

FuE-Programm "Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität" des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

Gemeinsamer Abschlussbericht

Vorhabenbezeichnung:

ENUBA 2

-

Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen

Laufzeit des Vorhabens:

vom: 01.05.2012

bis: 31.12.2015

Zuwendungsempfänger:
(Auflistung aller Verbundpartner)

Siemens AG - Mobility Division
Technology and Innovation
Otto-Hahn-Ring 6
81739 München

Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Professur für Elektrische Bahnen
Hettnerstraße 1-3
01062 Dresden

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verkehrssystemtechnik
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig

Förderkennzeichen:
(FKZ's entsprechend der links angegebenen Verbundpartner)

16EM1010

16EM1011

16EM1104

ENUBA 2

**Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen
zur Umweltentlastung von Ballungsräumen**

**Schlussbericht der Verbundforschungspartner
Siemens AG, TU Dresden und DLR**
Version V3 vom 31. August 2016

Projektlaufzeit: 01.05.2012 - 31.12.2015
FKZ: 16EM1010, 16EM1011, 16EM1104

Gefördert mit Mitteln des



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter den Förderkennzeichen 16EM1010, 16EM1011 und 16EM1104 gefördert. Die inhaltliche Verantwortung liegt bei der Siemens AG. Die in diesem Bericht und den zugehörigen Anlagen enthaltenen Informationen sind im Rahmen der Regelungen des ENUBA 2-Förderprojektes Eigentum der Siemens AG sowie der Verbundforschungspartner.

Executive Summary

The research project ENUBA 2¹ continued its predecessor ENUBA that started in 2010 with the systematic research into technological options to propel heavy commercial vehicles electrically over long distances. The developed concept featured an external direct current power supply with a bipolar overhead contact line system and newly designed adaptive current collectors to transfer the electric energy from the contact line to the vehicles. As connection and disconnection are possible at all speeds the hybrid electric trucks are as flexible as conventional vehicles in terms of driving behavior and usability.

While the first project phase concentrated on the initial conceptual development and on electric and mechanic trials the second project ENUBA 2 starting in May 2012 had a much wider, interdisciplinary approach. This final report describes in detail the aims, methods and results of the joint research and development project funded by the German Federal Ministry for the Environment.

The core aspects of the research and development work were:

- substantial redesign and optimization of the current collector (so-called pantograph) to fit into tractor trucks in terms of weight and space claim
- cooperation with the Sweden based truck manufacturer Scania AB (part of Volkswagen AG) to integrate the redesigned pantograph into a hybridized tractor truck
- comprehensive technical evaluation of the electrification concept with regard to infrastructure integration and electric vehicle operation into the existing highway conditions under supervision of the Federal Highway Research Institute (BAST²) being a subsidiary authority of the German Federal Ministry of Transport
- comprehensive ecological and economical evaluation of the integrated concept with regard to environmental benefits and interests of logistics operators under supervision of the Federal Environment Agency (UBA³) being a subsidiary authority of the German Federal Ministry for the Environment and further acknowledged research institutions
- design, integration, implementation and testing of a multi-hybrid tractor truck and trailer concept equipped with a pantograph on the tractor and a large battery in the trailer for full electric operation in both, electrified and not electrified network sections

The technical, ecological and economical evaluations as well as some of the research related tasks were conducted as a joint research project with the renowned academic and scientific partners Dresden University of Technology and German Aerospace Centre (DLR).

Electrifying an existing high performance traffic system with specialized and demanding stakeholders for all aspects and dimensions is a challenging task. In the given framework the overall project results can be considered as substantially achieved. The developed and evaluated electrification concept combines technical maturity with economic benefits and provides the most viable electric mobility solution for long-haul or heavy duty vehicles.

Due to the positive results of the ENUBA 2 project several interrelated work streams and initiatives were started to continue research work towards a decarbonized transport sector. These works include:

- integration of the electrification concept into national and international technology roadmaps to reduce road traffic emissions and to meet strategic climate protection goals
- public field trials and demonstration projects in Sweden, California and Germany to validate system behavior in logistic operations under day-to-day conditions
- continuation of industrial research to optimize component characteristics and system layout publicly funded by the German Federal Ministry for the Environment

¹ ENUBA - German for: Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen meaning: "Electric mobility for heavy-duty vehicle to limit environmental impact in conurbations"

² BAST - German for: Bundesanstalt für Straßenwesen

³ UBA - German for: Umweltbundesamt

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG UND ZIELSTELLUNG	6
1.1	Gesamtziel des Verbundvorhabens	6
1.2	Einordnung des Projekts ENUBA 2 in den förderpolitischen Rahmen.....	8
2	VORAUSSETZUNGEN UND STRUKTUR DES PROJEKTS.....	9
2.1	Organisatorische Voraussetzungen des Vorhabens.....	9
2.2	Stand der Technik zu Projektbeginn	10
2.2.1	Technologiebasis ENUBA (Erste Projektphase).....	10
2.2.2	Hybridisierung in der LKW-Branche	11
2.3	Projektstruktur und Arbeitsziele	12
2.3.1	Projektstruktur und Aufgabenteilung zwischen den Verbundpartnern	12
2.3.2	Ziele und Inhalte der Haupthandlungsstränge	14
2.3.2.1	<i>Interdisziplinäre Bewertung und Konzeption für Erstanwendungen - KA.....</i>	<i>14</i>
2.3.2.2	<i>Konzepte und Weiterentwicklung für Erprobung auf Versuchsanlage - KE</i>	<i>15</i>
2.3.2.3	<i>Neubau Versuchsanlage und Fertigung Prototypen - VE.....</i>	<i>16</i>
2.3.2.4	<i>Erprobung im Labor, auf der Versuchsanlage und auf BAB - EP.....</i>	<i>17</i>
2.3.3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	18
2.3.3.1	<i>Wesentliche interne Partner</i>	<i>18</i>
2.3.3.2	<i>Wesentliche externe Partner im Bereich „FuE-Fremdleistungen“.....</i>	<i>18</i>
2.3.3.3	<i>Wesentliche Partner im Bereich „Sonstige Leistungserbringer“.....</i>	<i>19</i>
3	ERGEBNISSE DES FÖRDERVORHABENS.....	20
3.1	Interdisziplinäre Bewertung und Konzeption Erstanwendungen - KA.....	20
3.1.1	Technischer Bewertungsprozess	20
3.1.2	Ökonomisch-ökologischer Bewertungsprozess	28
3.1.3	Rechtliche Bewertung.....	33
3.1.4	Konzepte für elektrifizierte Nutzfahrzeuge.....	35
3.1.5	Rahmenbedingungen des Netzaufbaus	39
3.1.6	Smart-Road-Applikationen für den eHighway.....	44
3.2	Konzepte und Weiterentwicklung für Erprobung auf Versuchsanl. - KE.....	48
3.2.1	Entwicklung eines Stromabnehmertyps zur Integration in Sattelzugmaschinen	48
3.2.2	Hybridisierte Sattelzugmaschine von Scania.....	53
3.2.3	Energienetz- und Verkehrsmanagement - Technisches Monitoring	55
3.2.4	Energiemessung und Abrechnung	60
3.3	Neubau Versuchsanlage und Fertigung Prototypen - VE	61
3.3.1	Umzug und Neubau der Versuchsanlage - Flächenplan.....	61
3.3.2	Einrichtungen der Straßenverkehrstechnik.....	62
3.3.3	Neubau und Änderungen am Fahrleitungssystem	64
3.3.4	Änderungen an der Stromversorgung	68
3.3.5	Integration von Stromabnehmer und Sattelzugmaschine.....	69
3.4	Erprobung im Labor, auf Versuchsanlage und BAB - EP.....	70
3.4.1	Testplanung	70
3.4.2	Erprobung der Scania-Sattelzugmaschine auf der Versuchsanlage.....	72
3.4.3	Externe Laboruntersuchungen an der Scania-Sattelzugmaschine.....	75
3.4.4	Untersuchungen zur Kontaktgüte Stromabnehmer - Fahrleitung	77
3.4.5	Weiterführende Emissions- und Immissionsmessungen.....	83
3.4.6	Systemtests in Grenzsituationen.....	85

3.5	Konzeption und Erprobung einer SZM mit Traktionsbatterie im Trailer	86
3.5.1	Motivation und Fahrzeugkonzept	86
3.5.2	Hauptkomponenten und Umrüstung des Fahrzeugs	87
3.5.3	Inbetriebnahme und Erprobung	88
4	WEITERENTWICKLUNGEN DURCH DRITTE - EINORDNUNG DER PROJEKTERGEBNISSE	91
4.1	Dekarbonisierung und Electric Road Systems (ERS)	91
4.2	Alternativtechnologien für Electric Road Systems	92
4.3	Internationalisierung der eHighway-Technologie	95
4.4	Einordnung der Projektergebnisse des Verbundvorhabens	97
5	FÖRDERZIELE UND ZUKUNFTSAUSSICHTEN	98
6	ANHANG	101
6.1	Abkürzungen	101
6.2	Quellen	104
6.3	Abbildungsverzeichnis	108
6.4	Tabellenverzeichnis	110
7	ANLAGEN	110

1 Einführung und Zielstellung

1.1 Gesamtziel des Verbundvorhabens

Ein zuverlässiger und schneller Straßengüterverkehr ist für hochproduktive, stark verflochtene Volkswirtschaften von hoher Bedeutung. Gleichzeitig steht die Transportwirtschaft angesichts der absehbaren Verknappung des für den Lkw-Verkehr wichtigen Energieträgers Erdöl, der hohen verkehrsbezogenen Emissionen in Ballungsräumen sowie der hinsichtlich CO₂-Emissionen ehrgeizigen Klimaschutzziele vor gewaltigen Herausforderungen, die gemeistert werden müssen, um auch zukünftigen Anforderungen hinsichtlich Quantität, Qualität und Bezahlbarkeit von Transportleistungen gerecht zu werden und dabei nicht die Lebensqualität künftiger Generationen unzulässig einzuschränken.

Diese Überlegungen waren bereits Ausgangspunkt des Projekts ENUBA (Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen), in dem bis September 2011 eine Vorzugslösung zum Einsatz elektrischer Energie im Straßengüterverkehr erarbeitet und mit Funktionsmustern bzw. Prototypen zentraler Komponenten und Teilsysteme erprobt wurde. Aufbauend auf den im Forschungsvorhaben ENUBA erzielten Ergebnissen (s. Projektabschlussbericht [1]) und motiviert durch die erneute Bekanntmachung von Fördermitteln im Bereich der Elektromobilität [2] wurden die Arbeiten im Projekt ENUBA 2 mit Förderung ab Mai 2012 fortgesetzt.

Kennzeichnend für die im Rahmen der ENUBA-Projekte entwickelte eHighway-Technologie ist die Einbettung eines elektrischen Verkehrssystems, bestehend aus einer Oberleitungsinfrastruktur, Fahrzeugen mit Stromabnehmern und Leittechnik, in einen existierenden Verkehrsträger, dessen Fahrweg, Fahrzeuge und Verkehrsleittechnik bereits spezifischen Anforderungen unterliegen. Aus dieser Komplexität leiten sich zahlreiche technische, nicht-technische und wissenschaftliche Entwicklungs- und Integrationsaufgaben ab, die sich mit der erforderlichen Tiefgründigkeit nur durch eine Zusammenarbeit qualifizierter Verbundpartner erfolgreich lösen ließen. Koordiniert durch die Siemens AG wurden die vielfältigen Aufgaben zusammen mit der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden und dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik als Verbundforschungspartner bearbeitet. Eine weitere Säule des Projekts war die Kooperation mit Scania beim Aufbau einer hybridisierten Sattelzugmaschine, die mit einem weiterentwickelten Stromabnehmer ausgerüstet wurde.

Übergeordnetes Ziel von ENUBA 2 war die Weiterentwicklung der Vorzugslösung, um zum Abschluss des Projekts eine seriennahe und im Rahmen einer ersten Pilotstrecke im öffentlichen Raum einsatzreife Gesamtlösung anbieten zu können und Integrationslösungen für weitere Nutzfahrzeugklassen, insbes. Sattelschlepper, zu entwickeln. Dementsprechend hatte das Projekt zwei Hauptziele:

- Ausdifferenzierung und Optimierung der technischen Vorzugslösung für die Elektrifizierung von Autobahnen einschließlich umfassender Weiterentwicklungen zentraler Komponenten und Fortsetzung der praktischen Erprobung von Infrastruktur und Fahrzeugen.
- Interdisziplinäre Analyse und Bewertung der verkehrs- und energietechnischen, ökonomischen, ökologischen und rechtlichen Aspekte im Kontext der eHighway-Technologie. Ergebnisse sind die Identifizierung normativer und rechtlicher Regelungsspielräume und -defizite sowie abgeleitete Maßnahmen, um einerseits bei einer ersten Pilotstrecke den öffentlichen oder individuellen Belangen Rechnung tragen und um andererseits auch für darüberhinausgehende Einsatzgebiete Entwicklungspfade und Auslegungsrichtlinien erarbeiten zu können.

Zur Erreichung der übergeordneten Ziele wurden in den Handlungssträngen Gesamtsystem und Infrastruktur, Fahrzeug und Stromabnehmer sowie bei der wissenschaftlichen Begleitforschung zahlreiche Teilaufgaben identifiziert und bearbeitet, die den Kern des vorliegenden Abschlussberichts bilden.

Der Themenkomplex Gesamtsystem und Infrastruktur, verantwortet durch die Siemens AG, umfasste folgende Schwerpunkte:

- Neuerrichtung der Versuchsanlage mit erweitertem Funktionsumfang, u. a. durch verkehrsleittechnische Einrichtungen, angepasste Fahrleitungskonstruktionen, Fahrzeugrückhaltesysteme und Kurvenabschnitte zur intensiven Erprobung im straßenverkehrstypischen Umfeld
- Weiterentwicklung des anspruchsvollen Schutz- und Notfallkonzepts für ein elektrisches Verkehrssystem mit zahlreichen, individuellen Fahrzeugen im Mischbetrieb mit nichtelektrischen Fahrzeugen unter Einbeziehung der Verkehrsleittechnik und des Kommunikationskonzepts

- Neuentwicklung eines umfassenden Kommunikations- und Telematikkonzepts, um die Schnittstellen des Systems zu Bedienern, Nutzern und Betreibern für die Funktionen Nutzerregistrierung und –berechtigung, Energieabrechnung, Verkehrsdiagnose und -beeinflussung etc. zu definieren und zu erproben

Im Themenkomplex Fahrzeug und Antriebssystem übernahm die Siemens AG im Rahmen des Projekts die Gesamtverantwortung für die Versuchsfahrzeuge und die Integrationsaufgaben, stimmte sich dabei aber inhaltlich mit dem Nutzfahrzeughersteller Scania als Kooperationspartner für die erste Sattelzugmaschine ab. Ziel der fahrzeugspezifischen Themen war, Integrations- und Antriebslösungen ohne Einschränkung von Ladungsvolumen und -gewicht für verschiedene Fahrzeugkonzepte (wie z. B. Solo-Lkw oder Sattelschlepper) und mit definierten, kompatiblen Schnittstellen zu entwickeln.

Die zentralen Arbeitsziele in diesem Komplex waren:

- Aufbau einer Sattelzugmaschine mit neuentwickelter, verbesserter Integration von Stromabnehmer und Antrieb in Kooperation mit einem Nutzfahrzeughersteller.
- Umfangreiche Überarbeitung des Stromabnehmers, um diesen von einem Funktionsmuster in einen günstigeren, kleineren und besser integrierbaren Basisentwurf zu überführen.
- Weiterentwicklung des Fahrzeugschutzkonzepts, um in allen Betriebsmodi und im gesamten Geschwindigkeitsbereich sicher fahren und Gefährdungen Dritter ausschließen zu können.

Für die letzte Projektphase wurden als zusätzliche Arbeitsziele der Aufbau einer weiteren hybridisierten Sattelzugmaschine sowie die Integration einer großen Traktionsbatterie in einen Auflieger aufgenommen. Diese Zugmaschine sollte in Eigenregie mit einem seriellen Hybridantriebssystem ausgestattet und für die Erprobung im Speditionsalltag vorbereitet werden.

Als ausgewiesenes Kompetenzzentrum für verkehrstechnische und –wirtschaftliche Themen war die Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden Forschungspartner im Verbundvorhaben und verantwortete wesentliche Aspekte der interdisziplinären Bewertung des Systems:

- Bewertung der systemtechnischen, ökologischen und ökonomischen Machbarkeit der Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs auf hochbelasteten Autobahnabschnitten unter Berücksichtigung von u. a. Verkehrsaufkommen und -entwicklung, Emissionen, Elektrifizierungswürdigkeit
- Kooperative Bearbeitung der Fragestellungen hinsichtlich der Einbettung der Elektrifizierungsinfrastruktur in das straßenverkehrstechnische Umfeld in Abstimmung mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) unter Berücksichtigung der Strecken- und Bauwerkscharakteristik zur Beschreibung geeigneter Basislösungen sowie zur Ermittlung der Anforderungen an angepasste Infrastrukturlösungen
- unabhängige, sicherheitstechnische Begutachtung des Sicherheits- und Schutzkonzeptes unter Berücksichtigung straßenverkehrstechnischer und elektrotechnischer Aspekte

Weiterhin bereicherte das DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik mit seinen Kompetenzen in der anwendungsorientierten Automotive-Forschung das Projekt ENUBA 2 mit folgenden Arbeitspaketen:

- Simulatorstudien zur psychologischen Wirkungsuntersuchung auf Verkehrsteilnehmer, insbesondere hinsichtlich sicherheitsrelevanter Aspekte und der Akzeptanz des Systems
- Interaktionsdesign für die Stromabnehmer-Bedienung im Lkw-Cockpit, um dem Fahrer neben einfacher Bedienung verständliche Informationen über den Systemzustand bereitzustellen
- Identifizierung und Erprobung ausgewählter Funktionen der „eTruck2Infrastructure“-Kommunikation unter effizienter Nutzung der eHighway-Infrastruktur

Zur Erreichung weiterer wissenschaftlicher und technischer Ziele wurden zusätzlich externe Akteure mit ihrer jeweils branchenspezifischen Kompetenz einbezogen. Hervorzuheben dabei sind:

- Einbeziehung der Speditions- und Logistikbranche bei der Validierung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Spediteure sowie bei der technischen Ausgestaltung des Systems
- Vertiefung der rechtlichen Untersuchungen zu den Planungsschritten und -verfahren für Pilotanwendungen sowie zur Zulassung neuer Hybridfahrzeuge für den Straßengüterverkehr in Zusammenarbeit mit dem IKEM (Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität) sowie TÜV
- Durchführung von fahrzeug- und systemspezifischen Sicherheitsanalysen und Komponentenprüfungen durch den Automotive-Entwicklungspartner EDAG

1.2 Einordnung des Projekts ENUBA 2 in den förderpolitischen Rahmen

Der fortgesetzt hohen Relevanz der Elektromobilität bei der Beantwortung zukünftiger Herausforderungen im Verkehrssektor und bei der Erfüllung der Klimaschutzziele tragen die Bundesregierung und die Fachministerien Rechnung, in dem z. B. Forschungsprogramme fortgeschrieben und Fördermittel für Forschungsprojekte zur Verfügung gestellt werden. Für das Projekt ENUBA 2 wurden Fördermittel auf Grundlage der Förderbekanntmachung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) [2] beantragt. Das Projekt ENUBA 2 setzt damit Untersuchungen zum Einsatz der Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen fort. In Tabelle 1 werden diejenigen förderrelevanten Themen und Ziele aus [2] zusammengestellt, die im Rahmen des Projekts ENUBA 2 aufgegriffen und bearbeitet werden.

Tabelle 1 Im Projekt ENUBA 2 aufgegriffene Förderziele und -themen nach [2]

Abschnitt	Ziele und Forschungsthemen
1. Zielsetzung der Förderung	<ul style="list-style-type: none"> • Einzelfallförderung von Projekten mit besonderer wissenschaftlicher, technischer oder wirtschaftlicher Bedeutung und hoher Relevanz für die Entwicklung Deutschlands zum Leitmarkt für Elektromobilität
2.1 Ermittlung der Umwelt- und Klimafaktoren durch Feldversuche im Wirtschaftsverkehr	<ul style="list-style-type: none"> • Technologieerprobung im realen Betrieb hinsichtlich Reife und Nutzerakzeptanz • Untersuchung verschiedener Optimierungsansätze hinsichtlich CO₂-Emissionen, Energieeinsatz und Abhängigkeit von Ressourcen • Lebenszykluskosten für bestimmte Fahrzeugkategorien und Einsatzspektren • Untersuchungen zu Schallemissionen von Elektrofahrzeugen
2.2 Kopplung der Elektromobilität an erneuerbare Energien und deren Netzintegration	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung und Erprobung zuverlässiger Verfahren zur Kopplung der Elektromobilität an erneuerbare Energien sowie zur Rückspeisung elektrischer Energie in das Stromnetz • Entwicklung von Methoden zur Vermeidung von Spitzenlasten • Analyse der Netzauswirkungen von Verfahren zum gesteuerten Laden
2.3 Markteinführung mit ökol. Standards	<ul style="list-style-type: none"> • Identifizierung von Flottenanwendungen mit dem größten ökologischen Mehrwert • Untersuchungen zum ökologisch orientierten Flottenmanagement
2.4 Ressourcenverfügbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung des Rohstoffbedarfs und Entwicklung einer Ressourcenstrategie zur Sicherung der Nachhaltigkeit der entwickelten Elektromobilitätslösung • Studien zu Logistikkonzepten und Geschäftsmodellen

Neben den technisch und wirtschaftlich spezifischen Themen in Tabelle 1 ordnet sich das Projekt ENUBA 2 darüber hinaus in folgende Rahmenforschungsprogramme und Leitlinien ein:

- Mobilität und Verkehrstechnologien - 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung [3]
- Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung [4]
- Regierungsprogramm Elektromobilität [5]
- Mobilität und Verkehr - Nachhaltigkeit, Sicherheit und Wettbewerbsfähigkeit durch intelligenten Verkehr [6]

Aus der Zusammenschau der spezifischen Förderziele des BMUB und der Ziele und Leitlinien der Bundesregierung zur Verkehrsforschung und Förderung der Elektromobilität wird deutlich, dass das im Rahmen des Vorgänger-Projekts ENUBA [1] konzipierte und mit Funktionsmustern auf einer Versuchsanlage bereits erfolgreich erprobte Elektromobilitäts-Konzept für schwere Nutzfahrzeuge konsequent in Richtung einer Angebots- und Gesamtsystemreife für eine Pilotanwendung im öffentlichen Raum weiterentwickelt werden sollte.

Im ministeriumsübergreifenden Regierungsprogramm Elektromobilität [5] wurden als Leuchttürme bezeichnete Schwerpunkte der Förderung und Forschung benannt. Kurz nach dem Start wurde das Projekt ENUBA 2 im Juni 2012 als Leuchtturm-Projekt benannt und dem Themenschwerpunkt Mobilitätskonzepte zugeordnet [7]. Die Auswahl als Leuchtturm unterstreicht die Erwartungshaltung des BMUB, dass das mit ENUBA untersuchte Elektromobilitätskonzept für den schweren Straßengüterverkehr in besonderem Maße zum technologischen Fortschritt, zur Erschließung positiver Umwelt- und Klimawirkungen sowie zur Wirtschaftlichkeit der Elektromobilität beiträgt.

2 Voraussetzungen und Struktur des Projekts

2.1 Organisatorische Voraussetzungen des Vorhabens

Wesentliche Voraussetzungen für die verantwortliche Bearbeitung mehrerer Teilsysteme sowie die Übernahme der Gesamtkoordination durch die Siemens AG sind Expertise und langjährige Erfahrungen im Auf- und Ausbau leistungsfähiger Verkehrssysteme sowie in der Planung, Umsetzung und Koordination komplexer Infrastruktur- und Fahrzeuggroßprojekte. Als Systemhaus für elektrische Verkehrssysteme verfügt die Division „Mobility“ über umfassende Kompetenzen im gesamten Systemlebenszyklus von der Konzeption über die Detailplanung, Errichtung, Inbetriebnahme bis hin zu Betrieb und Instandhaltung kompletter Bahnsysteme und ihrer Komponenten für alle Einsatzgebiete im Personen- und Güterverkehr. Die führende Marktstellung der Siemens AG als Anbieter und Ausrüster von Verkehrssystemen dokumentieren weltweit erfolgreich realisierte Kundenprojekte.

Weitere Grundlagen für dieses Vorhaben bilden zahlreiche Entwicklungsprojekte der Siemens AG auf den Gebieten der Hybridantriebssysteme für Stadtbusse, der Bahnelektrifizierung sowie der Verkehrsmanagementsysteme. Darüber hinaus hat die Siemens AG mit der erfolgreichen Durchführung des Vorgängerprojektes ENUBA die nötigen Qualifikationen als Forschungspartner, Zuwendungsempfänger und interdisziplinärer Koordinator für komplexe Entwicklungsprojekte unter Beweis gestellt.

Die Ergebnisse des Projekts ENUBA 2 wurden als Verbundforschungsvorhaben mit den Kooperationspartnern Technische Universität Dresden und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt erarbeitet. Die Verpflichtungen und Rechte wurden mit einem Kooperationsvertrag geregelt.

Als ausgewiesenes Kompetenzzentrum für verkehrstechnische und –wirtschaftliche Themen wurden zentrale Aspekte der ökonomischen, ökologischen und technischen Bewertung des Gesamtsystems durch die Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden als Forschungspartner im Verbundvorhaben verantwortet, wobei eine enge Abstimmung mit der Gesamtprojektleitung stattfand. Seitens der TU Dresden waren folgende Fachbereiche und Professuren beteiligt:

- Elektrische Verkehrssysteme (Professur für Elektrische Bahnen)
- Straßenverkehrsanlagen (Professur für Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen)
- Ökologische Wirkungen (Professur für Verkehrsökologie)
- Psychologische Wirkungen (Professur für Verkehrspsychologie)
- Lärmemissionen von Verkehrssystemen (Professur für Dynamik und Mechanismentechnik)

Neben der wissenschaftlichen Begleitforschung durch die TU Dresden wurde das DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik in Braunschweig aufgrund seiner langjährigen internationalen Erfahrungen in den Bereichen Interaktionsgestaltung, Automatisierung sowie Integration und Implementierung innovativer Lösungen im Straßenverkehr für einige ausgewählte Arbeitspakete als Verbundforschungspartner gewonnen.

Zu Beginn der Projektlaufzeit konnten die intensiven Gespräche mit verschiedenen Nutzfahrzeugherstellern soweit konsolidiert werden, dass mit Wirkung ab Januar 2013 der schwedische Nutzfahrzeughersteller Scania im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung gemeinsam mit der Siemens AG begann, Fahrzeuge und Infrastrukturen für den elektrifizierten Straßengüterverkehr in verschiedenen Einsatzgebieten zu entwickeln. Das bereits im Jahr 1900 gegründete Unternehmen zählt zu den größten und zugleich profitabelsten Nutzfahrzeugherstellern weltweit. Seit 2008 hält die deutsche Volkswagen AG die Mehrheit der Stimmrechte und fast die Hälfte des Grundkapitals der in Schweden börsennotierten Scania AB. Als wesentlicher Teil dieser Kooperation übernahm Scania im Förderprojekt ENUBA 2 umfangreiche Arbeitsgebiete im Bereich Nutzfahrzeugbau, -weiterentwicklung und -erprobung. Dabei arbeitete Scania auf eigene Rechnung und erhielt keine Fördermittel im Rahmen des hier beschriebenen Projektes. Gleichwohl wurde durch die enge inhaltliche wie terminliche Abstimmung zwischen Scania und Siemens gewährleistet, dass mit Umbau und Erprobung einer für den öffentlichen Verkehr zugelassenen und mit einem weiterentwickelten Stromabnehmer ausgerüsteten Sattelzugmaschine wichtige Ziele des Projekts ENUBA 2 erreicht werden konnten.

Unter diesen organisatorischen Voraussetzungen konnte das Forschungsprojekt ENUBA 2 kompetent, inhaltlich umfassend und zielorientiert bearbeitet werden.

2.2 Stand der Technik zu Projektbeginn

2.2.1 Technologiebasis ENUBA (Erste Projektphase)

Technologische Basis der später beschriebenen, zur Zielerreichung notwendigen Arbeitsschritte sind der Stand der Technik sowie die bisherigen Arbeiten der Verbundforschungspartner mit Bezug zu den im ENUBA-System eingesetzten Komponenten und Technologien. Beim Stand der Technik muss einerseits zwischen dem allgemeinen technischen Stand bei elektrischen Verkehrssystemen und andererseits dem speziellen, im Vorgängerprojekt bereits erreichten Entwicklungsstand unterschieden werden. Die Komplexität moderner elektrischer Verkehrssysteme und der zugehörigen Verkehrsleittechnik lässt eine tiefgründige Beschreibung der eingesetzten Technologien an dieser Stelle nicht zu, sondern es wird auf die zusammengefasste Darstellung im Rahmen der Abschlussdokumentation zum Vorgängerprojekt [1], die Standardwerke zur Energieversorgung [8] und den Fahrzeugen elektrischer Bahnen [9] sowie zur Verkehrsleittechnik im Schienen- und Straßenverkehr [10] verwiesen.

Demgegenüber stellen die im Vorgängerprojekt erzielten praktischen Ergebnisse zusammen mit den ebenfalls in [1] dokumentierten konzeptionellen Untersuchungen in anderen Ländern den spezifischen Stand der Technik für die Anwendung „elektrisch angetriebene schwere Nutzfahrzeuge auf elektrifizierten Autobahnen“ dar. Dieser spezifische Stand der Technik lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Als Beitrag zur Umweltentlastung in und zwischen Ballungsräumen sowie zur Bewältigung zukünftig stark steigender Aufkommen im Straßengüterverkehr bei gleichzeitiger Verknappung der Kraftstoffressourcen wird in mehreren Ländern (u. a. Schweden, Frankreich, USA, Deutschland, Österreich) die Elektrifizierung von Autobahnen zur Versorgung dieselektrischer Hybrid-Lkw über Fahrleitung und Stromabnehmer konzeptionell untersucht und in Deutschland sogar schon auf einer Versuchsanlage mit Funktionsmustern der Kernkomponenten erprobt.
- Der aus einer umfangreichen Variantenuntersuchung als Vorzugslösung umgesetzte Stromabnehmer des Typs „Invers Trolley“ konnte trotz außergewöhnlich kurzer Entwicklungszeit termingerecht entwickelt werden und zeichnete sich bereits nach kurzer Inbetriebsetzungsphase als funktionsgerecht und während der anschließenden, ca. zweimonatigen Erprobungsphase in zahlreichen verkehrstypischen Situation als zuverlässig und sicher aus.
- Erstmals wurde ein serielles, dieselektrisches Hybridantriebssystem auf einem Serien-Lkw implementiert und dieses gleichzeitig für den Betrieb mit einem Stromabnehmer an einer Fahrleitung ertüchtigt. Trotz der Leistungs- und Spannungsgrenzen der für das Vorgängerprojekt verfügbaren Komponenten wurde die prinzipielle Eignung des Antriebssystems einschließlich der Fahrleitungspeisung auch in autobahntypischen Lastprofilen nachgewiesen.
- Am Beispiel des Netzanschlusses des Unterwerks der Versuchsanlage konnten in einer Art Musterverfahren alle für Netzanschluss und Stromlieferung notwendigen Verträge mit einem Energieversorgungsunternehmen (EVU) geschlossen und auch die Genehmigung zur Rückspeisung elektrischer Energie ins EVU-Netz erwirkt werden.
- In zahlreichen Messfahrten auf der Versuchsanlage konnte nachgewiesen werden, dass der rein elektrische Betrieb schwerer Nutzfahrzeuge mittels Stromabnehmer an einer Fahrleitung zuverlässig und sicher möglich ist. Weiterhin können bremsende Lkw durch die Rückgewinnung elektrischer Energie gleichzeitig beschleunigende Lkw mit Energie versorgen oder Energie ins Netz des Stromversorgers zurückspeisen. Diese Energieaustausch- und Rückspeisevorgänge sind für den individuellen Straßengüterverkehr technologische Meilensteine.

Zusätzlich zu Planung, Konstruktion und Betrieb der Versuchsanlage und –fahrzeuge wurden in weiteren Studien und Arbeitspaketen spezifische technische Fragestellungen untersucht, z. B. hinsichtlich Schutz des Systems; Integration in den Straßenverkehr; Berechtigung, Überprüfung und Abrechnung der Teilnehmer; Auslegungsanforderungen und Instandhaltung der Infrastruktur einer Serienanwendung. Durch die vom Zuwendungsgeber geforderte Vertraulichkeit des Vorgängerprojektes und die eng mit ihm abzustimmende Verwertung und Veröffentlichung der Ergebnisse können diese Testergebnisse und Studien zwar noch keinen allgemein anerkannten Stand der Technik darstellen, sind aber trotzdem als belastbare, technische Basis des Projekts ENUBA 2 anzusehen.

