

# ATZ extra

Dezember 2019

VDI

SONDERHEFT FÜR  
DIE VDI-FVT 2019 | 2020

## Mobilität der Zukunft

### AUTO

reFuels – Notwendigkeit  
und Herausforderung

### SCHIENE

Alternative Antriebstechnologien  
für liniengebundene Fahrzeuge

### RAUMFAHRT

Internet of Space –  
Weltweit verbunden

/// INTERVIEW Volker Kefer [VDI]

/// GASTKOMMENTAR Matthias Becker [Wärtsilä]



## Umstellung liniengebundener Fahrzeuge auf alternative Antriebstechnologien

© RL-Institut

### AUTOREN



**Tim Röpcke, M. Sc.**  
ist wissenschaftlicher  
Mitarbeiter am Reiner  
Lemoine Institut in Berlin.



**Alexander Windt, M. Sc.**  
ist wissenschaftlicher  
Mitarbeiter am Reiner  
Lemoine Institut in Berlin.

Das Reiner Lemoine Institut hat den Betrieb alternativer Antriebskonzepte im deutschen Schienenpersonennahverkehr (SPNV) hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Kriterien analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass zur Elektrifizierung der untersuchten Linien ein Mix aus Batterie- und Brennstoffzellentriebzügen eine wirtschaftliche Alternative bietet.

### MANGELNDER ELEKTRIFIZIERUNGSGRAD

Für eine erfolgreiche Verkehrswende in Deutschland müssen alle Verkehrsformen betrachtet werden, um den Anteil fossiler Energieträger im Verkehrssektor so weit wie möglich zu reduzieren. Im deutschen Schienenverkehr sind mehr als 4000 Dieseltriebwagen in Betrieb, der höchste Wert in Europa [1]. Zudem ist das deutsche Schienennetz nur zu

rund 60 % elektrifiziert. Im europäischen Vergleich liegt Deutschland damit im Mittelfeld. Andere Länder wie Österreich oder die Schweiz erreichen einen Elektrifizierungsgrad von 72 bis 100 % [2]. Die aktuelle Bundesregierung hat im Koalitionsvertrag das Ziel aufgenommen, den Elektrifizierungsgrad in Deutschland bis zum Jahr 2025 auf 70 % zu erhöhen [3].

In wissenschaftlichen Arbeiten hat das Reiner Lemoine Institut den Betrieb

alternativer Antriebstechnologien auf nicht vollständig elektrifizierten Linien im deutschen SPNV untersucht, auf denen aktuell Dieseltriebwagen eingesetzt werden. Als Alternativen zu heutigen Dieseltriebwagen werden aktuell Batterietriebwagen und Brennstoffzellentriebwagen in den Markt eingeführt.

### LINIENANALYSE

Zur Ermittlung von Streckendaten (Länge und Elektrifizierungsgrad einer Strecke) sowie Fahrplandaten (Auslastung von Bahnhöfen und Streckenabschnitten) werden zunächst die Linien des deutschen SPNV analysiert. Datengrundlage bildet das elektronische Kursbuch der Deutschen Bahn AG und das Schienennetz aus dem INSPIRE-Datensatz der EU [4, 5]. Durch die Kombination beider Datensätze wird für jede der 529 Regionalbahnlinien (Stand 2018) der georeferenzierte Streckenverlauf mit allen Zwischenbahnhöfen, die wöchentliche fahrplanmäßige Auslastung der Strecke sowie der Endbahnhöfe ermittelt. Im Streckenverlauf ist die Information enthalten, welche Teilstücke bereits durch eine Oberleitung elektrifiziert sind. Auf insgesamt 322 Linien werden Dieseltriebwagen eingesetzt, da im Streckenverlauf nicht-elektrifizierte Teilstücke überbrückt werden müssen. Für diese 322 Linien wird anschließend eine Fahrtsimulation durchgeführt.

