daraus resultierende Anforderungen

Derzeit mit Dieselfahrzeugen betriebene Linien lassen sich in drei Gruppen einteilen. Auf dieser Basis können verschiedene Empfehlungen für die Neugestaltung von Ausschreibungsnetzen abgeleitet werden.

Eigenschaften	Kurze (Stich-)Linien	Mittlere Länge	Langläufer
Typische Länge	< 40 km	40–100 km	> 100 km
Typische Lage im Netz	Abgehend von elektrifizierten Hauptlinien mit nichtelektrifiziertem Endbahnhof	Verbindung mittelgroßer Städte (häufig mit elektrifizierten Endbahnhöfen)	Anbindung an Oberzentren
Durchschnittlicher Anteil elektrifizierter Strecke	Sehr gering	16 %	Meist < 30 %
Anzahl Linien (ca.)	200	170	80

**Tabelle 2:** Einteilung der nichtelektrifizierten Linien<sup>11</sup>

Insbesondere die kurzen Linien der ersten Gruppe bieten sich unter der Voraussetzung, dass mindestens ein Endpunkt elektrifiziert ist, für einen Einsatz der Batterietechnologie ohne größere Infrastruktur-Anpassungen an. Oft gehen diese kurzen Linien von elektrifizierten Hauptbahnen ab. Sie können unter Einsatz eines batterieelektrischen Triebzuges leicht mit den dort verkehrenden Elektrolinien verknüpft werden. Auf elektrifizierten Strecken können batterieelektrische Triebzüge mit rein elektrischen Zügen gekuppelt werden (Flügelkonzepte). Alle Anforderungen der verschiedenen Anwendungsfälle im SPNV können durch batterieelektrische Triebzüge erfüllt werden.



<sup>11</sup> Technische Universität Berlin: Potentialanalyse für Batteriebetriebfahrzeuge im deutschen Schienennetz, unveröffentlicht.

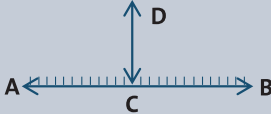


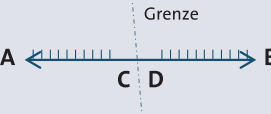
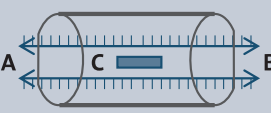
#	Anwendungsbereich	Schema	Vorteile
1	Nicht elektrifizierte Stichstrecke C-D		Umsteigefreie Verbindung der Stichstrecke nach A oder B ggf. mit Flügeln
2	Nicht elektrifizierte Verbindungsstrecke C-D		Kurze umsteigefreie Verbindung von A nach D ohne elektrifizierten Umweg
3	Nicht elektrifizierbare Tunnel (Elektrifizierung wirtschaftlich nicht darstellbar)		Wirtschaftliche Lösung ohne Elektrifizierung enger Altbautunnel, Vermeidung von Abgasen
4	Kleiner grenzüberschreitender Verkehr (A-D oder C-B) ohne Mehrsystemfahrzeuge		Vermeidung von spezifischen Mehrsystemfahrzeugen bzw. von Dieselmotoren
5	Tunnelbahnhöfe für Diesel-Fahrzeuge wegen Abgasemissionen nicht befahrbar		Vermeidung von Abgasemissionen im Tunnel

Tabelle 3: Einsatzszenarien im SPNV

Für längere Linien ist die Abfolge von elektrifizierten und nicht elektrifizierten Abschnitten entscheidend. Ideal ist ein stetiger Wechsel dieser Abschnitte, wobei erstere sowohl die Ausprägung eines elektrifizierten Streckenabschnittes als auch eines elektrifizierten Bahnhofs haben können. Auf diese Weise können Batteriefahrzeuge auf auch langlaufenden Linien eine – je im Einzelfall zu bewertende – Option bieten. Eine sinnvolle Einrichtung von Ladeinfrastruktur kann einen vollelektrischen Betrieb des SPNV ermöglichen, ohne das gesamte Schienennetz elektrifizieren zu müssen.

In manchen Bahnhöfen sind derzeit nicht alle Gleise elektrifiziert. Die Ausweitung der Oberleitung auf ein oder zwei zusätzliche Bahnsteiggleise würde einen zusätzlichen Zugang zur Oberleitung für batterieelektrische Triebzüge schaffen. Wichtig ist, dass von der errichteten Infrastruktur möglichst viele Linien profitieren. Eine Netzbetrachtung zur Ermittlung der optimalen Standorte unter Beachtung von Fahrplan und Wendezeiten ist hierfür unumgänglich.



#### 4. WIE WIRD DIE ENERGIEVERSORGUNG SICHERGESTELLT?

##### **Status quo der Infrastruktur**

Deutschland verfügt über ein dichtes Netz bereits elektrifizierter Eisenbahnstrecken; rund 60 % aller Netzkilometer sind elektrifiziert. Ausstehend sind noch ca. 18.000 km Streckenlänge, von denen der überwiegende Teil (ca. 15.000 km) auf eingleisige Strecken entfällt.

Versorgt wird das elektrifizierte Netz maßgeblich aus dem knapp 8.000 km langen zentralen 110-kV-Hochspannungsnetz der DB Energie, das mit 16,7-Hz-Bahnfrequenz betrieben wird. Die Bahnstromversorgung hat mit ca. 3.500 MW Erzeugerleistung ausreichend Leistungsreserve, um auch batterieelektrische Fahrzeuge im Stand und während der Fahrt unter Oberleitung aufladen zu können.

Das vorhandene Oberleitungsnetz bietet neben der notwendigen Infrastruktur einen technischen, regulatorischen und normativen Rahmen, den auch die modernen Elektrotriebwagen mit und ohne Energiespeicher bereits heute vollständig erfüllen.

##### **Schnittstelle zum Fahrzeug**

Deshalb ist es sinnvoll, auch die Nachladeinfrastruktur passend zum vorhandenen System auszulegen, also eine Schnittstelle aus Hochspannungsoberleitung (15 kV bzw. 25 kV Nennspannung) und Stromabnehmer zu nutzen. Heutige nur national eingesetzte Fahrzeuge sind für 15 kV Nennspannung und 16,7 Hz Nennfrequenz ausgelegt. Technisch ist ebenso einfach auch eine Schnittstelle mit der Frequenz des Landesnetzes von 50 Hz und ebenfalls 15 kV umsetzbar. Durch angepasste Fahrzeugtransformatoren ist ebenfalls die Nutzung eines Systems mit 25 kV Speisespannung und 50 Hz möglich, wie es in vielen umliegenden europäischen Ländern (Frankreich, Dänemark, Tschechien, weltweiter Hochgeschwindigkeitsverkehr) im Schienenverkehr üblich ist. Die am Markt verfügbaren batterieelektrischen Triebzüge sind auch für eine Nutzung von 25 kV Speisespannung und 50 Hz konzipiert.

Allen möglichen Kombinationen gemein sind maximale Ströme im Stillstand von bis zu 80 A pro Stromabnehmer bei Verwendung von Standardkomponenten nach dem heutigen Stand der Technik. Dies entspricht einer maximalen Ladeleistung von bis zu 1,2 MW bei 15 kV und bis zu 2 MW bei 25 kV. Bestimmend für die abrufbare Ladeleistung ist die maximal mögliche Leistung der Ladestation. Diese ist wiederum abhängig von den lokalen Gegebenheiten des vorgelagerten Landesnetzes. Zukünftig sind durch Optimierungen bei Fahrzeug oder Infrastruktur angepasste Ladeleistungen möglich. Dabei wird die Infrastruktur nach den Bedürfnissen des Betriebsprogramms ausgelegt und kann entsprechend geplant und gebaut werden.

Infrastrukturanlagen haben im Allgemeinen eine deutlich längere Nutzungsdauer als Fahrzeuge. Deshalb sollte die Errichtung von Infrastruktur entkoppelt von der Fahrzeugbeschaffung durch die jeweiligen regionalen Aufgabenträger veranlasst werden.

### **Technische Umsetzung der Nachladeinfrastruktur**

Grundsätzlich können zwei Varianten unterschieden werden, die beide auf der beschriebenen Schnittstelle zwischen Oberleitung und Stromabnehmer basieren:

#### **1. Nachladeabschnitt** (Laden während der Fahrt möglich):

- entspricht einer klassischen Oberleitung, dadurch bei Bedarf jederzeit regelwerkskonform umsetzbar
- muss auch Traktionsströme für den fahrenden Zug bereitstellen können
- wird dann benötigt, wenn die Standzeit während eines Halts für eine Nachladung nicht ausreicht bzw. eine Ausdehnung der Aufenthaltszeiten in Bahnhöfen zu Anschlussverlusten oder erheblichem Fahrzeugmehrbedarf führen würde
- bildet jeweils ein Oberleitungs-Inselnetz ohne Verbindung zum restlichen elektrischen Eisenbahnnetz

#### **2. Nachladepunkt als Stromtankstelle** (Laden nur im Stillstand möglich):

- kann mit Komponenten der bekannten Oberleitung gebaut werden, jedoch ohne aufwendige Sicherstellung für eine Befahrbarkeit mit gehobenem Stromabnehmer
- ist kostengünstiger, da die räumliche Ausdehnung geringer ist und er nicht für Durchfahrten mit gehobenen Stromabnehmern geeignet sein muss

Für das Laden bzw. Temperieren der Traktionsbatterien in Werkstattbereichen oder über Nacht gibt es im Bahnsektor bereits genormte Schnittstellen für das Vorheizen oder Klimatisieren von Zügen im abgestellten Zustand (sogenannte Zugvorheizanlagen). Diese Lösungen sind übertragbar und können über Stecker an das Fahrzeug angebunden werden. Eine Nutzung während des normalen Fahrzeugbetriebes ist jedoch nicht wirtschaftlich, weil über Steckverbindungen nur geringe Leistungen übertragen werden können und somit die Nachladezeit derart verlängert würde, dass die heutigen Fahrpläne und Haltezeiten nicht mehr eingehalten werden können. Zudem ist ein Laden über Kabel, wie von Elektroautos bekannt, im täglichen Betrieb mit Haltezeiten von wenigen Minuten nicht praktikabel.



## Anbindung der Nachladeinfrastruktur an das Landesnetz

Beiden Varianten gemein ist der Anschluss an die örtlichen Drehstrommittelspannungsnetze (10 kV bis 30 kV), sofern dort die benötigte Leistungsfähigkeit gegeben ist. Falls erforderlich könnte auch eine Anbindung an Hochspannungsnetze bis 110 kV erfolgen. Die Anbindung kann dabei mit folgenden Möglichkeiten realisiert werden, wobei mit aufsteigender Reihenfolge die Komplexität des Systems zunimmt:

- **Übertragung** mit 50 Hz über einen einfachen **Einphasen-Transformator**. Dieser bringt Schiefasten in das Drehstromnetz ein und kann deshalb nur bis zu jeweils örtlich unterschiedlichen Leistungen verwendet werden, die der lokale Netzbetreiber vorgibt.
- **Übertragung** mit 50 Hz mit Netzanschluss über einen **Umrichter**, der Schiefasten ausgleicht und dadurch auch für eine höhere Leistungsentnahme geeignet ist.
- **Frequenzwandlung** über **Umrichter** auf 16,7 Hz, sodass wieder die in Deutschland verwendete Frequenz und Spannung des klassischen Oberleitungsnetzes bereitgestellt wird.

Welches System genutzt werden kann, ist anwendungsbezogen zu prüfen. Die Auswahl muss in Abhängigkeit vom Betriebsprogramm, den Abhängigkeiten der Rückstromführung und der bereitstellbaren Leistung erfolgen. Abbildung 7 visualisiert mögliche Umsetzungsvarianten (Oberleitungsinseln stehen hierbei für Nachladeabschnitte oder Nachladepunkte):



Abbildung 7: Darstellung der möglichen Umsetzungsvarianten von Nachladeabschnitten bzw. Nachladepunkten. Von den oben genannten drei Varianten sind in dieser Grafik nur die erste und dritte dargestellt.<sup>12</sup>

## Rückstromführung

Wie im Oberleitungsbetrieb und für Zugvorheizanlagen üblich, wird der Ladestromkreis durch die Rückstromführung über das vorhandene Gleis als Rückleiter geschlossen. Dies ist regelwerkskonform, kann aber grundsätzlich zu technisch notwendigen Änderungen an Signalanlagen und der sonstigen Leit- und Sicherungstechnik führen. Die Rückwirkungsfreiheit auf diese Systeme muss im Einzelfall geprüft und gegebenenfalls müssen Anpassungen vorgenommen werden.

<sup>12</sup> Nach DB Energie GmbH, DB Netz AG: Zero-Emission-Antriebe im Schienenverkehr – Infrastrukturlösungen von DB Energie und DB Netz (07.11.2018), S. 3.

