

SCI Verkehr GmbH  
Köln, 05.11.2020

## **Innovatives Triebfahrzeug - Kurzbericht**

„Identifizierung von Forschungsansätzen und technischen Grundlagen zur Entwicklung eines leiseren, umweltfreundlicheren und betriebswirtschaftlich darstellbaren innovativen Triebfahrzeugs für bislang nicht elektrifizierte Netze“

Studie im Auftrag des  
**Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)**

Nicolas Wille (Projektleiter)  
Prof. Dr. Raphael Pfaff  
Dr. Roland Nolte  
Mark Vetter  
Martin Hohn  
Tim Tappert

Tel: +49 (221) 931 78-12  
Fax: +49 (221) 931 78-78  
Mail: [n.wille@sci.de](mailto:n.wille@sci.de)

## 1 Aufgabenstellung und Vorgehen

Um die Dekarbonisierung im Verkehr voranzutreiben und das Ziel eines CO<sub>2</sub>-neutralen Verkehrs im Jahr 2050 zu erreichen, hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) die vorliegende Studie in Auftrag gegeben. Das Ziel war eine Bestandsaufnahme der in Deutschland aktuell eingesetzten und durch Neuanschaffung für den Einsatz auf nicht-elektrifizierten Strecken vorgesehenen Triebfahrzeuge sowie die Erhebung und Bewertung der Lärmemission, des Schadstoffausstoßes und der CO<sub>2</sub>-Einsparung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Die Darstellung des Marktüberblicks über die Triebfahrzeuge erfolgt nach Antriebsart, Altersstruktur, Verkehren und Streckencharakteristiken (Infrastruktur mit/ohne Oberleitung) sowie jeweils für den Schienenpersonen- und Schienengüterverkehr.

Neben dieser Bestandsaufnahme ist der Stand der Wissenschaft und Technik von Triebfahrzeugen im Hinblick auf Möglichkeiten der Dekarbonisierung, Reduzierung von Luftschadstoffen und Minderung der Geräuschemissionen für bislang nicht elektrifizierte Netze analysiert und einschließlich der Betriebswirtschaftlichkeit und des Marktpotenzials bewertet worden. Dabei wurde nach Einsatzarten im Schienenpersonennahverkehr, im Schienenpersonenfernverkehr, im Schienengüterverkehr auf der Strecke und auf der letzten Meile sowie im Rangierbetrieb differenziert.

Die Studie zeigt auf, für welche Streckenart bzw. Einsatzmöglichkeit volkswirtschaftlich relevanter Forschungsbedarf im Hinblick auf eine signifikante Reduzierung von CO<sub>2</sub>, Luftschadstoffen und Lärmemissionen gesehen wird. Dabei wird ebenfalls die betriebswirtschaftliche Darstellbarkeit berücksichtigt. Für diesen Fall werden konkrete Anforderungen an das zu realisierende Projekt definiert und Lücken im derzeit verfügbaren Produktportfolio aufgezeigt. Ferner werden die Zeitrahmen zur Umsetzung von Projekten abgeschätzt. In der Gesamtschau werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Technologien ersichtlich. Die konkreten Ansatzpunkte, um Hemmnisse abzubauen, sind dargestellt.

Die nachfolgende Übersicht der Arbeitspakete enthält die grundlegenden Aufgabenstellungen im Projektverlauf:



Abbildung 1: Ablaufschema des Projektes

Federführend bei der Bearbeitung des Projektes zeichneten sich die **SCI Verkehr GmbH** (Gesamtprojekt sowie AP1 und AP5), die **FH Aachen** (AP2 und AP3) sowie das **IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung** (AP4).

## 2 Ergebnisse und Ausblick

Folgende Ergebnisse ergaben sich aus der Bearbeitung der Arbeitspakete 1 bis 4 und wurden – differenziert für den Personen- und Güterverkehr – zusammenfassend im AP 5 dargestellt:

### Personenverkehr

Bei der Bestandsaufnahme erfolgte eine Unterteilung des Marktes in nachfolgende Segmente. Um zielgerichtet Forschungsbedarfe zu ermitteln, wurde neben der Relevanz der Segmente im Hinblick auf ihre Flottengröße auch der **Forschungsimpact** bewertet, d.h. die Möglichkeiten und Potenziale, alternative Antriebe in einem Segment bedarfsgerecht zu implementieren. Dargestellt wird diese Größe in nachfolgenden Grafiken durch die Anzahl Sterne – die Flottengröße durch den Füllgrad nebenstehender Kreise.