### FAHRTSIMULATION

Um alternative Antriebskonzepte im deutschen SPNV hinsichtlich wirtschaftlicher und technischer Kriterien zu analysieren, wird ein modulares Triebfahrzeugmodell aufgebaut und anschließend eine zeitlich aufgelöste Fahrtsimulation

auf den 322 identifizierten Linien durchgeführt. Das Fahrzeugmodell bildet ein dreiteiliges Triebfahrzeug, unter anderem mit den Modulen Antriebsstrang, Pantograf, Batteriespeicher, Brennstoffzellensystem, Wasserstofftank und den Nebenaggregaten ab. Die Kapazität des Batteriespeichers (100 bis 600 kWh) und Wasserstofftanks (50 bis 200 kg) sowie die Leistung des Brennstoffzellensystems (200 bis 600 kW) sind variabel, um unterschiedliche Antriebskonzepte zu analysieren. Für die zu untersuchende Triebfahrzeugvariation und Linie wird in Abhängigkeit von der maximalen Traktionsleistung und Triebfahrzeugmasse zunächst ein zeitlich aufgelöstes Geschwindigkeitsprofil für die Fahrt auf der Linie erstellt. Anschließend kann der zeitliche Verlauf des Leistungs- und Energieflusses sowie Ladezustands des Batterie- und Wasserstoffspeichers bestimmt werden. Fällt der Ladezustand des Batteriespeichers während der Fahrtsimulation unter einen kritischen Wert, wird der Ausbau neuer Oberleitung auf dieser Linie in Bezug auf geringste Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen optimiert. Für die wasserstoffelektrischen Triebfahrzeuge wird der Aufbau von Wasserstofftankstellen zur Versorgung der jeweiligen Linie simuliert, **BILD 1**. Die sich anschließende Wirtschaftlichkeitsanalyse berücksichtigt die resultierenden Investitionskosten in Triebfahrzeug und Infrastruktur (Oberleitung und Wasserstofftankstelle) sowie Betriebskosten (Wartungs- und Energiekosten).

### AUSWIRKUNGEN DES OBERLEITUNGS-AUSBAUS

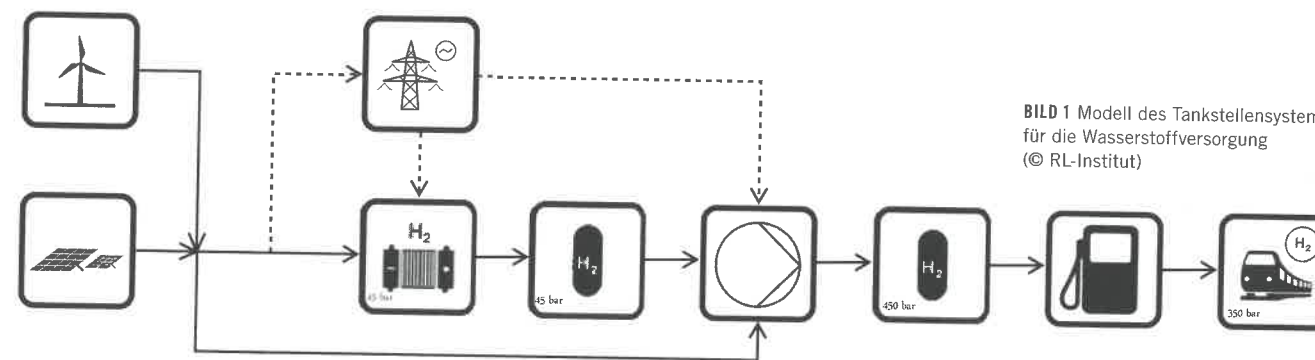
Die aktuell eingesetzte Batterietechnik für Triebfahrzeuge im Schienenverkehr begrenzt die Reichweite einer reinen

Batteriefahrt auf rund 40 km [6]. Wenn der Batteriespeicher während der Fahrt an einer Oberleitung geladen werden kann, sind auch längere Fahrten möglich. Um den optimalen Einsatz der Batterietriebzüge auf den untersuchten Linien zu ermitteln, wird ein Algorithmus eingesetzt, der den notwendigen Oberleitungszubau optimiert. **BILD 2** zeigt im oberen Teil den Verlauf des Ladezustands des Batteriespeichers auf einer Beispieltrecke. Ohne zusätzliche Oberleitung ist der Betrieb eines Batterietriebzugs auf dieser Linie nicht möglich. Wird an geeigneten Stellen Oberleitung zugebaut, kann der Batterietriebzug jedoch zwischenzeitlich geladen und auf der Linie betrieben werden, **BILD 2** unten.