## 5. BENÖTIGEN WIR EINEN ERWEITERTEN REGELUNGSRAHMEN?

Elektromobilität auf der Schiene nutzt fahrzeug- und infrastrukturseitig bewährte Technik und es bedarf aufgrund der bestehenden Regelungen keiner weitreichenden Neuerungen. Lediglich das Planen, Bauen und Betreiben der Nachladeinfrastruktur bedürfen weiterer Konkretisierungen und entsprechender Mittelzuweisung.

Es ist breiter Konsens, dass der Bund Eisenbahninfrastrukturunternehmen (Eisenbahnen des Bundes) in die Lage versetzen muss, die notwendige Ladeinfrastruktur in Abstimmung mit den Aufgabenträgern als Besteller der Verkehrsleistung – zeitgerecht und zur Fahrzeugtechnologie passend – zur Verfügung zu stellen. Ein solcher Abstimmungsbedarf ist aufgrund der langlaufenden Verkehrsverträge rechtzeitig absehbar. Der Bedarf der jeweils notwendigen Ladeinfrastruktur kann schon heute je Linie ermittelt werden. So ist ein Optimum zwischen infrastruktur- und fahrzeugseitigen Investitionen erreichbar.

Auch der Betrieb der Nachladeinfrastruktur inklusive der Abrechnung der Stromkosten mit den Eisenbahnverkehrsunternehmen ist schon geregelt. Ein Preismodell für die Nachladung batterieelektrischer Triebzüge könnte sich entweder an dem Verursacherprinzip orientieren, d. h., die zusätzlichen Kosten der Nachladeinfrastruktur würden in Abstimmung mit der Bundesnetzagentur als Stationsaufenthalt und die Bahnstromkosten somit variabel abgerechnet. Als Alternative zu diesem Preismodell könnten DB Netz und DB Energie die zusätzlichen Kosten in das bisherige Preismodell mit aufnehmen. Die Ermittlung des Stromverbrauches durch Nachladung der Batterien ist mit den bisher installierten Energiemesseinrichtungen auf den Zügen ohne Anpassung nutzbar. Die planrechtliche Genehmigung für den Bau und die entsprechende Zulassung der Nachladestationen bleibt ebenso unangetastet, sodass sowohl die Einhaltung der hohen technischen als auch der Sicherheits- und Verfügbarkeitsanforderungen gegeben ist.



Ein wesentlicher Vorteil innovativer batterieelektrischer Triebzüge ist also, dass sie grundsätzlich innerhalb des bereits bestehenden Regelungsrahmens betrieben werden können. Damit sind sie im Betrieb unter Fahrdrabt konventionellen elektrischen Zügen gleichgestellt.

Dabei ist durch den Gesetzgeber sicherzustellen, dass die Vergünstigung für Schienenbahnen bezüglich der EEG-Umlage unabhängig von der Bezugsquelle und auch der Speicherung der Energie gilt.<sup>13</sup> Bei batterieelektrischen Triebzügen sollten die Nachladepunkte dem klassischen Fahrleitungsnetz zugerechnet werden.



<sup>13</sup> Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Merkblatt für Schienenbahnen zu den gesetzlichen Regelungen nach §§ 63 ff. Erneuerbare-Energien-Gesetz 2017 (Stand 19.03.2018).

## 6. WELCHE BETREIBERMODELLE GIBT ES FÜR DEN EINSATZ INNOVATIVER BATTERIEELEKTRISCHER TRIEBZÜGE?

### Betreibermodelle für Fahrzeuge

Für die Vergabe der Leistungen von batterieelektrischen Triebzügen kommen unter den vorgenannten Bedingungen alle bisher etablierten Vergabemodelle in Betracht. Es bedarf hierbei keiner Neuerung in dem aktuellen Set-up, wie in Abbildung 8 dargestellt ist.

	Aufgabenträger	EVU	Hersteller
<b>Klassisches EVU-Modell</b>	Bestellt EVU-Leistung	Kauft Fahrzeuge und erbringt Instandhaltung	Liefert Fahrzeuge und Ersatzteile
<b>Leasing</b>	Bestellt EVU-Leistung	Sucht Leasing-Partner und erbringt Instandhaltung	Liefert Fahrzeuge und Ersatzteile
<b>BW-Modell</b>	Kauft Fahrzeuge von gewinnendem EVU, Rückverpachtung	Kauft Fahrzeuge nach Vorgaben des AT und erbringt Instandhaltung	Liefert Fzg. und Ersatzteile, ggf. Mitwirkung Instandhaltung
<b>Aufgabenträgerpool</b>	Kauft Fahrzeuge und Instandhaltung von Hersteller/Service	Fährt mit Fahrzeugen	Liefert Fahrzeuge und erbringt (in Koop.) Instandhaltung
<b>Lebenszyklus-Modell</b>	Kauft Fahrzeuge und Instandhaltung von Hersteller	Fährt mit Fahrzeugen	Liefert Fahrzeuge und erbringt Instandhaltung

Abbildung 8: Zusammenfassende Übersicht der aktuell existierenden Vergabemodelle

Die Vergabe von SPNV-Leistungen mit batterieelektrischen Triebzügen sowie die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur können im Rahmen dieser Vergabemodelle stattfinden.

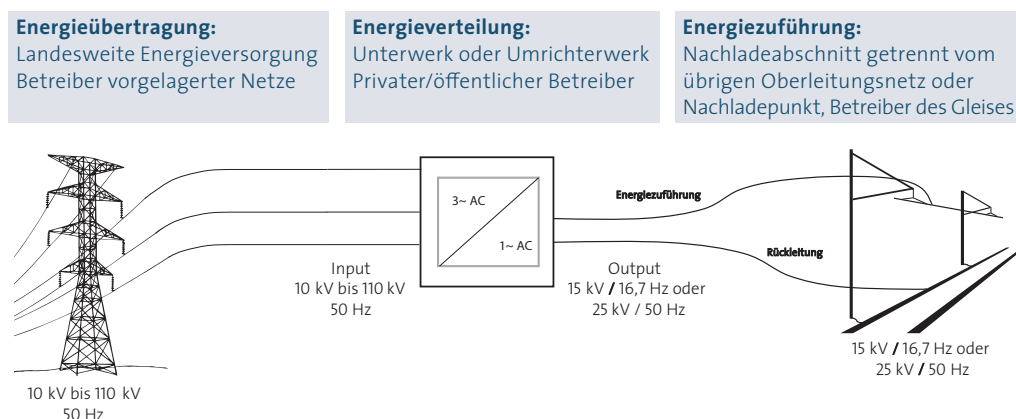




## Betreibermodell für Infrastruktur

Die Infrastruktur in Form von Nachladeabschnitten oder Nachladepunkten ähnelt in vielen Komponenten der einer klassischen Oberleitungsanlage. Für diese gibt es bereits ein bewährtes und zuverlässiges Betreibermodell.

Grundlage hierfür ist das Allgemeine Eisenbahngesetz (AEG). Dieses regelt, dass „der Betreiber der Schienenwege [...] auch den Betrieb der zugehörigen [...] Anlagen zur streckenbezogenen Versorgung mit Fahrstrom zum Gegenstand seines Unternehmens machen muss“<sup>14</sup>. Daraus ergibt sich, dass die Energiezuführung (s. Abbildung 10) mittels Oberleitung dem Bestands-Eisenbahninfrastrukturbetreiber (auf bundeseigenen Strecken z. B. DB Netz) betrieblich zugehörig sein muss. Diese Vorgabe gilt nicht für die Energieverteilung und die Energieübertragung (s. Abbildung 10), die in Deutschland durch andere Unternehmen erbracht werden. Die Schnittstellen zwischen Betreibern der Energieübertragung, Energieverteilung und Energiezuführung (Oberleitungsnetz) sind definiert und vorhanden. Woher letztendlich der Strom für jede einzelne Ladestation kommt, ist somit variabel und fallabhängig anpassbar. Dank der vorhandenen Schnittstellen kann die Energie somit von jedem beliebigen Marktteilnehmer bereitgestellt werden. Dieser zahlt Entgelte für die Nutzung der Infrastrukturanlagen.



**Abbildung 9:** Energiezuführung für Nachladeabschnitte bzw. Nachladepunkte. Das Modell funktioniert nahezu analog zu den aktuellen Betreibermodellen für Oberleitungsanlagen.<sup>15</sup>

<sup>14</sup> § 4 Abs. 7 Allgemeines Eisenbahngesetz.

<sup>15</sup> Expertenkreis Ladeinfrastruktur.

Folgerichtig sollte diese zuverlässige und in den jeweiligen Zuständigkeiten sowie Verantwortlichkeiten definierte Anordnung der Schnittstellen auch für den Betrieb von Nachladeinfrastruktur übernommen werden. Dieses Betreibermodell ist auch für Strecken anwendbar, die nicht zu den bundeseigenen Eisenbahnen gehören. Welche Komponenten einer Ladestation folglich zu welchem Betreiber gehören, ist schematisch in Abbildung 11 dargestellt.




<b>Energieübertragung:</b> Landesweite Energieversorgung	<b>Energieverteilung:</b> Unterwerk oder Umrichterwerk	<b>Energiezuführung:</b> Oberleitung
		
<p><b>Verantwortlich:</b> Betreiber vorgelagerter Netze (Frequenz von 50 Hz oder 16,7 Hz)</p> <p><b>Aufgabe:</b> Übertragung der Energie vom Kraftwerk zur Energieverteilung</p> <p><b>Besteht aus:</b> Freileitung oder Erdkabel</p>	<p><b>Verantwortlich:</b> i. d. R. DB Energie / andere möglich</p> <p><b>Aufgabe:</b> Umwandlung der Spannung und ggf. Frequenz zur Versorgung der Oberleitung</p> <p><b>Besteht aus:</b> Schaltanlagen, Transformator und ggf. Umrichter</p>	<p><b>Verantwortlich:</b> Betreiber des Gleises (Eisenbahn-Infrastrukturunternehmen)</p> <p><b>Aufgabe:</b> Zuführung der Energie zum Fahrzeug (über Kontakt mit dem Stromabnehmer)</p> <p><b>Besteht aus:</b> Oberleitungsanlage</p>

Abbildung 10: Betreiberverhältnisse klassischer Oberleitungsanlagen<sup>16</sup>

<b>Energieübertragung:</b> Landesweite Energieversorgung	<b>Energieverteilung:</b> Aktive Komponenten einer Nachladestation	<b>Energiezuführung:</b> Nachladestation bzw. Nachladepunkt
		
<p><b>Verantwortlich:</b> Betreiber vorgelagerter Netze (Frequenz von 50 Hz oder 16,7 Hz)</p> <p><b>Aufgabe:</b> Übertragung der Energie vom Kraftwerk zur Ladestation</p> <p><b>Besteht aus:</b> Freileitung oder Erdkabel</p>	<p><b>Verantwortlich:</b> privater/öffentlicher Betreiber</p> <p><b>Aufgabe:</b> Umwandlung der Spannung und ggf. Frequenz zur Versorgung der Ladestation</p> <p><b>Besteht aus:</b> Schaltanlagen, Transformator und ggf. Umrichter</p>	<p><b>Verantwortlich:</b> Betreiber des Gleises (Eisenbahn-Infrastrukturunternehmen)</p> <p><b>Aufgabe:</b> Zuführung der Energie zum Fahrzeug</p> <p><b>Besteht aus:</b> Oberleitung oder ähnlichen Anlagen</p>

Abbildung 11: Betreiberverhältnisse von Nachladeinfrastruktur nach erprobtem Modell<sup>17</sup>

<sup>16</sup> Expertenkreis Ladeinfrastruktur.

<sup>17</sup> Expertenkreis Ladeinfrastruktur.

## **7. IST DIE KOMBINIERTE OBERLEITUNGS- UND BATTERIETECHNOLOGIE WIRTSCHAFTLICH UND WETTBEWERBSFÄHIG?**

Klimaschutz braucht alternative Antriebskonzepte. Zugleich ist für den Markthochlauf hoch innovativer Technologien eine gezielte Aktivierung erforderlich. Studien zeigen, dass die kombinierte Oberleitungs- und Batterietechnologie dann wirtschaftlich und somit wettbewerbsfähig ist.

Die Wirtschaftlichkeit eines Systems ist maßgeblich von den über den gesamten Lebenszyklus von der Herstellung bis zur Entsorgung anfallenden Kosten bestimmt, den sogenannten Lebenszykluskosten. Dies gilt insbesondere für langlebige Güter wie Energieversorgungsinfrastruktur und Schienenfahrzeuge.

### **Methodik einer volkswirtschaftlichen Bewertung**

Besonders der volkswirtschaftliche Nutzen ist vergleichend für verschiedene mögliche Arten der Energieversorgung des elektrischen Fahrzeugantriebs zu bewerten.