Verkehrsart	Commuter (S-Bahn) Städtische oder stadtnahe Pendlerverkehre mit hohem Verkehrsaufkommen	Regionalverkehr/ Regionalbahn Anbindung ländlicher und suburbaner Gebiete	Regionalexpress Hochwertige Regionalverkehre mit eher längeren Reiseweiten, z.T. in Ergänzung zum IC	Intercity Fernverkehr exkl. ICE, i.d.R. IC	Hochgeschwindigkeitsverkehr Hochgeschwindigkeitszüge im Fernverkehr, i.d.R. ICE
Projektrelevanz	Komplett elektrifiziert ~ 1.700 Züge 0% Diesel	Hohes Potenzial durch Einsatz emissionsärmerer Fahrzeuge ~ 3.800 Züge ~70% Diesel	Großteils elektrifiziert, z.T. heute (noch) in Dieseltraktion 200-250 Züge ~20% Diesel	Größtenteils elektrifiziert ~ 260 Züge (2/3 Lok-bespannt) <5% Diesel	Komplett elektrifiziert ~ 220 Züge 0% Diesel

Abbildung 2: Segmentierung Schienenpersonenverkehr (Kreise: Mengeneffekt; Sterne: Forschungsimpact)

Im Personenverkehr sind die beiden nachfolgenden Segmente aufgrund eines signifikanten Anteils an Dieseltriebzügen (und teilweise dieselbetriebenen Lokomotiven) für das Projekt relevant:

- **Regionalbahn/-verkehr:** Ca. 2.500 momentan im Bestand eingesetzte Triebzüge in Dieseltraktion. Für dieses Segment wurde sowohl ein bedeutender Mengeneffekt als auch ein erheblicher Forschungsimpact ausgemacht.
- **Regionalexpress:** Ca. 50 momentan im Bestand eingesetzte Triebzüge in Dieseltraktion. Trotz der geringen Fahrzeugflotte bietet das Segment eine wesentliche Forschungsrelevanz.

Folgende Kernergebnisse wurden im Rahmen der Studie ermittelt:

- Der aktuelle und zukünftige Bedarf des Sektors zur Beschaffung innovativer Triebfahrzeuge liegt **bis zum Jahr 2030 bei etwa 1.350 Triebzügen** für den Einsatz auf nicht-elektrifizierten Strecken. Hinzu kommen weitere **1.150 Triebzüge bis zum Jahr 2050**.
- Im als realistisch eingeschätzten Szenario der zukünftigen Marktentwicklungen (insb. im Verkehrs- und Energiemarkt) lassen sich innovative Triebfahrzeuge mit alternativen Antrieben im Personenverkehr wirtschaftlich einsetzen. Trotz erforderlicher Investitionen in die Infrastruktur (z.B. Ladepunkte, Wasserstofftankstellen) ist der **Betrieb insb. bei Regionalbahnen wirtschaftlicher als mit konventionellen Fahrzeugen**, sofern die Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Preises den Plänen der deutschen Bundesregierung folgt.
- Sowohl batterieelektrische Produkte als auch wasserstoffbetriebene Fahrzeuge sind bereits im Einsatz bzw. Erprobung – lediglich **für Verkehrssegmente mit hohen Leistungsanforderungen** (RE- und IC-Verkehre) **sind aktuelle Antriebskonzepte noch weiterzuentwickeln**. Hierfür wird eine Entwicklungszeit von ca. 5 Jahren als realistisch eingeschätzt – federführend sind hierbei Fahrzeughersteller sowie Hersteller des Traktionsstrangs (die oftmals identisch sind).
- Zu den weiteren Forschungsbedarfen hinsichtlich einer Optimierung alternativer Antriebe im Personenverkehr zählen bis 2030 zudem:
  - Der **Pilotbetrieb energieeffizienter Klimasysteme** mit intelligenter Steuerung, die den Energieverbrauch an den jeweiligen Fahrzeugzustand anpassen. Somit kann der

Bordenergieverbrauch reduziert werden (CO2-Sensor, Einstellwerte, Zonierung...) und ggf. mit der Evaluation von HEPA-Filtern (und weiteren COVID-19 Maßnahmen) kombiniert werden.