2.2.2 Hybridisierung in der LKW-Branche

Bei schweren Nutzfahrzeugen kommt als Antrieb weiterhin fast ausschließlich der Dieselmotor zum Einsatz. Seit Ende der sechziger Jahre konnte der Verbrauch eines 40-Tonnen-Lastzugs um rund ein Drittel reduziert werden. Bis zum Jahr 2030 wird eine weitere Effizienzsteigerung von 20 bis 30 % prognostiziert. Dies wird vor allem durch folgende Maßnahmen erreicht:

- Hybridisierung und modulare Antriebskonzepte
- Verringerung des Luftwiderstandes des Gesamtfahrzeuges durch konstruktive Maßnahmen
- Verringerung der Rollreibung durch Verbesserung der Reifen und ihre Drucküberwachung
- Verbesserung der Verbrennungsmotoren zur Reduzierung von Emissionen und Kraftstoffverbrauch
- Gewichtsreduktion

Vor allem die Hybridisierung hat in den letzten Jahren auch bei Fernverkehrs-Lkw an Bedeutung gewonnen. Inzwischen haben namhafte Lkw-Hersteller angekündigt, in den kommenden Jahren Hybridfahrzeuge auf den Markt zu bringen. Bild 1 gibt einen Überblick zu Antriebstechnologien und Energieversorgungsoptionen für schwere Nutzfahrzeuge. Die Entwicklungen in der Nutzfahrzeugbranche zeigen, dass auch hier die Hybridisierung einen entscheidenden Baustein zu einem nachhaltigeren Straßengüterverkehr darstellt. In einem modularen Hybridkonzept sind unterschiedliche Kombinationen aus Antriebsmodulen (Elektromotor oder Verbrennungsmotor) und Systemen der Energieversorgung oder -speicherung (Batterien, Brennstoffzelle, Oberleitung, konventionelle oder synthetische Kraftstoffe) je nach Entwicklungsstand und Infrastruktur möglich.

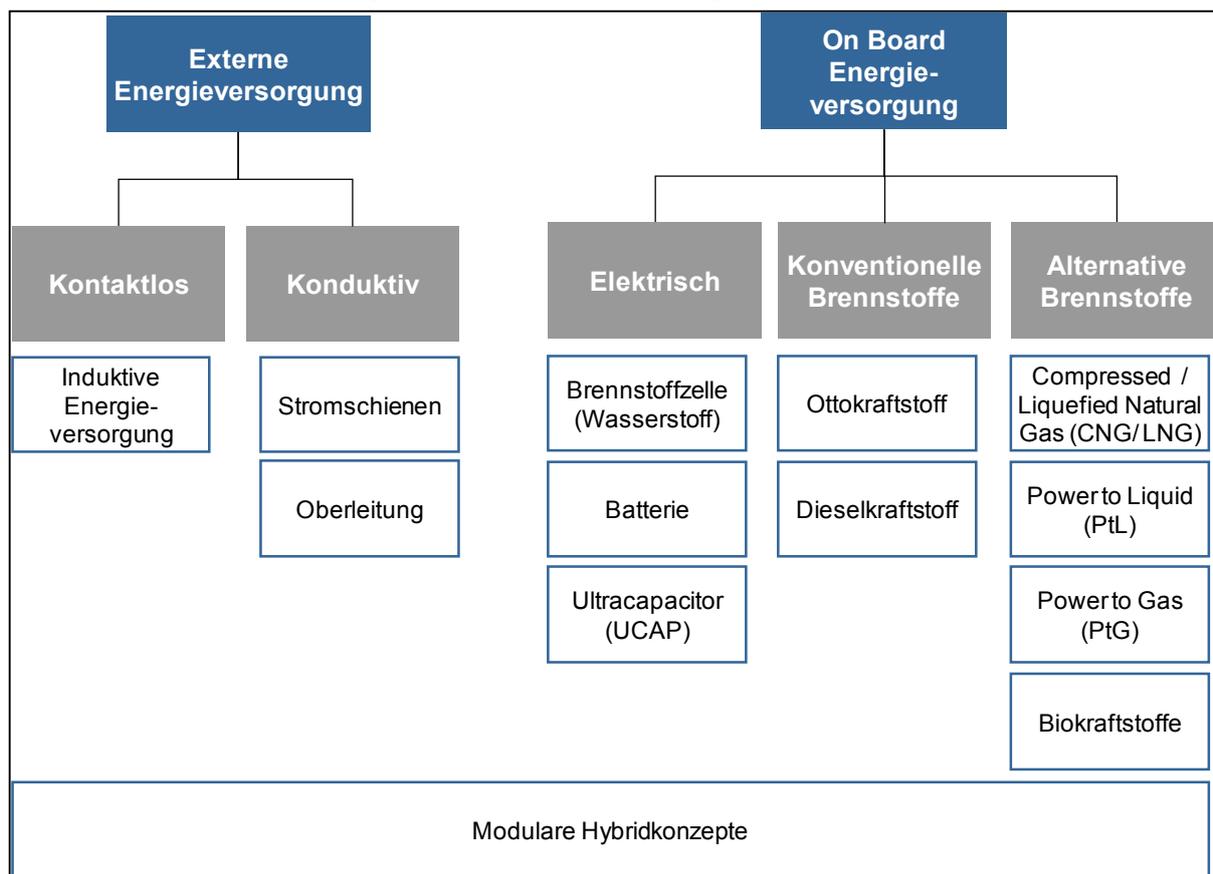


Bild 1 Antriebs- und Energieversorgungskonzepte für den Straßengüterverkehr

Entscheidende Erfolgsfaktoren für den Bereich der On-Board-Energieversorgung sind die Verfügbarkeit der Energiespeicher und der Brennstoffe, sowie der Versorgungsinfrastrukturen. Für die beabsichtigten Emissionsreduktionen sind die elektrischen Energiespeicher sowie die alternativen Brennstoffe von hoher Bedeutung. Durch Möglichkeit zur Kombination der verschiedenen Hybridantriebskonzepte mit einer Fahrleitung als externer Energieversorgungsquelle entsteht die technologische Basis energieoptimierter Logistikketten.

2.3 Projektstruktur und Arbeitsziele

2.3.1 Projektstruktur und Aufgabenteilung zwischen den Verbundpartnern

Zu Beginn des Projekts wurde ein Projektstrukturplan mit allen im Rahmen des Förderprojekts zu bearbeitenden Arbeitspaketen erstellt. Die Erstfassung aus dem Förderantrag wurde im Projektverlauf fortgeschrieben und gliedert das Förderprojekt in vier thematische Säulen:

- Interdisziplinäre Bewertung und Konzeption für Erstanwendungen - **KA**
- Konzepte und Weiterentwicklung für Erprobung auf der Versuchsanlage - **KE**
- Neubau Versuchsanlage und Fertigung Prototypen - **VE**
- Erforschung und Erprobung im Labor, auf Versuchsanlage und auf BAB - **EP**

Das Verbundforschungsvorhaben weist durch seinen breiten interdisziplinären Ansatz und die vielfältigen, wissenschaftlich orientierten Studien, Entwicklungsarbeiten sowie praktischen Erprobungen eine sehr feine Untergliederung in über 200 Arbeitspakete und Einzeltätigkeiten auf. Für die Darstellung der Einzelziele, der Projektergebnisse und die Zuordnung der einzelnen Arbeitspakete zu den Verbundforschungspartnern sowie den weiteren externen Leistungserbringern gilt:

- Tabelle 2 ordnet den Verbundforschungspartnern TU Dresden und DLR die von ihnen verantwortlichen bearbeiteten Arbeitspakete zu.
- Tabelle 3 listet die von Scania im Rahmen der Projektkooperation erbrachten Tätigkeiten auf. Alle anderen Arbeiten wurden durch Abteilungen der Siemens AG erbracht oder direkt von der Siemens AG beauftragt.
- Die Einzelziele und inhaltlichen Schwerpunkte der vier thematischen Säulen werden in Abschnitt 2.3.2 mit den vier Unterkapiteln 2.3.2.1- 2.3.2.4 vorgestellt.
- In Abschnitt 2.3.3 werden die wichtigsten weiteren Leistungserbringer und direkt beauftragten Forschungspartner und Betriebe mit ihren jeweiligen Aufgaben benannt.
- Die Darstellung der Projektergebnisse erfolgt in Kapitel 3, wiederum untergliedert in die vier thematischen Säulen (Unterkapitel 3.1 - 3.4). Dabei werden Sinneinheiten miteinander verknüpfter Arbeitspakete gebildet, um die Ergebnisse im Zusammenhang darlegen zu können.

Tabelle 2 Zuordnung der Arbeitsgebiete zu den Verbundforschungspartnern

Säule	Bezeichnung	Verbundpartner
KA	Nicht-technische Arbeitspakete und Studien: <ul style="list-style-type: none"> • Streckenauswahl für Erstanwendung • Mitwirkung und Begleitung der externen ökon./ ökol. Bewertung • Anforderungen an die Infrastrukturplanung – Handlungsleitfaden 	TU Dresden
KA	Technische Arbeitspakete und Studien: <ul style="list-style-type: none"> • Begleitung und Mitwirkung am techn. Bewertungsprozesses • Weiterentwicklung Rettungskonzept • Wahrnehmungspsychologische Beurteilung • Beurteilung des Sicherheitskonzeptes und der Schutzeinrichtungen • Bewertung der technischen Machbarkeit des Gesamtkonzeptes • Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie für BAB-Kernnetz • Zielkonzept Infrastrukturbündelung von Verkehrs- und Energienetzen 	TU Dresden
EP	<ul style="list-style-type: none"> • Verschleiß des Kontaktsystems - Analyse und Laboruntersuchung • Schalltechnische Beurteilung 	TU Dresden
KA	Technische Arbeitspakete und Studien: <ul style="list-style-type: none"> • Simulatorstudien zur psychologischen Wirkungsuntersuchung • Interaktionsdesign Fahrer-HMI für eTrucks • Konzept und Erprobung eTruck2X-Kommunikation 	DLR - Institut für Verkehrssystemtechnik

Im Januar 2013 entschied sich der schwedische Nutzfahrzeughersteller Scania im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung gemeinsam mit der Siemens AG Fahrzeuge und Infrastrukturen für den elektrifizierten Straßengüterverkehr in verschiedenen Einsatzgebieten zu entwickeln und zu erproben.

Als wesentlicher Teil dieser Kooperation übernahm Scania im Förderprojekt ENUBA 2 umfangreiche Arbeitsgebiete im Bereich Nutzfahrzeugbau, -weiterentwicklung und -erprobung, s. Tabelle 3.

Tabelle 3 Arbeitsgebiete des Kooperationspartners Scania

Säule	Bezeichnung / Inhalt
KA	Technische Arbeitspakete und Studien: <ul style="list-style-type: none"> • Patentrecherche und Analyse zu Antriebssystem und Hybridfahrzeugkonzepten • Normative Analyse zu Antriebssystem und Hybridfahrzeugkonzepten • Fahrzeugtechnische Verfahren zur Wirkungsgradermittlung des Antriebssystem
KE	Technische Arbeitspakete und Entwicklungsleistungen: <ul style="list-style-type: none"> • Konzeption, Basisdesign, mechanischer Aufbau • Integrationslösungen für Stromabnehmer und Antrieb • Auslegung und Integrationsplanung der Hybridkomponenten • Implementierung der CAN-Ethernet-Kommunikation im Lkw • Mitarbeit an der Kommunikations-Schnittstelle OBU-Infrastruktur-Leitzentrale
VE	Fertigung von Prototypen: <ul style="list-style-type: none"> • Fertigung Fahrzeug und Antriebssystem • Fahrzeug-Inbetriebsetzung • Fahrzeugabnahme durch TÜV (insbesondere Schutzkonzept) • System- /Typtests Antriebssystem und Gesamt-Lkw • Testkonzept und –plan Antriebssystem und Gesamt-Lkw
EP	Erprobung und Auswertung: <ul style="list-style-type: none"> • Erprobung des Lkw inkl. Antrieb in Laborumgebung / Testfeld (Sonder-Tests) • Erprobung Hybrid-Lkw und Antrieb auf der Versuchsanlage

Die zur Erreichung der Projektziele durch Scania im Rahmen der Kooperationen bearbeiteten Themen und erbrachten Leistungen waren so eng mit Planung, Aufbau und Erprobung des weiter entwickelten Stromabnehmers für die hybridisierte Sattelzugmaschine verknüpft, dass die Darstellung der Ziele und Ergebnisse im Zusammenhang mit den durch Siemens erbrachten Arbeiten in Abschnitt 3.2 erfolgt.

Auch die der technischen Bewertung durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zuzuordnenden Arbeitspakete der Verbundforschungspartner wurden kooperativ und eng verzahnt bearbeitet, sodass die Darstellung der Ergebnisse zu diesem Bereich in Abschnitt 3.1.1 im Zusammenhang erfolgt.

Bei den weiteren, schärfer abgegrenzten Arbeitspaketen der Verbundforschungspartner werden bei der Ergebnisdarstellung in Abschnitt 3 die Schwerpunkte auf Methodik, Kernaussagen und Bezüge zu Arbeitspaketen der Siemens AG gelegt. Für eine eingehendere, vertiefte Darstellung der zugeordneten Ergebnisse des Fördervorhabens wird ergänzend auf die separaten Abschlussberichte der Verbundforschungspartner verwiesen:

- Abschlussberichte der TU Dresden zum Projekt ENUBA 2 [11]
- Abschlussbericht des DLR-Instituts für Verkehrssystemtechnik zum Projekt ENUBA 2 [12]

Die Projektlaufzeit einschließlich der Verlängerung zum Aufbau der Sattelzugmaschine mit Stromabnehmer und großer Traktionsbatterie betrug 44 Monate vom 01.05.2012 bis 31.12.2015.

2.3.2 Ziele und Inhalte der Haupthandlungsstränge

2.3.2.1 Interdisziplinäre Bewertung und Konzeption für Erstanwendungen - KA

Gegenstand dieses Handlungsfelds waren alle rechtlichen und ökonomisch-ökologischen sowie technischen Analysen auf Gesamt- und Teilsystemebene zur Vorbereitung einer Erstanwendung im öffentlichen Raum, wie sie überblickartig in Bild 2 zusammengefasst werden. Dabei wurden nicht nur Standardlösungen entwickelt, sondern auch die Randbedingungen und Inhalte detaillierter Projektierungsschritte für eine Pilotstrecke identifiziert. Zu diesen Arbeiten gehörten folgende Aspekte:

- KAN - Nicht-technische Themen
 - Vertiefung der ökologisch-ökonomischen Analyse des eHighway-Systems
 - Rechtliche Analyse und Planungsverfahren
 - Zugeschnittene Werkstoffanalyse für eine Ressourcen- und Rohstoffstrategie
- KAT.1 - Technische Themen auf Gesamtsystemebene - Bewertung technische Machbarkeit
 - Patente und Normen für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs
 - Integration von Errichtung, Betrieb und Instandhaltung in den Verkehrsablauf
 - Integriertes Sicherheits- und Schutzkonzept für alle Teilsysteme und Nutzergruppen
 - Wirkungsgradermittlung für alle Teilsysteme und Gesamtsystem
 - Abgrenzung und Bewertung von Alternativsystemen
 - Marktanalyse und technische Übertragbarkeit auf elektrische Busse
- KAT.2 - Konzeption der elektrischen Infrastruktur
 - Entwicklungsziele bei der Einbindung in Energieversorgungsnetze
 - Speisekonzepte für eine angepasste Traktionsstromversorgung
 - Fahrleitungssysteme und Auslegungsrichtlinien für elektrifizierte Fernstraßen
- KAT.3/4 - Konzeption zur Serienüberleitung von Hybridfahrzeugen mit Stromabnehmern
 - Systematisierung der Schnittstellen zwischen Stromabnehmer und Fahrzeug
 - Nachweis der Kompatibilität mit verschiedenen Antriebssystemen
 - Technische Aspekte der Fahrzeugsicherheit im Vergleich zu konventionellen Lkw
- KAT.5 - Straßenverkehr und Verkehrsmanagement
 - Anpassentwicklungen für Installationen im Verkehrsraum
 - Integriertes Verkehrs- und Energienetz-Management
 - Smart-Road-Funktionen für den eHighway

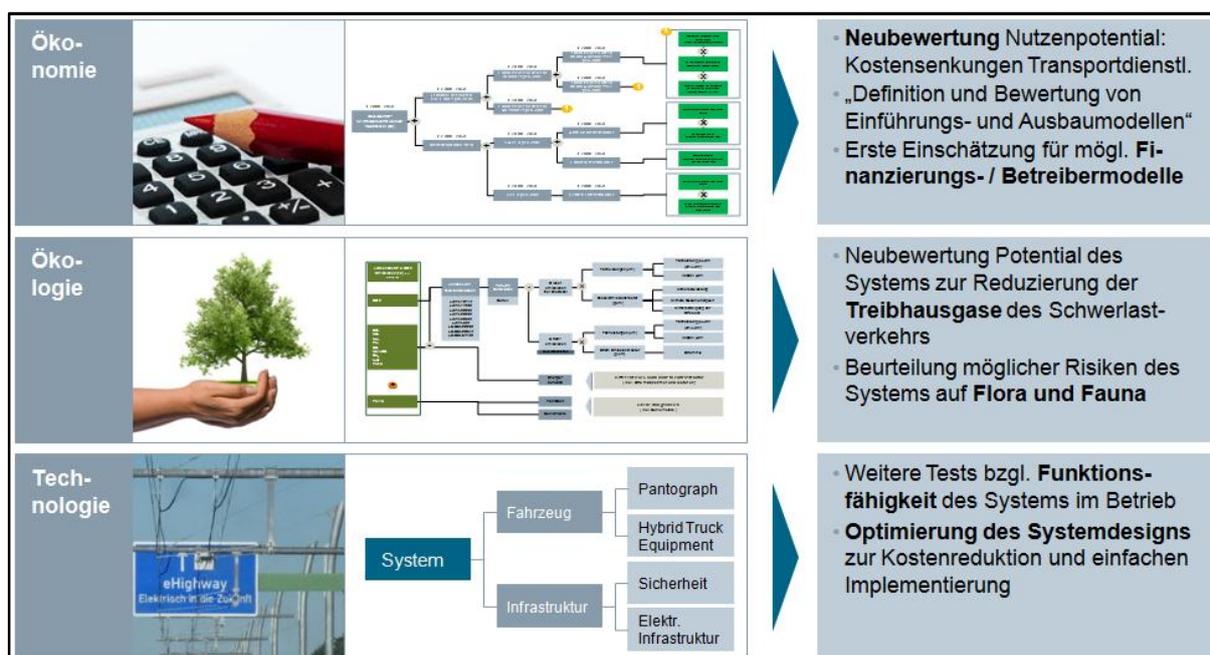
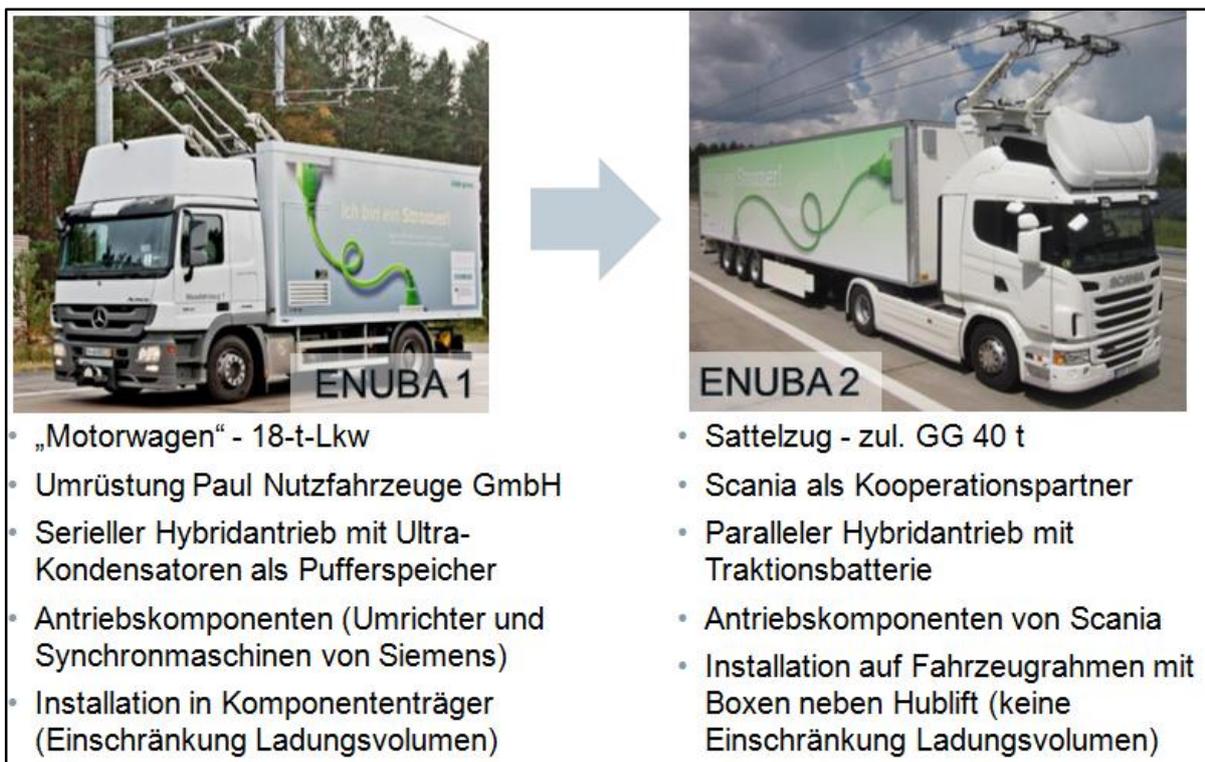


Bild 2 Schwerpunkte der Bewertung und Konzeption für Erstanwendungen

2.3.2.2 Konzepte und Weiterentwicklung für Erprobung auf Versuchsanlage - KE

Schwerpunkt dieses technisch dominierten Handlungsstrangs waren alle Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten, die im Zusammenhang mit dem Neubau und der Erweiterung der Versuchsanlage, der Fahrzeugentwicklung und der Entwicklung neuer Teilsysteme standen. Schwerpunkte dabei waren Weiterentwicklung und Integration des Stromabnehmers in eine Sattelzugmaschine, s. Bild 3. Zu diesem Handlungsstrang gehörten folgende Aktivitäten:

- KEN - Bebauungsplan, Bauantrag und Bauvorbereitung
- KET.1 - technische Themen auf Gesamtsystemebene - Systemintegration
 - Umsetzung des Sicherheits- und Schutzkonzeptes auf der Versuchsanlage
 - Messverfahren zur Wirkungsgradermittlung im Erprobungsbetrieb
- KET.2 - Projektierung der elektrischen Infrastruktur der Versuchsanlage
 - Weiterentwicklung von Traktionsstromversorgung und Unterwerkstechnik
 - Designoptimierung und Weiterentwicklung des Fahrleitungssystems
- KET.3 - Neuentwicklung eines Stromabnehmers für Sattelzugmaschinen
 - Anforderungsanalyse bezüglich Bauraum und Einsatzbereich
 - Topologievergleich und Variantenbewertung
 - Entwicklung von Labor- und Funktionsmustern
- KET.4 - Hybrid-Sattelzugmaschine für Stromabnehmerbetrieb
 - Präzisierung und Umsetzung der Stromabnehmer-Fahrzeug Schnittstelle
 - Weiterentwicklung und Umsetzung eines für alle Betriebsmodi und Geschwindigkeiten sicheren Schutzkonzeptes
 - Analyse und Bewertung der EMV-Anforderungen und -Kompatibilität
- KET.5 - Straßenverkehr und Verkehrsmanagement
 - Spezifikation und Implementierung eines Verkehrsmanagementsystems für die Versuchsanlage
 - Identifikation und Implementierung von Schnittstellen zur Leittechnik der Stromversorgung und zum neu entwickelten Monitoring-System für Stromabnehmer
 - Entwicklung eines Energiemesssystems für Hybrid-Lkw im Oberleitungsbetrieb



- „Motorwagen“ - 18-t-Lkw
- Umrüstung Paul Nutzfahrzeuge GmbH
- Serieller Hybridantrieb mit Ultra-Kondensatoren als Pufferspeicher
- Antriebskomponenten (Umrichter und Synchronmaschinen von Siemens)
- Installation in Komponententräger (Einschränkung Ladungsvolumen)

- Sattelzug - zul. GG 40 t
- Scania als Kooperationspartner
- Paralleler Hybridantrieb mit Traktionsbatterie
- Antriebskomponenten von Scania
- Installation auf Fahrzeugrahmen mit Boxen neben Hublift (keine Einschränkung Ladungsvolumen)

Bild 3 Weiterentwicklung von Stromabnehmer und Fahrzeug von ENUBA 1 nach ENUBA 2

2.3.2.3 Neubau Versuchsanlage und Fertigung Prototypen - VE

Aufbauend auf den Entwicklungsergebnissen und Projektierungsunterlagen des vorigen Handlungsfelds wurden in diesem Handlungsstrang die experimentellen, baulichen und konstruktiven Tätigkeiten zur Fertigung der Funktionsmuster und Prototypen sowie zum Aufbau der Versuchsanlage zusammengefasst. Dies umfasste auch die Demontage der aufgegebenen, ersten Versuchsanlage einschließlich der Gewinnung weiter nutzbarer Komponenten, wie dem Unterwerk und den Masten.

Der Handlungsstrang bestand aus folgenden Schwerpunkten:

- VEB.1 - Errichtung von Stromversorgung und Fahrleitung (s. Bild 4)
- VEB.2 - Fertigung und Inbetriebsetzung des Stromabnehmers
 - Aufbau eines Laborversuchsstandes
 - Bau von Labormuster und Funktionsmuster
- VEB.3 - Montage der Einbauten im Verkehrsraum und Inbetriebsetzung des Verkehrsmanagementsystems
 - Vorbereitung der Baugruben und Setzen der Fundamente
 - Installation von Kragarm (Wegweiserbrücke) und Schilderbrücke mit Wechselverkehrszeichen
 - Auswahl und Installation verschiedener Fahrzeugrückhaltesysteme entsprechend der funktionalen oder betrieblichen Anforderungen
 - Vermessung der installierten Fahrleitung und Einbringung der Fahrbahnmarkierung
- VEB.4 - Fertigung und Systemintegration von Fahrzeug und Stromabnehmer
- VEP.1 - Ausarbeitung und Abstimmung eines Testplans für das Gesamtsystem
- VEP.2-5 - Testvorbereitungen und Abnahmen aller Teilsysteme
 - Fahrleitung und Stromversorgung
 - Verkehrsleittechnik und technisches Monitoring-System
 - Fahrzeug (Sattelzugmaschine) und Stromabnehmer



Bild 4 Kurvenförmiger Verlauf von Fahrleitung und Fahrbahnmarkierung (© Scania)

2.3.2.4 Erprobung im Labor, auf der Versuchsanlage und auf BAB - EP

Der Betrieb der Versuchsanlage sowie die Vorbereitung und Durchführung einschließlich Auswertung und Diskussion von Messungen und Tests am Bestandssystem sowie der neuentwickelten Teilsysteme und Fahrzeuge auf der erweiterten Infrastruktur standen im Fokus dieses Handlungsfelds.

Es umfasste folgende Arbeitspakete:

- EPG - Erprobungen am Gesamtsystem
 - Unterhalt der Versuchsfahrzeuge und Messausrüstung der Versuchsanlage
 - Messungen und Auswertungen zu Gesamtsystem, Stromabnehmer und Fahrzeugen in verschiedenen Betriebsmodi und Systemzuständen
- EPT - Erprobungen am Bestandssystem
 - Beurteilung Systemverhalten in fahrdynamischen Grenz- und Extremsituationen
 - Havariefahrten und Wechselwirkungen bei defekten Infrastrukturkomponenten
- EPN.1/2 - Erprobungen und Tests am neu entwickelten Stromabnehmer
 - Erprobung des neu entwickelten Stromabnehmers mit geänderter Mechatronik
 - Planung und Begleitung externer Labortests am neu entwickelten Stromabnehmer (z. B. Klima-Test, EMV-Test, Vibrations- bzw. Rütteltest)
 - Analyse des Kontaktverhaltens und Verschleiß des Kontaktsystems bei verschiedenen Fahrleitungsbauformen, Fahrzeugabständen und harten Punkten im System (Streckentrenner)
- EPN.3 - Untersuchungen zu Betriebskenngrößen von Hybrid-Lkw
 - Messung und Bewertung von Traktionskennlinien unterschiedlicher Fahrzeugtypen
 - Schalltechnische Beurteilung unterschiedlicher Fahrzeugtypen und Antriebsmodi
 - Fahrdynamische Untersuchung und Ermittlung mittlerer Verbrauchskennwerte und äquivalenter Energiebedarfe in verschiedenen Antriebsmodi auf der Versuchsanlage und bei Vergleichsfahrten im öffentlichen Raum (s. Bild 5)
- EPN.4 - Erprobungen zum Verkehrsmanagement und Smart-Roads
 - Erprobung der Energiemesssysteme einschließlich Datenübertragung zur Leitstelle
 - Erprobung des technischen Monitoringsystems mit Abstimmung aller Sensor- und Datensammlungssysteme auf variable Fahrzeugfolgen
 - Implementierung und Erprobung der Smart-Road-Funktionen Wanderbaustelle entlang elektrifizierter Autobahnabschnitte und Spursperrung im Havariefall
 - Erprobung der Kommunikationswege und Rollendefinitionen im Havariefall unter Einbindung der Notabschaltung der Fahrleitung (SicatAES) und des Verkehrsleitsystems



Bild 5 Lastzüge zur Ermittlung mittlerer Verbrauchskennwerte und äquivalenter Energiebedarfe

2.3.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

2.3.3.1 Wesentliche interne Partner

Neben den verschiedenen Geschäftseinheiten der Division „Mobility“ wurde im Projekt ENUBA 2 auch mit der Division „Process Industries and Drives“ zusammengearbeitet. Deren Geschäftseinheit „Hybrid Drive“ mit Sitz in Nürnberg ist ein Systemlieferant für die Hybridantriebe nach dem bei Siemens entwickelten ELFA®-Konzept und liefert vor allem Antriebssysteme für Busse. Im Projekt ENUBA 2 lieferte die Geschäftseinheit „Hybrid Drive“ Antriebskomponenten für den seriellen Hybridantrieb der in der letzten Projektphase aufgebauten Sattelzugmaschine mit Batterietrailer und setzte das gesamte Antriebssystem in Betrieb. Dazu gehörten Generator und Antriebsmotor als permanent erregte Synchronmaschinen sowie ELFA-2 Umrichter einschließlich des Hilfsbetriebeumrichters.

2.3.3.2 Weitere Partner im Bereich „Forschung und Entwicklung“

Externe Expertise aus der Kraftfahrzeugindustrie – EDAG

Die Weiterentwicklung des Stromabnehmers zur Energieübertragung in entsprechend ausgerüstete Hybrid-Lkw im Projekt ENUBA 2 sollte noch stärker die zentralen Aspekte Integrationsfähigkeit in verschiedene Lkw-Typen und Einhaltung der Automotive-Normen und Umgebungsbedingungen beachten. Für die Entwicklungsbegleitung des Stromabnehmers konnte die EDAG GmbH und Co. KGaA als einer der weltweit führenden, unabhängigen Entwicklungsdienstleister der Automobilindustrie gewonnen werden. Die EDAG verfügt über hervorragende Referenzen und Erfahrungen in allen Phasen der Produktentwicklung und Vorfeldstudien. Diese bringt die EDAG in folgenden Schwerpunkten ein:

- Begleitung der Stromabnehmerentwicklung mit den Methoden des Sicherheits-Engineerings (FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, GuR - Gefährdungs- und Risikoanalyse)
- Durchführung von Klima-, EMV- und Vibrations-Tests am Stromabnehmer in Speziallabors zur Beurteilung des erreichten Entwicklungsstands
- Mitwirkung am technischen Bewertungsprozess zu ausgewählten Themen der Fahrzeugtechnik und -sicherheit
- Erstellung einer Gefährdungs- und Risikoanalyse für das Gesamtsystem

Externe Juristische Expertise – IKEM

Das IKEM - Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. V., ein An-Institut der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, war bereits wissenschaftlicher Partner im Vorgängerprojekt und hat dabei vor allem juristische Analysen zum geltenden Rechtsrahmen vor dem Hintergrund einer geplanten Elektrifizierung der Autobahnen durchgeführt. Eine Einbindung des IKEM in die Fortsetzung der rechtlichen Bewertung im Rahmen von ENUBA 2 wurde daher vorgesehen, um bestimmte planungsrechtliche Aspekte zu vertiefen und neu identifizierte, tangierte Rechtsbereiche zu bewerten.

Erbringer von Projektierungs- und Installationsleistungen – Heitec AG

An der Schnittstelle zwischen Stromabnehmer und Fahrzeug mussten für die Sattelzugmaschine zwei Schaltschränke projektiert und gefertigt werden. Als qualifizierter Engineering- und Fertigungsdienstleister wurden diese Arbeiten durch die Heitec AG als langjährigem, qualifizierten Partner der Siemens AG erbracht. Die Arbeiten umfassten:

- Projektierung und Fertigung von zwei Schaltschränken einschließlich Einrüstung der Steuerung des Stromabnehmers und des galvanisch trennenden DC-DC-Wandlers
- Durchführung von Abnahmetests und Unterstützung bei der Inbetriebsetzung

Fahrzeugumrüstung – Fa. Paul Nutzfahrzeuge GmbH

Die Umrüstung der Scania-Sattelzugmaschine in der ersten, mechanischen Integrationsphase des Stromabnehmers einschließlich der Inbetriebsetzung und Zulassung erfolgte wie im Vorgängerprojekt durch die Paul Nutzfahrzeuge GmbH in Passau. Die Paul Nutzfahrzeuge GmbH nimmt die Rolle eines Dienstleisters und Lieferanten ein und hat bereits langjährige Erfahrungen, dabei auch in der Zusammenarbeit mit der Siemens AG, in der Umrüstung von Lkw gesammelt.

Ebenso rüstete die Paul Nutzfahrzeuge GmbH in der letzten Projektphase die zweite Sattelzugmaschine und den Batterie-Auflieger um. Das Unternehmen baute dabei auf den Erfahrungen mit Sonderfahrzeugapplikationen auf und nahm die Rolle des Systemintegrators wahr. Die Firma baute alle neuen Komponenten in die Sattelzugmaschine und den Auflieger ein, verlegte die elektrischen Leitungen, integrierte Pneumatik- und Kühlsysteme und erwirkte die erforderlichen TÜV-Abnahmen für die Erprobungsfahrzeuge.