Der volkswirtschaftliche Nutzen ist – weil in die Eisenbahninfrastruktur staatlich investiert und Regionalverkehr aus den Regionalisierungsmitteln des Bundes finanziert wird – in besonderem Maße bedeutend. Investitionen für das elektrische Fahren erfolgen sowohl in die Infrastruktur als auch indirekt in die Fahrzeuge aus Steuermitteln. Die Gesamtwirtschaftlichkeit eines Systems misst sich also an den Gesamtkosten für beide Teile des Systems.

Für die Bewertung können fünf grundlegende wirtschaftliche Indikatoren herangezogen werden, die über den Lebenszyklus in zeitdiskreten und kontinuierlichen finanziellen Aufwendungen zu bemessen sind. Diese sind:

- Investition in Fahrzeuge
- Betriebskosten der Fahrzeuge (Energiekosten für Traktion und Hilfsbetriebe, Instandhaltung, zusätzlich Fahrten zur Tank- bzw. Nachladeinfrastruktur)
- Investition in Infrastruktur (Tankstellen, Nachladeinfrastruktur, Oberleitung, Grundstücke, Netzanschlussgebühren an Energieversorger und ggf. Bahnnetzbetreiber)
- Betriebskosten der Infrastruktur (Instandhaltung, Netzentgelte)
- Reinvestitionen in die Betriebsmittel (Speicherkomponenten wie Batterien, Wiederbeschaffung von Fahrzeugen, Wiederbeschaffung von Infrastruktur)

Solch eine Bewertung muss immer anhand des Betriebsprogramms der Strecke, des Fahrzeugeinsatzes und des vorhandenen Elektrifizierungsgrades konkret untersucht werden.

Zur Analyse muss ein repräsentativer Betrachtungszeitraum festgelegt werden. Die Lebensdauer einer Oberleitung ist mit 70 bis 75 Jahren ungefähr doppelt so lang wie die Lebensdauer eines elektrischen Schienenfahrzeuges. Werden kürzere Betrachtungszeiträume als die zugrunde gelegten Abschreibungsdauern (üblicherweise bei Oberleitung 50 Jahre, bei Triebwagen 20 Jahre) gewählt, so müssen für eine volkswirtschaftliche Betrachtung geeignete Restwerte für die Oberleitung beziehungsweise die Fahrzeuge angesetzt werden, um einen realistischen und gleichwertigen Technologievergleich zu ermöglichen.

### **Studie zeigt volkswirtschaftlichen Nutzen**

Im Auftrag der Bayerischen Eisenbahngesellschaft wurde zum volkswirtschaftlichen Nutzen eine Studie durch die Technische Universität Dresden erstellt.<sup>18</sup> Demnach ist insbesondere bei vorhandenen Teilelektrifizierungen und mittlerem Verkehrsaufkommen eine hohe Wirtschaftlichkeit von batterieelektrischen Triebzügen gegeben. Diese Rahmenbedingungen sind typisch für viele deutsche Regionalverkehre. Die geringsten Kosten kommen laut der Studie überwiegend dann zum Tragen, wenn mindestens ein Stundentakt vorliegt und wenn bestehende Oberleitungsanlagen häufiger genutzt werden. Im Rahmen der Studie werden die Lebensdauer-Gesamtkosten inklusive des Infrastruktur(mehr)bedarfs batterieelektrischer Fahrzeuge bewertet.

Als besonders wirtschaftlich haben sich gemäß der Untersuchung auch partielle Verlängerungen bestehender Streckenelektrifizierungen erwiesen. Diese Verlängerungen können überwiegend ohne die bei Nachladeabschnitten zusätzlich notwendigen Aufwendungen für die Energieversorgung aus dem Landesnetz umgesetzt werden, da eine Mitversorgung durch die bestehenden Oberleitungsanlagen erfolgen kann.

---

<sup>18</sup> Müller, André: Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV (03.11.2017).



## Betriebswirtschaftliche Bewertung

Neben dem volkswirtschaftlichen Nutzen sind gemäß Studien in vielen Fällen auch betriebswirtschaftliche Vorteile im Vergleich zum Dieserverkehr erkennbar. Die Studie zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung, erstellt durch die TU Berlin und die TU Dresden sowie die PTV AG, ergab bei einem Vergleich der Fahrzeuglebenszykluskosten (ohne Infrastruktur) bei entsprechenden Rahmenbedingungen deutliche Vorteile für Betreiber und Aufgabenträger.<sup>19</sup>

### Vergleich der Lebenszykluskosten

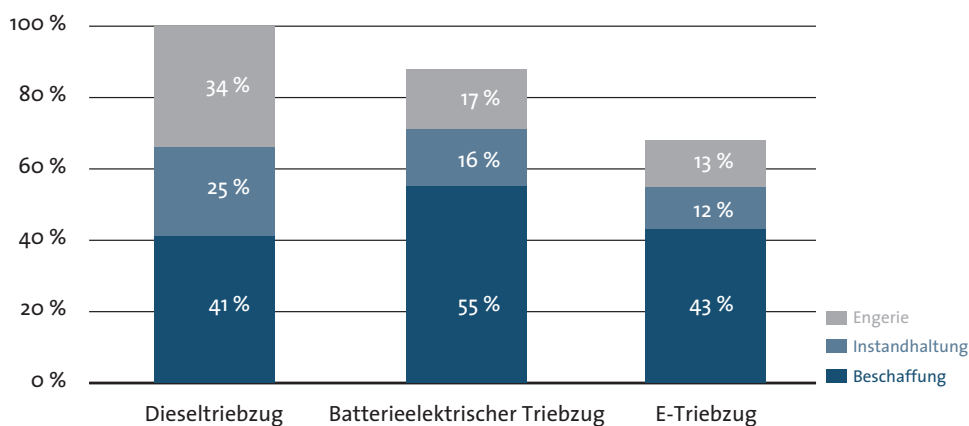


Abbildung 12: Vergleich der Lebenszykluskosten der Fahrzeugtechnologien<sup>20</sup>

Besonders vorteilhaft bei batterieelektrischen Fahrzeugen sind, wie in Abbildung 12 dargestellt, die geringen Kosten der aus dem zentralen Fahrleitungsnetz bezogenen Energie. Diese weisen zusammen mit den hohen Wirkungsgraden elektrischer Bahnfahrzeuge große Einsparpotentiale auf. In Kombination mit verringerten Instandhaltungskosten werden die höheren Erstinvestitionskosten in die Fahrzeuge mit kombiniertem Oberleitungs- und batterieelektrischem Antrieb mehr als kompensiert. Die Kosten für einen Akkutausch sind hier (analog zum Tausch des Powerpacks bei Dieseltriebzügen) den Instandhaltungskosten zugeordnet und in der Berechnung enthalten. Dadurch fallen die Instandhaltungskosten gegenüber rein elektrischen Triebzügen höher aus. Die MKS-Studie sowie die Lebenszykluskostenvergleich-Studien zeigen, dass der batterieelektrische Betrieb sowohl aus volks- als auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht bereits heute gegenüber dem Dieserverkehr vorteilhaft sein kann.

<sup>19</sup> Hecht, Markus; Stephan, Arnd; Walther, Christoph:  
Klimapolitisches Potenzial elektrischer Schienenstrecken in Deutschland (08.10.2018).

<sup>20</sup> Expertenkreis Ladeinfrastruktur.

### **Wartung und Lebenszykluskosten**

Die Wartung von batterieelektrischen Triebzügen ist einfacher und kostengünstiger. Aktuelle Batterietechnologien erlauben größere Laufleistungen zwischen den Werkstattaufenthalten, wobei die Werkstattinfrastruktur für elektrische und batterieelektrische Triebzüge nahezu identisch ist. Daher kann die bereits weit verbreitete Werkstattinfrastruktur für rein elektrische Triebzüge genutzt werden. Diese Vorgehensweise reduziert die laufenden Kosten der Werkstattinfrastruktur.



## 8. FAZIT

Gemäß dem Wunsch der Politik soll der Anteil der Elektrifizierung von heute knapp 60 % auf 70 %<sup>21</sup> gesteigert werden. Dieses Ziel ist allerdings nicht hoch genug gesteckt, um im SPNV rein elektrisch zu fahren, da in diesem Szenario nach wie vor viele Strecken nicht elektrifiziert wären und ein wesentlicher Teil der Zugkilometer mit dieselbetriebenen Zügen erbracht werden würde.

Eine vollständige Elektrifizierung des deutschen Eisenbahnstreckennetzes ist weder volks- noch betriebswirtschaftlich tragfähig. Batterieelektrische Triebzüge ermöglichen durch Nachladung über bestehende Oberleitung und Teilelektrifizierung einen kostenoptimierten und technisch realisierbaren Ansatz. Ein solches Konzept beruht auf drei wesentlichen Säulen:

- Nutzung der bestehenden Oberleitungsinfrastruktur zum Nachladen von batterieelektrischen Triebzügen im Stand und während der Fahrt ohne jegliche technische oder betriebliche Anpassung
- Erweiterung der bestehenden Oberleitungsinfrastruktur:
  - Verlängerung einer bestehenden Oberleitung
  - Aufbau einer Inseloberleitung auf einer Länge von mehreren Kilometern,
  - Aufbau punktueller Ladestationen ausschließlich für die Nachladung im Stand, z. B. an Endbahnhöfen
- Einsatz von batterieelektrischen Triebzügen auf nicht und teilweise elektrifizierten Strecken mit Nachladung über die oben beschriebene Infrastruktur

Die unterschiedlichen Varianten der Nachladung sind in Abbildung 13 dargestellt. Die finanziellen und planerischen Vorteile einer klugen Teilelektrifizierung der Strecken für den SPNV im Vergleich zu einer kostenintensiveren Voll-Elektrifizierung aller Strecken sind offensichtlich.



**Abbildung 13:** Beispielhafte Darstellung der Teilelektrifizierung mit der Verlängerung bestehender Oberleitung (links), Oberleitungsinsel (Mitte) und der punktuellen Ladestation am Endpunkt (rechts).<sup>22</sup>

Die Markteinführung batterieelektrischer Triebzüge und die Nutzung von Oberleitung und Nachladeinfrastruktur stellt sich als eine attraktive Möglichkeit dar, einen nachhaltigen und umweltfreundlichen Verkehr auf bisherigen Diesellinien zu realisieren. Dem Wunsch von Fahrgästen, Anwohnern, Betreibern und Politik nach einem weitgehend emissionsfreien SPNV wäre somit nachgekommen und eine Umsetzung wäre in kurzer Zeit realisierbar.

<sup>21</sup> Verkehrsministerkonferenz: Beschluss-Sammlung der Verkehrsministerkonferenz am 19./20. April 2018 in Nürnberg (26.04.2018).

<sup>22</sup> Strategiekreis Ladeinfrastruktur.



Neben den positiven ökologischen Effekten ergeben sich auch ökonomische Vorteile für den Besteller und somit auch für die Steuerzahler und Fahrgäste. Sowohl der Betrieb als auch die Wartung batterieelektrischer Triebzüge ist wirtschaftlich darstellbar. Hinzu kommt, dass die Bahnindustrie in Deutschland bei einer konsequenten Umsetzung des Konzeptes batterieelektrischer Triebzüge mit Nachladung die Technologieführerschaft nicht nur ausbauen, sondern auch als Ausstatter für den Weltmarkt exportieren kann.

Wo heute oftmals Dieselfahrzeuge auf bereits elektrifizierten Strecken fahren, kann mit Nutzung der Batterietechnologie in Zukunft voll und durchgängig elektrisch gefahren werden. Ein Attraktivitätsgewinn ergibt sich unter anderem dadurch, dass nunmehr neue und dadurch umsteigefreie Linienverbindungen möglich werden. Letztere können wiederum zu einer gesteigerten Nachfrage im SPNV und somit zu einer Erhöhung des ÖPNV-Anteils im Modal Split beitragen.

Entsprechende hoch innovative Fahrzeugkonzepte werden bereits heute durch die Bahnindustrie angeboten. Dazu werden elektrische Züge mit Traktionsbatterien ausgestattet. Die Nachladung erfolgt über den vorhandenen Stromabnehmer an der Oberleitung, die bereits heute für die entsprechenden Ströme und Leistungen ausgelegt ist.

Wie oben beschrieben, zeigen aktuelle Optimierungsmodelle, dass von den aktuell 450 Diesellinien mit der bereits heute verfügbaren Batterietechnologie und nur 120–150 Infrastrukturmaßnahmen zur Nachladung mindestens 80 % der Linien emissionsfrei gefahren werden können.