- Der **Pilotbetrieb von Fahrassistenzsystemen**, die den Triebfahrzeugführer bei einer verbrauchsoptimierten Fahrweise zur Reduzierung des Traktionsenergiebedarfes unterstützen.

Adressaten für die beiden o.g. Punkte sind Subsystemhersteller. Aufgrund der bereits im Markt vorhandenen Produkte dürfte die benötigte F&E-Zeit bei etwa 2-3 Jahren liegen.

## Güterverkehr

Bei der Bestandsaufnahme erfolgte eine Unterteilung des Marktes in folgende Segmente:

Verkehrsart	Leichte Rangierverkehre Zugbildung, Zuführungen (Waschanlage, Werkstatt), Gleisanschlussbedienung	Schweres Rangieren Industrie, Zugbildungsanlagen	Nahverkehrsbedienung Feeder-Verkehre zu größeren Knotenpunkten, Sammlung von Wagengruppen in der Fläche (inkl. Rangieren)	Streckenfahrten Verkehre auf Hauptstrecken als Zubringer zu Korridoren, aber auch vielfach Relationen außerhalb existierender Korridore	Korridor-Streckenfahrten Verkehre auf großen Güterverkehrskorridoren
Projekt-Relevanz	Segment verliert an Bedeutung - Substitution durch 2-Wege-Assets ~ 600 Lokomotiven ~100% Diesel	Großer Bestand - Kein Lok-Substitut vorhanden - Emissionsminderung ~ 2.000 Lokomotiven ~100% Diesel	Energie- und Flottenoptimierung - Potenzial: moderne Bedienkonzepte 250-300 Lokomotiven ~100% Diesel	Dual-Mode Konzepte in der Zulassung - Dieselmotor erforderlich 1.300-1.400 Lokomotiven ~35% Diesel	Größtenteils elektrifiziert ~ 1.100 Lokomotiven <1% Diesel

Abbildung 3: Segmentierung Schienenpersonenverkehr (Kreise: Mengeneffekt; Sterne: Forschungsimpact)

Für das Projekt sind aufgrund der Fahrzeuganzahl sowie des hohen Anteils an Dieseltraktion bei gleichzeitig fehlenden Substitutionsprodukten vor allem folgende Segmente relevant:

- **Schweres Rangieren:** Ca. 2.000 momentan im Bestand eingesetzte Diesellokomotiven
- **Nahverkehrsbedienung:** Ca. 250-300 momentan im Bestand eingesetzte Diesellokomotiven
- **Streckenfahrten** (außerhalb von Korridoren): Ca. 450 momentan im Bestand eingesetzte Diesellokomotiven

Folgende Kernergebnisse wurden im Rahmen der Studie ermittelt:

- Der Bedarf des Sektors zur Beschaffung innovativer Lokomotiven liegt **bis zum Jahr 2050 bei etwa 2.000 Fahrzeugen für schwere Rangieraufgaben, 250 Lokomotiven für die Nahverkehrsbedienung** auf nicht-elektrifizierten Strecken **sowie 400-500 Lokomotiven für Streckenfahrten** außerhalb der Korridore.
- Derzeit verfügbare Produkte im Bereich alternativer Antriebe bei Lokomotiven sind ausschließlich **Hybrid- bzw. Dual-Mode-Fahrzeuge** sowie **batterieelektrische Rangierlokomotiven**. Bis 2030 könnten batterieelektrische Antriebe auch für die Nahverkehrsbedienung vorliegen, sofern die **F&E-Bemühungen** in diesem Segment unterstützt werden. In beiden Segmenten (Rangierbetrieb und Nahverkehrsbedienung) ist bis 2030 von einem Bedarf des Sektors von jeweils 80-100 Fahrzeugen auszugehen.
- Zum Abbau wirtschaftlicher Hemmnisse ist für den Einsatz batterieelektrischer Lokomotiven im Rangiersegment und der Nahverkehrsbedienung ggf. ein **Umrüstungskonzept** zu entwickeln, da Neufahrzeuge (ohne Förderung / Incentivierung) wirtschaftlich nicht darstellbar sind. Hier könnte ein Pilotprojekt zur Umrüstung von Bestandslokomotiven im Rangierbetrieb auf batterieelektrischen Antrieb zur Erprobung und Verifizierung möglicher Betriebskostenvorteile und Überwindung operativer Hemmnisse aufgesetzt werden. Im Zeitraum von 3 Jahren dürfte die Betriebserprobung valide Ergebnisse für weitere F&E-Maßnahmen bringen.
- Im Streckenverkehr hingegen wäre der Einsatz alternativer Antriebe (vor dem Hintergrund zunehmender CO2-Bepreisung) **wirtschaftlich gut darstellbar**. Umso dringender sind hier (die bislang fehlenden technologischen) Lösungen zu finden. Aufgrund der Tatsache, dass für die