Traktionsbatterie – Firma Akasol GmbH

Die Firma Akasol GmbH lieferte das komplette Batteriesystem inklusive der Batteriekühleinheit und der Hochspannungsverteilungsbox. Die Firma mit Sitz in Darmstadt entwickelt und produziert Lithium-Ionen-Batteriesysteme, unter anderem für die Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie.

2.3.3.3 Wesentliche Partner im Bereich „Sonstige Leistungserbringer“

Erbringer von Bau- und Installationsleistungen – FEAG und SPL

Bei den Bau- und Installationsleistungen wird auf die langjährigen Partner der Siemens AG im Fahrleitungsbau (SPL Siemens Power Lines GmbH) bzw. bei der Ausrüstung von Gleichstromunterwerken (FEAG GmbH) zurückgegriffen, die als Lieferanten bzw. Erbringer sonstiger Vorhabenleistungen auftreten. Die geplanten bau- und elektrotechnischen Arbeiten auf der Versuchsanlage sollen, wie im Vorgängerprojekt, als sonstige Vorhabenleistungen durch die lokal ansässige Fa. Elektro Thomas GmbH erbracht werden.

Weitere Erbringer von Sach- und Dienstleistungen

Bau, Inbetriebnahme und Betrieb einer Versuchsanlage und mehrerer Versuchsfahrzeuge sind notwendigerweise mit zahlreichen weiteren Dienstleistungen verbunden, die zu Sicherheit und Verfügbarkeit der Versuchsanlage beitragen. Dazu gehören u. a.:

- Prüfung und Begutachtung von Fahrzeugen und Infrastruktur durch TÜV Süd GmbH
- Anmieten des Versuchsgeländes
- Bewachung des Versuchsgeländes
- Reparaturen der Versuchsfahrzeuge

3 Ergebnisse des Fördervorhabens

3.1 Interdisziplinäre Bewertung und Konzeption Erstanwendungen - KA

3.1.1 Technischer Bewertungsprozess

Die interdisziplinäre Analyse und Bewertung der verkehrstechnischen Aspekte im Kontext der ENUBA-Technologie zur Identifizierung normativer und rechtlicher Regelungsspielräume sowie zur Ableitung von Anforderungen und Auslegungsrichtlinien war eines der Hauptziele des Projekts ENUBA 2. Als wissenschaftlich-technisches Forschungsinstitut für den Straßenverkehr wurde die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als Prüfer zur Bewertung der technischen Machbarkeit und Integrationsfähigkeit benannt.

Ausgangspunkt der Bewertung war ein Überblick zum Aufbau des Systems sowie dessen wesentlichen Wechselwirkungen mit der baulichen, elektrischen, betrieblichen und fahrzeugtechnischen Umgebung, wie es beispielhaft Bild 6 zeigt. Der Systemaufbau und die Untergliederung in die vier Teilsysteme weist dabei große Analogien zu den bekannten elektrischen Verkehrssystemen für den Personen- und Güterverkehr auf.

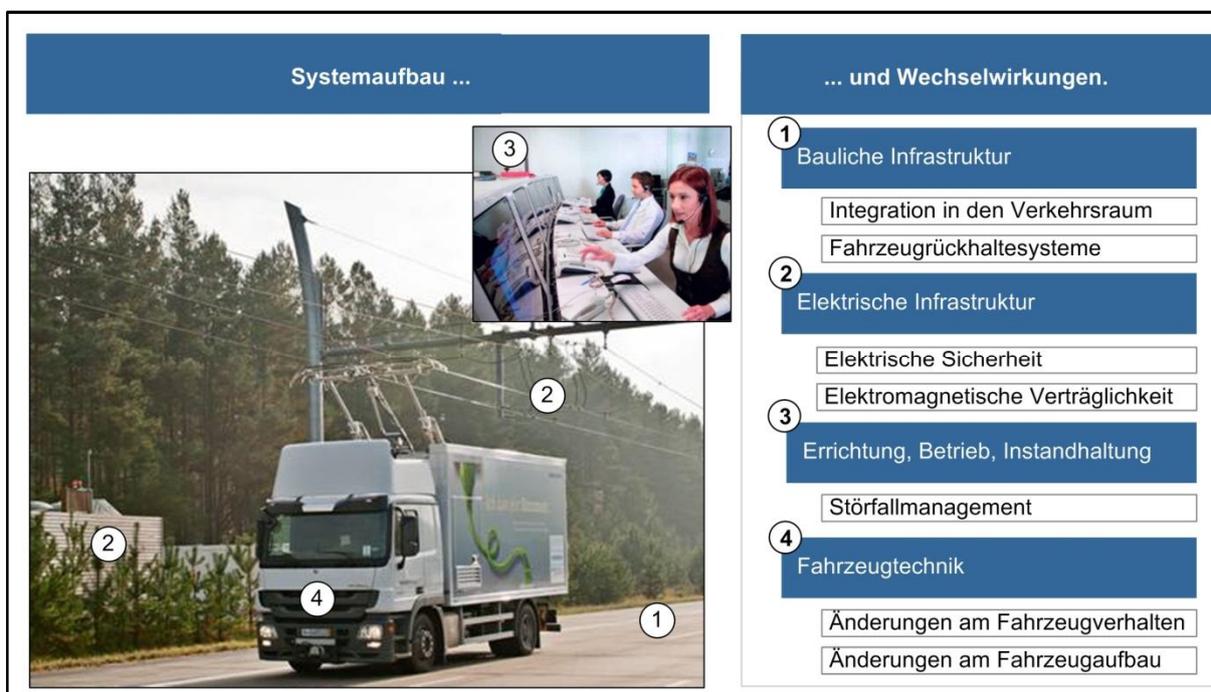


Bild 6 Systemaufbau des elektrifizierten Güterverkehrs und wesentliche Wechselwirkungen

Wie in Bild 6 umrissen, wirft die Integration einer Fahrleitungsinfrastruktur in den öffentlichen Straßenraum sowie von Stromabnehmern und Hybridantriebstechnik in Lastkraftwagen zahlreiche Fragen hinsichtlich der Anforderungen und Randbedingungen für die baulich angepasste Errichtung und den sicheren Betrieb des Verkehrssystems auf. Im Rahmen des technischen Bewertungsprozesses wurden diese Themen durch die Forschungsnehmer Siemens AG, TU Dresden und DLR sowie durch Einbeziehung der EDAG als kompetentem technischen Dienstleister aus der Automobilindustrie systematisch aufbereitet und der Bundesanstalt für Straßenwesen zur Bewertung vorgelegt.

Im Rahmen des Bewertungsprozesses erfolgt die Zuordnung aller identifizierten Aspekte und Teilfragen zu insgesamt 20 einzelnen Themenbereichen, die sich entsprechend Bild 6 in vier Hauptgruppen zusammenfassen lassen:

- TB 1 - Bauliche Infrastruktur
- TB 2 - Elektrische Infrastruktur
- TB 3 - Errichtung, Betrieb und Instandhaltung
- TB 4 - Fahrzeugtechnik

Mit Zuordnung zu diesen vier Hauptgruppen listet Tabelle 4 die insgesamt 20 untersuchten Themenbereiche auf.

Tabelle 4 Zuordnung der untersuchten Themenbereiche zu den Hauptgruppen

Gruppe	Nummer	Titel und Schwerpunkte
TB 1 - Bauliche Infrastruktur	TB 11	Durchfahrtshöhe an Bauwerken, Ableitung der Regelhöhe und Sonderkonstruktionen
	TB 12	Schwertransporte bis 4,5 m
	TB 13	Statik der Oberleitungsmaste unter Berücksichtigung der Seitenraumausrägung
	TB 14	Statik der Brückenbauwerke, Bewertung der Elektrifizierungsfähigkeit
	TB 15	Anforderungen an Fahrzeurückhaltesysteme
	TB 16	Anprallversuch zur Verifizierung der empfohlenen Fahrzeurückhaltesysteme
	TB 17	Sichtbarkeit der Beschilderung
TB 2 - Elektrische Infrastruktur	TB 21	Integriertes Elektrisches Schutzkonzept einschließlich Fahrzeugtechnik
	TB 22	Integriertes EMV-Konzept einschließlich Anforderungen an die Fahrzeugtechnik
	TB 23	Energieabschaltung im Notfall (OLSP-Konzept)
TB 3 - Errichtung, Betrieb, Instandhaltung	TB 31	Errichtungskonzept
	TB 32	Instandhaltungskonzept
	TB 33	Technisches Monitoring und Nutzerberechtigung
	TB 34	Störfallmanagement / Rettungskonzept
	TB 35	Gefährdungen durch Eisbehang auf Oberleitungen
TB 4 - Fahrzeug- technik	TB 41	Ausweichverhalten und Änderungen in der Fahrdynamik
	TB 42	Änderungen im Crashverhalten der OH-Lkw
	TB 43	Änderungen Brandverhalten der OH-Lkw
	TB 44	Einschränkungen bei Gefahrguttransporten
	TB 45	Verlängerung des Sattelzugs auf 17,0 m

In diesen Themenbereichen wird in jeweils einzelnen Berichten detailliert untersucht, von welchen Randbedingungen bei der Elektrifizierung von Straßen und Lastkraftwagen ausgegangen werden kann und welche Anforderungen für eine sichere Systemauslegung und Betriebsführung zu erfüllen sind. Die inhaltliche Erarbeitung erfolgt dabei meist in den folgenden Schritten:

- Beschreibung des Stands der Technik im Straßenverkehr unter Einbeziehung von Datenbanken zu Infrastrukturelementen oder Erhebung von Felddaten
- Beschreibung des Stands der Technik im elektrischen Bahnverkehr, einschließlich Eisenbahn oder Straßenbahn bzw. O-Bus
- Synthese der Randbedingungen und Identifizierung der für den elektrifizierten Straßengüterverkehr relevanten Aspekte
- Vorprojektierung oder Beschreibung beispielhafter, angepasster Lösungen
- Verallgemeinerung und Formulierung von Anforderungen
- Ableitung von Kriterien zum Nachweis der Anforderungen bzw. Formulierung von Randbedingungen für eine öffentliche Erprobung

Die Darstellung der Ergebnisse aus den einzelnen Themenbereichen kann angesichts der sehr umfangreichen Ausarbeitungen und teilweise noch ergänzenden Anlagen hier nur sehr verkürzt erfolgen. Für weitergehende Betrachtungen wird auf die ausführlichen Darstellungen in den einzelnen Berichten verwiesen. Im Anschluss an den Überblick zu den einzelnen Themenbereichen werden die Ergebnisse kurz eingeordnet und die entstandenen Handlungsleitfäden in den Bereichen Infrastruktur und Fahrzeuge vorgestellt.

TB 1 - Bauliche Infrastruktur

Zu diesem umfangreichsten Themenkomplex gehörten insgesamt sieben Einzelaspekte.

TB 11 Durchfahrthöhe an Bauwerken, Ableitung der Regelhöhe und Sonderkonstruktionen

Dieses Arbeitsgebiet beschreibt die Verfahren zur Ermittlung der Regelfahrdrahthöhe und gibt Einsatzempfehlungen für Konstruktionen bei eingeschränkter Fahrleitungshöhe. Ausgangspunkt der Betrachtungen sind einerseits Verkehrsraum und lichter Raum (s. Bild 7) sowie Datenbankabfragen zur Ermittlung eines statistischen Mengengerüsts der zu erwartenden Höheneinschränkungen im Zuge elektrifizierter Strecken. Unter Beachtung aller baulichen und verkehrlichen Randbedingungen sowie der klimatischen Umgebungsbedingungen sind immer 4,5 m ab Fahrbahnoberkante freizuhalten. Daher erfordert nur ein sehr geringer Prozentsatz der Bauwerke eine Unterbrechung der Fahrleitung, da diese unter Einhaltung des Lichtraums von 4,5 m nicht elektrifizierbar sind.

TB 12 Schwertransporte bis 4,5 m Höhe

Dieses Themengebiet untersucht Planung und Durchführung von Schwer- und Großraumtransporten auf elektrifizierten Abschnitten. Nach Erfahrungswerten bezieht sich die Mehrzahl der Genehmigungen auf die Überschreitung von Fahrzeuggewicht oder -breite. In der Gruppe der Transporte über 4,0 m sind Großraumtransporte unter 4,35 m Höhe am häufigsten, sodass bei einer Mindesthöhe der Fahrleitung von 4,5 m keine Gefährdungen bestehen. Für Transporte zwischen 4,30 und 4,5 m sind organisatorische Maßnahmen zu berücksichtigen. Bei Abschnitten mit Bauwerken unter 4,7 m ergeben sich keine Änderungen, da diese ohnehin nicht elektrifizierbar sind und die Verfahren zur Planung und Genehmigung von Großraumtransporten unverändert Anwendung finden.

TB 13 Statik der Oberleitungsmaste unter Berücksichtigung der Seitenraumausrprägung

Abgeleitet aus Vorbetrachtungen zu typischen Seitenraumausrprägungen wird in dieser Arbeitsmappe auf die Mastpositionierung und -dimensionierung eingegangen. In Einschnitten und Ebenen sind die Maste hinter der Entwässerungsmulde anzuordnen. Liegt die Fahrbahn in Dammlage, ist das jeweilige Fahrzeugrückhaltesystem einschließlich seiner Kenngrößen Wirkungsbereich und Fahrzeugeindringung zu berücksichtigen. Aus Befahrungsergebnissen wurde ein repräsentativer, 5 km langer Musterabschnitt abgeleitet, für den im Rahmen einer Vorprojektierung die Maste dimensioniert wurden.

TB 14 Statik der Brückenbauwerke, Bewertung der Elektrifizierungsfähigkeit

Brückenbauwerke im Streckenverlauf sind relativ häufig anzutreffen, jedoch können nur etwa 15 % wegen einer Länge von über 50 m nicht mit der Standard-Fahrleitungskonstruktion ohne Masten auf dem Bauwerk überspannt werden. In dieser Arbeitsmappe wurden technische Lösungen und Entscheidungskriterien zur nachträglichen Elektrifizierung von Brückenbauwerken entwickelt, die im Zuge konkreter Projektierungen auf die jeweiligen Bauwerke anzuwenden sind.

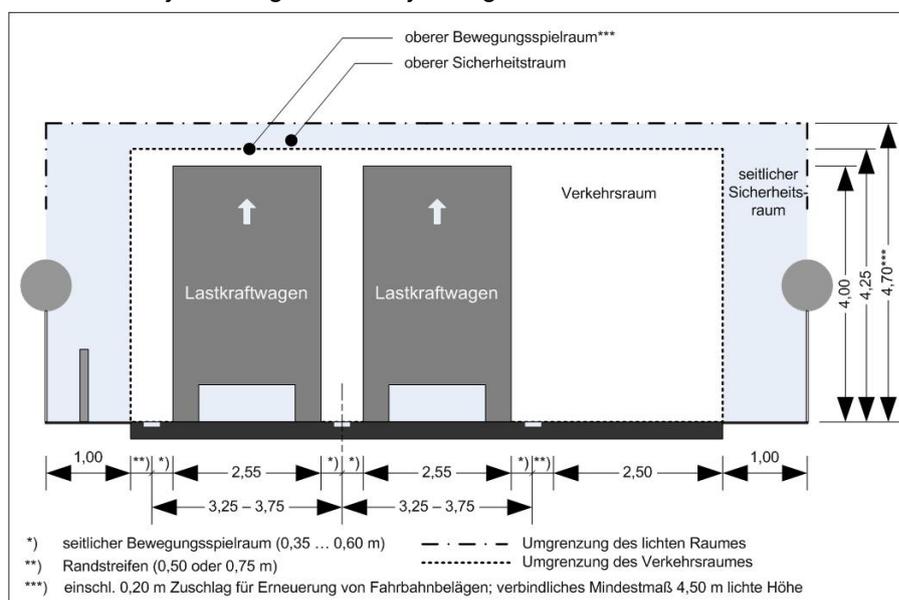


Bild 7 Verkehrsraum und lichter Raum (nach RAA [13], Maße in m)

TB 15 Anforderungen an Fahrzeugrückhaltesysteme

Diese Arbeitsmappe beschäftigt sich mit der Absicherung der Verkehrsteilnehmer auf elektrifizierten Streckenabschnitten. Entlang elektrifizierter Strecken werden Fahrleitungsmaste aufgestellt, die bei einem ungeschützten Anprall, wie jedes Hindernis im Seitenraum, schwere Unfallfolgen für Fahrzeuginsassen und Dritte verursachen können. Deshalb ist immer eine durchgehende Absicherung im rechten Seitenraum notwendig. Durch einen kombinierten Anprallversuch wurde das gemeinsame Aufhaltevermögen der Fahrleitungsanlage und der passiven Schutzzeineinrichtung getestet. Im Ergebnis wird der Einsatz von Fahrzeugrückhaltesystemen der Aufhaltestufe H4b empfohlen.

TB 16 Anprallversuch zur Verifizierung der empfohlenen Fahrzeugrückhaltesysteme

Normen und Regelwerke beschreiben detailliert Anprallversuche an Tragkonstruktionen und Schutzeinrichtungen. Um eine Gefährdungseinstufung der Fahrleitungsmaste entlang einer Autobahn zu erhalten, konnte auf diese standardisierten Testverfahren jedoch nur teilweise zurückgegriffen werden, da Fahrleitungsmaste entlang Außerortsstraßen bisher nicht in diesen Testverfahren abgebildet werden. Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des zusammen mit dem Crash-Test-Center der Dekra durchgeführten Anprallversuches wurden daher in dieser separaten Arbeitsmappe diskutiert.

TB 17 Sichtbarkeit der Beschilderung

Gegenstand dieser Arbeitsmappe war die Beurteilung möglicher Änderungen der Sichtbarkeit der Beschilderung entlang elektrifizierter Streckenabschnitte. Bei Untersuchungen auf der Versuchsanlage konnten folgende Verdeckungssituationen identifiziert werden: Teilverdeckungen von Beschilderungen über dem Verkehrsraum durch die Halteeinrichtungen des Fahrleitungssystems oder durch Stromabnehmer vorausfahrender Lkw sowie optische „Wandbildung“ durch die Maste im Seitenraum.

Als erster Untersuchungsansatz wurde eine Methode zur Bewertung örtlich und zeitlich veränderlicher Teilverdeckungen, einschließlich möglicher Rückschlüsse zur Lesbarkeit entwickelt. Danach wurden fallspezifische Modifikationen für die Position der Quertrageinrichtung und Hängesäulen des Fahrleitungssystems entwickelt. Bild 8 veranschaulicht die Methode und zeigt die Wirkungskontrolle nach Anpassung der Quertrageinrichtung (Ausleger).

Die Auswirkungen längerer Fahrten auf elektrifizierten Strecken wurden in zwei Simulatorstudien durch das DLR untersucht. Die Ergebnisse dieser Studien zeigen, dass der Errichtung der eHighway-Infrastruktur keine aus dem Blick- und Fahrverhalten der repräsentativen Probandengruppen von Pkw- oder Lkw-Fahrern ableitbaren Einwände entgegenstehen.

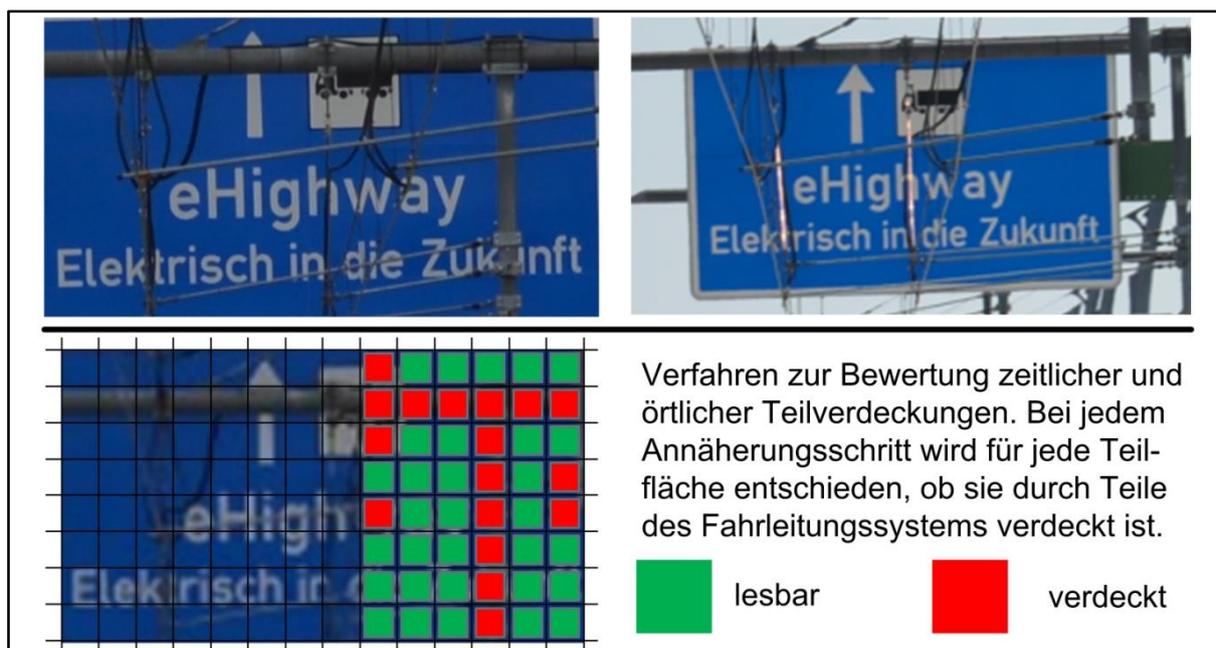


Bild 8 Höhersetzen der Ausleger zur Verbesserung der Sichtbarkeit (oben) und auf Teilflächen basierendes Verfahren zur Beurteilung von Verdeckungen (unten)

TB 2 - Elektrische Infrastruktur

Oberleitungen im öffentlichen Raum sind vom Eisenbahnbetrieb oder von Straßenbahnen in Städten her grundsätzlich bekannt. Bei der Integration des Fahrleitungsnetzes in Autobahnabschnitte müssen jedoch die Konzepte zur Gewährleistung der elektrischen Sicherheit, zur Vermeidung störender Beeinflussungen und zur sicheren Abschaltung im Notfall auf das neue Einsatzgebiet angepasst werden.

TB 21 Integriertes Elektrisches Schutzkonzept einschließlich Fahrzeugtechnik

Bedingt durch die Auswirkungen des elektrischen Stromes auf den menschlichen Organismus birgt jede elektrische Installation potentielle Gefahren in sich. Dies trifft insbesondere auf Anlagen zu, die zur Übertragung elektrischer Energie auf fahrende Fahrzeuge blanke Leiter nutzen. Bei der Ableitung der Schutzmaßnahmen ist das Zusammenspiel folgender Hauptkomponenten zu berücksichtigen:

- Die Energieversorgung, die im Fehlerfall sicher abschalten muss.
- Die Fahrleitung, die außerhalb des Handbereichs von Personen gehalten werden muss.
- Die Fahrzeuge mit Kontakt zur Fahrleitung, die Energie in Arbeitsbereiche von Fahrern und Passanten bringen könnten und über entsprechende Schutzmechanismen verfügen müssen.

Potentielle Gefahren können erst aus dem Zusammenwirken dieser Komponenten entstehen. Daher wurde im integrierten Schutzkonzept für unterschiedliche funktionale Zustände der Komponenten das resultierende Gefährdungspotenzial beurteilt und die erforderlichen Schutzmaßnahmen definiert.

TB 22 Integriertes EMV-Konzept einschließlich Anforderungen an die Fahrzeugtechnik

Das erarbeitete EMV-Konzept beschreibt die in einem eHighway-Projekt erforderlichen Rollen, Prozesse und in einzelnen Projektphasen zu erstellenden Dokumente. Dabei wurden in einer Kopplungsmatrix alle Systembestandteile sowie die Komponenten der elektromagnetischen Umgebung, mit denen Wechselwirkungen auftreten könnten, bewertet. Mit Hilfe der Matrix wurden unter Berücksichtigung minimaler Abstände, des Abstrahlungs- und Störfestigkeitsverhaltens und unterschiedlicher Betriebsmodi mögliche Wechselwirkungen untersucht und bedarfsweise Maßnahmen zur Einhaltung der Grenzwerte definiert.

TB 23 Energieabschaltung im Notfall

Die Arbeitsmappe beschreibt die Energieabschaltung und automatisierte Erdung der Fahrleitung im Notfall. Es ist ein von Eisenbahntunneln übernommenes Konzept, um auch in gestörten Betriebssituationen die Sicherheit zu gewährleisten. Der Status des zu erdenden Fahrleitungsabschnitts wird dabei dauernd überwacht und der geerdete Zustand der Fahrleitung an den Arbeitsgrenzen und Zugängen, z. B. elektrifizierten Nachbarabschnitten oder Auf- und Abfahrten, signalisiert (s. Bild 9). Im Zuge der Nutzer- und Funktionsanalyse wurden verschiedene Einsatzszenarien untersucht und Anforderungen für die kontinuierliche Ausrüstung elektrifizierter Streckenabschnitte definiert.



Bild 9 **Automatisierte Erdungsanlage mit a) Bedientableau und angetriebenem Erdungstrenner sowie b) aktiviertem Arbeiterschild**

TB 3 - Errichtung, Betrieb und Instandhaltung

Während sich die zuvor dargestellten Themenblöcke auf die baulichen und elektrischen Anforderungen der Fahrleitung konzentrierten, bilden Errichtung und Betrieb des Systems den Schwerpunkt dieses Themenkomplexes. Hauptanliegen war dabei, Eingriffe in den Verkehrsablauf zu vermeiden.

TB 31 Errichtungskonzept

Diese Arbeitsmappe beschreibt die Errichtung der Anlage unter Aufrechterhaltung des Verkehrs. Zentraler Baustein ist die Realisierung eines wirksamen Arbeitsstellenmanagements zur Minimierung der Beeinträchtigungen des Verkehrsflusses. Bauablauf und Arbeitsschritte werden so geplant, dass die Regeln für Arbeitsstätten (ASR) [15] und die Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA) [16] eingehalten und Staus, Unfälle und Gefahren für Arbeitskräfte vermieden werden.

TB 32 Instandhaltungskonzept für die Fahrleitungen elektrifizierter Abschnitte

Das erarbeitete Instandhaltungskonzept basiert auf den umfangreichen Erfahrungen aus dem Eisenbahn- und Nahverkehrsbereich. Kern ist die Beschreibung und funktionale Gruppierung der Tätigkeiten, sodass den Instandhaltungsstufen Wiederholungszyklen, Materialien und Sicherungsmaßnahmen zugeordnet werden können. Diese Systematik ermöglicht auch die Koordination mit den Instandhaltungsarbeiten der Autobahnmeistereien gemäß dem Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst [17].

TB 33 Technisches Monitoring für Stromabnehmer

In Ergänzung zu den Instandhaltungsarbeiten an Stromabnehmern im Stillstand und zu den beschränkten Möglichkeiten der Selbstdiagnose der Stromabnehmer während der Fahrt kann die Bewertung der Stromabnehmereigenschaften im Betrieb zweckmäßig sein. Das Konzept beschreibt Aufgaben, Ziele und Prototypen eines solchen Technischen Monitoring-Systems, das z. B. den Fahrdrähtanhub durch den Stromabnehmer misst und dem jeweiligen Fahrzeug zuordnet (s. Bild 10). Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Kontaktgüte und den Wartungszustand des Stromabnehmers.

TB 34 Störfallmanagement (Rettungskonzept)

Das Konzept zum Störfallmanagement enthält Handlungsempfehlungen für Störfälle auf Streckenabschnitten mit Fahrleitungen. Basierend auf Störfallplänen des Straßenwesens werden Ereignisstufen für Störfälle an oder in der Nähe der Fahrleitung definiert und die Meldekettens so angepasst, dass das für den Betrieb elektrischer Anlagen gemäß [18] verantwortliche Personal eingebunden ist.

TB 35 Gefährdungen durch Eisbehang auf Oberleitungen

Die Entstehung und Ausprägung von Eisbehängen an Fahrleitungen ist stark abhängig von klimatischen und örtlichen Faktoren. Die Arbeitsmappe beschreibt für Einsatzgebiete mit erwarteter Neigung zur Eisbildung die mechanischen, chemischen und elektrischen Verfahren zur Enteisung der Fahrleitung. Nach Abwägung der Vor- und Nachteile sind die elektrischen Verfahren klar zu bevorzugen.

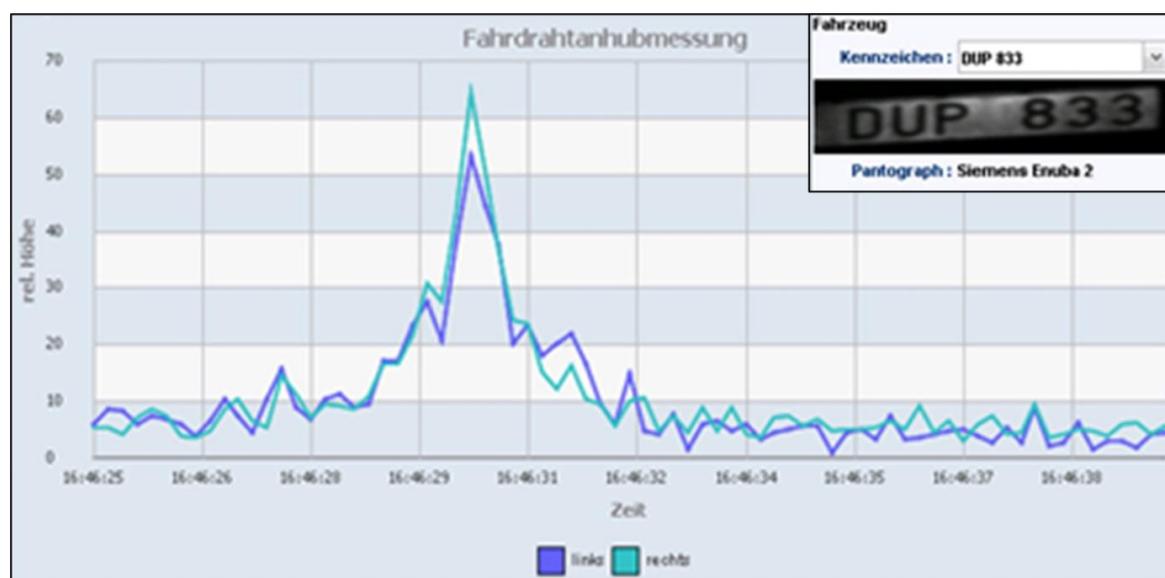


Bild 10 Beispieldatensatz der Fahrdrahtanhubmessung auf der Versuchsanlage

TB 4 - Fahrzeugtechnik

Die Installation eines Stromabnehmers auf einem Lkw kann dessen Verhalten verändern. Gegenstand dieses Themenkomplexes sind die Identifikation der wesentlichen Wirkungsmechanismen und die Abschätzung der Änderungen im jeweils kritischsten Einsatzfall.

TB 41 Ausweichverhalten und Änderungen in der Fahrdynamik

Ausgangspunkt der Betrachtungen zur Fahrdynamik war die Eingrenzung auf den kritischen Fall einer einzeln fahrenden zweiachsigen Sattelzugmaschine. Es wurden folgende fahrdynamische Kriterien definiert: Kipptest, Kreisfahrt, Bremsen, Spurwechsel, Frequenzgang Sinuslenken und Lenkwinkelsprung. Die Änderungen im Fahrverhalten wurden rechnerisch abgeschätzt und Auslegungshinweise zur Abstimmung von Achsabstand und Schwerpunktlage abgeleitet.

TB 42 Änderungen im Crashverhalten der Hybrid-Lkw mit Stromabnehmer

In diesem Arbeitsgebiet werden für einen Lkw mit Stromabnehmer die Crash-Situationen Frontal-, Seiten- und Heckaufprall im Vergleich zu einem konventionellen Lkw bewertet, s. Bild 11. Die Bewertung zeigt, dass nur durch den in früheren Entwicklungsstufen an der Fahrzeugfront angebrachten Fernbereichssensor Änderungen hervorgerufen werden. Durch die neue Einbauposition auf dem Lift besteht kein Unterschied mehr zu konventionellen LKW hinsichtlich der Kontaktzonen und Crashfälle.

TB 43 Änderungen Brandverhalten der Hybrid-Lkw mit Stromabnehmer

Die Betrachtungen beschränkten sich auf die Veränderungen durch das Gesamtsystem Stromabnehmer, d. h. ohne Antriebstechnik und Energiespeicher. Die verwendeten Materialien und Bauteile sind so auszuwählen, dass diese möglichst hohe Brandschutzklassen aufweisen. Der Nachweis der Materialeigenschaften und der Erfüllung der weiteren formulierten Anforderungen erfolgt entwicklungsbegleitend und ist mit dem Inverkehrbringer des Gesamtfahrzeugs abzustimmen

TB 44 Einschränkungen bei Gefahrguttransporten

Schwerpunkt der Arbeitsmappe war die Beurteilung möglicher Einschränkungen konventioneller Gefahrguttransporte auf elektrifizierten Abschnitten. Im Ergebnis der Gefährdungs- und Situationsanalyse sind diese nicht zu erwarten, da der Parallelverkehr von Gefahrguttransporten in der Nähe zu elektrischen Verkehrsmitteln wie z. B. Straßenbahnen bereits heute gefahrungsfrei realisiert wird. Ergänzend werden Anforderungen an Hybrid-Lkw mit Stromabnehmern für Gefahrguttransporte formuliert.