Die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems „batterieelektrischer Triebzug“ ist eindeutig gegeben. Mit dem gezielten Aufbau von Linien mit batterieelektrischen Triebzügen kann der SPNV die Vorreiterrolle bei der Elektromobilität weiter ausbauen und mittelfristig sogar als erster Verkehrsträger komplett emissionsfrei fahren.

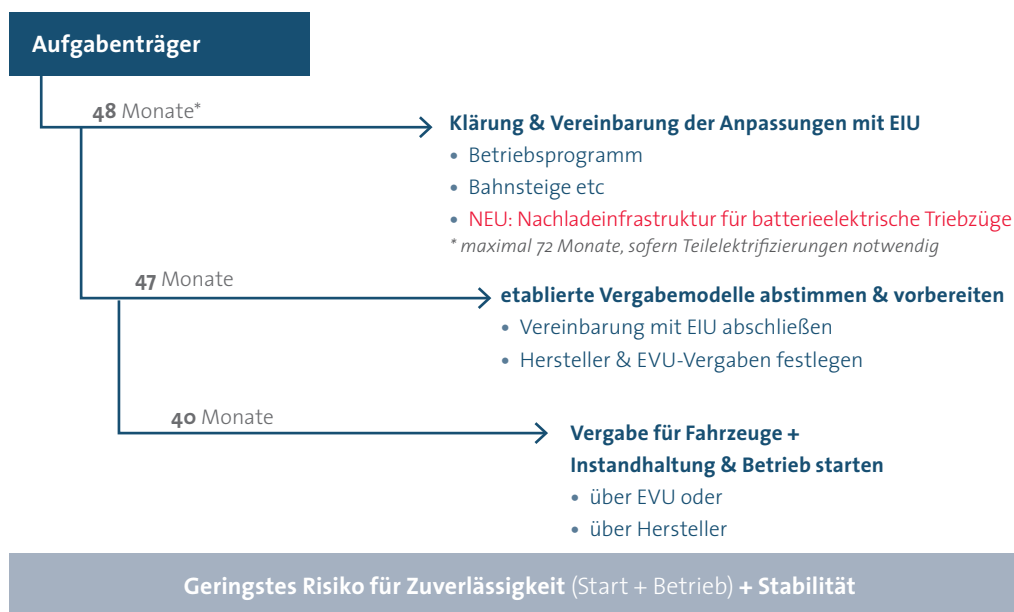
## 9. WAS IST JETZT ZU TUN FÜR DEN MARKTHOCHLAUF EMISSIONSFREIER BATTERIEELEKTRISCHER ZÜGE?

Zahlreiche Linien im Regionalverkehr können ohne zusätzliche Infrastruktur batterieelektrisch betrieben werden. Für viele weitere Linien gilt: Mit adäquaten Investitionsmitteln, den richtigen raschen Verfahren und angemessenem zeitlichem Vorlauf stellt die Planung und Errichtung der Ladeinfrastruktur kein Hindernis dar. Wie bei anderen Infrastrukturmaßnahmen können die dafür etablierten Institutionen mit Unterstützung und Beteiligung der Bahnindustrie die rechtzeitige Planung und Umsetzung gewährleisten.

### Elektrifizierungsstrategie (FV & NV) über den BVWP hinaus

→ Verkehrsleistung steigern

→ Wunsch nach einem emissionsfreien Betrieb (auch ohne Fahrdrat)



**Abbildung 14:** Vorschlag des zeitlichen Ablaufs mit batterieelektrischen Triebzügen und Ladeinfrastruktur im Rahmen von SPNV Ausschreibungen.

Eine geeignete Ausgestaltung der Förderinstrumente für Nachladeinfrastruktur – auch gemäß den Entscheidungen der Verkehrsministerkonferenzen – unterstützt die kurz- und mittelfristige Einführung batterieelektrischer Triebzüge. Die Bahnindustrie wünscht sich die Beibehaltung bewährter Rollen, um die notwendige Nachladeinfrastruktur kurzfristig zu planen, zu bauen und zu betreiben. Dies bedeutet eine getrennte Ausschreibung für Infrastruktur durch die Infrastrukturverantwortlichen und der Fahrzeuge durch den Aufgabenträger oder das Eisenbahnverkehrsunternehmen. Die Ausstattung mit zweckgebundenen finanziellen Mitteln ist ein wesentlicher Schlüssel zum Erfolg.

Der Koalitionsvertrag 2018 (Randnummer 3566) sieht eine „Förderinitiative“ für die Elektrifizierung regionaler Schienenstrecken vor.<sup>23</sup> Infolgedessen wäre ein separater Fördertopf, mit dem ca. 120 bis 150 Infrastrukturmaßnahmen über einen Zeitraum von circa zehn Jahren gefördert würden, zweckdienlich. Darüber hinaus sollte ein Gremium gebildet werden, das über die Priorisierung und Verteilung der Mittel entscheidet. Dieses könnte sich zeitlich am Auslaufen der Verkehrsverträge und der Neuvergabe von Verkehrsleistungen orientieren.

<sup>23</sup> CDU/CSU; SPD: Ein neuer Aufbruch für Europa. Eine neue Dynamik für Deutschland. Ein neuer Zusammenhalt für unser Land. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 19. Legislaturperiode (12.03.2018).

Um den Migrationsprozess zu unterstützen, müssen zusätzlich Fördermöglichkeiten eingerichtet werden, um ein Anreizmodell für die Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge zu schaffen. Bahnbrechende Innovationen können auch weiterhin nur durch exzellente Forschung und Entwicklung realisiert werden.

### Was braucht Deutschland für die Einführung von batterieelektrischen Fahrzeugen?

	<b>Status</b>
Politische Bereitschaft/Bewusstsein/Sichtbarkeit	✓
Machbarkeitsstudien	✓
Erprobung der Technik	läuft
Festlegung standardisierter Infrastruktur	läuft
Fahrzeuflösungen verschiedener Hersteller	✓
Ausschreibungen emissionsfreier Verkehre	läuft
Festlegung der Infrastrukturzuständigkeiten (Planung, Bau und Betrieb)	offen
Förderung von Fahrzeugen und Infrastruktur	offen

## HERAUSFORDERUNG LADEINFRASTRUKTUR – EIN ANWENDUNGSBEISPIEL:

# Laden von Batteriezügen mit 50 Hz

*Felix Dschung, Bern (CH)*

Oberleitungsinseln und Ladestationen sind meist auf eine Speisung aus dem 50-Hz-Landesnetz angewiesen. Eine direkte Speisung der Züge über Transformatoren ohne dazwischengeschaltete Umrichter ist lukrativ, sofern die Unsymmetrien im Dreiphasennetz beherrscht und die Züge für die Frequenz von 50 Hz ausgelegt werden. Auch das sonst unübliche System von 15 kV 50 Hz erscheint attraktiv.

### Charging battery trains at 50 Hz

Isolated sections of contact lines and charging stations are usually dependent on a supply from the 50 Hz national grid. A direct supply of the trains via transformers without intermediate converters is lucrative, as long as the asymmetries in the three-phase network are controlled and the trains are designed for the frequency of 50 Hz. The otherwise unusual system of 15 kV 50 Hz also appears attractive.

### Charger les batteries des trains sous 50 Hz

Les lignes électrifiées en îlot et les stations de recharge dépendent généralement d'une alimentation à partir du réseau national à 50 Hz. Une alimentation directe des trains via des transformateurs sans convertisseurs intermédiaires est rentable, à condition que les asymétries du réseau triphasé soient contrôlées et que les trains soient conçus pour la fréquence de 50 Hz. Le système de 15 kV 50 Hz, par ailleurs inhabituel, semble également attrayant.

## 1 Ausgangslage

### 1.1 Allgemein

Fahrzeuge, welche für den Betrieb abseits elektrifizierter Strecken mit einer Traktionsbatterie ausgestattet sind, sind auf das Vorhandensein einer Nachladeinfrastruktur angewiesen. Wenn sich solche Fahrzeuge auf einem bereits elektrifizierten Streckenabschnitt befinden, verhalten sie sich wie gewöhnliche elektrische Triebfahrzeuge und können zusätzlich die Fahrleitung zur Aufladung der fahrzeugeitigen Energiespeicher nutzen. Fährt der Batteriezug sodann aus dem elektrifizierten Abschnitt hinaus, „zehrt“ er für sein weiteres Vorankommen aus seinem Energiespeicher. Bei der Umlaufplanung muss nun darauf geachtet werden, dass der in der Batterie gespeicherte Energieinhalt auf jeden Fall ausreichend ist, um wieder in einen elektrifizierten Abschnitt zu gelangen.

Dies bedeutet im Fall einer nicht elektrifizierten Stichstrecke ins Hinterland, welche von einer elektrifizierten Hauptstrecke abzweigt, dass das Fahrzeug über eine Reichweite verfügen muss, die sowohl die Hin- als auch die Rückfahrt abdeckt. Eine Reichweite eines Batteriezugs von 50 km erlaubt folglich lediglich das Befahren einer solchen Stichstrecke von 25 km Länge unter Annahme einer ebenen Streckentopografie. Liegt der letzte Bahnhof der Stichstrecke jenseits der halben Reichweite des Fahrzeugs, muss

entweder die Batteriekapazität auf dem Fahrzeug erhöht werden, was jedoch zu einer Erhöhung der Fahrzeugmasse führt, oder die Stichstrecke ist teilweise zu elektrifizieren.

### 1.2 Optionen der Teilelektrifizierung

Die grundsätzliche Möglichkeit einer Vollelektrifizierung – also die Ausstattung der kompletten Bahnstrecke mit einer Fahrleitungsanlage – besteht in den meisten Fällen. Ungeachtet besonderer Hemmnisse einer Elektrifizierung, wie beispielsweise sehr enge Tunnel oder niedrige Brücken, die auch den Einsatz einer Stromschienenoberleitung nicht zulassen, wäre eine solche Maßnahme mit sehr hohen Kosten verbunden, die angesichts des Fahrgastaufkommens auf derlei ländlichen Strecken schwierig zu rechtfertigen ist. Aus diesem Grund sollen daher im Folgenden ausschließlich die Optionen einer teilweisen Elektrifizierung betrachtet werden. Diese sind in Bild 1 schematisch dargestellt.

Bei Option 1a handelt es sich um eine Erweiterung der bestehenden Oberleitungsanlage. Bis zum Ende des elektrifizierten Abschnitts können sodann auch elektrische Fahrzeuge ohne Batteriespeicher fahren. Gleichzeitig verkürzt sich die nicht elektrifizierte Stichstrecke, die vom Batteriezug noch zu bewältigen ist. Da die neu gebaute Fahrleitungsanlage von der elektrifizierten Hauptstrecke aus gespeist

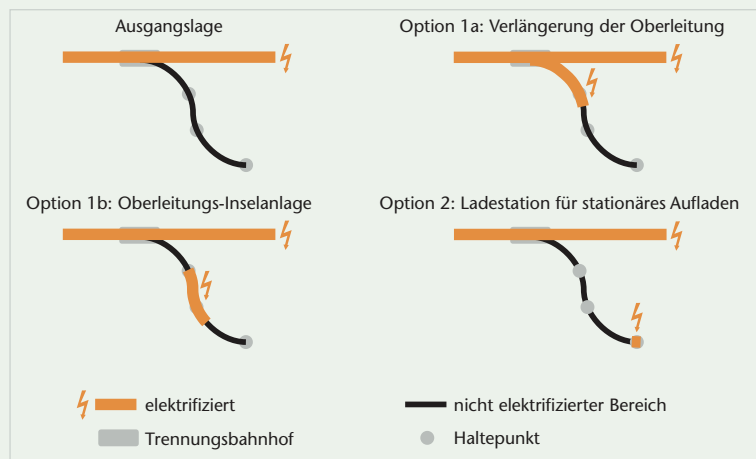
wird, ist während der Planungsphase zu prüfen, inwieweit am Ende des Fahrleitungsabschnitts noch eine ausreichende Spannungshaltung gewährleistet werden kann. Werden die nach EN 50163 [1] beziehungsweise EN 50388 [2] vorgegebenen Werte unterschritten, kann die Errichtung eines zusätzlichen Einspeisepunkts entlang oder am Ende des elektrifizierten Abschnitts erforderlich werden.

Demgegenüber stellt Option 1b eine sogenannte „Oberleitungs-Inselanlage“ (OLIA) dar. Hierbei handelt es sich um einen elektrifizierten Teilabschnitt einer Bahnstrecke, der dadurch charakterisiert ist, dass er losgelöst vom restlichen elektrifizierten Netz ist. Ihre isolierte Lage führt dazu, dass ausschließlich elektrische Fahrzeuge mit Batteriespeicher diese OLIA erreichen können. Prinzipiell besteht keine Längenbegrenzung, jedoch ist im Gegensatz zu Option 1a zwingend eine zusätzliche Einspeiseinfrastruktur in Form eines Unterwerks aufzubauen. Sollte sich keine 110-kV-Bahnstromleitung in vertretbarer Nähe befinden, kann die Energie den öffentlichen 50-Hz-Netzen entnommen werden. Sofern die eingesetzten Fahrzeuge in der Lage sind, mit einer Speisefrequenz von 50 Hz zurechtzukommen, kann auf eine Umrichtung der Netzfrequenz von 50 Hz auf 16,7 Hz verzichtet werden. Inwieweit in diesem Fall eine Spannung von 25 kV verwendet werden muss, ist zu diskutieren.