Leistungsanforderungen im Streckenverkehr bislang keine alternativen Antriebe geeignet sind, besteht hier erheblicher Forschungsbedarf. Bis 2030 (evtl. sogar bis 2035) werden **keine batterieelektrischen Produkte oder wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge marktreif** sein.

- Forschungsansätze für **Energiespeicher bzw. Brennstoffzellen für hohe Leistungsanforderungen** (Streckenverkehre) sind zu entwickeln bzw. aus anderen Anwendungsbereichen zu adaptieren. Da grundlegende technologische Herausforderungen zu meistern sind und erst anschließend eine Adaption für den Schienenverkehr erfolgen kann, ist von einer Entwicklungszeit von mindestens 10 Jahren auszugehen.

Nach einer umfangreichen Analyse vorhandener und in der Entwicklung befindlicher Antriebstechnologien wurden diese im Hinblick auf ihre Eignung in den verschiedenen Verkehrssegmenten näher untersucht. Die Auftragnehmer haben hierfür verschiedene Betriebsszenarien simuliert und dabei den Elektrifizierungsgrad der Strecken variiert. Aus der Simulation der betrieblichen Gegebenheiten folgt je untersuchtem Betriebsszenario im Hinblick auf die benötigte Speichergröße eine Eignungseinschätzung für die jeweilige alternative Antriebsart.

Zusammenfassend lässt sich herausstellen, dass im **Personenverkehr** Wasserstofflösungen (HMU) bei nicht-elektrifizierten Profilen sowie im leistungsintensiveren RE-Verkehr die Vorzugslösung darstellen. Demgegenüber ist die batteriebetriebene Variante (BEMU) vor allem bei Strecken mit höherem Elektrifizierungsgrad im Regionalbahn- sowie im fast vollständig elektrifizierten RE-Verkehr besonders geeignet. Diesel-Vollhybride (BDMU) und Diesel-Oberleitungs-Fahrzeuge (DEMU) sind nach Abwägung und Bewertung aller Aspekte in keinem der Betriebsszenarien als Vorzugslösung gegenüber HMU und BEMU anzusehen.

Im **Güterverkehr** stellt die Wasserstofflösung (H-Lok) lediglich im nicht-elektrifizierten Streckenverkehr die Vorzugslösung dar. Für die übrigen Betriebsszenarien sieht das Projektteam wesentliche Vorteile der BE-Lok (Batterieantrieb mit Oberleitung) gegenüber einer Wasserstoffvariante. Analog zum Personenverkehr stellen Diesel-Vollhybride zwar eine potenziell geeignete Lösung dar, jedoch keine Vorzugslösung gegenüber vollständig alternativ angetriebenen Lokomotiven.

Da noch nicht alle oben genannten Antriebstechnologien am Markt verfügbar sind, sondern sich vielfach in der Entwicklung befinden, haben die Auftragnehmer im Projektverlauf fünf wesentliche Cluster analysiert, welche als Hemmnisse der Marktreife und -einführung dieser Technologien entgegenstehen.