TB 45 Verlängerung des Sattelzugs auf 17,0 m

Für den Stromabnehmer muss bei Sattelzugmaschinen der Sattel um 0,5 m versetzt werden. Dadurch erhöht sich die Fahrzeuglänge von bisher 16,5 m auf max. 17,0 m. In der Arbeitsmappe wurden die Änderungen am Kurvenfahrverhalten untersucht und Hinweise zu Ausnahmegenehmigungen gegeben. Simulierte Schleppkurven des Vergleichs-Lkw und eines Lkw mit Stromabnehmer unterschieden sich nur um max. 3 cm, sodass sich der Kurvenlauf nicht sicherheitskritisch verschlechtert.

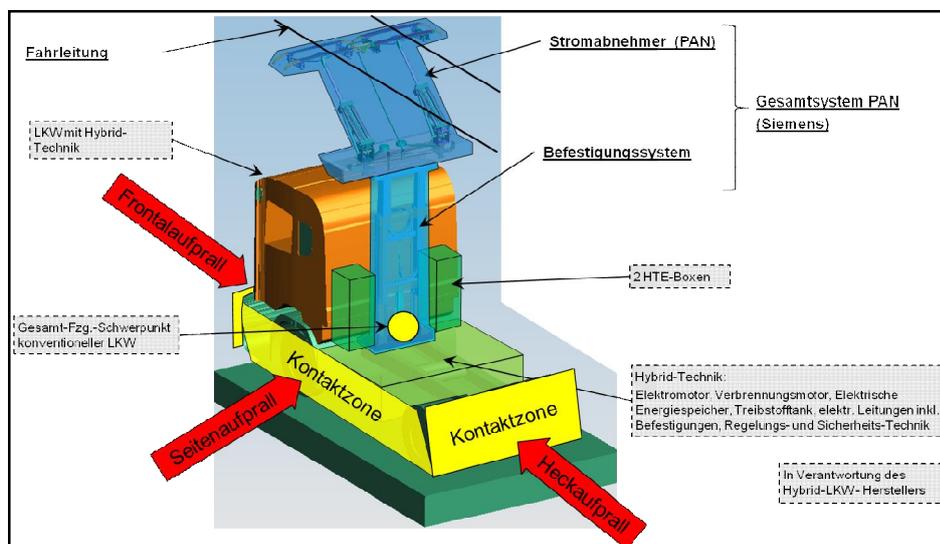


Bild 11 Crash-Situationen und Kontaktzonen einer Sattelzugmaschine mit Stromabnehmer

Einordnung der Ergebnisse und Handlungsleitfaden

In der Zusammenschau der Ergebnisse des technischen Bewertungsprozesses wird deutlich, dass die Elektrifizierung von Streckenabschnitten mit hohem Schwerverkehrsanteil und die Ausrüstung schwerer Nutzfahrzeuge mit Stromabnehmern eine technisch machbare Option zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs ist. In der umfassenden Betrachtung der Wechselwirkungen der Teilsysteme untereinander und mit dem vorhandenen Umfeld hinsichtlich Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsablauf wurden keine Aspekte identifiziert, die einer Elektrifizierung grundsätzlich entgegen stehen.

Bei der Erarbeitung der Einzelthemen wurden die jeweils maßgeblichen Anforderungen, Randbedingungen und Bewertungskriterien formuliert. Vielfach wurden zugeschnittene Untersuchungs- und Bewertungsmethoden entwickelt, die auf konkrete Projektierungen übertragbar sind.

Je nach Umfang des Gesamtprojekts ist für die Errichtung einer Fahrleitung als Teil einer Fernstraße von einem Bauordnungsverfahren, ggf. in Verbindung mit einem Bebauungsplan, von einem Plange-nehmungsverfahren oder einem Planfeststellungsverfahren auszugehen. In ein Planfeststellungsverfahren kann eine Umweltverträglichkeitsprüfung eingebettet sein. Die Art des Genehmigungsverfahrens und der Umfang der einzureichenden Planungsunterlagen sind zu Beginn der Planungsarbeiten mit der zuständigen Verkehrsbaubehörde abzustimmen.

Wesentliche Aspekte der Planung erfordern zu Beginn eine detaillierte Streckenbesichtigung und -analyse hinsichtlich:

- Ausprägung der Seitenräume, u. a. von Dammlagen, Einschnitten, Knotenpunkten
- Erfassung der Höheneinschränkungen durch Verkehrszeichenbrücken und Überführungen
- Erfassung von Brückenbauwerken im Streckenverlauf und Auswertung der Bauwerksbücher
- Erfassung der vorhandenen Fahrzeugrückhaltesysteme und Lärmschutzeinrichtungen
- Vorprojektierung der Fahrleitung und Stromversorgung zur Ermittlung der Unterwerksstandorte und Abstimmung der Standorte der Bedienterminals für die Notabschaltung der Fahrleitung

Bei der Prüfung der Bauunterlagen ist für die Fahrleitungsanlage ein Prüfstatiker erforderlich. Weiterhin sind im Zuge der Planungen die Ansprechpartner für die Erarbeitung und Abstimmung des Störfallmanagements, die Abstimmung des Errichtungskonzepts sowie die Erarbeitung und Abstimmung des Konzepts zur Instandhaltung des Fahrleitungssystems zu ermitteln.

Je nach Größe der eingesetzten Fahrzeugflotte sind entwicklungsbegleitende Schritte für Projektierung, Bau und Zulassung der Hybrid-Lkw mit Stromabnehmer erforderlich. Eine Schlüsselrolle kommt dabei dem Inverkehrbringer der Fahrzeuge zu, der sich mit den Zulassungsbehörden abstimmen muss. Einen Überblick über die Einzelaspekte in Abhängigkeit der Flottengröße gibt Tabelle 5.

Tabelle 5 Rollen und Zuständigkeiten in Abhängigkeit der Seriengröße

	Kleinstserie (Einzelgenehmigungen)	Kleinserie (≤ 250 Stk.) (Ggf. Ausnahmegenehmigung)	Serie (> 250 Stk.)
Fahrzeughersteller (Hybrid-LKW)	Hersteller und Lieferant des Lkw mit Typgenehmigung und/oder Erstzulassung		Hersteller und Lieferant des Lkw mit Typgenehmigung ggf. Erstzulassung
Untertierlieferant (Stromabnehmer)	Zulieferer; ggf. prototyp-hafte Bauteile, mit funktio-naler Verantwortung	Zulieferer; mit funktionaler Verantwortung	Zulieferer; mit funktionaler Verantwortung, Fertigung nach vorgegebenen Produktions- und Qualitäts-Anforderungen
Inverkehrbringer (Hybrid-LKW mit Stromabnehmer)	Hersteller; Verantwortlich für Zulassungs- und Genehmigungstauglichkeit, Verkehrssicherheit und Haftungsübernahme		Hersteller; Verantwortlich für Typgenehmigung (Deutschland, EU oder weltweit) und Einhaltung von Vorgaben (Produktions- und Qualitäts-Anforderungen)
Zulassungsbehörde (Technischer Dienst)	Zulassungsstelle; Prüfung und Bescheinigung der Zulassungseignung, erteilt Einzelgenehmigung	Zulassungsstelle; Prüfung auf Zulassungseignung, erteilt Genehmigung, ggf. Ausnahmegenehmigung.	Zulassungsstelle; Prüfung auf Zulassungseignung, erteilt Genehmigung
Gutachter (ggf. Techn. Dienst)	Begutachtungs- bzw. Beratungsfunktion		in der Regel nicht erforderlich

3.1.2 Ökonomisch-ökologischer Bewertungsprozess

Neben den technisch-konzeptionellen Studien und den Arbeiten und Auslegungsdokumenten zur Planung und Errichtung der Versuchsanlage kommt der ökologischen und ökonomischen Bewertung des Systems erhebliche Bedeutung zu. Die ökologische Dimension ergibt sich bereits aus der Motivation und Zielstellung des Vorhabens, dass durch die zu entwickelnde Elektrifizierungstechnologie ein signifikanter Beitrag zur Senkung der durch den Straßengüterverkehr erzeugten CO₂-Emissionen geleistet werden soll. Im Rahmen der ökonomischen Bewertung wurden Abschätzungen des Nutzerpotentials, des ökonomischen Vorteils aus Nutzersicht sowie erste Einschätzungen zu Finanzierungs- und Betreibermodellen erarbeitet.

Der Vielfältigkeit der Fragestellungen und Einflussfaktoren trägt die Struktur des Bewertungsprozesses und der beteiligten Fachbehörden und Institutionen Rechnung, s. Bild 12.



Bild 12 Beteiligte Partner und Rollen bei der ökonomisch-ökologischen Bewertung

Für die beiden Teilgebiete der ökonomischen und ökologischen Bewertung wurde durch die Forschungspartner Siemens AG und TU Dresden ein Bewertungsmodell in enger Abstimmung mit den Partnern und Prüfern des Umweltbundesamts (UBA), Bundesamts für Naturschutz (BfN), DLR-Instituts für Verkehrsforschung, Instituts für Energie und Umweltforschung (ifeu), der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST) und der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) entwickelt. Die Bewertungskriterien, methodischen Ansätze und Parameterannahmen wurden im Zuge des Bewertungsprozesses in vier Fokus-Workshops mit den Partnern und Prüfern intensiv diskutiert und abgestimmt. Dieser Workshop-Prozess wird in Bild 13 veranschaulicht.



Bild 13 Fokus-Workshops der ökonomisch-ökologischen Bewertung

Die Darstellung der Ergebnisse kann angesichts der Komplexität des Modells, den sehr umfangreichen Parameterstudien und den ergänzenden Anlagen hier nur überblicksartig erfolgen. Für weitergehende Betrachtungen wird auf die ausführlichen Darstellungen in [19] verwiesen.

Direktvergleich zwischen Oberleitungs-Hybrid-Lkw (OH-Lkw) und konventionellem Diesel-Lkw

Ein Direktvergleich zwischen Oberleitungs-Hybrid-Lkw und konventionellem Diesel-Lkw verdeutlicht die ökonomischen und ökologischen Wirkungen der Umstellung auf ein Oberleitungs-Hybrid-System (eHighway-System). Auf Fahrzeugebene wurden Energieverbrauch, CO₂-Emissionen und Mobilitätskosten beider Antriebsalternativen gegenübergestellt, s. Bild 14.

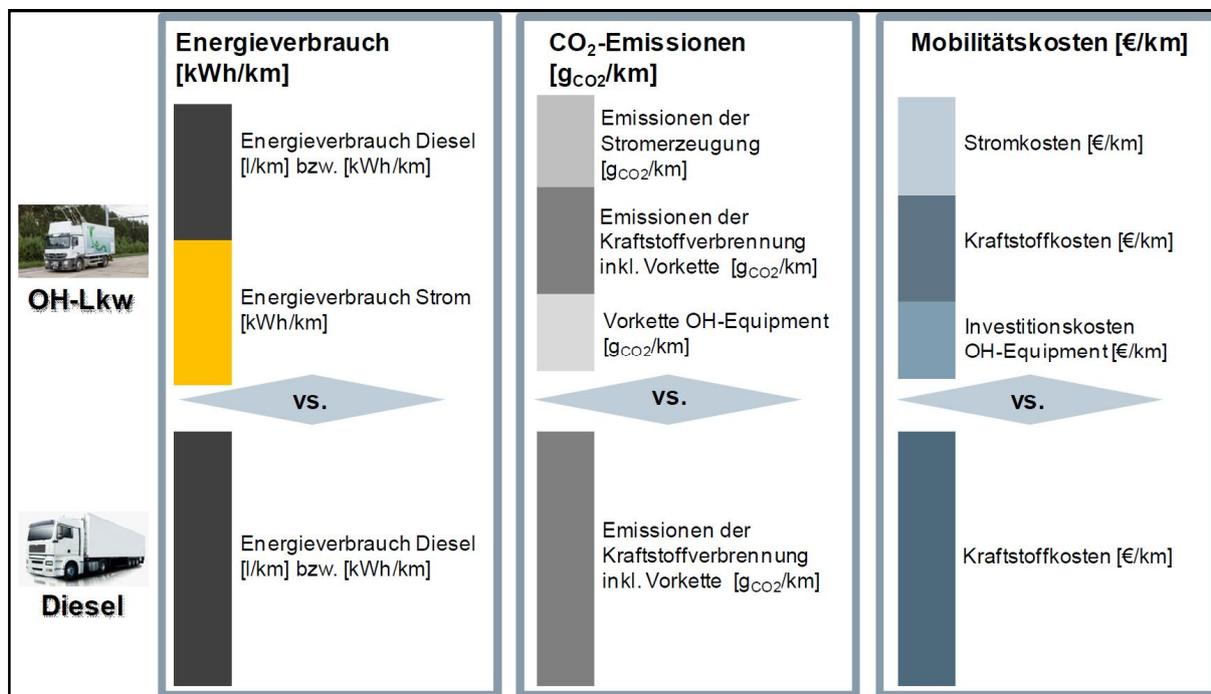


Bild 14 Kriterien eines Direktvergleichs zwischen OH-Lkw und konventionellen Diesel-Lkw

Für den Direktvergleich wurden zwei Haupt-Szenarien untersucht:

- Das **Basis**-Szenario der ökonomischen und ökologischen Bewertung beruht auf Prognosen und Parametern aus aktuellen Studien der Bundesregierung und wissenschaftlichen Instituten.
- Einer konservativen, absichernden Betrachtungsweise entsprechend, werden für das Szenario **Pro-Diesel** bewusst ungünstige Rahmenbedingungen für das OH-System angenommen.

Die beiden Szenarien unterscheiden sich durch Variation folgender, einflussreicher Faktoren:

- Fahrzeugkosten bzw. Mehraufwendungen OH-Lkw
- Energiepreisentwicklung (Strom, Diesel)
- Infrastrukturkosten und Streckenausbaugeschwindigkeit

Darüber hinaus wurden zwei Energie-Szenarien für die Entwicklung der Energieerzeugung definiert, um Unterschiede für die Emissionsbelastung bei der Stromerzeugung abzubilden:

- Das Szenario **Strommix** steht für die Zusammensetzung des eingespeisten Stroms, wie sie in der BMU-Leitstudie 2011 [20] prognostiziert wurde.
- Im Szenario **100 % Erneuerbare Energien (100% EE)** wird von einer Versorgung mit 100% EE ausgegangen.

Diese vier Szenarien wurden im Direktvergleich anhand folgender Parameter im Zeitvergleich (2020 bis 2050) untersucht: Fahrzeugkosten, materielle Mehraufwände (Sachbilanz), Energieverbrauch, Energiepreise und Emissionsfaktoren.

Ein direkter Vergleich des Energieverbrauchs der beiden Fahrzeugkonzepte Diesel-Lkw und OH-Lkw zeigt einen je nach elektrischem Fahrleistungsanteil zum Teil deutlichen Kraftstoffminderverbrauch für den OH-Lkw im Vergleich zum Diesel-Lkw. Bei 100 % elektrischer Fahrleistung wird ein um ca. 50 % geringerer Energieverbrauch des OH-Lkw im Vergleich zum Diesel-Lkw erwartet. Ein Vergleich mit Kraftstoff- und Energieverbräuchen weiterer Antriebstechnologien, z. B. der Verbrennung fossiler oder aus Erneuerbaren Energien synthetisierter Kraftstoffe, zeigt auch hier die Konkurrenzfähigkeit der OH-Technologie. Für die Beurteilung des Primärenergiebedarfs der beiden Fahrzeugkonzepte wurden

beim Diesel-Lkw der Energieinhalt des verbrauchten Diesels und die Aufwände zur Herstellung des Diesels berücksichtigt. Beim OH-Lkw wurden die Aufwände aus der Herstellung und Verteilung des Stromes und die Aufwände aus der Herstellung des OH-Equipments berücksichtigt.

Im Direktvergleich der CO₂-Emissionen wurden die beiden Antriebstechnologien unter der Annahme von mindestens 50 % elektrischer Fahrleistung des OH-Lkw gegenübergestellt. Dabei wurden die auftretenden CO₂-Emissionen unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte bestimmt:

- Direkte Emissionen durch den Betrieb des Lkw
- Emissionen aus der Herstellung des Diesels / des Stroms
- Emissionen aus der Herstellung der Zusatz-Ausrüstungen für den OH-Lkw (OH-Equipment)

Für das Szenario **100 % Erneuerbare Energien** zeigt Bild 15 den Vergleich der spezifischen CO₂-Emissionen in den Bewertungsjahren 2020, 2030, 2040 und 2050.

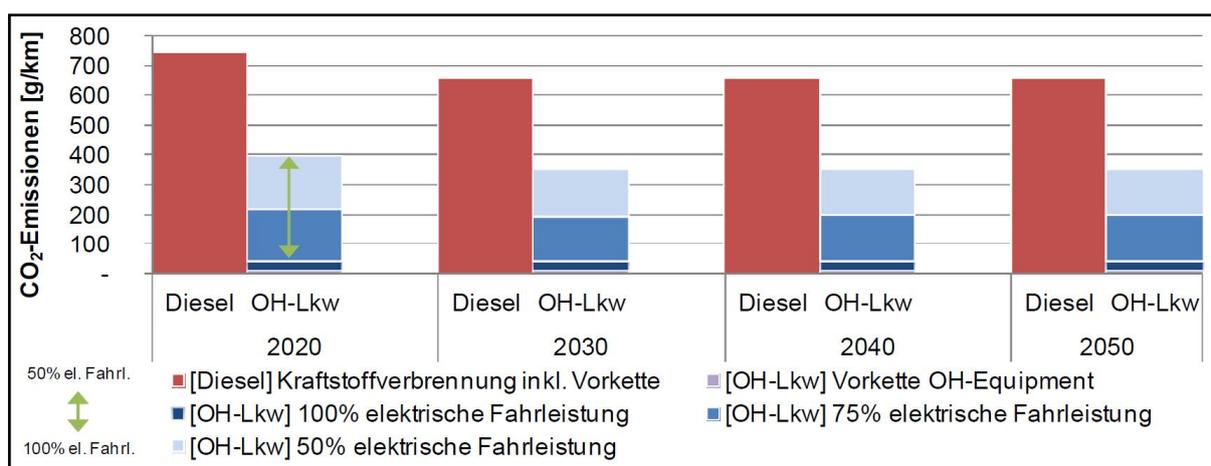


Bild 15 Direktvergleich der CO₂-Emissionen im Szenario 100% EE

In Bezug auf die CO₂-Emission zeigt Bild 15 den deutlichen Vorteil der OH-Lkw gegenüber konventionellen Diesel-Lkw im Szenario 100 % EE (erneuerbare Energien). Neben dem Potential zur CO₂-Reduktion kann auch für das Versauerungs-, Eutrophierungs- und photochemische Ozonbildungspotential eine deutliche Verringerung durch den OH-Lkw festgestellt werden. In Abhängigkeit von der elektrischen Fahrleistung kann bereits eine schrittweise Umstellung von Fahrzeugflotten auf OH-Lkw einen wichtigen Beitrag zur flottenspezifischen Senkung von CO₂-Emissionen leisten.

Bei dem Direktvergleich der Mobilitätskosten wurden neben den Dieselmotorkraftstoffkosten und den Stromkosten auch die Mehrkosten für die zusätzliche OH-Ausrüstung berücksichtigt. Es wurden die Mobilitätskosten der Antriebstechnologien gegenübergestellt, unter der Annahme eines mindestens 50%igen elektrischen Fahrleistungsanteils des OH-Lkw. Die Mobilitätskosten des OH-Lkw liegen je nach Szenario zum Teil deutlich unter den Werten des Diesel-Lkw. Dies ist bereits bei einer 50%igen elektrischen Fahrleistung der Fall. Aus diesem signifikanten Kostenvorteil ergibt sich ein Potential für einen Nutzerbeitrag zu den Investitionskosten für die Infrastruktur.

Folgende Parameter wurden bei dem Direktvergleich der Mobilitätskosten berücksichtigt:

- Unterschiedlich steigende Energie- und Dieselmotorkraftstoffkosten bis zum Jahr 2050
- Effizienzsteigerungen beim Diesel-Lkw kompensieren nicht die steigenden Kraftstoffkosten

Im Ergebnis überkompensiert der Energiekostenvorteil des OH-Lkw im Vergleich zum Diesel-Lkw die für das OH-Lkw-Equipment und insbesondere den Stromabnehmer anfallenden Mehrkosten. Ein Vergleich der spezifischen CO₂-Emissionen und Mobilitätskosten macht deutlich, dass strombasiertes Fahren zum einen zu einer signifikanten Emissionsreduktion führt und zum anderen einen deutlichen Kostenvorteil bietet und damit aus ökonomischer Sicht für den Transportdienstleister eine vielversprechende Alternative zu einem konventionellen Diesel-Lkw sein kann.

Für eine umfassende Abschätzung der Wirtschaftlichkeit und der Umweltwirkungen ist jedoch die Berücksichtigung der Infrastruktur unerlässlich. Dazu wurde neben einer Strecke mit hohem Pendelverkehrsaufkommen ein größeres Streckennetz von ca. 4.100 km Länge als Ausbaumodell untersucht.

Ökonomische und ökologische Bewertung eines Ausbaumodells

Um die hohe Lebensdauer der OH-Infrastruktur angemessen zu berücksichtigen, wurde auf Basis von Kosten- und Nutzenparametern eine Abschätzung zu Nutzer- und Fahrleistungsgrößen über einen längeren Zeitraum vorgenommen. Das Ausbaumodell soll die ökonomischen und ökologischen Wirkungen eines umfassenderen Ausbaus des OH-Systems verdeutlichen.

In die Berechnung der Infrastrukturkosten wurden die Anlagen der Fahrstromversorgung, das Fahrleitungssystem, die Unterwerke sowie der Bau leit- und sicherheitstechnischer Einrichtungen berücksichtigt. Für die Berechnung der Betriebskosten wurden u. a. folgende Komponenten berücksichtigt: Personal, Fremdleistungen, Mieten, Material, IT/ Kommunikation und Wartungsfahrzeuge. Die Abschätzung der durchschnittlichen jährlichen Betriebskosten wurde mit einem Anteil von 2 % der gesamten Infrastrukturkosten vorgenommen.

Ausgangspunkt der Wirtschaftlichkeitsprüfung war die Kalkulation eines Streckenkilometers (beide Richtungen), wobei der Untersuchung durchgängig ein erhöhter Wert zugrunde gelegt wurde, welcher sich aus der konservativen Einschätzung des Szenarios **Pro-Diesel** ableitet und so einen Risikoaufschlag von 20 % enthält.

Für die Realisierung eines kumulierten finanziellen Vorteils auf der Nutzerseite wurde für das **Basis**-Szenario die Auslastung eines Streckenkilometers ermittelt. Dies beinhaltet auch die Deckung der jährlichen Infrastruktur- und Betriebskosten. Eine Untersuchung des Streckennetzes der BAB konnte zeigen, dass ca. 50 % des Gesamtnetzes ein Schwerlastverkehrsaufkommen aufweist, das mindestens der berechneten Auslastung zur Deckung der Infrastruktur- und Betriebskosten entspricht. Dabei sorgen die im Zeitverlauf für den OH-Betrieb immer vorteilhafteren Mobilitätskosten für eine Reduktion des für einen wirtschaftlichen Betrieb erforderlichen Mindest-Aufkommens.

Der Ausbau des OH-Systems wurde für ein exemplarisches Streckennetz der BAB untersucht. Hierbei wurde der potentielle Beitrag zur CO₂-Reduktion sowie die Frage nach der Wirtschaftlichkeit untersucht, wobei der Fokus auf die mittel- und langfristigen ökonomischen und ökologischen Wirkungen des OH-Systems gerichtet wurde. Die Modellannahmen der Ausbaustrecke beruhen auf realen Streckenverläufen und Verkehrsdaten. Dabei wurden jedoch keine Fahrprofile und streckenspezifische Pendelverkehrsanteile schwerer Nutzfahrzeuge dargestellt. Vielmehr stellt das Ausbaumodell das ökonomische und ökologische Potential des OH-Systems in einem eingeschwungenen Zustand mit einer stabilen Anzahl von Nutzern dar.

Mit Hilfe einer Mautdatenauswertung zum Schwerlastverkehr im Jahr 2012 wurden aus dem BAB-Netz insgesamt neun Strecken inklusive Verbindungsstrecken zur Bildung eines zusammenhängenden Netzes mit der höchsten täglichen Abschnittsbefahrung ausgewählt. Die charakteristischen Daten dieses Ausbaunetzes werden in Tabelle 6 mit den Kenndaten des gesamten deutschen Autobahnnetzes verglichen.

Tabelle 6 Vergleich von OH-Streckennetz (Ausbaumodell) und gesamtem BAB-Netz

	Netz Ausbaumodell	BAB-Netz
Streckenlänge	4110 km	12845 km
Streckenanteil	32,0 %	100 %
jährliche Fahrleistung mautpflichtiger Lkw	16,04 Mio. km	26,69 Mio. km
Anteil der Fahrleistung	60,1 %	100 %

Auf ca. 6 % des untersuchten Ausbaunetzes von 4110 km ist eine Errichtung einer Oberleitung technisch nur eingeschränkt oder nicht möglich, z. B. durch nicht elektrifizierbare Talbrücken oder niedrige kreuzende Bauwerke. Dieser Anteil wird im Rechenmodell von der untersuchten Ausbaustrecke abgezogen, wodurch sich eine Streckenlänge von 3863 km ergibt, auf der ca. 57 % der mautpflichtigen Fahrleistung erbracht werden.

Unter der Annahme der jährlichen elektrischen Fahrleistung mautpflichtiger Lkw auf der Ausbaustrecke wurden die Mobilitätskosten der OH-Lkw unter Berücksichtigung der jährlichen elektrischen Fahrleistung berechnet und mit den Mobilitätskosten eines Diesel-Lkw verglichen. Die Umstellung auf den OH-Betrieb durch den Transportdienstleister im Rahmen des Ausbaumodells wird erwartet, sobald die Mobilitätskosten des OH-Betriebs im Vergleich zum konventionellen Betrieb geringer sind.

Durch den sukzessiven Streckenausbau wird für das Ausbaumodell insgesamt eine zeitliche Verzögerung bei der rentablen Nutzung des OH-Systems angenommen. Demgegenüber kann auf Pendelstrecken aufgrund der speziellen Nutzergruppe der wirtschaftliche Betrieb unverzögert beginnen.

Kern der ökonomischen Bewertung ist ein Modell zur Berechnung des finanziellen Vorteils der Transportdienstleister. Der ökonomische Nutzen wird als Differenz zwischen den finanziellen Vorteilen für die Transportdienstleister und den Gesamtinfrastrukturkosten ermittelt. Über einen dreißigjährigen Zeitraum übersteigt der finanzielle Vorteil der Transportdienstleister – sowohl im **Basis**-Szenario, als auch im Szenario **Pro-Diesel**– die gesamten Infrastruktur- und Betriebskosten. Die kumulierten Werte berücksichtigen auch die Jahre des Infrastrukturaufbaus, in welchen nur ein geringerer Kostenvorteil durch den OH-Betrieb erwartet wird.

Zusätzlich wurde ein Risikoabschlag in Form eines Mindestkostenvorteils für Transportdienstleister kalkuliert, welcher als Bedingung für einen Umstieg auf OH-Lkw angenommen wurde. Entsprechend der Untersuchung kann für einen eingeschwungenen Zustand die Finanzierung der OH-Infrastruktur und des Betriebs realisiert werden. Für ausgewählte Parameter wurden durch eine Break-Even-Analyse errechnet, ab welchen Wertausprägungen ein ökonomischer Nutzen des OH-Systems vorliegt.

In der Bewertung der ökologischen Auswirkungen der Errichtung und des Betriebs des OH-Systems wurden sowohl die stofflichen Belastungen sowie die physischen Belastungen und der Ressourcenverbrauch berücksichtigt. Bei den stofflichen Belastungen wurde für das Ausbaumodell das Einsparungspotential der CO₂-Emission im Zeitvergleich bestimmt. Darüber hinaus wurden Betrachtungen zu Versauerung, Eutrophierung, Ozonbildung und Feinstaub vorgenommen.

Die Untersuchung physischer Belastungen wie Lärm und der Belastung von Natur und Landschaft konnte die Unbedenklichkeit des OH-Systems in diesen Punkten verdeutlichen. In der Betrachtung des Ressourcenverbrauchs wurden u. a. Energieaufwand und Flächenbedarf überprüft. Bild 16 zeigt die bei der ökologischen Bewertung untersuchten Wirkungszusammenhänge.

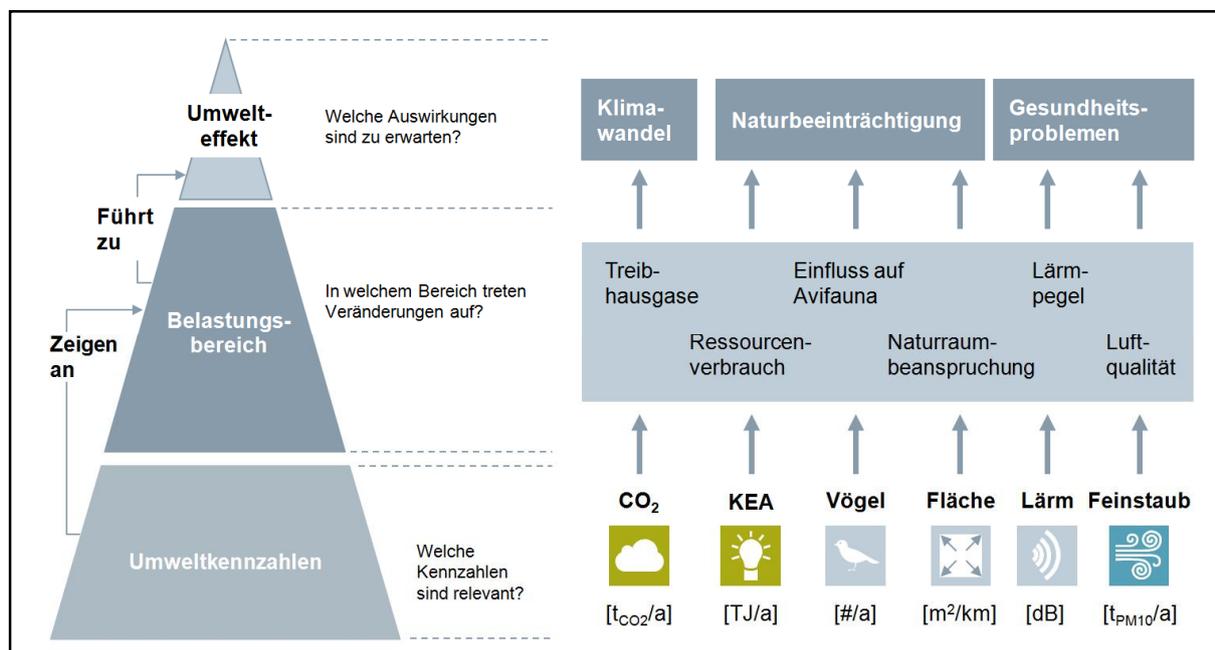


Bild 16 Ökologische Bewertung - Wirkungszusammenhänge

3.1.3 Rechtliche Bewertung

In der Untersuchung „Rechtliche Aspekte der Elektrifizierung von Autobahnen als E-Highway“ werden sowohl die durch eine technische Umsetzung des eHighway-Systems tangierten Rechtsbereiche sowie weitere mögliche rechtliche Barrieren untersucht.

Die Analyse des Gutachtens aus der ersten Projektphase über den bestehenden Rechtsrahmen für die Planung, die Errichtung und den Betrieb einer Oberleitungsinfrastruktur (OLI) als Fahrstromnetz (FSN) für oberleitungsfähige Hybrid-Lkw (OH-Lkw) an Bundesstraßen (eHighway) wurde in ENUBA 2 weiter vertieft. Während das erste Gutachten seinen Fokus noch stärker auf die Planung- und Errichtung der OLI und einen möglichen Testbetrieb richtete, standen im Zentrum des zweiten Gutachtens stärker Fragen des Betriebs der Oberleitung als FSN unter dem Regime des Energiewirtschaftsrechts und als Teil der Straße unter dem Regime von Straßen- und Straßenverkehrsrecht.

Die einzelnen Themenschwerpunkte wurden zu den folgenden Arbeitspaketen zusammengefasst:

- Datenschutzrechtliche Aspekte
- Systemseitige Eingriffe in den Fahrbetrieb
- Metastudie zum teilautonomen Straßenverkehr
- Vertiefte Begutachtung der Aufgaben, Rechte und Pflichten der an der Planung, Errichtung und am Betrieb der Oberleitungsinfrastruktur Beteiligten
- Voraussetzungen des Betriebs eines Fahrstromnetzes für OH-Lkw als Kundenanlage, geschlossenem Verteilernetz oder ohne Regulierung durch das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)
- Anregungen zur Optimierung des Rechts- und Politikrahmens

Die Darstellung der Ergebnisse kann angesichts der mehrdimensionalen rechtswissenschaftlichen Fragestellungen sowie jeweils mehreren zu betrachtenden Merkmalsausprägungen hier nur zusammenfassend erfolgen. Für weitergehende Betrachtungen wird auf die ausführlichen Darstellungen in [21] verwiesen.

Datenschutzrechtliche Aspekte

Da in Bezug auf personenbezogene Daten die durch das Bundesdatenschutzgesetz festgeschriebene Einhaltung datenschutzrechtlicher Vorgaben gilt, wird empfohlen, durch die frühzeitige Anonymisierung der relevanten Daten die Einhaltung des Datenschutzes zu garantieren. Darüber hinaus soll fallspezifisch geprüft werden, ob die Erhebung personenbezogener Daten notwendig ist oder vermieden werden kann. Zu Abrechnungszwecken muss die Einwilligung der Nutzer für die Identitätsfeststellung eingeholt werden. Die Verwendung der Daten unterliegt dem jeweils zugelassenen Zweck, weshalb auch technische Systeme auf diesen Nutzungsbereich ausgerichtet sein sollten. Auch wurde das Potential von Mehrwertdiensten diskutiert, welche basierend auf einer Ermächtigungsgrundlage die Wahrung der Anonymität berücksichtigen.