Sowohl bei der Option 1a als auch bei 1b ist eine klassische Fahrleitungsanlage aufzubauen. Hiervon unterscheidet sich grundlegend Option 2, bei der das Batteriefahrzeug ausschließlich im Stillstand mit elektrischer Energie versorgt wird. Solche Anlagen bieten sich an, wenn die mehrminütige Wendezeit des Fahrzeugs als Ladezeit verwendet werden soll. Eine Versorgung des Oberleitungssystems mit einer Frequenz von 50 Hz ist ebenfalls vorstellbar. Weil in diesem Fall jedoch keine fahrdynamischen Beanspruchungen der Oberleitungsanlage auftreten, soll diese Möglichkeit der Nachladung in Abgrenzung zu den zuvor beschriebenen OLIA als „Ladestation“ beziehungsweise „Stromtankstelle“ bezeichnet werden. Letztere Begriffsdefinition gibt zudem einen Hinweis auf die besondere regulatorische Einordnung solcher Anlagen [3; 4].

### 1.3 Grundsätzliche Auslegung eines modernen BEMU-Fahrzeugs

Die Entwicklung der Leistungselektronik in den vergangenen Jahrzehnten führte dazu, dass moderne elektrische Triebfahrzeuge mit Drehstromantrieben ausgestattet werden. Zu den Vorteilen eines Drehstrommotors gegenüber einem Universalmotor (Gleichstrommotor mit geblechtem Stator) gehört die kommutatorlose Ausführung des Rotors bei gleichzeitiger Abgabe eines konstanten Drehmo-



**Bild 1:** Optionen der Teilelektrifizierung (Bilder 1 bis 3: Furrer+Frej).

ments am Anfang des Beschleunigungsvorgangs [5]. Darüber hinaus sind Fahrzeuge mit Drehstromtechnik rückspeisefähig [6]. Zum Einsatz in Bahnfahrzeugen kommen bei Bahnanwendungen vornehmlich Asynchronmaschinen und bisweilen auch permanent-erregte Synchronmaschinen.

Weil das elektrische Triebfahrzeug über eine einphasige Fahrleitung mit Spannung versorgt wird, muss der für die Drehfeldmaschinen erforderliche Mehrphasenwechselstrom an Bord des Fahrzeugs erzeugt werden. Hierzu wird bei Bahnen, welche mit Wechselspannung betrieben werden, durch einen Transformator die Fahrleitungsspannung zunächst auf ein für die Gleichrichter verträgliches Spannungsniveau umgespannt und gleichgerichtet. Die auf diese Weise erzeugte Gleichspannung dient der Versorgung der Wechselrichter, welche die Spannung für die Fahrmotoren erzeugen. Es bietet sich nun an, eine Traktionsbatterie an den Gleichspannungszwischenkreis anzubinden. Wegen der fahrzeugseitigen Gleich- und späteren Wechselrichtung werden die Fahrmotoren mit einer Frequenz betrieben, die von der primärseitigen Versorgungsfrequenz unabhängig ist. Bei den kommutatorlosen Drehstromantrieben tritt auch kein Bürstenfeuer auf, wie es von Reihenschlussmotoren bekannt ist. Aus diesem Grund besteht die Möglichkeit, das Fahrzeug auch Industriefrequenz statt mit den bei deutschen Bahnen üblichen 16,7 Hz zu versorgen.

## 2 Fahrleitungsnetz und OLIA/Ladestation

### 2.1 Konventionelles Fahrleitungsnetz

Das in Deutschland mit einer Nennspannung von 15 kV und einer Nennfrequenz von 16,7 Hz einpha-



sig betriebene Fahrleitungsnetz wird in einem möglichst durchgekuppelten Zustand betrieben. Lediglich an den Übergängen zwischen dem zentralen und dem dezentralen Netz sind Schutzstrecken vorzusehen, da die im zentralen Bahnstromnetz vorherrschende Phasenlage von der des dezentralen abweichen kann [7]. Die Durchkupplung ist in vielerlei Hinsicht vorteilhaft [8]:

- Die elektrischen Triebfahrzeuge werden während ihrer Fahrt ohne Unterbrechung durch Schutzstrecken mit Traktionsstrom versorgt. Insbesondere an Steigungsstrecken können auf diese Weise Einbrüche der Fahrgeschwindigkeit vermieden werden.
- Es gibt einen Lastausgleich zwischen den Unterwerken, so dass die Komponenten innerhalb des einzelnen Unterwerks für eine tiefere Spitzenleistung ausgelegt werden können.
- Die Rückspeiseleistung bremsender Triebfahrzeuge kann besser aufgenommen werden.
- Durch geschickte Betriebsführung kann der Energiebezug so gesteuert werden, dass möglichst geringe Netzentgelte vorgelagerter Netzbetreiber entstehen.

Der Betrieb des Bahnsystems mit einer Sonderfrequenz von 16,7 Hz geht ebenfalls mit einigen Vorteilen einher:

- Der geringere induktive Leitungsbelag lässt bei gleicher Spannung größere Unterwerksabstände zu als bei einer Speisung mit 50 Hz.
- Es gibt geringere induktive Effekte auf benachbarte Leitungen

Es stellt sich nun die Frage, inwieweit dieses in Deutschland bewährte Bahnspannungssystem ebenfalls für die Versorgung von OLIA und Ladestationen verwendet werden sollte.

## 2.2 Besonderheiten beim Betrieb von OLIA und Ladestationen

Die Betriebsführung von OLIA und Ladestationen unterscheidet sich grundlegend von jener der Unterwerke des konventionellen Fahrleitungsnetzes. Da diese Infrastruktur vornehmlich im ländlich geprägten Raum aufgebaut werden wird, in welchem im Vergleich zu urbanen Gebieten mit einem wesentlich geringeren Fahrgastpotential zu rechnen ist, wird es wesentlich weniger Zugfahrten über den Tag verteilt geben. In vielen Fällen werden derlei Strecken derzeit stündlich betrieben, mit eventuellen halbstündlichen Verstärkern in der morgendlichen und nachmittäglichen Hauptverkehrszeit. In diesen Spitzenstunden verkehren die aktuell eingesetzten Dieseltriebwagen mitunter auch in Doppeltraktion. Eine Verdichtung des Angebots auf einen 30-min-Takt

über den kompletten Tag wird angesichts der Fahrgastzahlen in vielen Fällen auch zukünftig nicht zu rechtfertigen sein. Lediglich für Sonderverkehre – wie zum Beispiel im Rahmen eines Volksfests – wird kurzzeitig ein signifikant erhöhtes Sitzplatzangebot geschaffen. Dies kann sowohl durch eine Taktverdichtung wie auch durch den Einsatz von Doppeltraktionen bewerkstelligt werden.

Da die OLIA oder die Ladestation aufgrund ihrer isolierten Lage keine Energie mit dem Bahnstromnetz austauschen können, muss das Unterwerk für die Spitzenleistung innerhalb des Speiseabschnitts ausgelegt werden. Weil die Batteriezüge die OLIA oder die Ladestation mit einem teilentladenen Energiespeicher erreichen werden und die Batterien wieder für die weitere Fahrt aufgeladen werden sollen, ist mit einem konstant hohen Leistungsbedarf während der kurzen Aufenthaltszeit zu rechnen. Laut EN 50367 [9] ist für Wechselspannungsbahnen ein Stillstandstrom von 80 A je Stromabnehmer zulässig, was bei einer Spannung von 15 kV einer übertragenen Leistung von 1,2 MW entspricht. Bei einer Doppeltraktion kann bei Ladung im Stillstand an einer Ladestation demnach die Gesamtleistung bei bis zu 2,4 MW liegen. Weil bei einer OLIA auch eine Aufladung des Fahrzeugs während der Fahrt möglich ist, fällt die Restriktion der 80 A weg, so dass in diesem Fall ein noch höherer Leistungsbedarf auftreten kann. Mit Ausnahme von OLIA mit einer großen räumlichen Ausdehnung ist davon auszugehen, dass diese Leistung über einen einzigen Anschlusspunkt zu einem vorgelagerten Netzbetreiber (VNB) bezogen wird.

Das besondere Verhalten dieser Batteriezüge bezüglich des speisenden Netzes soll anhand eines fiktiven, jedoch praxisnahen Beispiels erläutert werden. Es soll hinsichtlich des Verkehrsangebots vorausgesetzt werden, dass

- der erste Batteriezug des Tages um 6:00 Uhr morgens die Ladestation erreicht,
- ein stündlicher Takt bis 23:00 Uhr besteht und
- an Werktagen in der morgendlichen Hauptverkehrszeit um 7:00 Uhr und 8:00 Uhr eine Doppeltraktion verkehrt.

Weiter soll angenommen werden, dass

- eine Einzeltraktion eine Ladeleistung von 1,2 MW und
- eine Doppeltraktion eine Ladeleistung von 2,4 MW aufweist, sowie
- die Ladezeit der Akkuzüge jeweils 5 min betragen soll.

In diesem Fall ergäbe sich die in Bild 2 dargestellte Leistungsverteilung während eines Werktags.

Die für die Ermittlung der Netzentgelte relevanten Viertelstundenmittelwerte führen zu Bild 3. Hierbei wird angenommen, dass das fünfminütige Aufla-

den des Batteriezugs stets in ein einziges Viertelstundenabrechnungsintervall fällt. Es ist zu erkennen, dass gegenüber einem Unterwerk des konventionellen Fahrleitungsnetzes deutlich die Leistungsspitzen dominieren. Hierzu wird zum Vergleich auf Bild 4 verwiesen, in der beispielhaft die Belastungskurve des Unterwerks Eisenach gezeigt wird. Zudem zeigt sich, dass der Netzanschluss auch bei einer hypothetischen Ausweitung des Verkehrsangebots deutlich weniger als 2500 h/a ausgelastet ist. Ein Aspekt, der sich nachteilig auf die Höhe der Netzentgelte auswirkt.

Für dieses Beispiel beträgt der Stundenfaktor  $c_{hr}$ , der sich nach Schmidt [10] aus dem Quotienten der mittleren Leistung während der Stunde der größten Belastung am Tag bezogen auf die Tagesmittelleistung errechnet, 2,4. Dieser Wert übersteigt den Richtwert von 1,3 für Vollbahnunterwerke beziehungsweise von 1,6 bei Unterwerken für Nahverkehrsbahnen deutlich.

Schmidt führt ferner aus, wie die Bahnbelastung als Zufallsgröße modelliert werden kann und welche Verteilungsfunktionen die realen Gegebenheiten am geeignetsten abbilden. Es liegt jedoch die Vermutung nahe, dass sich das Verhalten der Batteriezüge bei OLIA oder Ladestationen nicht auf diese Weise nachbilden lässt. Schließlich basieren derlei Modelle unter anderem auf der Grundannahme, wonach ein stillstehender Zug quasi keine Traktionsleistung aufnimmt. Ebenso ist fraglich, inwieweit es sich bei der Höhe des Leistungsbezugs tatsächlich um ein stochastisches Ereignis handelt. Einzig die genauen Zeitpunkte, wann das Aufladen des Akkuzuges beginnt und wann es endet, sind im Vorfeld nicht determinierbar.

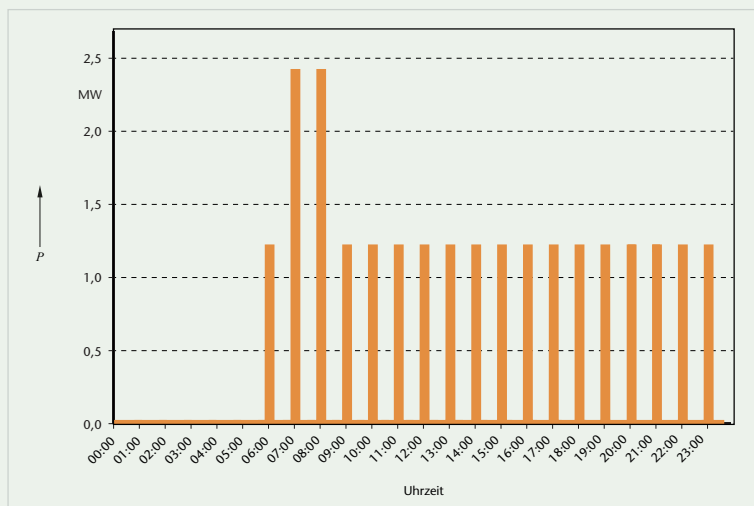
Bild 2 ist weiterhin zu entnehmen, dass zwischen den eigentlichen Ladevorgängen kein Energiebezug stattfindet. Der auf die Tageszeit bezogene Leerlaufgrad beträgt in diesem Fall über 93 %.