Abbildung 4: Identifizierte Hemmnisse

Um Hemmnisse in diesen Clustern zu überwinden, wurden sowohl konkrete Handlungsempfehlungen als auch langfristig-strategische Handlungsempfehlungen für das BMVI abgeleitet. Da diese zeitlich unterschiedlich relevant sind, wurden sie in nachfolgenden „Roadmaps“ dargestellt und in konkrete Maßnahmen bis zum Jahr 2030 sowie mittel- bis langfristige zu realisierende Maßnahmen unterteilt (siehe folgende Seite) – dabei liegen derzeit technologische Hemmnisse vor allem bei Fahrzeugen mit hohem Leistungsbedarf vor:

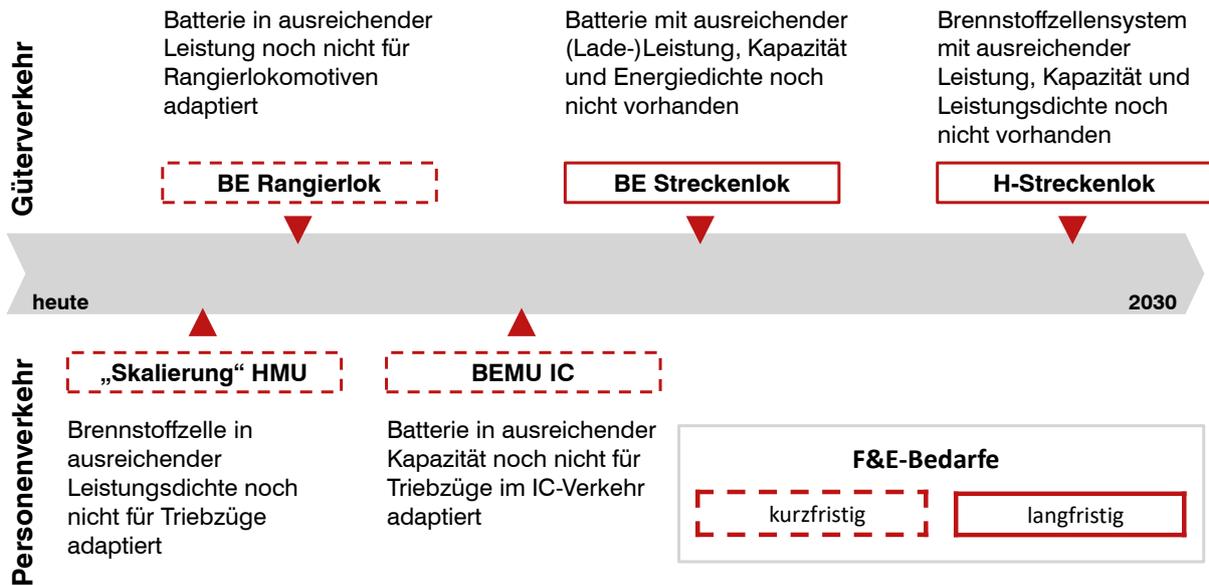


Abbildung 5: Technologische Hemmnisse nach Güter- und Personenverkehr

Im **Schienepersonenverkehr** ergeben sich Potenziale durch Optimierung des (Bord-)Energiebedarfs sowie durch eine Hochskalierung vorhandener Lösungen (z.B. HMU für RE-Verkehre). Um die Klimaziele der Bundesregierung 2050 zu erreichen, muss ein Großteil der RB-/RE-Flotten nach 2030 erneuert und modernisiert werden (z.B. BEMU/HMU). F&E-Projekte im können kurzfristig wesentlich zu einer Flottenerneuerung beitragen, sind jedoch auch mittelfristig von Relevanz.

Im **Schiengüterverkehr** liegen wesentliche Forschungsbedarfe für alternative Antriebe im Bereich des schweren Rangierens und der Streckenfahrten. Hierbei ist eine Erneuerung/Modernisierung der Lokomotivflotte hauptsächlich nach 2030 erforderlich, um die Klimaziele der Bundesregierung 2050 zu erreichen. Für Lokomotiven sind vielfach keine leistungsstarken, alternativen Antriebe vorhanden – F&E-Projekte sollten jetzt beginnen, um nach 2030 marktwirksam zu sein.