Systemseitige Eingriffe in den Fahrbetrieb

Dieser Schwerpunkt beschäftigte sich mit der Klärung der Frage nach der Umsetzbarkeit eines Nutzerberechtigungssystems, welches auf unerwünschte oder illegale Nutzung der OLI reagiert. Dabei wurde festgestellt, dass es rechtlich nicht möglich ist, dem Nutzer die Autorisierung zum Anbügeln an die Oberleitung zu entziehen. Ebenso ist die Warnung des Fahrers bezüglich administrativer oder technischer Probleme nicht erlaubt. Erst unter Einbeziehung der Polizei sind alle möglichen Maßnahmen als Reaktion auf eine technische Störung legitimiert.

Die Unterbindung von Stromentnahmen ohne vertragliche Grundlage ist nur zivilgerichtlich möglich. Zur Minimierung des Missbrauchs wird die technische Prüfung der Stromabnehmer als vorgeschriebene Voraussetzung für die Teilnahme am elektrischen Oberleitungsbetrieb empfohlen.

Metastudie zum teilautonomen Straßenverkehr

Gemäß der standardisierten Verkehrsregeln des „Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr“ muss der Fahrzeugführer jederzeit ein Fahrerassistenzsystem übersteuern können. Unabhängig vom Automatisierungsgrad des Systems bleibt der Mensch Fahrzeugführer. Er muss das Fahrzeug so beherrschen können, dass er es jederzeit unter Kontrolle hat. Die Halterhaftung sowie die Haftung des Fahrzeugführers sind im Falle von Fahrerassistenzsystemen ohne Einschränkungen anwendbar.

Bei der Entwicklung von Assistenzsystemen und Automationslösungen sind im Rahmen des Haftungsrechts diverse Ansprüche sowohl des Systemkäufers bzw. -nutzers als auch Drittgeschädigter in erster Linie gegen den Fahrzeughalter zu beachten. In den Untersuchungen zur Zulässigkeit solcher Systeme sollte dementsprechend sowohl auf mögliche Konstruktionsfehler als auch auf Instruktionsfehler geachtet werden. Bei der Entwicklung sind Methoden des Sicherheits-Engineerings wie FMEA-Untersuchungen (FMEA - Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse) sowie Gefährdungs- und Risikoanalysen zwingend anzuwenden.

Vertiefte Begutachtung der Aufgaben, Rechte und Pflichten der an der Planung, Errichtung und am Betrieb der Oberleitungsinfrastruktur Beteiligten

Resultierend aus technischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten wird in der Betriebsphase der OLI (Oberleitungsinfrastruktur) zwischen den verschiedenen Rollen der Beteiligten unterschieden. Dabei ist die Entflechtung zwischen Fahrstromnetzbetreiber (FNB) und Stromlieferant von zentraler Bedeutung. Zur Stärkung des Wettbewerbs und zur Erhöhung der Transparenz soll die Unabhängigkeit des Netzbetreibers von den übrigen Wertschöpfungsstufen der Energieversorgung gefördert werden.

Bei dem Thema der Energieabrechnung für die OH-Lkw wurden die Rolle der Messstellenbetreiber und die Bedeutung der On-Board-Meter (OBM) diskutiert. Durch die Regelung des EnWG obliegt dem Stromlieferanten die Nutzung des Fahrleitungssystems für die Bereitstellung der Energie, wobei jedem Energieversorgungsunternehmen der Zugang zum Fahrstromnetz offen steht.

In den Betrachtungen zur Stromübertragung vom Lieferanten zum Nutzer (OH-Lkw-Betreiber) wurden alle relevanten Vertragsbeziehungen berücksichtigt. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Verträge zwischen Stromlieferant und FNB (Lieferantenrahmenvertrag) und zwischen Stromlieferant und Übertragungsnetzbetreiber (Bilanzkreisvertrag).

Während Errichtung, Betrieb und Instandhaltung der OLI durch das Straßenrecht und der Verkehr an der Oberleitung durch das Straßenverkehrsrecht öffentlich-rechtlich geregelt sind, unterliegt das Marktgeschehen in der Oberleitung als Fahrstromnetz überwiegend privatrechtlichen Regelungen.

Voraussetzungen des Betriebs eines Fahrstromnetzes für OH-Lkw als Kundenanlage, als geschlossenes Verteilernetz oder ohne Regulierung durch das EnWG

In dieser Teilstudie wurden die rechtlichen Bezugsgrößen einer exemplarischen eHighway-Anwendung am Beispiel kürzerer Pendelstrecken, z. B. im Hafenhinterland-Verkehr, untersucht. Mit dem Ziel der Identifikation möglicher Regulierungsvarianten jenseits des EnWG, wurde der Betrieb als Verein oder Genossenschaft betrachtet.

Die OLI kann dabei durch diese Dachkörperschaft selbst oder besser noch durch eine eigene Betreibergesellschaft errichtet und betrieben werden. Durch einen Gesellschaftsvertrag zwischen Dachgesellschaft und Betreibergesellschaft werden alle relevanten nutzungsspezifischen Aspekte definiert. Dies beinhaltet auch eine Regelung für den Kauf von Strom und den Verkauf rückgespeister Überschussenergie.

Anregungen zur Optimierung des Rechts- und Politikrahmens

In diesem abschließenden Kapitel in [21] werden aus den voranstehenden Arbeitspaketen Empfehlungen zu notwendigen oder sinnvollen Anpassungen und Präzisierungen des Rechts- und Politikrahmens zusammengestellt und ihre Bedeutung bewertet. Die vorgeschlagenen Anpassungen betreffen u. a. einzelne Aspekte einer Fahrstromverordnung, des Datenschutzrechts sowie des Straßen- und Verkehrsrechts.

3.1.4 Konzepte für elektrifizierte Nutzfahrzeuge

Die Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen gewinnt stetig an Bedeutung. In begleitenden Studien werden dazu regelmäßig verschiedene Antriebskonzepte technologisch und ökonomisch bewertet, so z. B. durch CE Delft und DLR in [22] oder durch das Öko-Institut im Auftrag des BMWi [23]. Um die Bezüge der eHighway-Technologie zur Erforschung und Bewertung anderer Antriebstechnologien und Einsatzgebiete herzustellen, werden in diesem Kapitel die Untersuchungsergebnisse zu folgenden Aspekten zusammengetragen:

- Verfahren zur Darstellung von Energiefluss und Wirkungsgrad des Gesamtsystems sowie Ermittlung maßgeblicher Fahrzeugparameter für den Energiebedarf
- Technologievergleich, Einsatzgebiete und Synergiepotenziale alternativer Antriebssysteme
- Technologietransfer und Einsatzperspektiven für weitere Nutzfahrzeugklassen

Energiefluss und Wirkungsgrad des Gesamtsystems

Die Schlüsselgröße zur Bewertung eines Antriebssystems ist der über die Fahrzeit bzw. den Fahrzyklus integrierte Wirkungsgrad. Kennzeichnend für elektrische Antriebssysteme ist die Möglichkeit zur Umkehr der Energieflussrichtung, wenn z. B. beim Bremsen oder bei Fahrten in Gefällen mechanische Energie am Rad aufgenommen und in elektrische Energie umgewandelt wird. Mit dieser können dann zunächst die Hilfsbetriebe an Bord versorgt oder Energiespeicher auf dem Fahrzeug nachgeladen werden. Steht noch mehr elektrische Bremsenergie zur Verfügung, können durch den Austausch über die Fahrleitung andere elektrische Fahrzeuge versorgt werden oder mittels eines Umrichters im Unterwerk sogar Energie ins Mittelspannungsnetz zurückgespeist werden. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Energieflussrichtungen zeigt Bild 17 die Unterwerks- und Fahrzeugkomponenten mit Energieumsatz und die zugeordneten Wirkungsgrade.

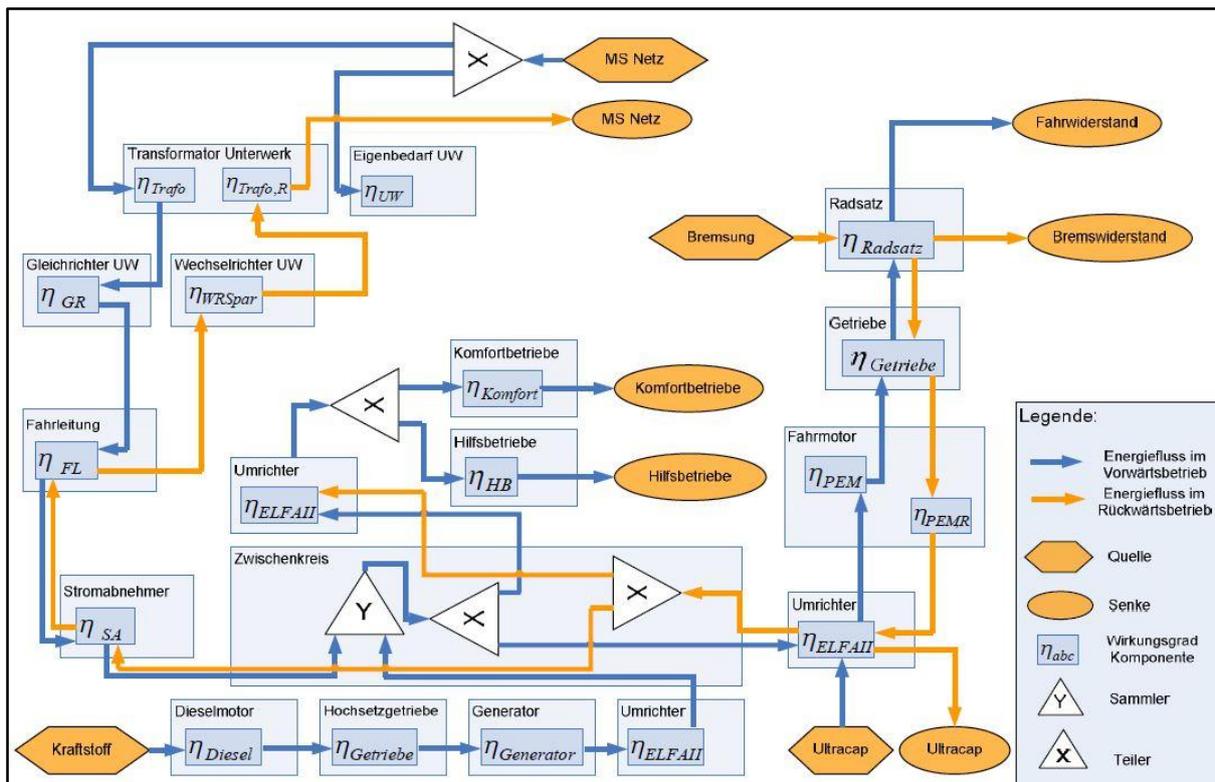


Bild 17 Energiefluss im Gesamtsystem für Traktion und Rückspeisung [25]

Die Berechnung des Systemwirkungsgrads kann aus den an den Systemgrenzen aufgenommenen oder abgegebenen elektrischen und mechanischen Leistungen mit Formel (1) nach [24] erfolgen:

$$\eta_{E-Gesamt} = \frac{\int P_{el,ab} dt + \int P_{mech,ab} dt + \int P_{Nutz-sonst} dt}{\int P_{el,auf} dt + \int P_{mech,auf} dt} = \frac{E_{el,ab} + E_{mech,ab} + E_{Nutz-sonst}}{E_{el,auf} + E_{mech,auf}} \quad (1)$$

Bei Komponentenwirkungsgraden über 95 % steigen die Anforderungen an die Genauigkeit der eingesetzten Messtechnik erheblich. Gleichzeitig sind sowohl die Systemgrenzen als auch die Punkte zwischen den Komponenten einer kontinuierlichen Messung kaum zugänglich. Daher wird vereinfachend zur Bestimmung des Gesamtwirkungsgrad auf die Verkettung von Teilwirkungsgraden zurückgegriffen, die zuvor über Einzelmessungen oder analytische Betrachtungen ermittelt wurden. Für den elektrifizierten Straßengüterverkehr ist (2) die entsprechende Berechnungsvorschrift nach [25]:

$$\eta_{Gesamt} = \eta_{Uw-Trafo} \cdot \eta_{Uw-GR} \cdot \eta_{FL} \cdot \eta_{PAN} \cdot \eta_{Antrieb} \cdot \eta_{Getriebe} \tag{2}$$

Die Wirkungsgrade der Teilsysteme und Komponenten wurden gemäß Tabelle 7 in Einzelmessungen, Simulationen oder analytischen Betrachtungen bestimmt.

Tabelle 7 Komponentenwirkungsgrade elektrischer Lkw im Oberleitungsbetrieb

Komponente	mittlerer Wirkungsgrad	Verfahren
Unterwerkstransformator (Uw-Trafo)	97 %	Messung [25]
Gleichrichter (Uw-GR) / Wechselrichter	98 % / 97 %	Messung [25]
Fahrleitung (FL)	(90) ... 95 ... (100) %	Analytisch [25] Messung [26]
Stromabnehmer (PAN)	99 %	Messung [27]
Antrieb	95 %	Referenzwerte [28]
Getriebe	95 %	Referenzwerte [28]
<i>Wirkungsgrad Gesamtsystem</i>	80 %	

Dieses Verfahren ist grundsätzlich auch auf andere Antriebs- oder Energieversorgungssysteme übertragbar. Dabei müssen die Antrieb und Getriebe vorgelagerten Komponenten entsprechend zugeordnet und wiederum mit Teilwirkungsgraden belegt werden. Geht man bei der Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen davon aus, dass die dem Getriebe vorgelagerte Antriebsmaschine immer ein Elektromotor ist, so bietet sich die Messung des Energiebedarfs ab Zwischenkreis an. Dazu wurden umfangreiche Fahrten mit einem ballastierten Lastzug durchgeführt, auf die in Abschnitt 3.4.5 eingegangen wird.

Elektrifizierte Lkw unterscheiden sich im Oberleitungsbetrieb von konventionellen Lkw vor allem durch den gehobenen Stromabnehmer. Zur richtigen Parametrierung der grundlegenden Formeln für Luft- und Fahrwiderstand wurden daher umfangreiche Ausroll- und Beschleunigungsversuche durchgeführt. Es wurden folgende Luftwiderstandsbeiwerte für einen einzelnen 18-t-Lkw ermittelt [28]:

$$c_{w-ab} = 0,66 \quad \text{Stromabnehmer abgesenkt} \tag{3}$$

$$c_{w-an} = 0,83 \quad \text{Stromabnehmer angebügelt}$$

Diese Werte ordnen sich gut in das bekannte Spektrum von Luftwiderstandsbeiwerten ein, s. [29] und Bild 18. Der resultierende höhere Fahrwiderstand und Energiebedarf wird durch die Möglichkeit zum Austausch elektrischer Bremsenergie ausgeglichen, der nach [31] bis zu 10 % betragen kann.

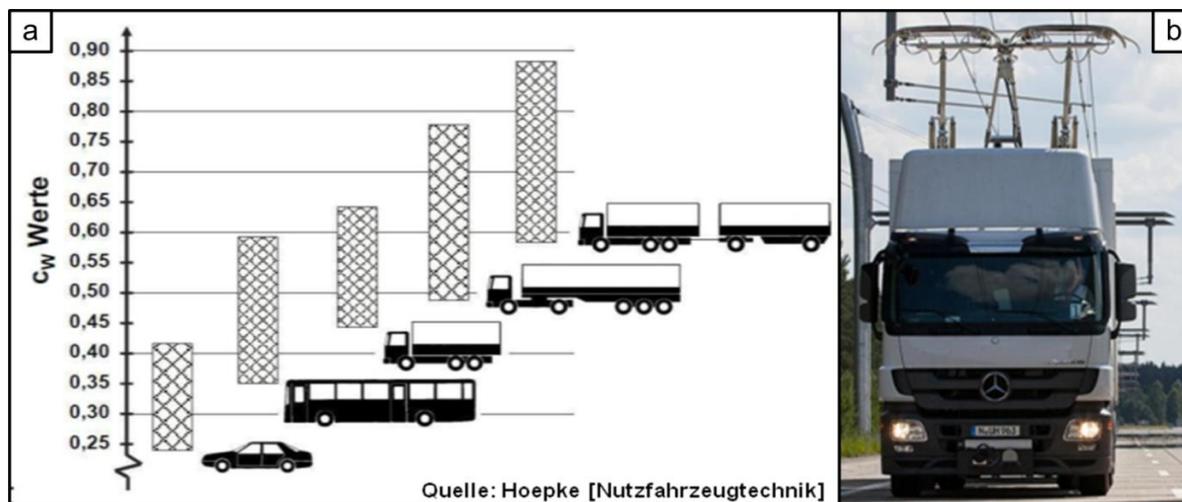


Bild 18 a) Luftwiderstandsbeiwerte für Straßenfahrzeuge [29]; b) OH-Lkw mit angebügelttem Stromabnehmer

Technologievergleich, Einsatzgebiete und Synergiepotenziale alternativer Antriebssysteme

Ausgehend von den in Bild 1 aufgeführten Antriebs- und Energieversorgungskonzepten wurden in diesem Arbeitspaket die Technologien verglichen und Synergiepotenziale abgeleitet. Wenn davon ausgegangen wird, dass der bisherige Dieselantrieb nicht für das gesamte Einsatz- und Leistungsspektrum durch nur ein neues Antriebssystem ersetzt werden kann, entstehen zahlreiche Kombinationen aus externer Energieversorgung mit Systemen zur Energieerzeugung oder -speicherung an Bord der Fahrzeuge. Einen Überblick zu geeigneten und ungeeigneten Kombinationen zeigt Tabelle 8.

Tabelle 8 Kombination von externer Energieversorgung und On-Board-Antriebssystemen

	Brennstoffzelle	Alternative Kraftstoffe	Batterie	induktive Energieübertragung	Stromschiene	Oberleitung
Brennstoffzelle		-	x	x	x	x
Alternative Kraftstoffe			x	x	x	x
Batterie				x	x	x
induktive Energieübertragung					-	-
Stromschiene						-
Oberleitung						

Da die Systeme zur Energieerzeugung oder -speicherung an Bord der Fahrzeuge in die Domäne der Lkw-Hersteller fallen, konzentrierten sich die intensiveren Studien auf einen Vergleich der Systeme zur externen Energieversorgung.

Ein bekannteres System firmiert unter dem Namen „elWays“ und beruht auf einer straßenbündigen Stromschiene (s. Bild 19), die von oben mit einem Stromabnehmer-Arm bestrichen wird [32].

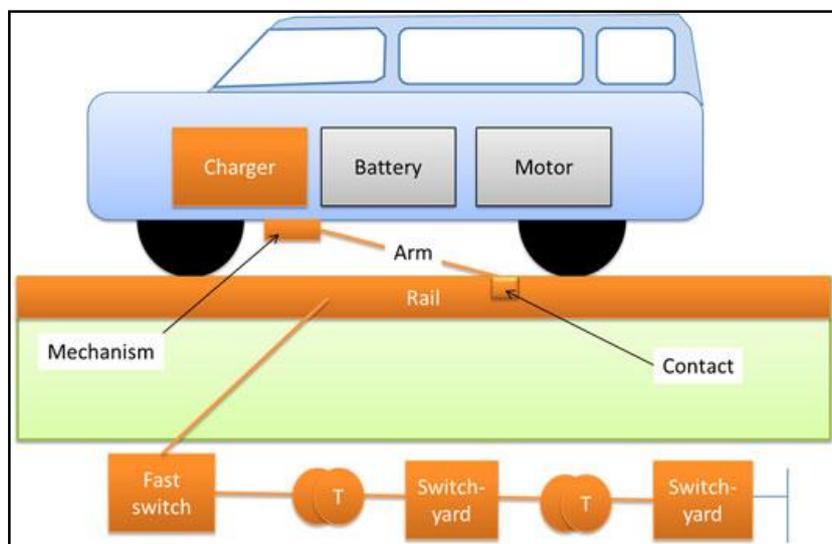


Bild 19 Stromschiene zur Energieübertragung auf Fahrzeuge nach [32]

Auf weitere Systeme zur induktiven oder konduktiven Energieübertragung auf Straßenfahrzeuge wird u. a. in [33] und in Kapitel 4.2 eingegangen. Bei den dort vorgestellten Systemen wird bei den angegebenen Systemwirkungsgraden jedoch nicht abgegrenzt, ob nur die Energieübertragung selbst gemeint ist oder auch die Verluste in der vorgelagerten Infrastruktur und auf den Fahrzeugen berücksichtigt sind. Aufbau und qualitativer Vergleich der Systeme zur externen Energieversorgung werden in Anlage 7.1 vorgestellt. Bislang sind keine Veröffentlichungen zur dynamischen induktiven oder stromschiene-basierten Energieübertragung bekannt, in denen für schwere Nutzfahrzeuge ein annähernd hoher Systemwirkungsgrad wie im Oberleitungsbetrieb nachgewiesen werden konnte.

Technologietransfer und Einsatzperspektiven für weitere Nutzfahrzeugklassen

Bereits zu Beginn der Überlegungen zur Elektrifizierung von Autobahnen standen zunächst nicht Lastkraftwagen sondern Busse als Fahrzeuge im Vordergrund, die im schnellen Pendelverkehr benachbarte Großstädte verbinden sollten [34].

Davon ausgehend wurde im Rahmen dieses Arbeitspaketes untersucht, für welche weiteren Nutzfahrzeugklassen und in welchen Einsatzgebieten Synergiepotenzial hinsichtlich des Einsatzes eines intelligenten, aktiv nachregelnden Stromabnehmers an einer zweipoligen Oberleitung bestehen. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf:

- Elektrifizierung von Fernbussen zur weiteren Nutzung elektrifizierter Autobahnabschnitte
- gemeinsame Nutzung vorhandener Fahrleitungsstrukturen in Städten

Seit der Liberalisierung des Fernbusverkehrs in Deutschland zum 1. Januar 2013 wächst dessen Marktanteil im Personenfernverkehr stark [36]. Durch Abfragen von Flottengrößen und Abschätzungen auf Basis der erbrachten Verkehrsleistung und erreichten Auslastungsgrade kann die Flottengröße der regelmäßig auf Fernbuslinien operierenden Fahrzeuge vorsichtig auf 1000 - 2000 Busse geschätzt werden. Weitere Fahrzeuge sind im touristischen Verkehr eingesetzt, aber hinsichtlich eines regelmäßigen Verkehrs auf Autobahnen nur schwer in Aufkommensschätzungen einbeziehbar. Selbst bei weiterem rapiden Wachstum beider Segmente rechtfertigen sie allein nicht den Aufbau einer Oberleitung. Sollte sich der Hybridisierungstrend auch im Busmarkt fortsetzen und später ein größeres Fahrleitungsnetz vorhanden sein, wären Stromabnehmer aber mit vertretbarem Aufwand integrierbar.

Mit über 300 Systemen in Großstädten weltweit sind Obus-Systeme nach Straßenbahnen das am weitesten verbreitete elektrische Nahverkehrsmittel. Gleichzeitig wird auch in Städten und Ballungsräumen nach umweltschonenden Technologien zur Senkung der Verkehrsemissionen gesucht. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde daher untersucht [35], ob sich eine kommunale Nutzfahrzeugflotte vorteilhaft an einem ohnehin vorhandenen Obus-Fahrleitungsnetz betreiben lässt. Dazu wurden zunächst die Einsatzprofile der linienmäßig operierenden Abfallsammelfahrzeuge analysiert und Netzabschnitte für gemeinsame Nutzungen und z. B. das Nachladen von Energiespeichern identifiziert. Im Anschluss wurden Anforderungen an eine für die verschiedenen Nutzergruppen einsetzbare Konfiguration von Stromabnehmer und Fahrleitung formuliert. Ein mehrjähriger Pilotbetrieb von Abfallsammelfahrzeugen an einer Obus-Fahrleitung fand in den 1980er Jahren in Bologna statt, s. Bild 20.

Auch wenn dieses Synergiepotenzial nicht kurzfristig gehoben werden kann, sollte der Hybrid-Lkw- und Elektrobus-Markt mit vielfältigen Lösungen auch zum stationären Laden, z. B. in Wien [37], beobachtet werden, um bei ausreichendem Nutzfahrzeugaufkommen eine flexibel nutzbare Stromabnehmer-Fahrleitungs-Konfiguration zum Einsatz bringen zu können.



Bild 20 Abfallsammelfahrzeug mit Stromabnehmer für O-Bus-Fahrleitung in Bologna [35]

3.1.5 Rahmenbedingungen des Netzaufbaus

Der Aufbau eines umfangreichen Fahrleitungsnetzes stellt neben dessen Integration in den bestehenden Verkehrsträger Autobahn und dem Bedarf an angepassten Hybrid-Lkw-Konzepten auch umfangreiche Anforderungen an die Einbettung der Bahnenergieversorgung in das bestehende Netz der Landesenergieversorgung. Den dabei auftretenden Rahmenbedingungen, Wechselwirkungen und Synergiepotenzialen wurde im Projekt ENUBA 2 in folgenden Arbeitspaketen nachgegangen:

- Ressourcen-Bedarf der eHighway-Technologie
- Konzepte zur Bündelung von Fahrleitungsnetz und Hochspannungsleitungen
- Variantenanalyse zum Netzaufbau einer Fahrstromversorgung für elektrifizierte Autobahnen
- Deckungspotenziale der Versorgung elektrischer Lkw bei gleichzeitigem Ausbau erneuerbarer Energien

Ressourcen-Bedarf der eHighway-Technologie

In diesem Arbeitspaket wurde der für Errichtung der Infrastruktur sowie Ausrüstung der Fahrzeuge mit Hybridantriebstechnik entstehende zusätzliche Ressourcenbedarf untersucht. Dabei wurden neben den verschiedenen, für die Antriebs- wie Nachrichtentechnik wichtigen seltenen Erden vor allem der erhöhte Bedarf an Kupfer für die Errichtung der Fahrleitung im Kontext des globalen Vorkommens betrachtet. Die Ergebnisse basieren dabei im Wesentlichen auf den Projektergebnissen des Fraunhofer-Instituts für Systemforschung Elektromobilität FSEM [41].

Für die folgenden identifizierten Schlüsselkomponenten und -technologien des eHighway-Systems wurde der Materialbedarf abgeschätzt und dessen Verfügbarkeit geprüft:

- Hybrider Antriebsstrang bestehend aus Dieselmotor und elektrischer Maschine
- Energieversorgungsinfrastruktur bestehend aus Oberleitungen und Unterwerken
- Intelligenter Stromabnehmer zur Energieübertragung

Während für die meisten Komponenten wie u. a. Leistungshalbleiter, Masten, Fundamente und Stromabnehmer die hinreichende Verfügbarkeit der benötigten seltenen Erden konstatiert werden konnte, wurde der hohe Kupferbedarf für die Errichtung der Fahrleitungsinfrastruktur und die Fahrzeugantriebe mit besonderer Sorgfalt untersucht.

Hauptbestandteile der Infrastruktur sind die vom Stromabnehmer beschliffenen Fahrdrähte, die zusammen mit dem Tragseil und den Hängern das Kettenwerk bilden. Aufgrund der hohen Leitfähigkeit, Festigkeit sowie Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit haben sich hartgezogenes Elektrolytkupfer sowie Kupferlegierungen weltweit als Fahrleitungsmaterial durchgesetzt. Die Kettenwerke des eHighway-Systems bestehen aus magnesiumlegierten Kupferseilen und -drähten. Anhand einer analytischen Abschätzung wurde zunächst der Kupferbedarf für die Errichtung der Infrastruktur auf einem Streckenkilometer ermittelt. Aus dem Bedarf von 12,8 t für einen Streckenkilometer (d. h. für beide Fahrtrichtungen) wird für die Elektrifizierung des ca. 4 000 km langen Teilnetzes (vgl. Abschnitt 3.1.2) eine benötigte Kupfermenge von etwa 50 000 t abgeleitet. Neben der Errichtung der Oberleitungsinfrastruktur wird Kupfer auch für die elektrischen Antriebsaggregate auf den Fahrzeugen benötigt.

Zur Bewertung der Verfügbarkeit wurde die globale Verteilung der Kupfervorkommen sowie Fördermengen und Verbrauch ausgewertet. Dazu wurde die Modellsimulation des Fraunhofer ISI mit zwei Szenarien für die Entwicklung der Elektromobilität herangezogen. Während das „Dominanzszenario“ ein optimistisches Bild für die Einführung der Elektrofahrzeuge zeichnet, bildet das Szenario „Pluralismus“ eine eher konservative Entwicklung ab [41]. Außerdem wurden weitere Segmente zukünftiger Kupfernachfrage wie u. a. die Energieübertragung und die Daten- und Signaltechnik berücksichtigt.

In der Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Kupfernachfrage durch die Entwicklung der Elektromobilität nur wenig beeinflusst wird. Auch unter der Annahme eines starken Wachstums an Elektrofahrzeugen und dem Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur des eHighway-Systems wird kein Engpass der Kupfernachfrage erwartet. Die weltweiten Kupferreserven und die Tendenz zum Sekundärkupfereinsatz, wie auch der segmentweise Rückgang an Kupferapplikationen durch Substitution, z. B. in der Telekommunikation, Bauwesen und Wasserversorgung, kompensieren den Bedarf der kupferintensiven Technologiesegmente.

Konzepte zur Bündelung von Fahrleitungsnetz und Hochspannungsleitungen

Mit der Steigerung der Erzeugungsleistung elektrischer Energie durch den Ausbau Erneuerbarer Energien wie z. B. Off-Shore-Windparks in der Nord- und Ostsee, stellt sich die Frage nach dem Ausbau des Übertragungsnetzes. Ziel dieses Arbeitspaketes der TU Dresden war die Untersuchung und Bewertung möglicher Synergieeffekte beim Aufbau der eHighway-Infrastruktur und dem gleichzeitigen Ausbau der Übertragungsnetze. Dabei wurden u. a. die grundsätzlich zur Verfügung stehenden Strom- und Übertragungssysteme, Erzeuger- und Verbraucherstandorte, räumliche Kombinationsmöglichkeiten der Systeme (Trassenbündelungen), konkrete Einbauorte der Leitungssysteme im BAB-Querschnitt sowie rechtliche Hintergründe bei Trassenkombinationen analysiert.

Zu Beginn wurden sowohl die grundlegenden Spannungs- und Energieübertragungssysteme als auch die elektrischen Leitungssysteme in der Höchstspannungsebene betrachtet. Zur Energieübertragung können dabei entweder Freileitungen, Kabel oder gasisolierte Übertragungsleitungen genutzt werden. Da sich die einzelnen Übertragungsmittel hinsichtlich ihrer Bauart und Geometrie sowie der eingesetzten Materialien und Isolierstoffe und damit auch in ihren elektrischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften deutlich voneinander unterscheiden, wurden diese Aspekte zunächst einer detaillierten Betrachtung unterzogen. In einem Vergleich wurden die Unterschiede in den elektrischen Eigenschaften, im Betriebsverhalten und in den Gesamtkosten dargestellt. Als Vorzugsvariante bei den Übertragungsmedien wurde dabei die Freileitung aufgrund ihrer wirtschaftlichen und betrieblichen Stärken erkannt. Es wurde weiterhin gezeigt, dass zum sicheren Betrieb der Freileitungen, aber auch der anderen genannten Leitersysteme, entsprechende Schutzstreifen einzurichten sind.

In der Untersuchung der Kombinationsmöglichkeiten von neu zu errichtenden, elektrischen Übertragungsmedien im Höchstspannungsbereich und vorhandenen linearen Infrastrukturen in Form von Autobahntrassen wurden sowohl die Entwicklung der Übertragungsnetze, als auch die Beschaffenheit des Autobahnnetzes untersucht, s. Bild 21.

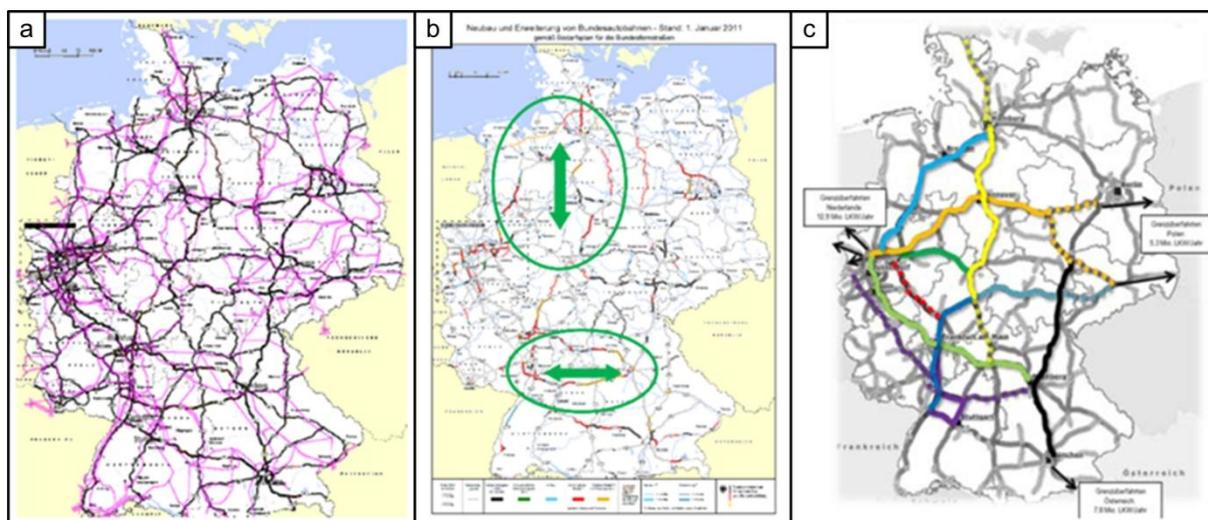


Bild 21 Potenzielle zur Trassenbündelung: a) Stromübertragungsnetz (magenta) und Autobahnnetz (schwarz); b) Überschneidungen des Ausbau von BAB und Übertragungsnetzausbau (grüne Markierungen); c) eHighway-Ausbaumodell Stufe 1 und 2

Nach Bild 21 sind gemeinsame Trassen nur eingeschränkt verfügbar, da bereits feste Umspannwerke des Hochspannungs-Drehstrom-Netzes als Start- und Endpunkte möglicher Hochspannung-Gleichstrom-Übertragungen (HGÜ) existieren, die nicht in räumlicher Nähe zur Bundesautobahn gebaut wurden. Durch das an sich bestehende Bündelungsgebot ist bei großen Elektrifizierungsprojekten zu prüfen, ob ein zeitgleicher Ausbaus des Übertragungsnetzes abschnittsweise möglich ist.