Würde die Ladestation mit einer Spannung von 15 kV 16,7 Hz betrieben werden, bestünde das Unterwerk im Wesentlichen aus einem dreiphasigen Eingangstransformator, dem eigentlichen Umrichter und schließlich dem einphasigen Ausgangstransformator. Für die folgende Betrachtung seien die übrigen Komponenten wie zum Beispiel Mittelspannungsschaltanlage oder Schutztechnik vernachlässigt.

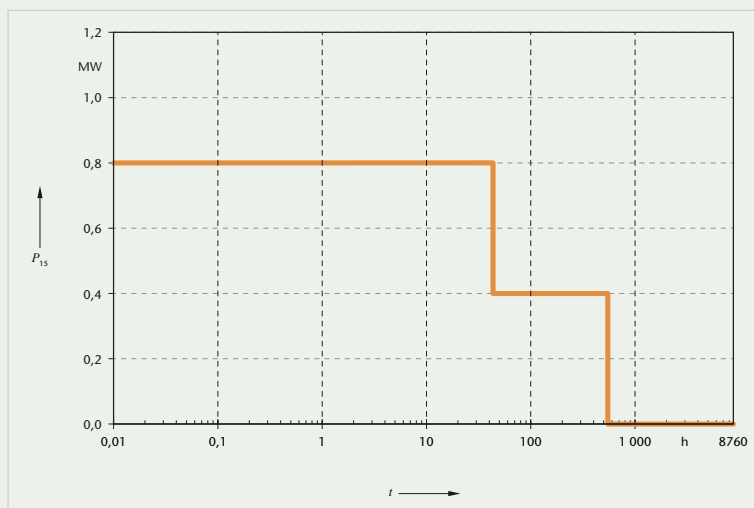
Wird das komplette Unterwerk auf eine maximale Abgangsleistung von 2,5 MW ausgelegt, ist es statthaft anzunehmen, dass die Leerlaufverluste

- des Ein- beziehungsweise Ausgangstransformators ungefähr bei je 8 kW und
- des Umrichters bei rund 12 kW liegen.

Hiermit ergäben sich die GesamtLeerlaufverluste zu 28 kW. Befindet sich die Anlage nun 22,5 Stunden am Tag im Leerlauf, ergibt dies einen Leerlaufverlust



**Bild 2:** Auslastung einer Ladestation über den Tag.



**Bild 3:** Zeitgewichtete Belastungsdauerkurve einer fiktiven Ladestation für 15-min-Mittelwerte der Leistung.

von 630 kWh/Tag. Dies entspricht rund einem Drittel der insgesamt abgegebenen Energiemenge von 2 MWh.

An dieser Stelle geht es weniger um die genauen Zahlenwerte, sondern vielmehr um die Größenordnung. Ein Weg, die Leerlaufverluste zumindest etwas zu reduzieren, besteht in diesem Fall in einer Reduktion der Scheinleistung der Transformatoren. Schließlich ist bekannt, dass es sich bei dem Ladevorgang nur um ein Kurzzeitereignis im Minutenbereich handelt, so dass Transformatoren für eine dauerhafte Scheinleistung von 2,5 MW überdimensioniert erscheinen. Bei dieser Maßnahme würden die thermischen Zeitkonstanten des Transformators ausgenutzt werden, dessen kleinerer Kern zu geringeren Eisen-

verlusten führt. Im Gegensatz hierzu besteht bei der Leistungselektronik nicht dieses Überlastungspotential.

Trotz dieser Optimierungsmöglichkeiten würden weiterhin signifikante Leerlaufverluste bestehen, sollte der Oberleitungsabschnitt wie üblich dauernd unter Spannung gehalten werden. Allerdings ist die Aufrechterhaltung der Oberleitungsspannung wichtig, um auftretende Kurzschlüsse sofort detektieren zu können. Sollte zudem bekannt werden, dass über Nacht die Oberleitungsanlage spannungsfrei geschaltet ist, könnte dies gewisse Personenkreise zum Metalldiebstahl ermuntern. Eine mögliche technische Lösung des Dilemmas könnte darin bestehen, die Oberleitungsanlage zu Zeiten geplanter Inaktivität über eine hochohmige Prüfeinrichtung einzuspeisen, so dass die Hauptkomponenten der Ladestation abgeschaltet werden können.

Die größtmögliche Reduktion der Verluste im Leerlauf, aber auch während der Leistungsabgabe ergibt sich bei Verzicht auf den Umrichter. Dies bedingt jedoch unmittelbar die Verwendung der Landesfrequenz von 50 Hz.

### 3 Wahl der Frequenz

#### 3.1 Vorteile einer Frequenz von 16,7 Hz

Die Verwendung der Sonderfrequenz bietet grundsätzlich zwei Vorteile:

1. Da das Fahrzeug für das in Deutschland übliche System AC 15 kV 16,7 Hz ausgelegt wird, sind fahrzeugseitig keine weiteren Anpassungen notwendig.
2. Zur Erzeugung dieser Spannung ist ein Umrichter zu verwenden, womit gegenüber dem VNB ein symmetrischer Leistungsbezug einhergeht.

#### 3.2 Nachteile einer Frequenz von 16,7 Hz

Diesen Vorteilen stehen die folgenden Nachteile gegenüber:

1. Die Frequenz von 16,7 Hz entspricht etwa einem Drittel der 50 Hz. Im Umkehrschluss weist eine 16,7-Hz-Spannung eine dreimal so große Periodendauer auf. Das bedeutet jedoch auch, dass es im Schnitt dreimal so lange dauert, bis es zum Nulldurchgang kommt. Weil bei einer Wechselspannung ein Strom aber grundsätzlich im Stromnulldurchgang geschaltet wird, braucht es bei einer Frequenz von 16,7 Hz bei gleicher Leistung robustere (das heißt teurere) Schaltelemente, welche für eine größere Schaltenergie auszulegen sind.
2. Weltweit gesehen zählen Bahnstromsysteme mit einer Frequenz von 16,7 Hz eher zu den Exoten.

Das geringere Marktvolumen schlägt sich in höheren Preisen für 16,7-Hz-Komponenten nieder.

3. Zur Inselspeisung eines Depots, dessen Vorfeld nicht mit Oberleitungen überspannt werden soll, ist zusätzlich eine Umrichteranlage vorzusehen.

#### 3.3 Systembedingte Nachteile von Umrichtern

Aus der Verwendung von Umrichtern ergeben sich folgende Nachteile:

1. Leistungsfähige Umrichter sind teuer. Der Verzicht auf einen Umrichter bedeutet ein großes Kosteneinsparpotential, führt jedoch zwangsläufig zur Verwendung der Landesfrequenz. Auf Aspekte der Spannungsunsymmetrie soll gesondert in Abschnitt 3.4 eingegangen werden.
2. Die meisten Umrichter sind Teil eines komplexen Gesamtsystems, bestehend aus dreiphasigem Eingangs- und einphasigem Ausgangstransformator, Kühltechnik sowie Steuerungssystemen. Selbst bei Verwendung hochzuverlässiger Komponenten hat eine solche Anlagenkomposition unweigerlich höhere Verluste und eine geringere technische Zuverlässigkeit im Vergleich zu einer Anlage, die im Wesentlichen nur aus einem einzigen Transformator besteht. Hinsichtlich der Verluste spielen nicht nur die Leerlaufverluste eine Rolle, die bereits in Abschnitt 2.2 thematisiert wurden, sondern auch jene bei Leistungsabgabe, da die Wirkungsgrade der einzelnen Teilkomponenten miteinander multipliziert werden müssen. Werden beispielsweise für die beiden Transformatoren Wirkungsgrade von 98,8 % und für den Umrichter ein Wirkungsgrad von 95 % unterstellt, ergibt sich für die Kette „Eingangstransformator – Umrichter – Ausgangstransformator“ ein Gesamtwirkungsgrad von  $0,988 \cdot 0,95 \cdot 0,988 \approx 0,927 = 92,7\%$ . Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass während der Umwandlung 7,3 % der Energie in Form von Wärmeenergie abzuführen sind. Weil bei einer 50-Hz-Station nur ein Transformator benötigt wird, fallen die Verluste mit 1,2 % wesentlich geringer aus.
3. Ersatzteile für Komponenten der Leistungselektronik sind in der Regel nur über wenige Jahre nach Errichtung der Anlage problemlos zu beziehen. Jedoch soll die OLIA oder die Ladestation auch noch nach Jahrzehnten einsatzbereit sein. Dies führt zu einem aufwendigen Ersatzteilmanagement, welches vom Wohlwollen eines kleinen Anbietermarkts abhängt. Da es aus Gründen des Wettbewerbs sinnvoll erscheint, hinsichtlich der Auswahl der Umrichterhersteller zu diversifizieren, entsteht auf diese Weise gleichzeitig ein „Teilezoo“ zueinander inkompatibler Ersatzteile. Mitunter aus diesem Grund ergeben sich für Umrichter kürzere Abschreibezeiten als für Transformatorstationen.

- In Kombination mit dem höheren Preis eines Umrichters bedeutet dies aus Sicht einer Investitionsrechnung höhere Kosten in zweifacher Hinsicht. Eine Abschreibung eines Umrichters über 40 Jahre geht bei einer vorzeitigen Ablösung mit einem großen Risiko einer Sonderabschreibung einher.
4. Die Entwicklungskosten für Umrichter müssen auf eine relativ kleine Anzahl von Anlagen umgelegt werden. Deutschlandweit erscheint eine Größenordnung von 100 OLIA oder Ladestationen realistisch. Diese Anzahl würde sich nun auf diverse Umrichterhersteller aufteilen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Anlagen nicht im Rahmen eines größeren Auftrags bestellt werden können. Stattdessen kann mit der Projektierung erst begonnen werden, wenn nach Ausgang der Ausschreibungen seitens der Aufgabenträger feststeht, auf welchen der jetzt mit Dieselfahrzeugen betriebenen Verkehrslinien Batteriezüge überhaupt zum Einsatz kommen sollen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass je nach Örtlichkeit verschiedene Anforderungen an die Ladeinfrastruktur gestellt werden können. Beide Punkte erschweren den Abschluss von Rahmenverträgen mit der Zulieferindustrie. Die Annahme, wonach Umrichter im Laufe der Zeit immer günstiger werden, erscheint zumindest für den Anwendungsfall bei OLIA oder Ladestationen als Trugschluss. Denn Kostenvorteile bei Leistungselektronik oder Elektronik im Allgemeinen bedingen große Stückzahlen, wie dies beispielsweise bei Umrichtern für Photovoltaikanlagen der Fall ist. Diese sind jedoch insbesondere bei der Bahninfrastruktur nicht gegeben.
  5. Bei Umrichteranlagen ist im Rahmen der Inbetriebnahme der Nachweis zu erbringen, dass sie sich in jedem Betriebspunkt systemverträglich zur jeweils örtlich verbauten Leit- und Sicherungstechnik verhalten. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass es zu keinen unbeabsichtigten Einkoppelungen in die Stellwerkstechnik kommt, die zu betriebsgefährdenden Zuständen führen würden. Basiert die Speiseeinrichtung der OLIA oder Ladestation allerdings nur auf einem Transformator, welcher eine rein passive Komponente darstellt, vereinfacht dies die Nachweisführung erheblich.

### 3.4 Spannungsunsymmetrie

Der Zustand eines dreiphasig betriebenen Netzes wird als symmetrisch beschrieben, wenn die Zeiger der Leiterspannungen beziehungsweise -ströme betragsmäßig gleich groß sind und hinsichtlich ihrer Phasenlage um jeweils 120° versetzt sind. Dieser Zustand ist anzustreben, um einen gleichmäßigen Energiefluss von der Quelle zum Verbraucher zu er-

reichen. Weil sich bei einem symmetrischen Netzzustand die Zeigersumme der drei Leiterströme zu Null ergibt, kann zudem auf einen Rückleiter verzichtet werden. Eine Voraussetzung zum Erreichen der Symmetrie ist die gleichmäßige Belastung aller Leiter.