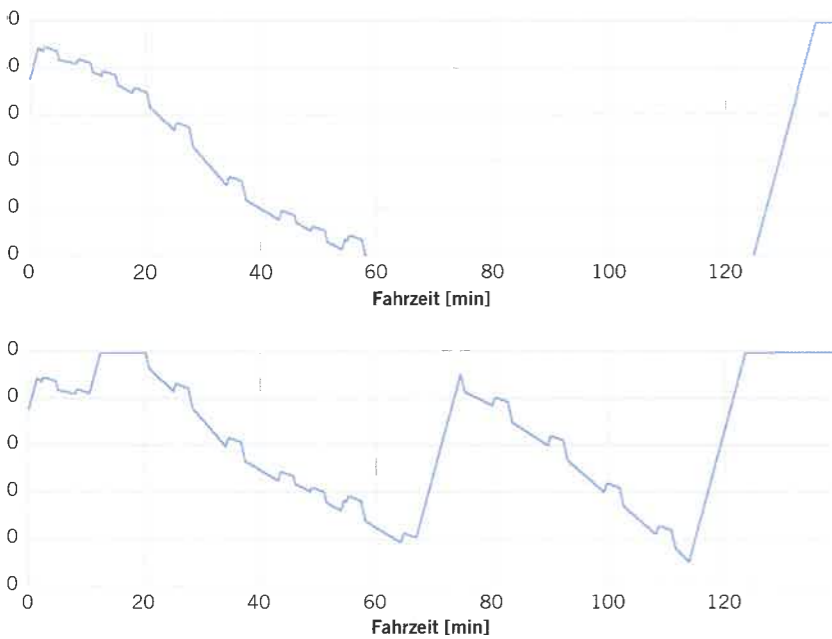
Wird auf allen 322 untersuchten Linien ein Batterietriebzug mit einer Batteriekapazität von 300 kWh eingesetzt, müssen in dieser Analyse simulativ insgesamt 2774 km neue Oberleitung zugebaut werden. Wird die Batteriekapazität um ein Drittel von 300 auf 400 kWh erhöht, kann der simulative Ausbau notwendiger Oberleitung in dieser Analyse auf 1809 km reduziert werden.

### IDENTIFIKATION DER GEEIGNETEN TECHNOLOGIE

Die Fahrtsimulation und anschließende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat für jede der 322 Linien beim Vergleich eines Batterietriebzugs (300 kWh Batteriekapazität) mit einem Brennstoffzellentriebzug (200 kWh Batteriekapazität und 400 kW Brennstoffzellenleistung) eine Alternative identifiziert, die in dieser Analyse wirtschaftlicher auf der Linie zu betreiben ist. Auf 131 Linien ist der Einsatz des batterieelektrischen Zugs wirtschaftlicher. Auf den restlichen 191 Linien kann in dieser Untersuchung der Brenn-



**BILD 1** Modell des Tankstellensystems für die Wasserstoffversorgung  
(© RL-Institut)



2 Verlauf des Ladezustands des Batteriespeichers eines Batterietriebszugs während der Fahrt auf Beispielstrecke. Vergleich zwischen Ist-Zustand der Strecke (oben) und optimiertem Ausbau neuer Oberleitung (unten) (© RL-Institut)

zellantriebzug wirtschaftlicher betrieben werden. Der Nettoenergiebedarf des genannten Batterietriebszugs liegt je nach Streckencharakteristik in dieser Analyse zwischen 2,8 und etwa 5 kWh/km. Im Vergleich dazu beträgt der Nettoenergiebedarf des genannten Brennstoffzellantriebszugs 5,5 bis zu 10 kWh/km.