Eine Kombination der Planfeststellungsverfahren erscheint in diesen Fällen als wahrscheinlich. Inwieweit der Arbeits- bzw. Aufwandsumfang der kombinierten Planfeststellungsverfahren dadurch reduziert wird, konnte in diesem Zusammenhang jedoch nicht geklärt werden. Sicher ist, dass in Kombination mit dem Bündelungsgebot die Anzahl untersuchter Varianten eingeschränkt werden kann. Dies kann zu einer zeitlichen Straffung des Verfahrens führen.

Variantenanalyse zum Netzaufbau einer Fahrstromversorgung für elektrifizierte Autobahnen

Während Unterwerke mit ihren installierten Leistungen von 1-4 MW zweckmäßig an ein Mittelspannungsnetz angeschlossen werden, stellt das eHighway-Netz im Ausbaumodell einen Großverbraucher dar, der analog zur Bahn ggf. den Aufbau eines eigenen Hochspannungsnetzes rechtfertigt. Gegenstand dieses an der TU Dresden bearbeiteten Arbeitspaketes war daher die Gegenüberstellung verschiedener Varianten zum Netzaufbau der Energieversorgung des eHighway-Systems.

Ausgangspunkt war der Aufbau des europäischen und deutschen Stromnetzes mit der funktionalen Gliederung der Netzebenen entsprechend Tabelle 9. Für die Energieübertragung haben sich Drehstromnetze mit einer Frequenz von 50 Hz und 380 kV als Höchstspannungsebene durchgesetzt.

Tabelle 9 Netzspannungen in Deutschland

Netzbezeichnung	Nennspannung	Sonstiges
Hochspannungs-Gleichstromübertragung (DC)	400 kV, bis zu 1000 kV	Gleichstrom für große Entfernungen und für Verbindungen zwischen Verbundnetzen im europäischen Verbundnetz
Höchstspannung (AC)	380 kV bzw. 220 kV	Drehstrom und große Verbundnetze
Hochspannung (AC)	110 kV	Drehstrom, Regionale Verteilernetze
Mittelspannung (AC)	10-30 kV	Drehstrom, Verteilernetze
Niederspannung (AC)	400/380 V und 230 V	Verbrauchsnetz, Dreh- bzw. Wechselstrom

Anschließend wurden für die Untersuchung zur Energieverteilung für ein BAB-Kernnetz die bekannten Formen der Bahnenergieversorgung (BEV) analysiert, wobei auf alle Aufgaben von der Bereitstellung und Übertragung bis zur Verteilung der Bahnenergie eingegangen wurde. Für Bahnsysteme grundlegend ist die Unterscheidung zwischen Gleichstromsystemen sowie Einphasenwechselstromsystemen mit niedriger Frequenz (16,7 Hz) oder mit Landesfrequenz (50 Hz). Eine nähere Betrachtung erfolgte für die deutsche BEV mit AC 16,7 Hz und die DC-Energieversorgung der Berliner S-Bahn.

Daran anknüpfend wurden aus den Parallelen der BEV eine zentrale und eine dezentrale eHighway-Energieversorgungsvariante abgeleitet. Hauptunterschied ist der Anschluss der entsprechenden Gleichrichterunterwerke (GUw). Bei der dezentralen eHighway-Energieversorgung erfolgt der Anschluss der einzelnen Unterwerke an lokal vorhandene Mittelspannungsnetze. Bei der zentralen Variante werden die Gleichstromunterwerke ähnlich wie bei der Berliner S-Bahn über einen an das 110-kV-Hochspannungsnetz angeschlossenen Mittelspannungsring versorgt. Dieser wird über eine Umspannstation des eHighway-Systems an das Hochspannungsnetz angeschlossen, s. Bild 22.

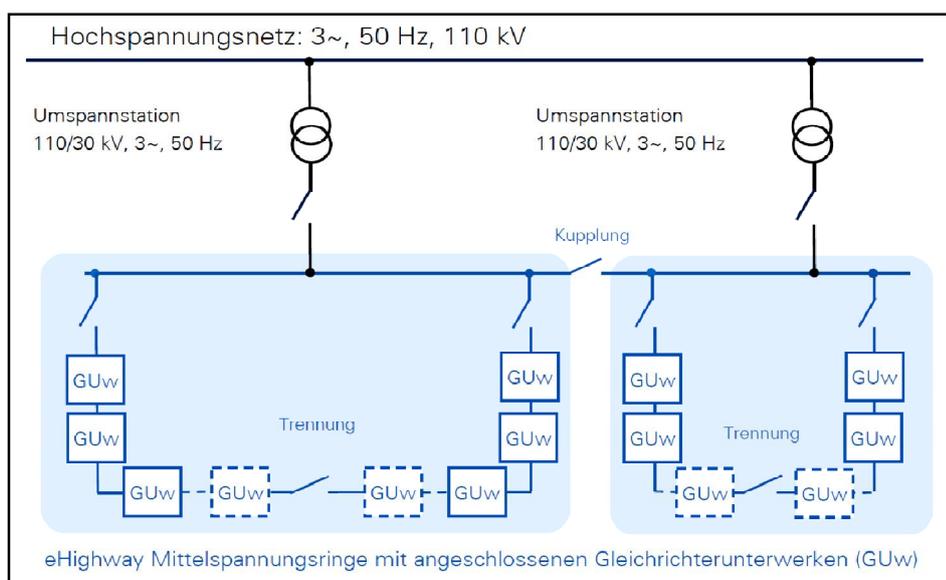


Bild 22 Zentrale Variante einer eHighway-Energieversorgung

Der Mittelspannungsring ist mit einer Trennung ausgestattet, so dass die Leitungen von zwei Seiten versorgt werden. Die Vorteile der Ringstruktur liegen in dem übersichtlichen Aufbau, der einfachen Planung und der kostengünstigen Errichtung. Außerdem bietet dieser Aufbau eine höhere Zuverlässigkeit und bessere Spannungshaltung im Vergleich zu Strahlennetzen.

Energieversorgung elektrischer Lkw bei gleichzeitigem Ausbau erneuerbarer Energien

Ausgehend von der durch die Bundesregierung formulierten Zielstellung, die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2035 auf 55 bis 60% zu erhöhen und somit die Treibhausgasemissionen weiter zu reduzieren, wurde in der Masterarbeit „Analyse und Bewertung von Energiebedarfsprofilen im elektrischen Straßengüterverkehr zur Versorgung durch Erneuerbare Energien“ das Deckungspotential des Energiebedarfs im elektrifizierten Straßengüterverkehrs durch Strom aus regenerativen Energieträgern untersucht [42].

Wesentlicher Bestandteil der Vorüberlegungen sind die Betrachtungen zum Netzentwicklungsplan der Bundesregierung, welcher sowohl den Ausbaubedarf des deutschen Stromnetzes sowie den Ausbau der Stromerzeugungsanlagen aus Erneuerbaren Energien berücksichtigt. Mit der Orientierung an den definierten Einführungs- und Ausbaunetzen orientiert sich die methodische Ausrichtung der Arbeit an dem Verkehrslastprofil des für den Ausbau des eHighway-Systems definierten Streckennetzes auf BAB. Das hieraus erarbeitete Energieprofil des eHighway -Systems wurde anschließend mit der prognostizierten Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien verglichen, s. Bild 23.

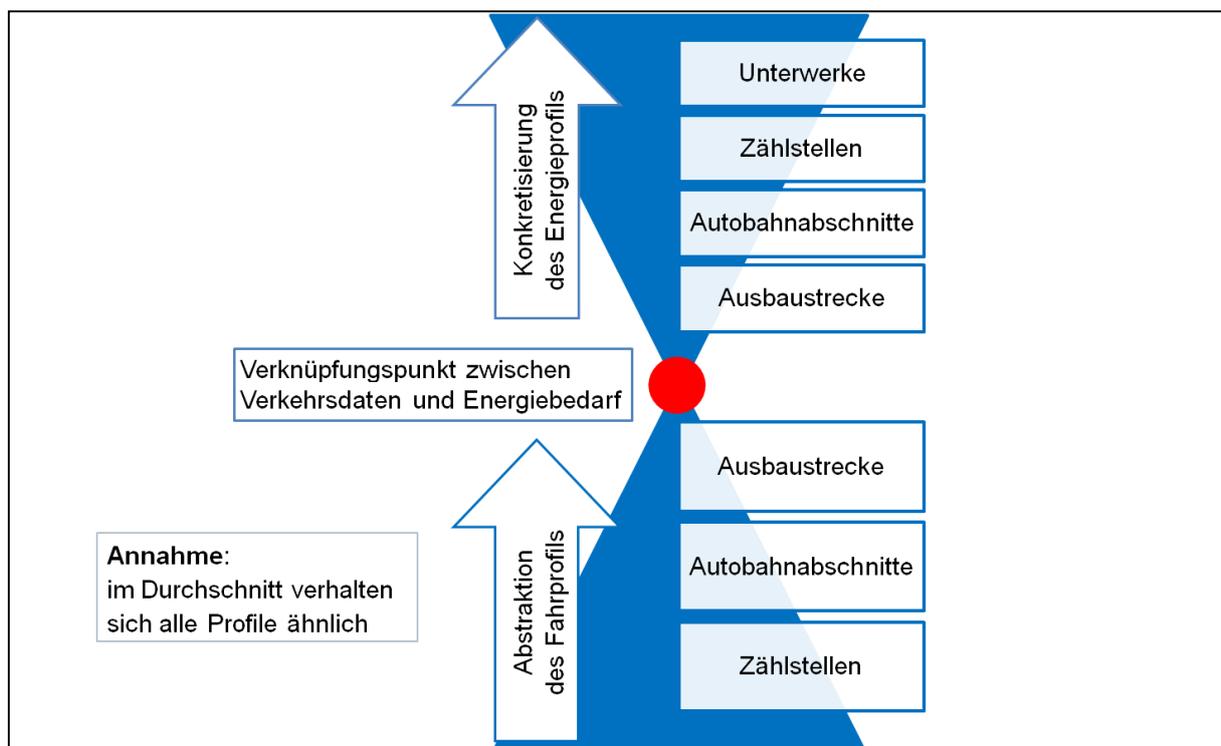


Bild 23 Methode zur Energiebedarfsprofil-Analyse

Zunächst wurde ein Fahrprofil (Verkehrslastprofil) für den Straßengüterverkehr auf ausgewählten Netzabschnitten und auf Basis realer Verkehrsdaten von über 100 Dauerzählstellen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) aufgestellt. Durch die Auswertung verschiedener Zählstellen für die Erfassung der ortsgebundenen temporären Verkehrsdichte wurde für das Szenario der Streckenelektrifizierung die entsprechende mittlere Verkehrslast ermittelt. Dabei wurde neben den Jahressganglinien auch der Wochenverlauf untersucht, wobei u. a. die Hauptverkehrsspitzen identifiziert werden konnten. Charakteristisch für das Fahrprofil des Straßengüterverkehrs ist ein „zweigipfliger“ Tagesverlauf mit einer steilen Vormittagsspitze und einer breiteren, aber höheren Nachmittagsspitze. Ausgehend von dem im Testbetrieb ermittelten spezifischen Verbrauch eines OH-Lkws wurde der Jahresenergiebedarf entsprechend der Jahresfahrleistung auf den Teilnetzen der Einführungs- und Ausbaustrecke bestimmt. Für die Ermittlung des Energiebedarfs im Oberleitungsbetrieb, wurden die Ergebnisse der Fahrprofilanalyse entsprechend der Zielgruppe des Projektes ENUBA, bestehend aus mautpflichtigen Lkws und Sattelzügen größer 12 t zulässigem Gesamtgewicht (zGG), angepasst. Für die Umstellung der Fahrzeuge auf den Oberleitungsbetrieb werden die zwei möglichen Entwicklungen **Basis-Szenario** und das Szenario **Pro Diesel** betrachtet (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Ausgehend von den aus dem Projekt „Agora Energiewende“ des Fraunhofer IWES stammenden Daten der Stromerzeugung aus regenerativen Energieträgern [43] und basierend auf dem zwischen den Ministerien der Bundesregierung abgestimmten Leitszenario des Netzentwicklungsplanes wurden alle weiteren Betrachtungen für das Jahr 2033 angestellt, also nach der möglichen Fertigstellung eines eHighway-Kernetzes. Unter Berücksichtigung verschiedener Entwicklungsszenarien der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien wurden sowohl optimistische wie konservative Simulationen dem Energiebedarf des eHighway-Systems gegenübergestellt, s. Bild 24.

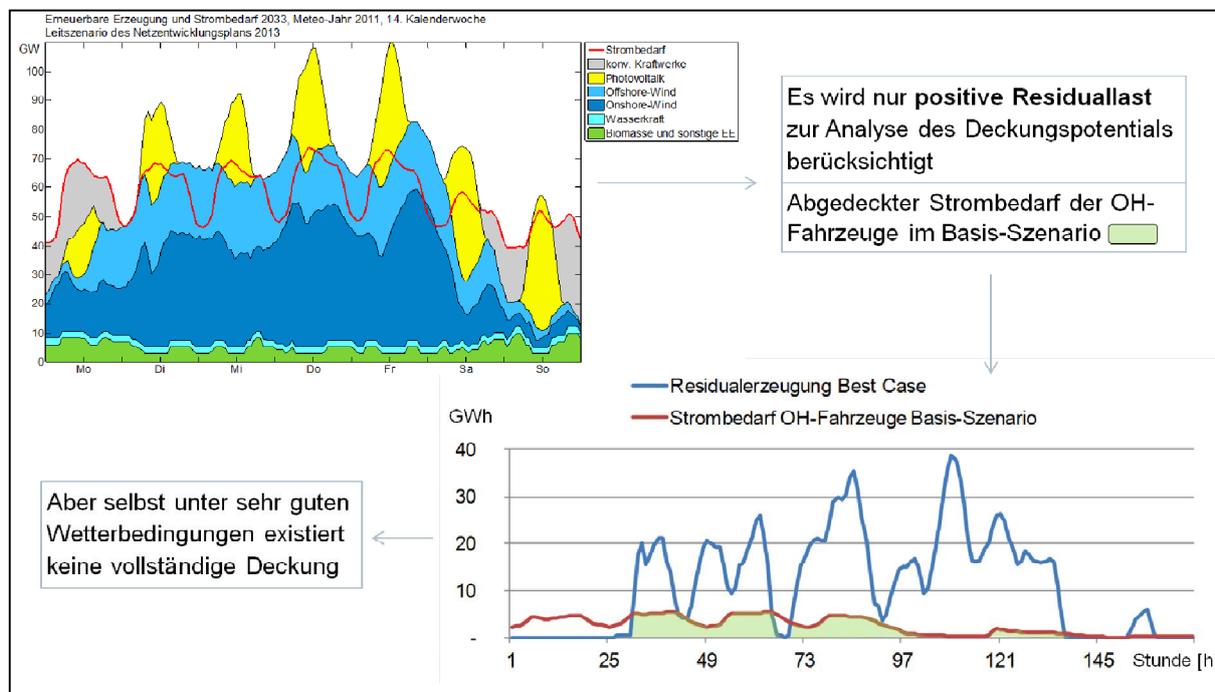


Bild 24 Vergleich des Energiebedarfes des eHighways und regenerativer Energieerzeugung

Für die Ermittlung des Deckungspotentials des elektrifizierten Straßengüterverkehrs durch Strom aus regenerativen Energieträgern wurde die Residuallast, die sich aus der Differenz von Energieerzeugung und Energiebedarf ergibt, mit dem Strombedarf des eHighway-Systems verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass aufgrund der gleichen Kurvenverläufe vom Strombedarf in Deutschland und der OH-Fahrzeuge eher eine geringe Verstärkung der Spitzenlastzeiten und nur selten eine Glättung der Bedarfskurve durch den eHighway zu erwarten ist. Der Anteil des OH-Verkehrs am gesamten Stromverbrauch in Deutschland beträgt aber nur 1 - 3 %. Wenn also durch den forcierten Ausbau der erneuerbaren Energien die bereits bisher prognostizierten Unterdeckungen zuverlässig abgesichert werden, stellt der zusätzliche Energiebedarf des eHighway bei vollständigem Aufbau des Ausbaumodells keine signifikante und unzulässige Mehrbelastung der öffentlichen Stromnetze dar.

Anschließend wurde eine qualitative Bewertung jedes einzelnen Energieträgers auf seine Eignung zur Versorgung der OH-Fahrzeuge vorgenommen, woraus Empfehlungen für die Wahl der Kraftwerkstypen für eine selbstständige Versorgung abgeleitet wurden. Dabei wurde durch einen Nord-Süd-Vergleich den unterschiedlichen lokalen Verfügbarkeiten der Ressourcen Rechnung getragen. Für die Anbindung des Oberleitungshybridsystems wurde eine exemplarische Netztopologie für die Oberleitungsversorgungsstruktur skizziert. Dabei wurden für einen exemplarischen Streckenabschnitt von 50 km der Leistungsbedarf ermittelt und Varianten der Netzanbindung diskutiert.

Die Untersuchungen dieser Arbeit konnten zeigen, dass ein hohes Deckungspotential einzig aus Erneuerbaren Energien für den Strombedarf der Oberleitungshybrid-Fahrzeuge im Jahr 2033 bei einer Unterscheidung nach Nord- und Süddeutschland insbesondere für ein zusätzlich untersuchtes Einführungsnetz gegeben ist, das sich vorwiegend im Norden befindet. In Bezug auf die gesamte Ausbaustrecke wurde im Rahmen der Arbeit für den südlichen Teil eine autonome Versorgung der Infrastruktur als Vorzugsvariante empfohlen.

3.1.6 Smart-Road-Applikationen für den eHighway

Auch wenn das eHighway-System im Kern auf der wechselseitigen Anpassung und Weiterentwicklung langjährig bewährter Komponenten und Teilsysteme aus den Domänen Mechanik, Elektrotechnik sowie Automatisierungs- und Verkehrstechnik beruht, kann ein so komplexes und in die Zukunft gewandtes System nicht ohne Einbettung in und Verknüpfung mit IT-Anwendungen und sowohl nutzer- als auch betreiberorientierten Kommunikations- und Interaktionstechnologien entstehen. In den folgenden drei Themengebieten werden Forschungsergebnisse aus dem Bereich Smart-Road-Applikationen im eHighway-Kontext vorgestellt:

- Leitstelle der Zukunft - Interaktion und Integration
- Designstudie zum Lkw-Cockpit der Zukunft
- Augmented-Reality-Applikation für Fahrzeug- und Systemzustandskontrollen

Leitstelle der Zukunft - Interaktion und Integration

Bei der Planung und Errichtung der erweiterten Versuchsanlage mit der neuen Funktion Verkehrsmanagement sowie den geplanten Entwicklungen und Erprobungen in den Bereichen Technisches Monitoring und Energieabrechnung wurden die zugehörigen, etablierten Leitsysteme nebeneinander installiert. Aus der gemeinsamen Anwendung eHighway leiteten sich einerseits übergeordnete Querschnittsfunktionen und individuelle Interaktionen ab, die durch die bestehenden domänenspezifischen Leitsysteme nicht abgedeckt werden konnten. Einen Eindruck der Ausgangslage vermittelt Bild 25. Alle Diskussionen führten zu der zentralen Frage, ob für den zukünftigen Betrieb eines eHighway-Systems eine integrierte „Leitstelle der Zukunft“ mit einem einheitlichen Leitsystem benötigt wird.

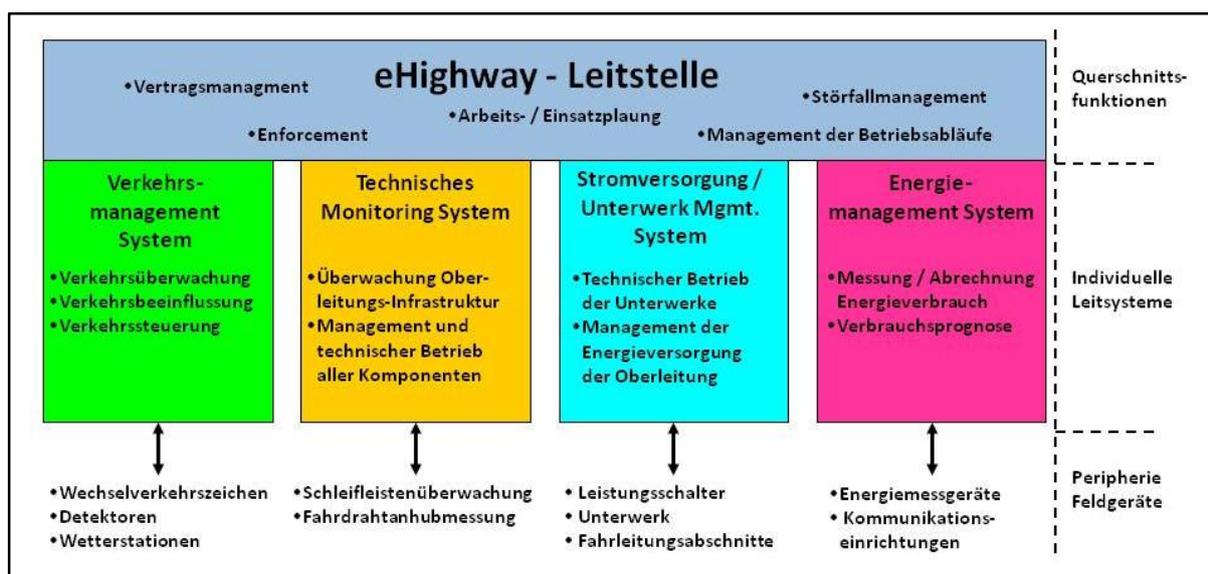


Bild 25 Ausgangslage der Funktions- und Interaktionsanalyse einer eHighway-Leitstelle

Die Analyse der Aufgabenstellung und schrittweise Erarbeitung der Antwort erfolgte zusammen mit der Forschungsabteilung CT - Corporate Technology der Siemens AG unter systematischer Anwendung erprobter Methoden des Usability-Engineerings (dtsh. etwa: nutzerorientierte Entwicklung) und umfasste folgende Arbeitsschritte:

- Analyse der bekannten und neuen Akteure und Teilsysteme, d. h. einerseits Autobahnmeistereien, Verkehrsmanagementzentralen und Leitstellen der Bahnstromversorgung sowie andererseits der neuen Funktionen Technisches Monitoring und Energiemanagement
- Erfassung und Abgrenzung der bisherigen Aufgaben und Verantwortungsbereiche zusammen mit den erforderlichen Qualifikationen
- Analyse der bekannten Prozesse zur Abstimmung, Planung und Durchführung von Arbeiten
- Identifikation neuer Aufgaben und Prozesse zur Planung und Durchführung von Arbeiten
- Abgrenzung von aus Nutzersicht getrennten, funktionalen Einheiten

Im Ergebnis der Analyse wurde deutlich, dass der Schwerpunkt der zukünftigen Zusammenarbeit beim Betrieb eines eHighway-Systems in der Interaktion und Abstimmung der Verantwortungsträger und Koordinatoren liegt. Demgegenüber blieb die Anzahl der auf Ebene der Leitsysteme für die Bediener erforderlichen Zusatzfunktionen sehr begrenzt und beschränkte sich auf den Austausch einzelner Informationen und Warnmeldungen, ohne Kompetenzen von den jeweiligen Systemen abzuziehen. Die auf die Anwendungsgebiete zugeschnittenen Leitsysteme erfordern hoch qualifizierte Bediener, die für ihr Teilsystem Sicherheitsverantwortung tragen und teilweise hoheitliche Aufgaben wahrnehmen, wodurch eine übergreifende Qualifikation nahezu unmöglich ist.

Umfangreicher Abstimmungsbedarf wurde jedoch bei Planung und Durchführung von Instandhaltungsarbeiten und im Störfallmanagement erkannt. Es werden zukünftig mehr Komponenten unterschiedlicher Teilsysteme installiert sein, zu denen der sichere Zugang teilweise nur durch Einschränkungen an anderen Teilsystemen gewährleistet werden kann, wie z. B. die Sperrung von Fahrstreifen oder die Abschaltung eines Fahrleitungsabschnitts. Um teilsystemübergreifend Sicherheit zu gewährleisten und schon bei der Planung der Arbeiten Abhängigkeiten zu erkennen sowie systematisch Synergien zu erschließen, konzentrierten sich die weiteren Arbeiten auf die Konzipierung zweier IT-Anwendungen für die folgenden Support-Funktionen:

- Planungstool zur Planung, zeitlichen und örtlichen Koordination und Genehmigung von Instandhaltungsarbeiten entlang elektrifizierter Autobahnabschnitte einschließlich Festlegung der erforderlichen Sicherungsmaßnahmen (Screenshot eines Ansichtbeispiels s. Anlage 7.2)
- Aufgaben-Manager als Smartphone-Applikation für den Sicherheitskoordinator einer Arbeitsstelle, s. Bild 26.

Die erarbeiteten Prozessanalysen und beispielhaften Visualisierungen bilden eine belastbare Grundlage der weiteren Spezifikation und Entwicklung der konzipierten Anwendungen.

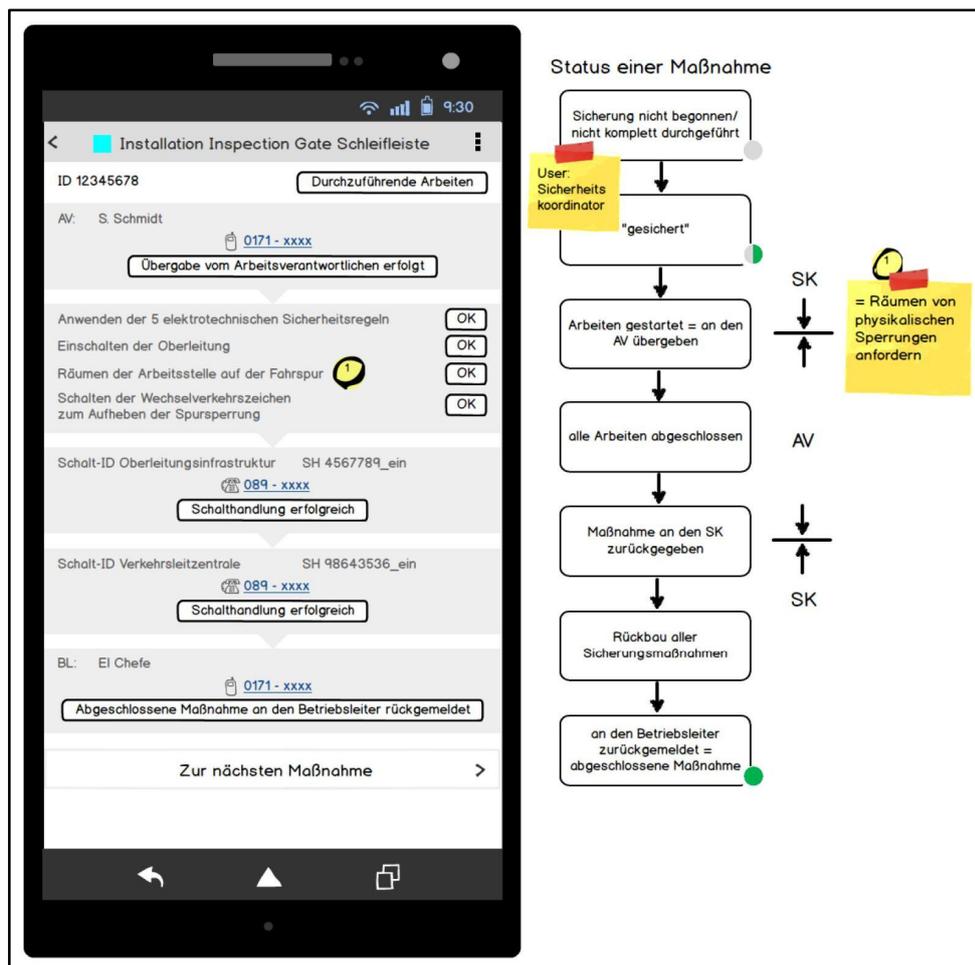


Bild 26 Wireframe der Smartphone-App für Sicherheitskoordinatoren an Arbeitsstellen

Designstudie zum Lkw-Cockpit der Zukunft

Ein weiterer Schwerpunkt der nutzerorientierten Gestaltung wurde auf den Fahrer-Arbeitsplatz gelegt. Dieses Arbeitspaket wurde durch das DLR verantwortet und beleuchtete folgende Aspekte:

- Funktionsanalyse und daraus abgeleitete Gestaltung des HMI (human machine interface, dt.: Mensch-Maschine-Schnittstelle) zur Stromabnehmerbedienung
- Auswertung laufender Projekte zum teil- und hochautomatisierten Fahren zur Ableitung von Verknüpfungen und Anforderungen an das teil- und hochautomatisierten Fahren von e-Lkw
- Design-Studien zu Lkw-Cockpits für OH-Lkw auf eHighways im Jahr 2020 und 2040

Ausgangspunkt der Überarbeitung der Nutzerschnittstelle waren Interviews und Beobachtungen zum Nutzungsverhalten des in ENUBA realisierten Touch-Displays. Daraufhin wurden die erforderlichen Funktionen systematisiert und anschließend in zwei Designvarianten skizziert. Neben Stromabnehmer-Bedienung (sowohl über Buttons als auch in der Positionsanzeige) und Zustandsinformation wurde auch ein Informationsbereich für Verkehrszeichen integriert, die über V2I-Kommunikation (V2I für en.: vehicle to infrastructure) von der verkehrstechnischen Infrastruktur an das Fahrzeug kommuniziert wurden. Bild 27 zeigt das neu gestaltete Interface. Bild 33 (S. 50) vergleicht beide ENUBA-Entwicklungsstufen und zeigt das neu gestaltete Interface bei gehobenem Stromabnehmer.



Bild 27 Neu gestaltetes Bedienfeld zur Stromabnehmersteuerung (DLR [12])

Die Designstudie zum Cockpit des OH-Lkw im Jahr 2020 (s. Bild 27) orientiert sich noch stark an konventionellen Bedienelementen und ergänzt diese mit integrierten Displays und Eingabebereichen. Im Zukunftsszenario 2040 wird stärker zwischen manuellem und vollautomatisiertem Fahren unterschieden, bei dem z. B. das Lenkrad in das Armaturenbrett zurückgezogen wird und große Anzeige- und Arbeitsflächen dominieren.

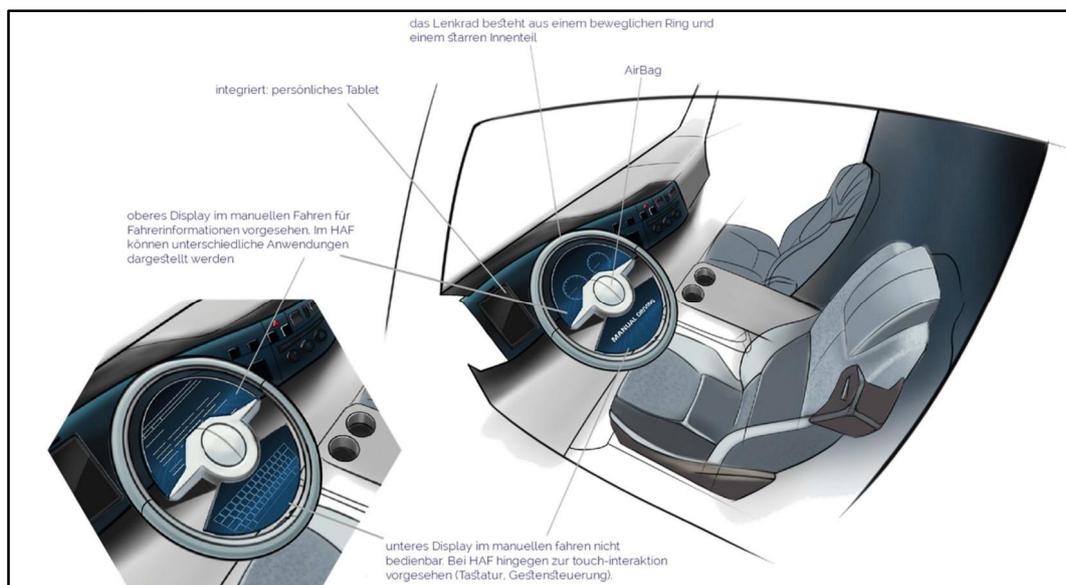


Bild 28 Konzeptstudie zum Lkw-Cockpit im Jahr 2020 (DLR [12])

Augmented-Reality-Applikation für Fahrzeug- und Systemzustandskontrollen

Bereits Fahrer von konventionellen Lkw und speziell von Lastzügen sind u. a. in Kurven und beim Rückwärtsfahren mit erheblich größeren Sichteinschränkungen als Pkw-Fahrer oder andere Verkehrsteilnehmer konfrontiert, s. Bild 29.