Bei einem elektrischen Eisenbahnfahrzeug handelt es sich jedoch in der Regel um einen einphasigen Verbraucher. Wird diese einphasige Last nun ohne ausgleichende Elemente an ein dreiphasiges Netz angeschlossen, entsteht in letzterem eine Unsymmetrie. Das unsymmetrische Zeigersystem der drei Leiter kann mit Hilfe der Methode der symmetrischen Komponenten in ein symmetrisches „Mitsystem“ mit positiver Phasenfolge, in ein symmetrisches „Gegensystem“ mit negativer Phasenfolge und in ein gleichphasiges „Nullsystem“ zerlegt werden [5]. Als Maß der Unsymmetrie  $u$  wird nun das Verhältnis der Beträge des Gegensystems zum Mitsystem definiert. Somit gilt für die Unsymmetrie der Spannung

$$u_u = U_2 / U_1 \quad (1)$$

und für die Unsymmetrie des Stroms

$$u_i = I_2 / I_1 \quad (2)$$

mit folgenden Bedeutungen der Indizes

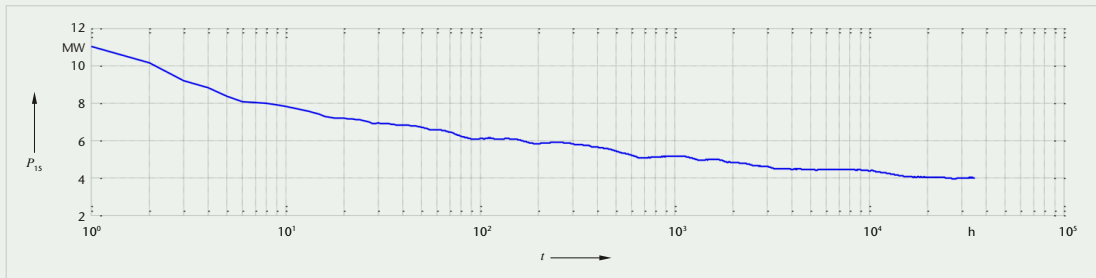
U	Spannung
I	Strom
1	Mitsystem
2	Gegensystem

Im Fall eines einphasigen Verbrauchers kann die Unsymmetrie  $u$  auch über die von *Biesenack* [11] genannte Formel

$$u_u \approx S_e / S_k'' \quad (3)$$

angenähert werden. Dabei steht  $S_e$  für die Scheinleistung der einphasigen Last und  $S_k''$  für die Kurzschlussleistung des Drehstromnetzes am Anschlusspunkt des Unterwerks. Da die Kurzschlussleistung  $S_k''$  wiederum eine Funktion der Netztopologie des Drehstromnetzes ist, ist sie keine konstante Größe, sondern wird üblicherweise als Bandbreite angegeben.

Ein unsymmetrischer Netzzustand ist generell unerwünscht, da die negative Phasenfolge des Gegensystems bei einem Drehstromantrieb ein Drehfeld mit einem umgekehrten Drehsinn erzeugt. Auf diese Weise entsteht ein bremsender, drehmomenthemmender Effekt, der zu einer Erwärmung der Wicklungen führt. Weil es innerhalb eines Drehstromnetzes immer, wenn auch nur leichte Unsymmetrien gibt, muss dies bei der Auslegung eines Drehstromantriebs berücksichtigt werden. Übersteigt jedoch die Unsymmetrie ein für die Maschine verträgliches Maß, ist im Rahmen eines *Deratings* die Leistung so-



**Bild 4:** Zeitgewichtete Belastungsdauerkurve für das Uw Eisenach, nach [6].

weit zu reduzieren, dass die Temperaturgrenzwerte der Wicklungsisolation eingehalten werden [12; 13]. Auch das gleichphasige Nullsystem geht mit negativen Effekten einher. So können sich beispielsweise bei dreischenklig ausgeführten Transformatoren die gleichphasigen Felder der Leiterspulen nicht über den Eisenkern schließen und führen damit zu verlustbehafteten Streuflüssen.

Daher stellt die Unsymmetrie eine wichtige Qualitätskennzahl zur Beurteilung des Zustands eines Drehstromnetzes dar, deren Betrag aus diesen Gründen nach oben hin zu begrenzen ist. Für deutsche Mittelspannungsnetze gelten in vielen Fällen die Technischen Anschlussbedingungen des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW) [14]. Demnach darf die Unsymmetrie im zehnminütigen Mittel den Wert von 0,7% der Kurzschlussleistung nicht übersteigen. Weiterhin darf ein Wert von 2% zu keinem Zeitpunkt überschritten werden.

Beträgt die minimale Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt daher zum Beispiel 100 MVA, kann eine einphasige Last mit bis zu 700 kVA dauerhaft versorgt werden. Eine darüber hinaus gehende Leistung ist ebenfalls im Minutenbereich statthaft, sofern die genannten Grenzwerte eingehalten werden. Ein Leistungsbezug über 1,2 MW darf daher in diesem Fall maximal 5 min 50 s dauern. Ein solcher Wert passt gut zu den Erfordernissen der Batteriezüge bei einer schnell durchgeführten Bahnsteigwende. Um einen Leistungsbezug in einem Ausmaß zu vermeiden, der zu einer Verletzung der Technischen Anschlussbedingungen führen würde, kann das Unterwerk die Verbindung zur Last trennen. Auf diese Weise lassen sich gleichzeitig die Netzentgelte auf ein verträgliches Maß reduzieren, währenddessen sichergestellt ist, dass der Batteriezug auskömmlich mit Energie für seine weitere Fahrt in einem nicht elektrifizierten Abschnitt ausgestattet wurde.

Sollten aus bahnbetrieblichen Gründen Leistungsbezüge erforderlich sein, die unweigerlich zu einem Konflikt mit den Technischen Anschlussbedingungen des VNB führen würden, sind Maßnahmen zur Symmetrisierung erforderlich. In diesem Fall kann trotz der Verwendung einer Frequenz von 50 Hz ein Umrichter notwendig werden. Da die Errichtung eines

Umrichters wesentlich aufwendiger im Vergleich zu einer 50-Hz-Transformatorstation ist, existiert hier ein erhebliches Sprungkostenpotential. Daher empfiehlt sich zu prüfen, inwieweit auch ein leicht geringeres Anforderungsprofil den Erfordernissen des Bahnbetriebs gerecht werden kann.

### 3.5 Abwägung

Aus technischer Sicht erscheint eine Speisung der OLIA oder der Ladestationen sowohl mit 16,7 Hz wie 50 Hz möglich. Für die Verwendung von 50 Hz sprechen vor allem viele kaufmännische Gründe. Insbesondere wenn es gelingt auf den Umrichter zu verzichten, fallen die Investitionen geringer aus. Die freien Finanzmittel lassen sich teils nutzen, um die Anzahl an verfügbaren OLIA oder Ladestationen zu erhöhen. Auf diese Weise wird der Einsatz der Batteriezüge robuster gegenüber externen Störungen wie Baustellen oder Streckensperrungen.

Ein dichteres Netz an Nachlademöglichkeiten verringert zudem die betrieblichen Auswirkungen, die beim Ausfall einer Anlage entstehen. Denn grundsätzlich ist festzuhalten, dass eine hundertprozentige Verfügbarkeit einer technischen Einrichtung unmöglich ist. Im Fall des konventionellen Fahrleitungsnetzes kann der Ausfall eines Unterwerks durch benachbarte Unterwerke kompensiert werden. Selbst wenn im Einzelfall für die Triebfahrzeuge im betroffenen Abschnitt eine Oberstrombegrenzung festgelegt werden muss, kann der Bahnbetrieb aufrechterhalten werden. Auf diese Weise entsteht eine gewisse  $(n-1)$ -Verfügbarkeit bezüglich der Streckeneinspeisung.

Beim Ausfall der Speiseeinrichtung einer OLIA oder einer Ladestation ist ein Betrieb der Batteriezüge jedoch nur noch möglich, sofern die durch den Wegfall entstehende elektrische Lücke die Reichweite der Züge nicht überfordert. Die Systemredundanz ist daher nur durch eine größere Anzahl von Nachladeeinrichtungen zu erreichen. Auf diese Weise kann gleichzeitig erreicht werden, dass im Normalbetrieb, wenn alle Einspeiseeinrichtungen wie gedacht funktionieren, der Energiebezug für die Züge auf eine

größere Anzahl an Anlagen verteilt werden kann. Dies führt zu geringeren Netzentgelten, die an die Betreiber der vorgelagerten Netze zu entrichten sind. Es ist daher ratsam, die Batterien eher häufiger mit geringer Leistung zu laden, als seltener mit hoher.

## 4 Wahl der Spannungshöhe

In Europa werden mit Wechselspannung betriebene Bahnenergieversorgungssysteme in der Regel mit AC 15 kV 16,7 Hz oder mit AC 25 kV 50 Hz betrieben. Diese Spannungen sind nach EN 50163 [1] genormt. Da es aus Gründen der Interoperabilität sinnvoll ist, die Anzahl der verwendeten Bahnenergieversorgungssysteme auf ein Mindestmaß zu begrenzen, finden sich die beiden genannten Systeme auch in der TSIENE [15].

Die Verwendung einer Frequenz von 50 Hz bei OLIA und Ladestationen würde auf Basis der derzeitigen EN 50367 automatisch eine Nennspannung von 25 kV nach sich ziehen. Weil die Akkuzüge jedoch auf jeden Fall das konventionelle Fahrleitungsnetz benutzen sollen, welches in Deutschland mit AC 15 kV 16,7 Hz betrieben wird, bedeutet dies, dass die Fahrzeuge für die Nutzung einer 50-Hz-Spannung mehrsystemfähig sein müssten.

Um den Aufwand auf Seiten der Fahrzeughersteller zu begrenzen, welche ihre Züge sowohl in Märkte mit 15 kV 16,7 Hz wie auch in solche verkaufen, in denen eine Spannung von 25 kV 50 Hz vorherrscht, bietet sich die Entwicklung eines einheitlichen Transformators an. Dieser verfügt zur Beherrschung der beiden Spannungssysteme über zwei Oberspannungsanzapfungen, die je nach Spannungssystem umgeschaltet werden. Ein mehrsystemfähiges Fahrzeug benötigt daher zum einen diesen zusätzlichen Schalter. Zum anderen müssen alle Komponenten wie zum Beispiel Kabel oder Oberspannungswandler, welche mit einer Spannung von 25 kV beaufschlagt werden können, bezüglich ihrer Isolationskoordination dafür ausgelegt werden. Maßgeblich hierfür ist die höchste nichtpermanente Spannung  $U_{\max 2}$ , die bei einer Nennspannung von  $U_n = 25$  kV bei 29 kV liegt.

Weil nach *Behmann* [8] die Leitungsreaktanzen, der Blindspannungsfall sowie induktive Beeinflussungsspannungen frequenzproportional höher ausfallen, sind diese Effekte durch eine höhere Spannung zu kompensieren. Dies ist der Grund, weshalb 50-Hz-Bahnenergieversorgungssysteme mit einer Nennspannung von 25 kV anstatt mit 15 kV betrieben werden. Die Alternative wäre eine Verringerung der Unterwerksabstände gewesen.

Im Fall der hier vorliegenden Batteriezüge kann jedoch festgestellt werden, dass sich das Triebfahrzeug stets in unmittelbarer Nähe zum Unterwerk be-

findet. Bei einer Ladestation ist die Oberleitung nur wenige Meter lang oder entspricht der Länge der Bahnsteigkante. Selbst bei einer 10 km langen OLIA ist bei einer mittigen Speisung der Verbraucher höchstens 5 km entfernt. Durch die verglichen mit den Unterwerken des konventionellen Fahrleitungsnetzes kleinen Leiterschleifen fallen die höheren Leitungsreaktanzen bei einer 50-Hz-Speisung entsprechend ebenfalls klein aus. Für Ladestationen erscheinen sie gar vernachlässigbar.

Aus dieser Erkenntnis kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass aus elektrotechnischer Sicht nichts gegen eine Speisespannung von 15 kV mit 50 Hz spricht. Auf diese Weise können die Kostenvorteile realisiert werden, welche mit dieser Frequenz einhergehen. Gleichzeitig können die geringeren isolationstechnischen Anforderungen einer 15-kV-Spannung genutzt werden. So beträgt die höchste nichtpermanente Spannung  $U_{\max 2}$  hierbei lediglich 18 kV.

## 5 Ausblick

Für den Betrieb der Batteriezüge ist eine entsprechende Ladeinfrastruktur zu errichten. Diese kann elektrisch isoliert vom restlichen Fahrleitungsnetz in Form von Oberleitungs-Inselanlagen (OLIA) oder Ladestationen aufgebaut werden. Die Auslastung und Überlastbarkeit solcher Anlagen unterscheidet sich von jener der üblichen Bahnunterwerke. Dies ist zum einen den besonderen Eigenschaften der Batteriezüge geschuldet, jedoch ebenfalls der singulären Verknüpfung zu einem vorgelagerten Versorgungsnetz.