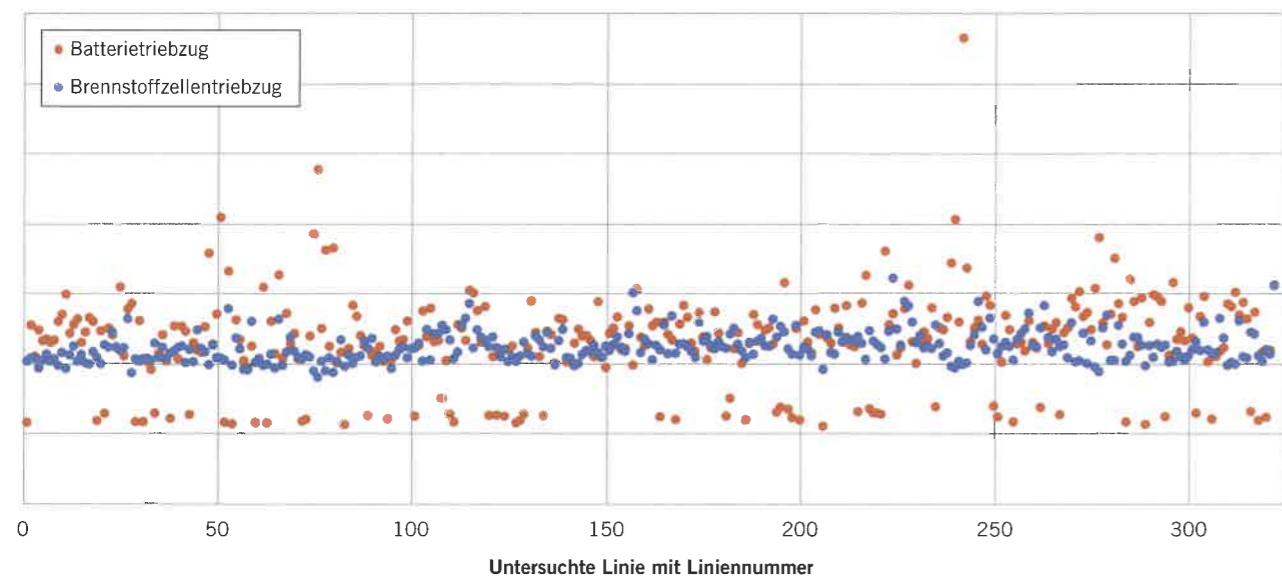
**BILD 3** zeigt die Kosten des beschriebenen Batterie- sowie Brennstoffzellantriebszugs auf allen untersuchten Linien. Durch den geringen Nettoenergiebedarf sind die Betriebskosten beim Batterietriebzug vergleichbar gering. Wird ein Zubau von Oberleitung für den Betrieb benötigt, steigen die Investitionskosten für die Batteriealternative stark an. In **BILD 3** sind

59 Linien erkennbar, bei denen keine Oberleitung zugebaut werden muss und die Kosten im Betrieb des Batterietriebszugs in dieser Analyse zwischen 2 und 2,5 Euro/km liegen. Ist ein Zubau von Oberleitung erforderlich, schwanken die Kosten je nach benötigter Länge der Oberleitung zwischen 3 und 7,6 Euro/km. Die Kosten des Brennstoffzellantriebszugs haben geringe Schwankungen und liegen zwischen 2,8 und 4,3 Euro/km.

### ÜBERTRAGBARKEIT AUF BUSBETRIEBE

Die verwendete Methodik wird in einem nächsten Schritt auf andere liniengebundene Verkehrsträger wie Busse oder Schiffe übertragen. Dabei liegt der Fokus vor allem auf der Identifikation von passenden Fahrzeugtechnologien, die die Elektrifizierung eines Bus- oder Schiffbetriebs ermöglichen.

Für Busbetriebe werden durch diese Methodik die Fahrzeugkonfigurationen ermittelt, die bei Beibehaltung der aktuellen Umlaufplanung für elektrifizierte Alternativen möglich sind. Eine Weiterentwicklung der Methodik ist notwendig, da Pausen- und Standzeiten in Umlaufplänen von Busbetrieben oft nicht dafür ausgelegt sind, Zwischenladung von elektrischen Bussen zu gewährleisten. Die Methodik wird um den Einfluss des Verkehrsflusses und weitere Faktoren erweitert. Damit kön-



3 Die Kosten des Betriebs alternativer Antriebskonzepte im SPNV sind stark vom Elektrifizierungsgrad der Strecke abhängig. Ist der Ausbau neuer Oberleitung nicht notwendig, können Batterietriebszüge im Vergleich zu Brennstoffzellantriebszügen sehr wirtschaftlich betrieben werden (© RL-Institut)

nen konkrete Fahrzeugzahlen, Batteriekapazitäten und Ladeleistungen ermittelt werden, die nötig sind, um den Fahrplan mit elektrischen Bussen einzuhalten.