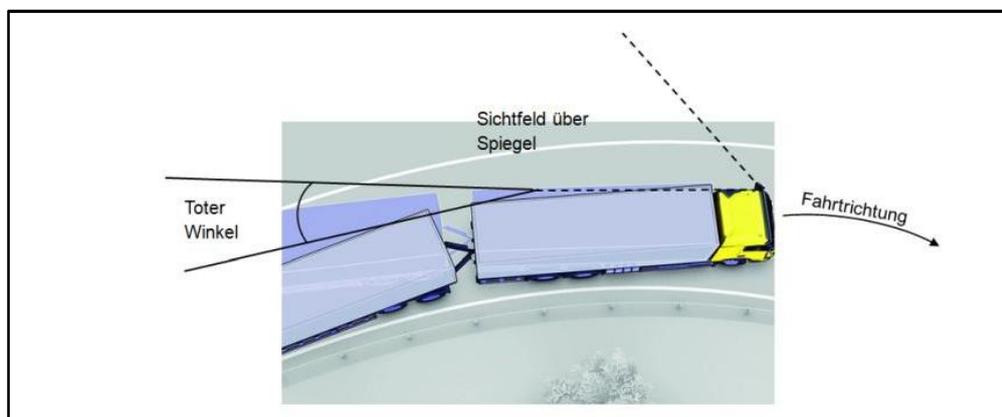


Bild 29 Toter Winkel bei Lkw und Lastzügen in Rechtskurven [39]

Durch den regelmäßigen Betrieb des Stromabnehmers an der Oberleitung oberhalb der Fahrerkabine entsteht ein weiterer, zumindest subjektiv interessanter Punkt, der nicht einsehbar ist. Ausgehend von dieser Problemstellung wurde im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht, ob durch die Verknüpfung der erst in jüngster Zeit Verbreitung findenden Datenbrillen mit zusätzlich installierten Beobachtungskameras die Sicherheit erhöht und die Sichteinschränkungen abgebaut werden können [39].

Bild 30 zeigt den aus der Anforderungsanalyse abgeleiteten Systemaufbau, der in einen der Erprobungsträger auf der Versuchsanlage eingerüstet und erfolgreich getestet wurde. Die Systemfunktionen und -komponenten sind:

- Datenbrille mit WLAN-Verbindung zu einem Router und Datenumsetzer (Encoder)
- vier analoge Kameras ausgerichtet auf den Rückfahrbereich, den toten Winkel hinten links (vor allem in Rechtskurven), den toten Winkel vorn rechts an der Fahrerkabine sowie eine Kamera zur Beobachtung des Stromabnehmers
- ein Encoder zur Umsetzung der analogen Videodaten in digitale Daten und zur Bereitstellung der Videostreams
- vier QR-Tags (en. quick response , dt. in etwa „schnelle Antwort“) mit denen die unterschiedlichen Kamerabilder durch kurzes Anblicken aufgerufen werden können, sodass sie anschließend in einem Ausschnitt der Datenbrille angezeigt werden

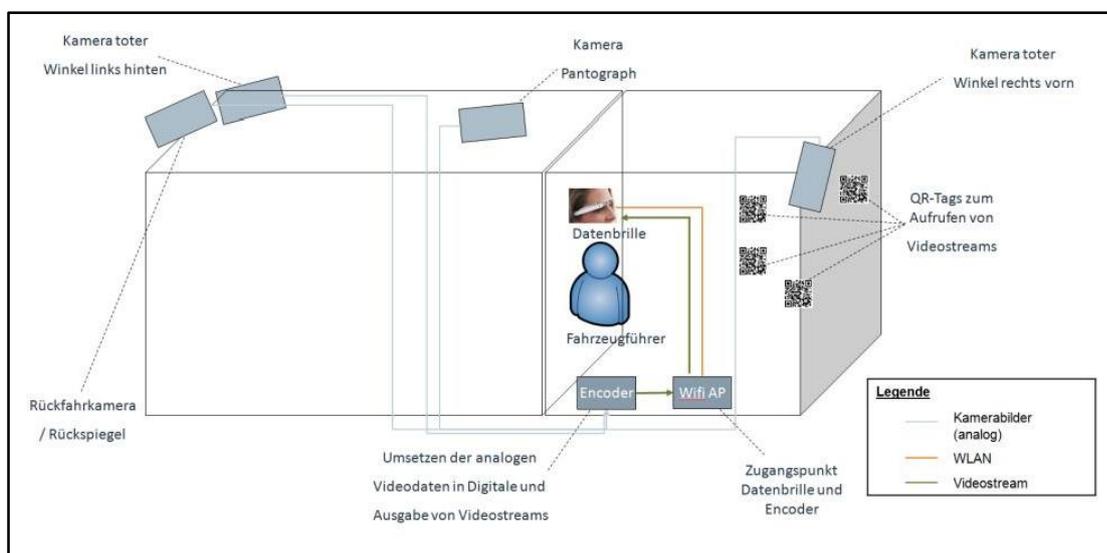


Bild 30 Systemaufbau des Augmented-Reality-Erprobungsträgers [39]

3.2 Konzepte und Weiterentwicklung für Erprobung auf Versuchsanl. - KE

3.2.1 Entwicklung eines Stromabnehmertyps zur Integration in Sattelzugmaschinen

Die Entwicklung eines Stromabnehmertyps, der auch in Sattelzugmaschinen ohne Einschränkungen beim Ladungsvolumen integrierbar ist, war eines der vordringlichen Projektziele von ENUBA 2. Die Grundzüge dieser Weiterentwicklung werden entlang der folgenden Arbeitsschritte vorgestellt:

- Anforderungsanalyse im Kontext der Projektziele von ENUBA und ENUBA 2
- Umsetzung der Anforderungen im mechatronischen Konzept sowie in Steuerung und Sensorik
- Erprobung des weiterentwickelten Stromabnehmers im Labor und auf der Versuchsanlage

Anforderungsanalyse

In Tabelle 10 werden die wichtigsten Anforderungen an Stromabnehmer für Lkw im elektrifizierten Straßengüterverkehr zusammengestellt. Während die Anforderungen im oberen Teil der Tabelle bereits im Projekt ENUBA im Rahmen der grundsätzlichen technischen Machbarkeit nachgewiesen wurden, listet der untere Teil der Tabelle die Schwerpunkte für die Weiterentwicklung in ENUBA 2 auf.

Tabelle 10 Anforderungen an Stromabnehmer für den elektrifizierten Straßengüterverkehr

Betriebliche Anforderungen	Technische Anforderungen	Allg. Entwicklungsanforderungen
<i>In ENUBA erfüllte und funktional nachgewiesene Anforderungen</i>		
Wechsel der Antriebsart durch An- und Abbügeln während der Fahrt	mindestens zweipolige Konstruktion wegen fehlender Schienenrückleitung	geringe Zusatzkosten im Verhältnis zu den Fahrzeuggesamtkosten
keine Spurführung des Fahrzeugs in der elektrifizierten Spur	aktive Nachregelbarkeit zum Ausgleich von Bewegungen innerhalb der Fahrspur	keine Einschränkung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit gegenüber konventionellen Lkw
keine Störung des bisherigem Verkehrsablaufs	einfache Bedienbarkeit durch den Fahrer nach Einweisung	mindestens gleiche Sicherheit wie konventionelle Lkw
<i>Schwerpunkte und Anforderungen der Weiterentwicklung in ENUBA 2</i>		
Einhaltung des Lichtraumprofils im abgebugelten Zustand	Integration in Lkw ohne Einschränkungen in Ladungsraum und -gewicht (s. Bild 31)	Robustheit hinsichtlich straßenverkehrstypischen Umgebungsbedingungen und mechanischen Belastungen
Migrationsfähigkeit hinsichtlich Nachrüstung vorhandener Fahrzeuge	mit der Infrastruktur abgestimmtes elektrisches Schutzkonzept	Beachtung der Normungsräume für elektrische Verkehrssysteme, Automobilanwendungen und Straßenverkehr

Während im ersten ENUBA-Projekt für den Stromabnehmer einschließlich Tragkonstruktion noch eine Bautiefe von ca. 1,5 m beansprucht wurde, stand für die Weiterentwicklung nur eine Bautiefe von 0,5 m an der Basis des Stromabnehmers zur Verfügung. Bild 31 verdeutlicht die geänderten Einbauanforderungen in den beiden Projektphasen.

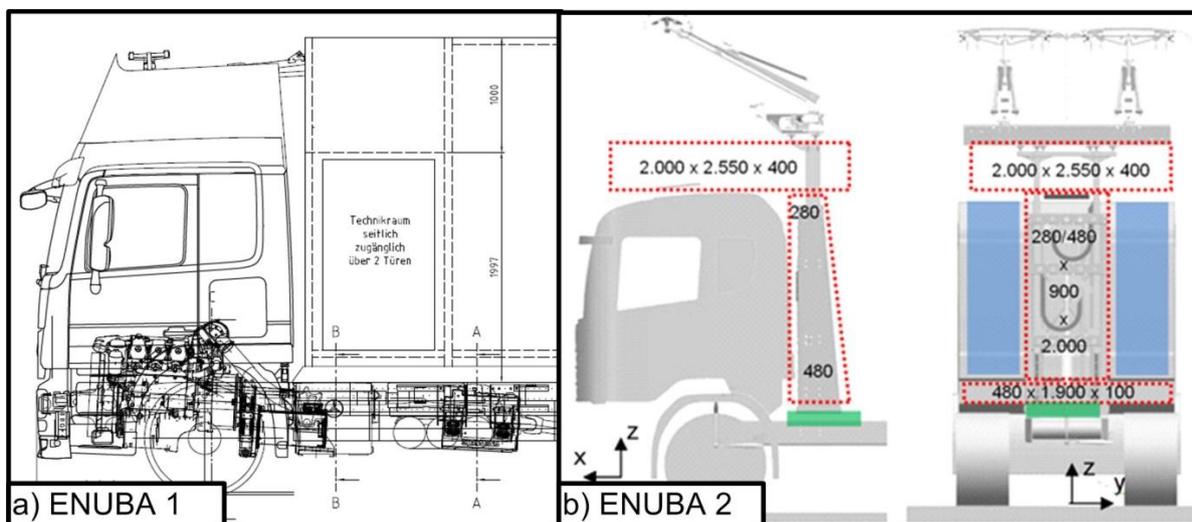


Bild 31 Bauraum für den Stromabnehmer auf einer Sattelzugmaschine

Mechatronisches Konzept

Als Ergebnis der zu Beginn der Weiterentwicklung durchgeführten Variantenuntersuchung wurde festgestellt, dass das Konzept „Inverse Trolley“ mit den zwei in Fahrtrichtung zeigenden Stromabnehmerarmen beibehalten werden sollte. Dabei waren zwei fast gegensätzliche Anforderungen umzusetzen. Einerseits führte die Bauraumrestriktion in Richtung Sattelaufleger dazu, dass die Gelenkpunkte der Arme nur ca. 30 cm hinter der Fahrerkabine liegen durften. Andererseits sollten auch im abgesenkten Zustand die Arme in Fahrtrichtung nicht über die Kabine nach vorne überragen, woraus sich gegenüber ENUBA eine Verkürzung der Armlänge um fast 1,0 m ergab. Um trotz reduzierter Armlänge die Fahrleitung im gesamten vertikalen Arbeitsbereich kontaktieren zu können, mussten die Fußpunkte der Arme in Arbeitsposition näher an der Fahrleitung sein. Dies ließ sich bei gleichzeitiger Erfüllung der beiden anderen Anforderungen nur durch eine Liftkonstruktion für die Arme erreichen.

Bild 32 zeigt ein dreidimensionales Modell des neu entwickelten Stromabnehmers mit Liftkonstruktion und verschränkten Armen.

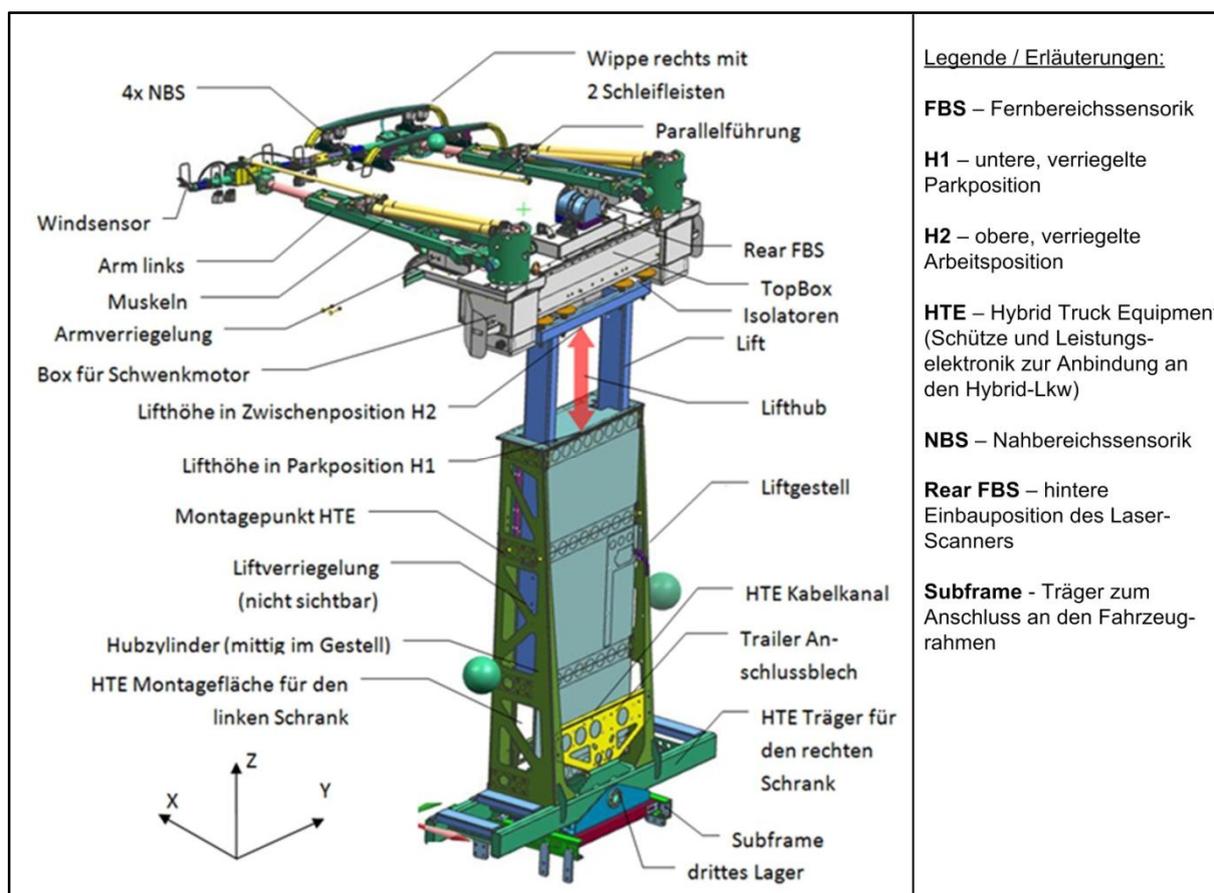


Bild 32 3D-Modell des Stromabnehmers mit Liftkonstruktion und verkürzten Armen

Zur Anbindung an den Fahrzeugrahmen wurde ein sog. „Subframe“ entworfen, der auf der Seite des Stromabnehmers eine einheitliche mechanische Schnittstelle bietet und auf der Seite des Fahrzeugs an verschiedene Längsträger unterschiedlicher Lkw-Typen und -Hersteller angepasst werden kann.

Weitere Veränderungen und Weiterentwicklungen betrafen folgende Aspekte:

- Unterbringung der Stromabnehmersteuerung sowie der schutztechnischen und leistungselektronischen Komponenten in zwei Schaltschränken (HTE-Boxen) seitlich neben dem Lift
- Platzierung des Scanners zur Fahrleitungsdetektion auf dem Lift anstatt an der Stoßstange, um einer Vorgabe aus dem Bereich Crashverhalten nachzukommen (vgl. TB 42 in Abschnitt 3.1.1)
- Verschränkung der Arme im abgesenkten Zustand, um die nach Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO [38]) zulässigen Fahrzeugmaße einzuhalten
- Umgestaltung der Verriegelungsbaugruppe, die sich im Langzeitverhalten der Versuchs-Lkw aus der ersten Projektphase als störanfällig erwiesen hatte

Steuerung und Bedienung des Stromabnehmers

Auch bei der Steuerung des Stromabnehmers waren umfangreiche Weiterentwicklungen notwendig, um die Änderungen und Verbesserungen der Fahrleitungsinfrastruktur sowie des mechatronischen Konzepts des Stromabnehmers umzusetzen. Die wesentlichen Änderungen an der Steuerung erfolgten bei den folgenden Funktionen:

- Anpassung der Stromabnehmer-Steuerung an die in Fahrzeuginnenachse und Höhenlage geänderte Scanner-Position der Fernbereichssensorik und an die verkürzte Länge der Arme
- Aufweitung des regelmäßigen Arbeitsbereichs auf ca. 1 m zur Realisierung von niedrigen Fahrleitungshöhen in Kettenwerksabsenkungen an Brücken
- Optimierung der Erkennungsmuster von Fahrdrähten in Parallelfeldern, in Kettenwerksabsenkungen und in Kurven sowie zur Erkennung von Streckentrennern, um diese als zulässige Fahrleitungsbauformen zu identifizieren
- Entwicklung und Optimierung eines Zustands-Folgereglers zur optimalen Ausregelung der Andruckkraft mit nichtlinearen Muskel-Aktoren
- Pneumatische und softwaretechnische Verbesserungen zur Verkürzung der Absenkezeiten des Stromabnehmers zur Verkürzung von Übergangszuständen
- Entwicklung einer neuen Regelsystematik für die Horizontalmotoren für eine schnellere Nachregelung der lateralen Abweichung

Die Weiterentwicklungen im Bereich der Stromabnehmerbedienung resultierten aus einer höheren Wichtung der Integration des Stromabnehmers in die Fahrerkabine und Anpassung an die Bedienungsgewohnheiten der Lkw-Fahrer. Folgende Entwicklungsschritte wurden realisiert:

- Entwicklung eines Touch-Displays für Fahrer zur intuitiven Bedienung des Stromabnehmers auf Basis einer Nutzfunktions- und Erwartungsanalyse (als Arbeitspaket des DLR), Bild 33
- Weiterentwicklung des vorhandenen Bedienungskonzepts mit Anpassung der funktionalen Aufteilung an die unterschiedlichen Testfahrer-, Bediener- und Entwickler-Levels
- Einfache Bedienungsmöglichkeit über Kippschalter mit Stromabnehmerpiktogramm im Armaturenbrett (Piktogramme s. Bild 34)
- Integration von Zustands- und Warnleuchten im Lkw-Display (Piktogramme s. Bild 34)

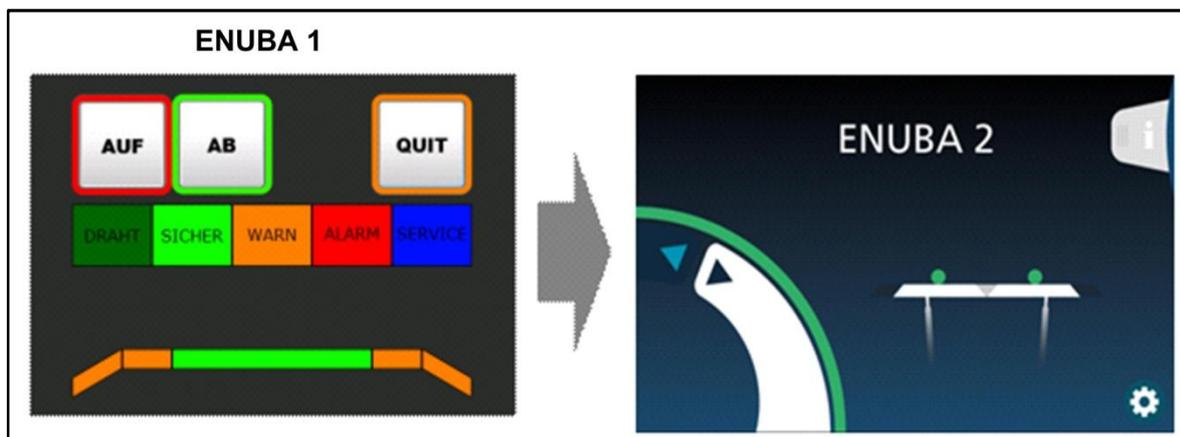


Bild 33 Touchdisplays der unterschiedlichen Entwicklungsstufen



Bild 34 Intuitive Piktogramme für Kippschalter und Lkw-Display

Anpassungen und Variantenbewertung bei der Nah- und Fernbereichssensorik

Die Sensorsysteme des Stromabnehmers zur Erfassung der Fahrdrähte der zweipoligen Oberleitung und ihrer Position in Bezug zum Fahrzeug müssen zwei grundsätzliche Aufgaben erfüllen:

- Nach dem Einfahren in die elektrifizierte Spur muss detektiert werden, wann sich das Fahrzeug ausreichend nah unter den Fahrdrähten befindet, damit der Fahrer oder die Steuerung den Befehl zum Anlegen des Stromabnehmers geben kann.
- Bei angebügelmtem Stromabnehmer sind durch das Sensorsystem dauernd Informationen zur Nachführung des Stromabnehmers zu liefern, so dass der Kontakt zu den Fahrdrähten während der Fahrt nicht unterbrochen wird, solange sich das Fahrzeug unter den Fahrdrähten befindet.

Durch die Änderungen an Mechatronik und Steuerung des Stromabnehmers mussten die Erkennungsmuster der Sensorik an weitere Fahrleitungsbauformen und -elemente angepasst werden. Ebenso bedeutete die zur Erreichung einer crashgerechten Gestaltung geänderte und durch die Liftkonstruktion im Bezug zur Fahrleitung nicht mehr höhenkonstante Position des Laser-Scanners umfangreiche Anpassungen an den Auswertungsalgorithmen zur Detektion zulässiger Fahrdrähtlagen.

Weitere Untersuchungen umfassten im Bereich der Sensorik folgende Aspekte:

- Anpassung der Auswertungsalgorithmen an ein vielfältiges Witterungsspektrum mit Schnee-, Regen- und Nebellagen im Verlauf der gegenüber ENUBA deutlich ausgeweiteten Testphasen
- Einrichtung eines Dauerversuchsstandes zur Bewertung unterschiedlicher Technologien für die Fernbereichssensorik und zur Ermittlung von Langzeit-Witterungs-Einflüssen

Ergänzend dazu und motiviert durch die Chance, mit einfacheren oder günstigeren Technologien die Systemkosten des gesamten Stromabnehmers langfristig senken zu können, wurden entwicklungsbegleitend verschiedene Systeme der Nah- und Fernbereichssensorik identifiziert und mit einfachen Testinstallationen untersucht und bewertet. Bild 35 zeigt beispielhaft eine Testaufnahme einer Stereo-Kamera bei Tageslicht.



Bild 35 Komplexe Fahrdrachtsituation bei Erfassung durch Stereo-Kamera und Tageslicht

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass:

- der bereits im ersten ENUBA-Projekt gewählte Laserscanner derzeit weiterhin die bestmögliche Lösung für die Fernbereichs-Sensorik ist.
- für kleine Stückzahlen das bisherige Sensoriksystem robust und voll einsatzfähig ist.
- für große Stückzahlen die Komponentenkosten über Skaleneffekte sinken oder angepasste und günstigere Systeme evaluiert werden müssen.

Integrations- und Testprogramm

Der neu entwickelte Stromabnehmer (auch als Pantograph bezeichnet) wurde in verschiedenen Entwicklungsschritten umfangreich im Labor und auf der Versuchsanlage mit Labor- und Funktionsmustern getestet und erprobt. Dieses schrittweise Vorgehen umfasste:

- zwei Laborversuchsstände zur Untersuchung der geänderten Arm- und Schwenkbaugruppe (s. Bild 36 a)) sowie zur Erprobung der Liftbaugruppe
- ein vereinfachtes Funktionsmuster zur Ersterprobung auf der noch nicht hybridisierten Sattelzugmaschine (s. Bild 36 b)) und mit provisorischen Schaltschränken zur Unterbringung der Stromabnehmer-Steuerung
- ein vollständig integriertes Funktionsmuster für die hybridisierte Sattelzugmaschine

Mit dem vollständig integrierten Funktionsmuster wurde ein umfangreiches Testprogramm auf der Versuchsanlage in Groß Dölln absolviert. Es beinhaltete u. a.:

- Betriebsverhalten des Pantographen in normalen Verkehrssituationen, d. h. An- und Abbügeln bei allen Geschwindigkeiten, Überholmanöver und Untersuchungen zum Kurvenfahrverhalten
- Untersuchungen zum geänderten Schutz- und Isolationskonzept des Stromabnehmers einschließlich Kontrolle des Systemverhaltens bei Versagen einzelner Isolationsebenen
- Verhalten des Pantographen in Extremsituationen, z. B. beim schnellen Verlassen der elektrifizierten Fahrspur vor einer niedrigen Brücke oder bei Not- und Gefahrenbremsungen
- Untersuchungen zum Kontaktverhalten einzelner Stromabnehmer und zu den Wechselwirkungen zwischen mehreren angebügelten Fahrzeugen

Darüber hinaus wurden in Zusammenarbeit mit der EDAG Laboruntersuchungen zu weiteren Themenbereichen durchgeführt, die insbesondere von Relevanz für die Produktentwicklung und Härtung unter Beachtung der Design- und Anforderungsrichtlinien der Automobilindustrie sind. Dazu gehörten:

- Test der beiden Labormuster-Versuchsstände in einer Klimakammer zur Kontrolle der Stromabnehmer-Funktionen in einem aufgeweiteten Temperaturspektrum
- Test der beiden Labormuster-Versuchsstände auf einem Rütteltisch mit einem von Scania bereitgestellten Schwingungsspektrum zur Untersuchung des Langzeitverhaltens zentraler Baugruppen
- Test der gesamten, hybridisierten Sattelzugmaschine zur Störempfindlichkeit der elektronischen Baugruppen

Auf die Durchführung und Ergebnisse des Erprobung des neu entwickelten Stromabnehmers wird in Abschnitt 3.4 eingegangen.

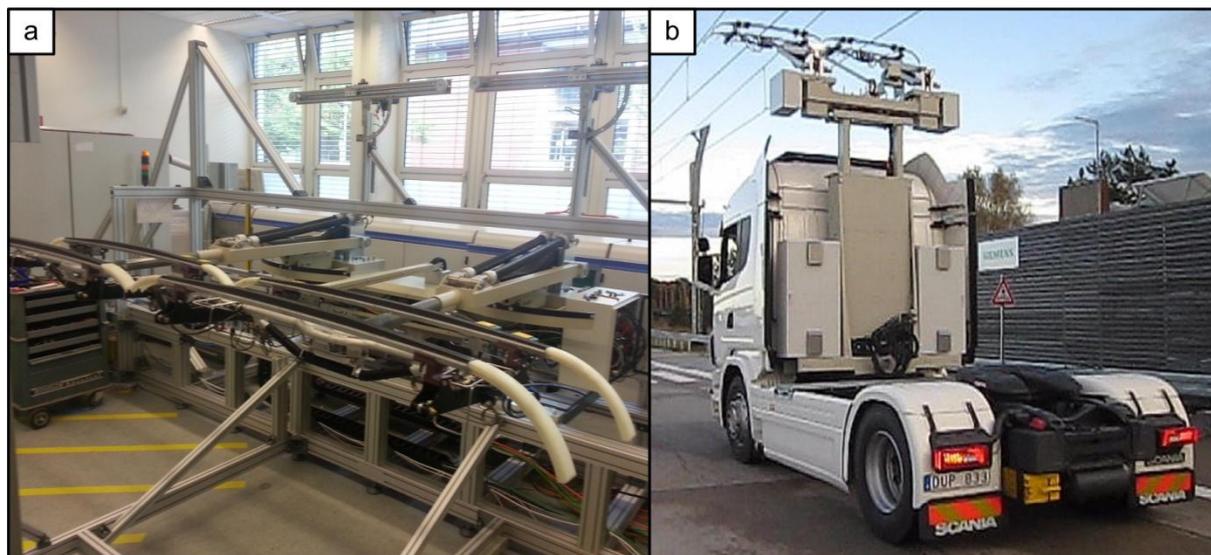


Bild 36 Labor- und Funktionsmuster: a) Labor-Versuchsstand für die Arm- und Schwenkbaugruppe, b) Funktionsmuster auf dem Diesel-Mock-up

3.2.2 Hybridisierte Sattelzugmaschine von Scania

Im Rahmen von ENUBA 2 wurde in Kooperation mit Scania AB eine Sattelzugmaschine vom Typ G360 Highline (mit langer Fahrerkabine) hybridisiert und mit einem Stromabnehmer ausgerüstet.

Dazu wurde das Fahrzeug durch Scania zusätzlich zum vorhandenen Verbrennungsmotor mit einem Elektromotor ausgerüstet, der zwischen Dieselmotor und Getriebe eingebaut ist. Der Elektromotor hat eine kontinuierliche Leistung von 50 kW und kann für einen kurzen Zeitraum diese auf bis zu 150 kW steigern. Um Einbauraum für die Hybridtechnik zu schaffen, wurde der 500-l-Dieseltank auf der Fahrerseite des Fahrzeugs entfernt, sodass an dieser Stelle eine Traktionsbatterie von ca. 5 kWh und eine elektrische Lenkhilfspumpe eingebaut werden konnten.

Um die Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Pantographensystem klären zu können, wurden die in einem gemeinsamen Workshop identifizierten mechanischen, elektrischen, steuerungstechnischen und pneumatischen Schnittstellen systematisch erfasst und im Rahmen des Interface-Managements nachverfolgt. Hierbei wurde jedes der Interfaces in die Bereiche Steuerung, Pneumatik, Mechanik und Leistungselektronik aufgeteilt. Dabei ergaben sich folgende Schwerpunkte:

- Im Bereich Steuerung wurden insgesamt neun Interfaces zwischen Siemens und Scania identifiziert, die z. B. die Schnittstellen zwischen der Pantographensteuerung und der Signalisierung im Armaturenbrett oder die CAN-Kommunikation zwischen der Fahrzeugsteuerung und der Pantographensteuerung beschreiben.
- Im Bereich der Pneumatik wurden zwei Schnittstellen identifiziert, die die Leitungsverlegung und die benötigte Druckluftversorgung beschreiben.
- Im Bereich Mechanik gab es 11 Schnittstellen, die u. a. das Lichtraumprofil des Fahrzeugs, die Freiräume für den Auflieger, die Gewichtsverteilung sowie den Zwischenrahmen für die Befestigung des Stromabnehmers am Hauptrahmen des Fahrzeugs definieren.
- Im Bereich Leistungselektronik wurden vier Schnittstellen identifiziert, die u. a. die Sicherungseinrichtungen wie Leitungsschutz und Überspannungsschutz sowie Kabeltypen und Kabelverlegung der Energieleitungen von der Hochvoltbatterie zu den HTE-Schränken beschreiben.

Aus diesen einzelnen Schnittstellen wurde ein Standard-Satz an Interfaces abgeleitet, der aufbauend auf den mit Scania gesammelten Erfahrungen auch auf andere Fahrzeuge und Hersteller übertragbar ist. Einen Überblick über diese verallgemeinerten Standard-Interfaces gibt Bild 37.

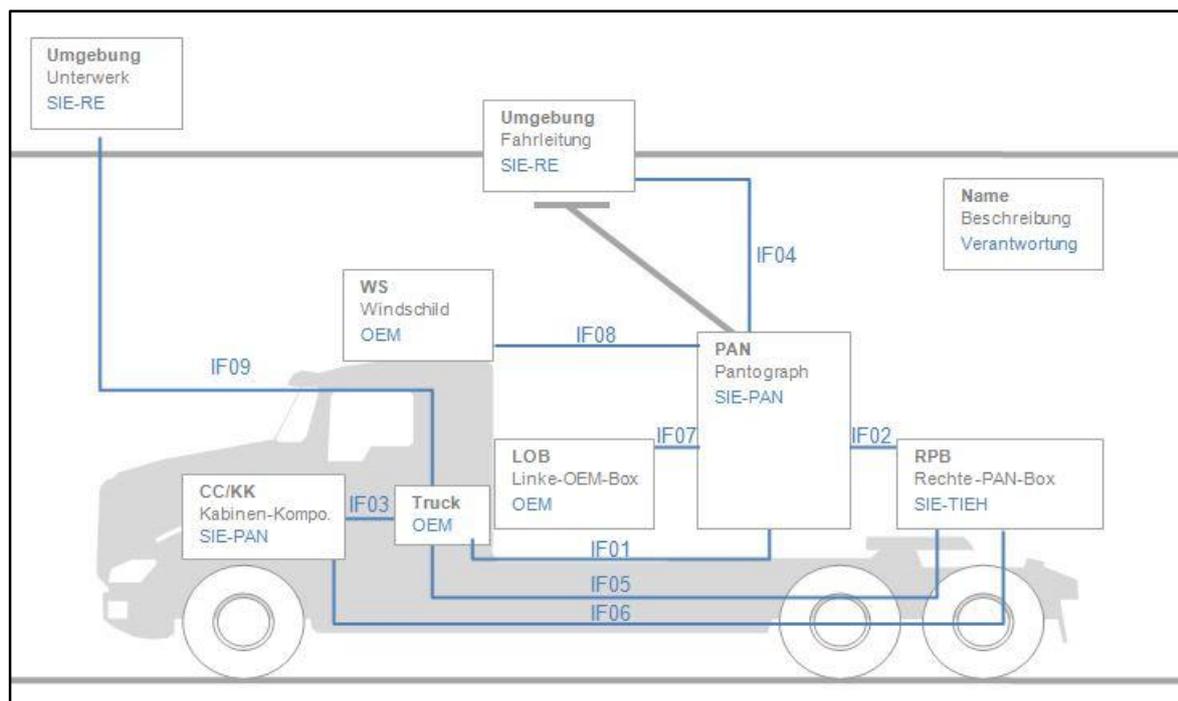


Bild 37 Standard-Schnittstellen zur Integration eines Stromabnehmers in einen Lkw

Als Bindeglied zwischen hybridisierter Sattelzugmaschine und Stromabnehmer wurden durch die Heitec AG nach Vorgaben der Siemens AG zwei Schaltschränke mit Schutzeinrichtungen und galvanisch trennenden DC-DC-Wandler ausgerüstet.