Da die Beschaffung von Batteriefahrzeugen mit erhöhten Investitionskosten verbunden ist, die an sich bereits eine Markteintrittsbarriere darstellen, sollte darauf geachtet werden, die ebenfalls notwendigen Ausgaben in zusätzliche Infrastruktur möglichst gering zu halten. Darüber hinaus sind möglichst geringe Lebenszykluskosten anzustreben, so dass am Ende ein möglichst günstiges Verhältnis zwischen eingesetztem Kapital und geladenen Kilowattstunden entsteht.

Die Fahrzeuge sind für den Betrieb auf dem konventionell elektrifizierten Streckennetz Deutschlands für eine Spannung von 15 kV 16,7 Hz herzurichten. Es kann jedoch dargelegt werden, dass bei OLIA und Ladestationen eine Verwendung von 50 Hz mit vielfältigen technischen und finanziellen Vorteilen einhergeht. Die für diese Frequenz notwendigen Anpassungen auf dem Fahrzeuge beschränken sich im Wesentlichen auf die Software sowie den Einsatz etwaiger Filter. Der Aufwand ist daher als überschaubar zu bezeichnen.

Die Einführung eines Spannungssystems mit den Parametern 15 kV und 50 Hz erscheint sinnvoll und

lohnenswert. Gleichwohl die aktuelle Fassung der TSIENE nur die Wechselspannungssysteme 15 kV 16,7 Hz und 25 kV 50 Hz kennt, eröffnet sie für innovative Lösungen eine Tür. Zitat: „Um mit dem technischen Fortschritt Schritt halten zu können, sind möglicherweise innovative Lösungen erforderlich, die nicht den Spezifikationen im Anhang entsprechen oder für die nicht die im Anhang dargelegten Bewertungsmethoden angewendet werden können.“ Bei diesen Worten muss man im Hinterkopf haben, dass die Batteriezüge, die heutzutage in aller Munde sind, zum Zeitpunkt der Verabschiedung dieses Teilsystems der TSI noch nicht am Horizont erschienen waren. Sicherlich müssten im Fall eines Bahnspannungs-Inselsystems mit AC 15 kV 50 Hz beispielsweise noch Fragen der Toleranzbänder hinsichtlich Spannung und Frequenz geklärt werden. Es erscheint jedoch naheliegend, sich hinsichtlich dieser und auch ähnlicher Fragen an die Werte der bewährten Spannungssysteme anzulehnen.

## Literatur

- [1] EN 50163/A1:2008-02, Bahnanwendungen – Speisenspannungen von Bahnnetzen.
- [2] EN 50388:2012-12, Bahnanwendungen – Bahnenergieversorgung und Fahrzeuge – Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität.
- [3] *Dschung, F.*: Ladestationen für Batteriezüge als Serviceeinrichtung – wie eine Regelungslücke geschlossen werden kann. In: Elektrische Bahnen 116 (2018), H. 11-12, S. 20-25.
- [4] Rail Business Branchenreport der Eurailpress, Ausgabe 14.10.2019.
- [5] *Gerling, D.*: Vorlesungsskriptum Elektrische Maschinen und Antriebe, Universität der Bundeswehr München, 2016.
- [6] *Stephan, A.*; u. a.: Machbarkeitsstudie zur Verknüpfung von Bahn- und Energieleitungsinfrastrukturen, Ergebnisbericht zu Los 2, Dresden, 2012.
- [7] *Kießling, F.*; *Puschmann, R.*; *Schmieder, A.*: Fahrleitungen elektrischer Bahnen. Erlangen: Publicis Publishing, 2014.
- [8] *Behmann, U.*: Statische Umrichter – Nur für Sonderfrequenzen? In: Elektrische Bahnen 98 (2000), H. 10, S. 381-389.
- [9] EN 50367:2017-01, Bahnanwendungen – Zusammenwirken der Systeme – Technische Kriterien für das Zusammenwirken zwischen Stromabnehmer und Oberleitung für einen freien Zugang.
- [10] *Schmidt, P.*: Energieversorgung elektrischer Bahnen. Berlin: VEB transpress Verlag für Verkehrswesen, 1988.
- [11] *Biesenack, H.*; u. a.: Energieversorgung elektrischer Bahnen. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag, 2006.
- [12] *Pillay, P.*; u. a.: Derating of Induction Motors Operating With a Combination of Unbalanced Voltages and Over or Undervoltages, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, December 2002.
- [13] *Gosbell, V. J.*: Voltage Unbalance, Power Quality Centre, Technical Note No. 6, University of Wollongong, October 2002.
- [14] BDEW, Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Mittelspannungsnetz TAB Mittelspannung 2008, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin, 2008.
- [15] Verordnung (EU) Nr. 1301/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Energie“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union. Veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 356 vom 12.12.2014, S. 197–227; Berichtigung, veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 13 vom 20.01.2015, S. 13.

### Autor



**Dr. Felix Dschung** (35), 2005 bis 2010 Studium der Elektro- und Informationstechnik an der Universität der Bundeswehr München und Technischen Universität München (TUM); 2010 bis 2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik der TUM; 2015 bis 2017 Ingenieur Infrastrukturplanung bei der DB Energie GmbH; seit 2017 Elektroingenieur Bahntechnik bei der Furrer+Frey AG; Gründungsmitglied des VDB Arbeitskreis Ladeinfrastruktur.

Adresse Furrer+Frey AG, Thunstr. 35,  
3000 Bern 6, Schweiz;  
Fon: +41 31 3576287,  
E-Mail: fdschung@furrerfrey.ch

## QUELLENVERZEICHNIS

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: *Merkblatt für Schienenbahnen zu den gesetzlichen Regelungen nach §§ 63 ff. Erneuerbare-Energien-Gesetz 2017*, Eschborn (Stand 19.03.2018), URL: [http://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/bar\\_merkblatt\\_schienenbahnen.pdf;jsessionid=7BE29AoF18B87B3DD2AD1F354C344228.1\\_cid371?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](http://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/bar_merkblatt_schienenbahnen.pdf;jsessionid=7BE29AoF18B87B3DD2AD1F354C344228.1_cid371?__blob=publicationFile&v=6), zuletzt abgerufen am 29.01.2019.

Bundesarbeitsgemeinschaft Schienenpersonennahverkehr: *Dossier Verteilung der Traktionsart im SPNV 2016* (Stand 08.2017), URL: <https://bag-spnv.de/files/bagspnv/downloads/Dossier%20Verteilung%20Traktion%20BL%20final.pdf>, zuletzt abgerufen am 23.10.2018.

CDU/CSU; SPD: *Ein neuer Aufbruch für Europa. Eine neue Dynamik für Deutschland. Ein neuer Zusammenhalt für unser Land. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 19. Legislaturperiode*, Berlin (12.03.2018), URL: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/847984/5b8bc2359od4cb2892b31c987ad672b7/2018-03-14-koalitionsvertrag-data.pdf?-download=1>, zuletzt abgerufen am 19.01.2019.

DB Energie GmbH, DB Netz AG: *Zero-Emission-Antriebe im Schienenverkehr – Infrastrukturösungen von DB Energie und DB Netz* (07.11.2018), URL: <https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/2-veranstaltungen/20181107-zero-emission-antriebe-fuer-den-schienenverkehr/6.praesentation-herr-bruemmer-herr-noll.pdf>, zuletzt abgerufen am 29.01.2019.

Hecht, Markus; Stephan, Arnd; Walther, Christoph: *Klimapolitisches Potenzial elektrischer Schienenstrecken in Deutschland*, Beitrag im MKS-Fachworkshop „Reaktivierung und Elektrifizierung von Schienenstrecken“, Berlin (08.10.2018).

Müller, André: *Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV*, TU Dresden im Auftrag für Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH, Dresden (03.11.2017), URL: <https://beg.bahnland-bayern.de/de/aktuelles/gutachten-alternative-antriebe-im-bahnland-bayern>, zuletzt abgerufen am 29.01.2019.

Strategiekreis Ladeinfrastruktur: *Untersuchungsergebnisse aus dem Mitgliederkreis*, unveröffentlicht

Technische Universität Berlin – Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb / Fachgebiet Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik: *Potentialanalyse für Batteriebetriebfahrzeuge im deutschen Schienennetz*, unveröffentlicht.

Verkehrsministerkonferenz: *Beschluss-Sammlung der Verkehrsministerkonferenz am 19./20. April 2018 in Nürnberg*, Berlin (26.04.2018), URL: [https://www.verkehrsministerkonferenz.de/VMK/DE/termine/sitzungen/18-04-19-20-vmk/18-04-19-20-beschluss.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.verkehrsministerkonferenz.de/VMK/DE/termine/sitzungen/18-04-19-20-vmk/18-04-19-20-beschluss.pdf?__blob=publicationFile&v=2), zuletzt abgerufen am 29.01.2019.

§ 4 Abs. 7 Allgemeines Eisenbahngesetz, URL: [https://www.gesetze-im-internet.de/aeg\\_1994/BJNR239600993.html](https://www.gesetze-im-internet.de/aeg_1994/BJNR239600993.html), zuletzt abgerufen am 29.01.2019.

§ 42 Personenbeförderungsgesetz, URL: [https://www.gesetze-im-internet.de/pbefg/\\_42.html](https://www.gesetze-im-internet.de/pbefg/_42.html), zuletzt abgerufen am 29.01.2019.



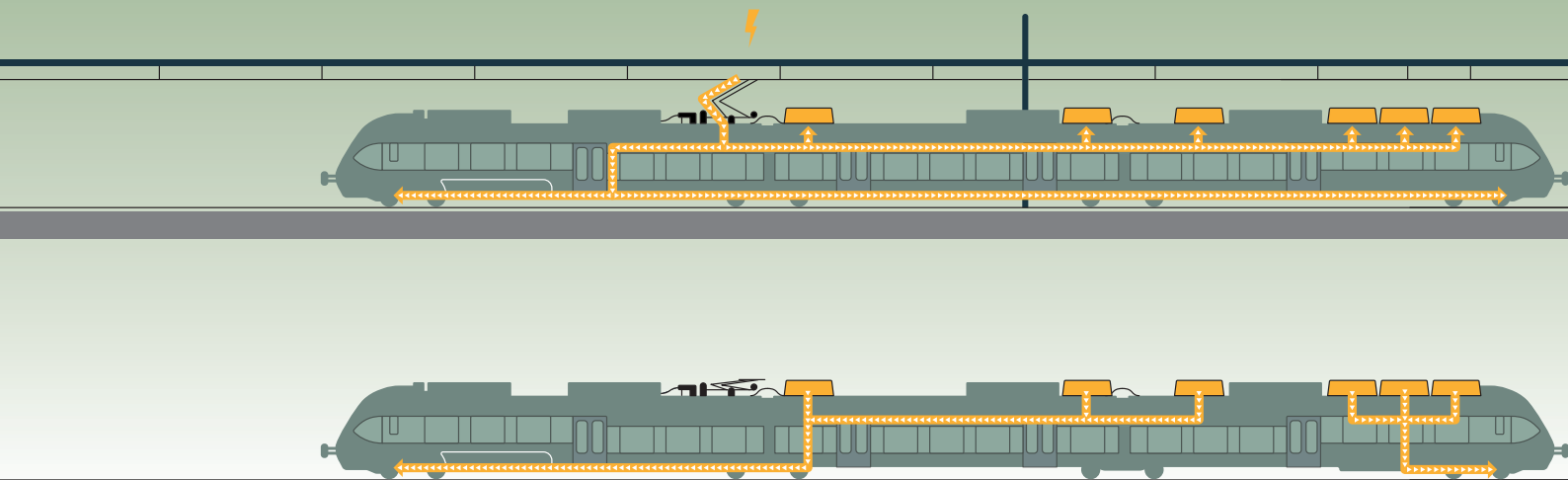
**Bildnachweis**

Alstom Transport (Grafik Titel, S. 20);  
Creative Commons (S. 22 li. o.);  
Furrer+Frey (S. 18);  
DB AG, Barteld Redaktion & Verlag (S. 21);  
DB AG, Bartolomiej Banaszak (S. 15, 28);  
DB AG, Volker Emersleben (S. 26)  
DB AG, Uwe Miethe (S. 11, 13, 19);  
Siemens Mobility, Ralf Staub (S. 10);  
Stadler Pankow (S. 12);

Sebastian Terfloth (S. 22 mi. o);  
Nyascha Wittemann (S. 22 o. re, mi. u.)

**Gestaltung**  
designhaus-berlin

© Juli 2021



VERBAND DER BAHNINDUSTRIE  
IN DEUTSCHLAND (VDB) e. V.

Universitätsstraße 2  
10117 Berlin

[info@bahnindustrie.info](mailto:info@bahnindustrie.info)  
[www.bahnindustrie.info](http://www.bahnindustrie.info)

@ Bahnindustrie\_D