### ERGEBNISSE

Der Betrieb alternativer Antriebskonzepte im deutschen SPNV wurde vom Reiner Lemoine Institut hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Kriterien analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass weder ein Batterie- noch Brennstoffzellantriebzug alle 322 untersuchten Linien am wirtschaftlichsten betreiben kann. Je nach Charakteristik der Linie können die Kosten des Betriebs stark schwanken und lassen vermuten, dass es in Zukunft einen Mix aus unterschiedlichen Antriebskonzepten im deutschen SPNV geben wird. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um auch Teilnetze sowie die Überschneidungen von Linien bei der Optimierung des Ausbaus neuer Oberleitung zu berücksichtigen. Die in dieser Analyse verwendete Methodik wird weiterentwickelt, um den Einsatz alternativer Antriebssysteme auch in Busbetrieben zu untersuchen und diejenige Technologie zu identifizieren, die einen elektrifizierten Betrieb ermöglicht.

### LITERATURHINWEISE

- [1] Coradio iLint: Alstoms emissionsfreier Zug. Online: [https://www.info24news.net/app/download/16512589825/Main+document+Coradia+iLint+Alstom\\_dt-UG\\_SiS\\_TK.pdf?t=1510604231-UG\\_SiS\\_TK.pdf%3Ft%3D1510604231&usg=AOvVaw1vp-BXTrhGvPNiCuG71dqm](https://www.info24news.net/app/download/16512589825/Main+document+Coradia+iLint+Alstom_dt-UG_SiS_TK.pdf?t=1510604231-UG_SiS_TK.pdf%3Ft%3D1510604231&usg=AOvVaw1vp-BXTrhGvPNiCuG71dqm), aufgerufen am 12.09.2019
- [2] Allianz pro Schiene, Infrastruktur. Online: [https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2018/09/180905\\_EU-Vergleich\\_Elektrifizierung.pdf](https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2018/09/180905_EU-Vergleich_Elektrifizierung.pdf), aufgerufen am 05.09.2019
- [3] Ein neuer Aufbruch für Europa, Eine neue Dynamik für Deutschland, Ein neuer Zusammenhalt für unser Land - Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, 19. Legislaturperiode. Online: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/847984/5b8bc23590d4cb2892b31c987ad672b7/2018-03-14-koalitionsvertrag-data.pdf?download=1>, aufgerufen am 20.09.2019
- [4] Regionaltabellen - Elektronisches Kursbuch. Online: [http://kursbuch.bahn.de/hafas/kbview.exe/dn?rt=1&dosearch=1&searchmode=tableplus&table\\_nr=%20&controlpattern=P.ddd&mainframe=utabile&tocinfo=reg\\_tab](http://kursbuch.bahn.de/hafas/kbview.exe/dn?rt=1&dosearch=1&searchmode=tableplus&table_nr=%20&controlpattern=P.ddd&mainframe=utabile&tocinfo=reg_tab), aufgerufen am 12.09.2019
- [5] Open Data - INSPIRE Themen. Online: [http://sg.geodatenzentrum.de/wms\\_dlm?50\\_inspire?REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=WMS](http://sg.geodatenzentrum.de/wms_dlm?50_inspire?REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=WMS), aufgerufen am 13.09.2019
- [6] Lasse Toylsbjerg-Petersen: Trains on Batteries. Online: [http://www.ig-nahverkehr.de/wp-content/uploads/2018/12/1330\\_RailCPH,7-Trains-on-batteries\\_presentation\\_for-the-webpage\\_0.pdf](http://www.ig-nahverkehr.de/wp-content/uploads/2018/12/1330_RailCPH,7-Trains-on-batteries_presentation_for-the-webpage_0.pdf), aufgerufen am 20.09.2019

# DISCOVER THE WORLD'S LEADING SPECIALIST MAGAZINE FOR THE AUTOMOTIVE SECTOR!

TAKE A FREE TEST DRIVE  
ATZ-MAGAZINE.COM