Ein erstes Labormuster des Stromabnehmers wurde bereits im November 2013 auf der zu diesem Zeitpunkt noch nicht hybridisierten Sattelzugmaschine installiert und bis März 2014 getestet, s. Bild 36 b (S. 52). Im Mai 2014 wurden die Schaltschränke (HTE-Boxen) und das weiterentwickelte Funktionsmuster des Stromabnehmers zusammen mit den Hybridkomponenten bei Scania integriert (s. Abschnitt 3.3.5) und ab Juni 2014 für den mehrmonatigen Testbetrieb nach Groß Dölln überführt. Dort werden regelmäßig Testfahrten mit und ohne Auflieger durchgeführt, s. Bild 38.



Bild 38 Hybridisierte Sattelzugmaschine mit Auflieger auf der Versuchsanlage

3.2.3 Energienetz- und Verkehrsmanagement - Technisches Monitoring

Während in Abschnitt 3.1.6 der Fokus auf zukünftige IT-Anwendungen im eHighway-Kontext gelegt wurde, waren auch für die Erprobung auf der Versuchsanlage umfangreiche Anpass- und Neuentwicklungen für die Monitoring- und Leitsysteme erforderlich. Die Entwicklungs- und Forschungsarbeiten konzentrierten sich dabei auf folgende Aspekte:

- Leitsystem Sitras RSC zur Überwachung und Fernbedienung von Bahnstromnetzen
- Leitsystem Conduct⁺ für Verkehrsüberwachung und Verkehrsflussmanagement
- eTruck2X - Kommunikation mit innovativen Verkehrsmanagement-Anwendungen
- Technisches Stromabnehmer-Monitoring zur Zustandsermittlung und -bewertung (TMS)
- Technisches Fahrleitungs-Monitoring (CMS) zur Risserkennung und Zustandskontrolle

Leitsystem Sitras RSC zur Überwachung und Fernbedienung von Bahnstromnetzen

In der neuen Leitstelle am Unterwerk zur Energieversorgung des Fahrleitungsnetzes kam im Projekt ENUBA 2 erstmals die neueste Produktgeneration des Leitsystems Sitras RSC - Sitras⁴ Rail SCADA⁵ zum Einsatz. Leitsysteme in Bahnenergieversorgungsnetzen erfüllen vielfältige Aufgaben, wie z. B.:

- zentrale Ermittlung und Überwachung der Schaltzustände aller Leistungsschalter und Trenner im gesamten Bahnenergieversorgungsnetz mit zahlreichen Unterwerken
- zentrale Sammlung von Warn- und Störmeldungen zur priorisierten Abarbeitung
- Fernbedienung der Leistungsschalter und Trenner als Reaktion auf Störfälle oder zur Vorbereitung und Sicherung von Instandhaltungsarbeiten

Bild 39 zeigt das Stationsbild des Unterwerks der Versuchsanlage im Leitsystem Sitras RSC. Wie bei der Vor-Ort-Bedienung im Unterwerk erfordert auch die Fernbedienung von der Leitstelle aus entsprechend qualifizierte und in die Anlage eingewiesene Elektrofachkräfte (EFK) als Schaltberechtigte oder Anlagenverantwortliche gemäß [18].

Das Leitsystem ermöglicht im Erprobungsbetrieb die schnelle Erfassung des elektrischen Zustands der Versuchsanlage. Bei den Untersuchungen zum elektrischen Schutzkonzept, zur Notabschaltung der Fahrleitung, zum Instandhaltungskonzept und zum Störfallmanagement (vgl. Abschnitt 3.1.1) wurden außerdem die Kommunikations- und Entscheidungsprozesse analysiert. Diese bilden eine wichtige Grundlage bei der späteren Kombination von elektrischen Netzleitstellen und Verkehrsmanagementzentralen und bei Planung und Durchführung von Instandhaltungsarbeiten sowie bei Störfällen.

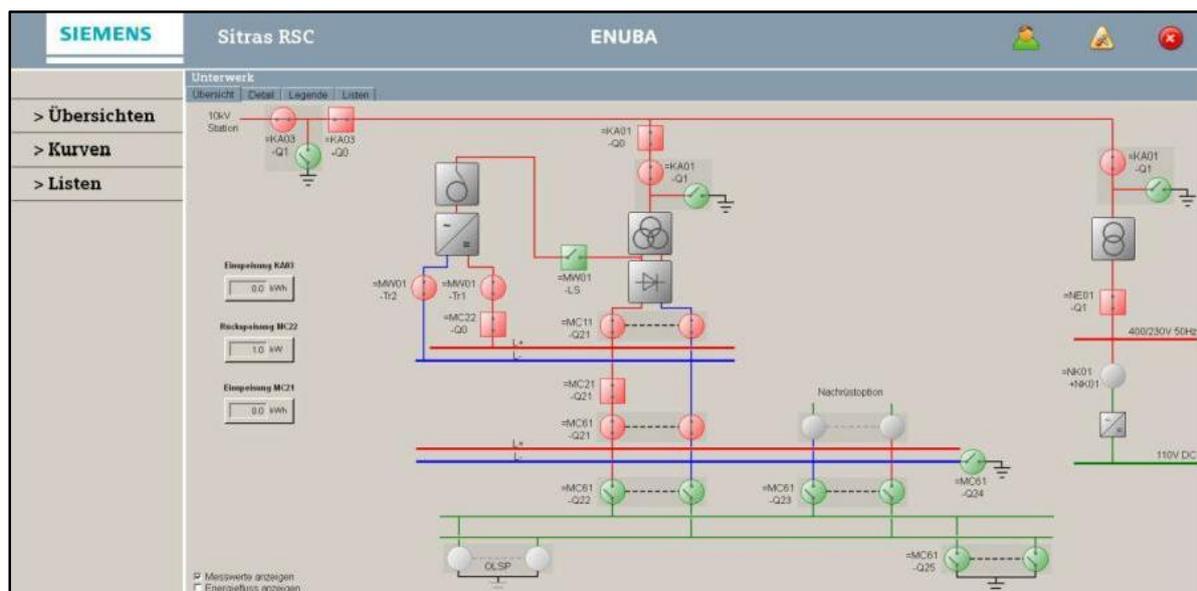


Bild 39 Stationsbild des Unterwerks der Versuchsanlage im Leitsystem Sitras RSC

⁴ Sitras - Siemens Traction Automation System, s. auch Abkürzungsverzeichnis Abschnitt 6.1

⁵ SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition

Leitsystem Conduct⁺ für Verkehrsüberwachung und Verkehrsflussmanagement

Ein weiteres, in der Straßenverkehrstechnik etabliertes Leitsystem ist das Programm Conduct⁺. Es wird u. a. erfolgreich zur dynamischen, aufkommensabhängigen Verkehrsflusssteuerung mit Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen, zur Verkehrssteuerung in Tunneln und auf Abschnitten mit temporärer Standstreifen-Freigabe eingesetzt.

Auf der Versuchsanlage sind alle installierten Komponenten der Verkehrsleittechnik in das Leitsystem Conduct⁺ eingebunden. Dazu gehören:

- Induktions-Doppelschleifen zur Fahrzeugerkennung
- eine Wetterstation zur kontinuierlichen Gewinnung von Umweltdaten
- mehrere Überkopfdetektoren (ÜKD) zur Erfassung der Spurbelegung
- eine Schilderbrücke mit Wechselverkehrszeichen

Zusätzlich wurden zwei ANPR-Kameras zur Kennzeichenerkennung installiert und verknüpft, die im technischen Stromabnehmer-Monitoring genutzt werden. Das Streckenbild der Versuchsanlage, wie es im Leitsystem Conduct+ abgebildet wird, zeigt Bild 40.

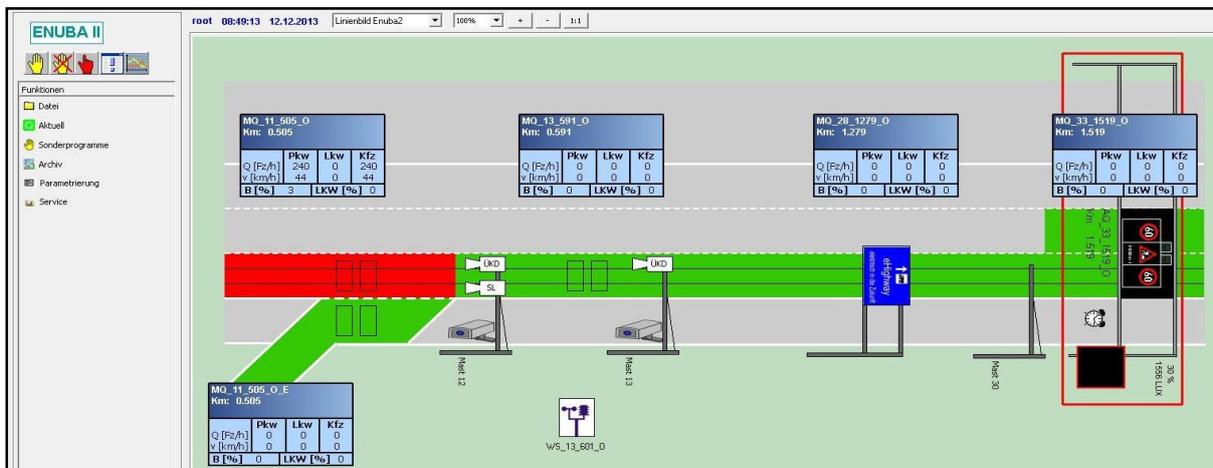


Bild 40 Streckenbild der Versuchsanlage im Verkehrsleitsystem Conduct⁺

Die Gesamtheit der Detektoren, Übertragungswege und Anzeigeelemente führen zu einem typischen Abbild technisch zeitgemäß ausgestatteter Autobahnabschnitte, in die Fahrleitung und Stromversorgung integriert werden mussten. An der Schilderbrücke, s. Bild 41, musste eine Kettenwerksabsenkung für die Fahrleitung installiert werden (vgl. Abschnitte 3.3.2 und 3.3.3). Das Leitsystem Conduct⁺ und die Schilderbrücke mit den Wechselverkehrszeichen bildeten außerdem die technische Voraussetzung, um in den Forschungsarbeiten zusammen mit dem DLR innovative Szenarien aus dem Bereich der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation zu entwickeln und zu erproben.



Bild 41 Schilderbrücke mit Wechselverkehrszeichen auf der Versuchsanlage

eTruck2X - Kommunikation für innovative Verkehrsmanagement-Anwendungen

Die stetige Ausbreitung von Kommunikationsnetzen und -anwendungen bindet mittlerweile auch Fahrzeuge und Verkehrsinfrastrukturen ein. Die Zusammenarbeit mit dem DLR als Know-How-Träger in Verkehrs- und Kommunikationsanwendungen bot daher die Gelegenheit, im Projekt ENUBA 2 neue Anwendungsfälle der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (V2I - en. für: vehicle to infrastructure) zu identifizieren und zu erproben. Es wurden dabei drei Anwendungsfälle erkannt, die bei Aufbau und Betrieb von Fahrleitungen und OH-Lkw mit Stromabnehmern von besonderer Bedeutung sind:

- das Szenario „Unfall“ als Störfall mit beliebigen Fahrzeugen auf dem elektrifizierten Fahrstreifen, bei dem der Fahrleitungsabschnitt abgeschaltet und den OH-Lkw die Unterbrechung der Energieversorgung angezeigt wird
- das Szenario „wandernde Arbeitsstelle“ als ortsveränderliches Hindernis, das z. B. durch die regelmäßige Streckenkontrolle der Autobahn oder eine Sichtinspektion der Fahrleitung entsteht
- Anzeige „virtueller Schilderbrücken“ im Lkw-Cockpit für häufigere Informationen über Verkehrszustände ohne mit hohem Aufwand verbundene reale Schilderbrücken mit Wechselverkehrszeichen zu installieren

Anhand Bild 42 lässt sich das Szenario „Wanderbaustelle“ nachvollziehen:

- In Bild 42 a bildet der Warnleitanhänger das letzte Fahrzeug der „wandernden“ Arbeitsstelle. Über eine Sendeeinrichtung werden Position und Fahrtrichtung per speziellem WLAN-Protokoll an eine Scalance-RSU (RSU für en. Road Side Unit, ein WLAN-Access-Point für V2X-Kommunikation) übertragen und von dort ans Leitsystem Conduct+ übermittelt.
- Das Leitsystem errechnet aus der Position der Wanderbaustelle ein Schaltprogramm für **die fest installierten (realen) und virtuellen Schilderbrücken**, das dann wieder über die Road Side Units per V2X-Kommunikation an die empfangsfähigen Fahrzeuge übertragen und zusätzlich auf der realen Schilderbrücke angezeigt wird (Bild 42 b1).
- Bewegt sich die Wanderbaustelle weiter, so wird kontinuierlich das Anzeigeprogramm für die fest installierten und virtuellen Schilderbrücken angepasst, sodass die Einschränkungen im Verkehrsablauf minimiert werden können (Bild 42 b2).

Dabei wurde im Projekt ENUBA 2 erstmals ein kombiniertes, dynamisches Anzeigeprogramm für real installierte Wechselverkehrszeichen und virtuelle Schilderbrücken realisiert. Die vom Leitsystem festgelegten Anzeigen erscheinen sowohl auf der Schilderbrücke (s. Bild 41, S. 56) als auch im Informationsbereich des neu entwickelten Touch-Displays zur Stromabnehmerbedienung (s. Bild 27, S. 46).

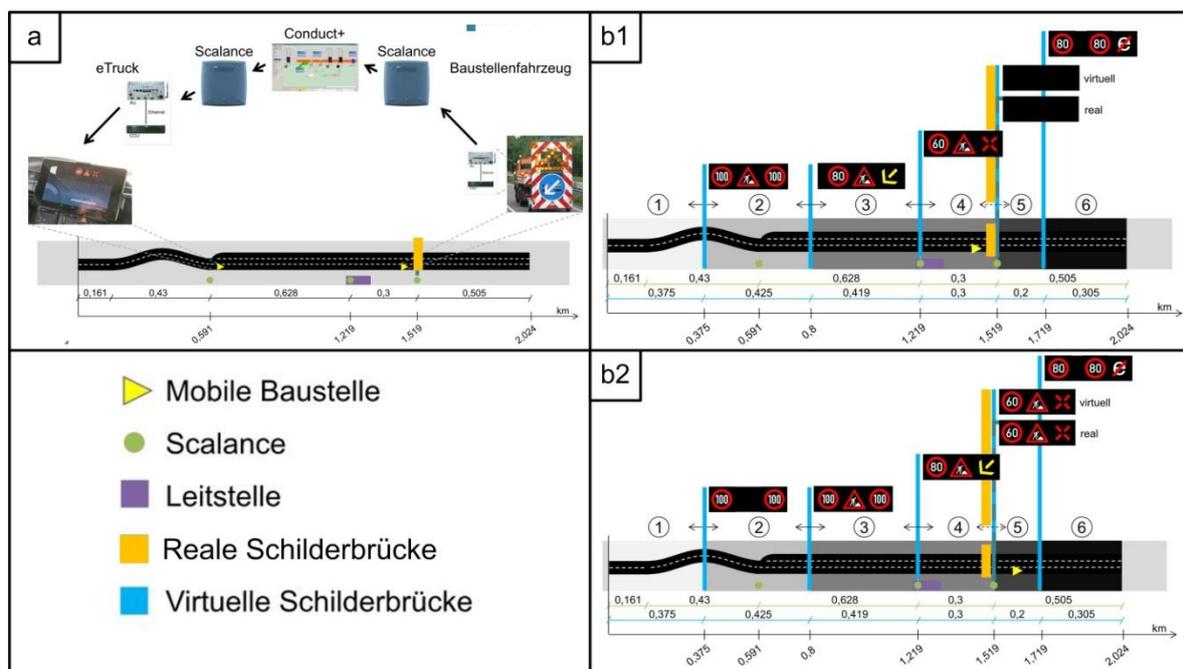


Bild 42 eTruck2X-Kommunikation im Szenario „Mobile Baustelle“: a) Kommunikationspfad, b1/2) ortsabhängig konfigurierte Anzeigebilder für Schilderbrücken [12]

Technisches Stromabnehmer-Monitoring zur Zustandsermittlung und -bewertung (TMS)

An der Schnittstelle Stromabnehmer - Fahrdrabt stehen die Fahrzeuge im mechanischen und elektrischen Kontakt mit der Infrastruktur. Für den Betrieb der Fahrzeuge und der Infrastruktur müssen die Stromabnehmer hinsichtlich der Andruckkräfte und die Schleifleisten hinsichtlich ihrer Beschaffenheit in einem sicheren Zustand sein. Daraus folgen Anforderungen an die Instandhaltung der Stromabnehmer, die in Analogie zum Instandhaltungskonzept der Infrastruktur sowohl Inspektionen und Funktionsprüfungen als auch Wartungen und Reparaturen umfassen. Die Schleifleisten bestehen aus gehärtetem Kohlenstoff und bilden den weicheren Partner der Kontaktpaarung Fahrdrabt - Schleifleiste, sodass sie regelmäßig zu kontrollieren und bei Erreichen der Verschleißgrenze auszutauschen sind.

In Ergänzung zu den Instandhaltungsarbeiten an den Stromabnehmern im Stillstand und den beschränkten Möglichkeiten zur Selbstdiagnose der Stromabnehmer während der Fahrt ist die infrastruktureitige Erfassung und Auswertung der Stromabnehmer- und Fahrzeugeigenschaften im Betrieb zweckmäßig. Aufgaben und Ziele eines solchen Technischen Monitoring-Systems sind:

- Sicherstellung einer hohen betrieblichen Verfügbarkeit des Systems
- Frühzeitiges Erkennen von Beschädigungen und Defekten, um Störfälle zu vermeiden
- Unterstützung der Benutzer im täglichen Umgang mit dem eHighway-System durch Vereinfachung und Unterstützung bei Kontrollaufgaben

Einzelne Aspekte sind schon heute im Autobahnbetrieb relevant und werden durch punktuelle oder dauerhafte Zustandskontrollen bestimmter Fahrzeugeigenschaften untersucht, wie beispielsweise Gewichtskontrollen vor Brückenbauwerken oder Höhen- und Temperaturkontrollen vor Tunneln.

Aus dem Oberleitungsbetrieb ergeben sich zusätzliche Kriterien für Stromabnehmer, deren Messung und Bewertung sinnvoll zur Erreichung der zuvor genannten Ziele des Technischen Monitorings sind:

- Messung des Fahrdrabtanhubes durch die Stromabnehmer als Maß für die Kontaktkraft
- Ermittlung des Zustands der Schleifleisten der Stromabnehmer

Die Messstellen verfügen über verschiedene Sensoren zur Erkennung von Fahrzeugen und zur Messung der jeweiligen Zustandsgröße. Durch Erkennung des Fahrzeugtyps und weitere Ausschlusskriterien ist sichergestellt, dass die Zustandsgrößen nur für Lkw mit angebügeltem Stromabnehmer ermittelt werden. Einen Messdatensatz der Fahrdrabtanhubmessung auf der Versuchsanlage zeigt Bild 10 (S. 25). Den Aufbau und einen Messdatensatz des sog. Inspection Gates zum Schleifleistenzustand zeigt Bild 43. Die Messdatensätze aller Inspection Gates werden in die Leitstelle übertragen und können dort über eine Datenbank verwaltet und hinsichtlich Auffälligkeiten ausgewertet werden.



Bild 43 Aufbau und Messdatensatz des Inspection Gates „Schleifleiste“

Technisches Fahrleitungs-Monitoring (CMS) zur Risserkennung und Zustandskontrolle

Ein technisch basiertes Fahrleitungsmonitoring (CMS für Contact Line Monitoring System) hilft bei der Erkennung langfristiger Zustandsänderungen und unterstützt die Instandhaltung. Durch Überwachung der Bewegung der Radspanner können auch kurzfristige Ereignisse wie ein Fahrdratriss erkannt werden und z. B. eine Abschaltung des betroffenen Abschnitts veranlassen. Im Projekts ENUBA 2 wurden zwei Aspekte des CMS erprobt und hinsichtlich des Weiterentwicklungspotenzials untersucht:

- Ausrüstung der Versuchsanlage und Anpassung CMS-Messsysteme aus dem Bahnbereich an das zweipolige Fahrleitungssystem (s. Bild 44) für Langzeitbeobachtungen und Risserkennung
- Durchführung von Voruntersuchungen im Bereich AE - Acoustic Emission zur akustischen Zustands- und Änderungsdiagnose im Rahmen einer Diplomarbeit [40]

Die in Bild 44 dargestellten Messeinrichtungen wurden auf der Versuchsanlage installiert. Sie wurden sowohl bei den Tests in Grenzsituationen (u. a. Fahrdratriss, s. Abschnitt 3.4.6) eingesetzt als auch als Datenquellen zur Langzeitbeobachtung des Fahrleitungssystems genutzt.

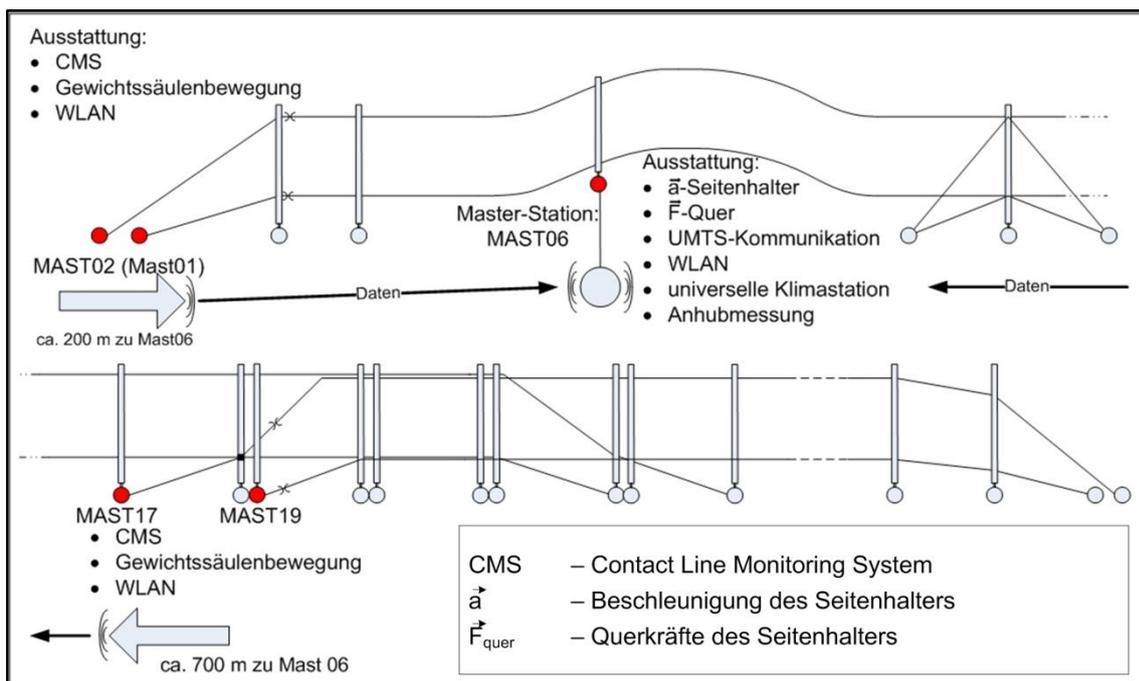


Bild 44 Installationen des CMS - Contact Line Monitoring Systems auf der Versuchsanlage

Die Grundidee des AE - Acoustic Emission beruht darauf, dass sich entlang linienförmiger Leiter Schallwellen ausbreiten und sich durch lokale Defekte oder Abnutzung das messbare Frequenzspektrum ändert. In [40] erfolgten orientierende Untersuchungen zur Unterscheidbarkeit von Referenzsignalen (Hsu-Nielsen-Test) und typischer Betriebssignale wie Anbügeln und Fahrt mit Stromabnehmer, s. Bild 45. Durch die zahlreichen Bauelemente wie Klemmen weist die Fahrleitung eine hohe Dämpfung auf. Ebenso prägt das seitliche Wear-Leveling Geräusche ein. Es besteht weiterer Untersuchungsbedarf, um die interessierenden zustandsbezogenen Größen von den Störgrößen zu unterscheiden.

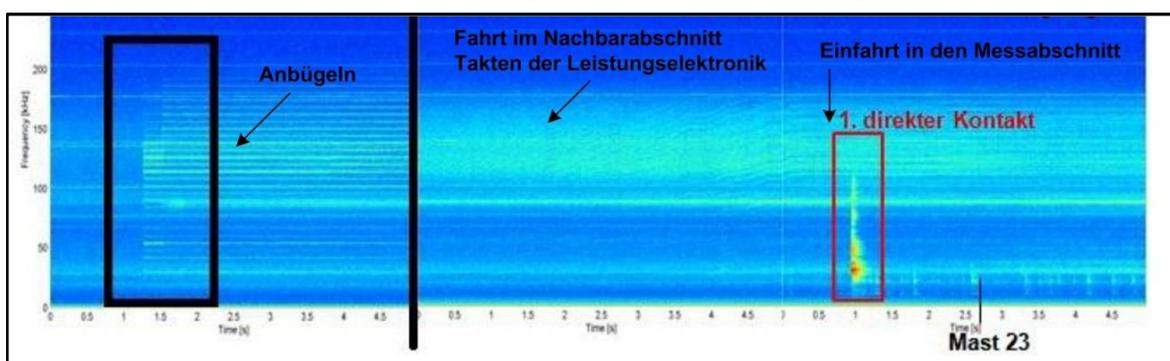


Bild 45 Akustisches Spektrum der Fahrleitung bei Fahrt mit 60 km/h

3.2.4 Energiemessung und Abrechnung

Rechtliche Analysen zeigen (vgl. Abschnitt 3.1.3), dass beim Betrieb individueller Fahrzeuge an einer gemeinsamen Versorgungsinfrastruktur Energiebezug und Abrechnung den einzelnen Fahrzeugen zugeordnet werden müssen. In Analogie zur Messung und Abrechnung der Traktionsenergie bei Eisenbahnfahrzeugen (s. [46]) muss den Anforderungen des liberalisierten Strommarktes gemäß EnWG - Energiewirtschaftsgesetz [47] Rechnung getragen werden. Dabei wurden in Rahmen des Projekts ENUBA 2 auf der einen Seite eine Analyse und Zuordnung der sich aus den Anforderungen des EnWG ergebenden Rollen und Zuständigkeiten beim Betrieb eines Fahrstromnetzes erarbeitet. Zum anderen wurden in zwei Erprobungsträgern der verschiedenen Fahrzeuggenerationen eichrechtlich konforme Energiemesssysteme installiert sowie deren Fernauslesung erprobt, s. Bild 46 und Bild 47.

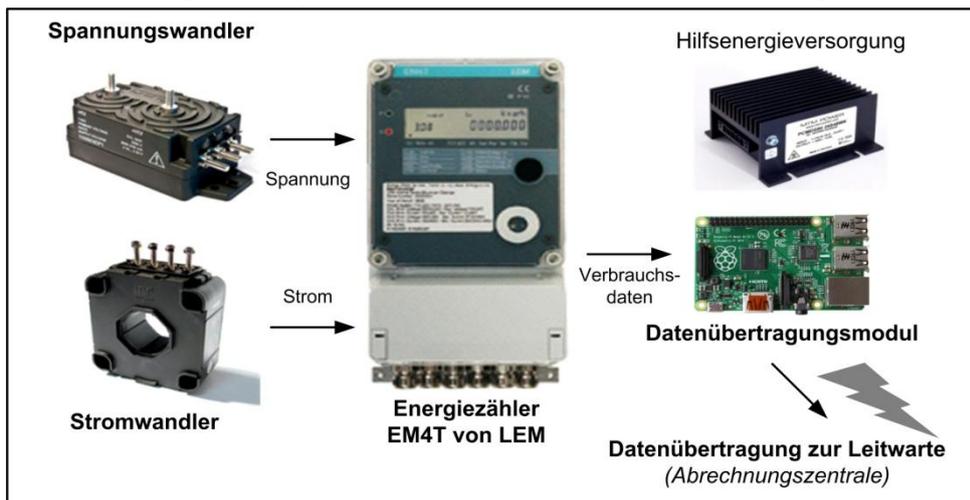


Bild 46 Systemaufbau und Komponenten zur Energiemessung und Datenübertragung

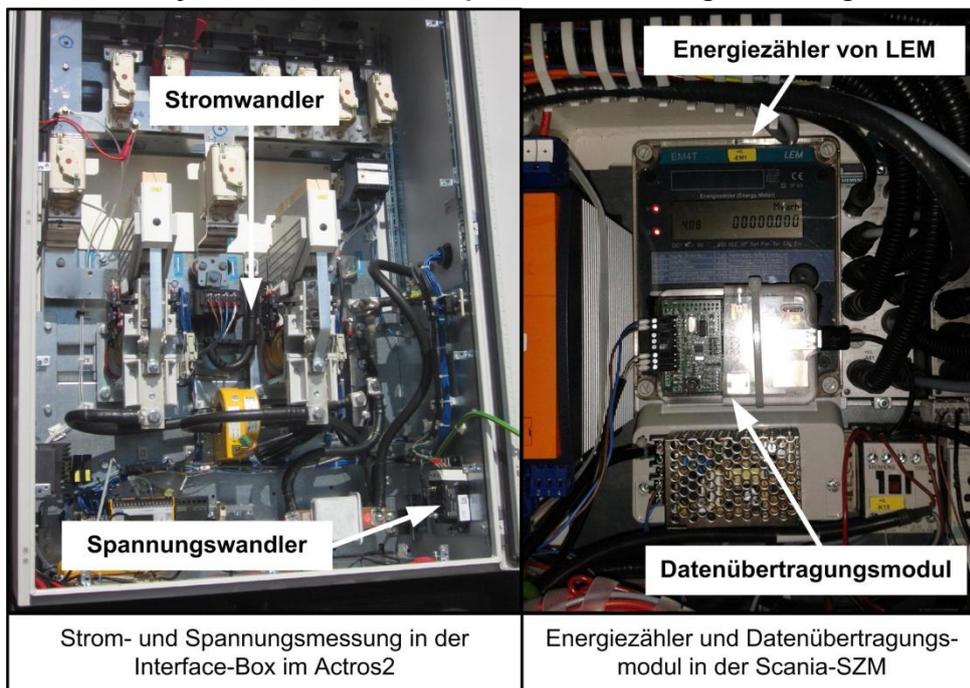


Bild 47 Komponenten der Energiemessung im Actros2 (links) und in Scania-SZM (rechts)

In beiden Fahrzeugen gemäß Bild 47 wurde je ein komplettes Messsystem installiert. Die automatische Aufzeichnung und Übertragung der Energiemessprofile erfolgt in unterbrechungsfreien 15-Minuten-Intervallen. Da durch die kurze elektrische Fahrstrecke keine vollständigen Intervalle entstehen, kann ersatzweise manuell der Zählerstand abgefragt werden. Die Arbeiten zur verbesserten Auslesung und Veranschaulichung der Daten sind noch nicht abgeschlossen. Ebenso sind in späteren Entwicklungsschritten energie- und eichrechtliche Aspekte eingehender zu betrachten.

3.3 Neubau Versuchsanlage und Fertigung Prototypen - VE

3.3.1 Umzug und Neubau der Versuchsanlage - Flächenplan

Wie bereits in Kapitel 2.3.2.3 dargestellt, konnte die in der ersten Projektphase aufgebaute Versuchsanlage auf der Querwindbahn des ehemaligen Militärflughafens Groß Dölln nicht für die gesamte Projektlaufzeit von ENUBA 2 genutzt werden. Nach einmaliger Verlängerung lief der Mietvertrag für die Querwindbahn zum 31.07.2012 aus, die dann zu einer der Kernflächen des neu errichteten Solarkraftwerks wurde. Daher musste die Fahrleitung entlang der Querwindbahn zurückgebaut und das Unterwerk zum voraussichtlichen neuen Standort umgesetzt werden.

Zur Fortsetzung der Erprobung und zur Erreichung der Projektziele von ENUBA 2 war der Umzug bzw. Neubau der Versuchsanlage notwendig. Dazu wurde mit dem neuen Flächeneigentümer die Ausweichfläche „Taxiway“ gefunden und ein Miet- und Nutzungskonzept abgestimmt, s. Bild 48. Der Taxiway befindet sich südlich und parallel zur ehemaligen Hauptstart- und -landebahn. Östlich von der Versuchsanlage befinden sich die Rennkurse und Sonderflächen des Driving Centers. In den drei anderen Himmelsrichtungen grenzt die Versuchsanlage teilweise unmittelbar an einzelne Blöcke des Solarkraftwerks oder an Waldstücke.

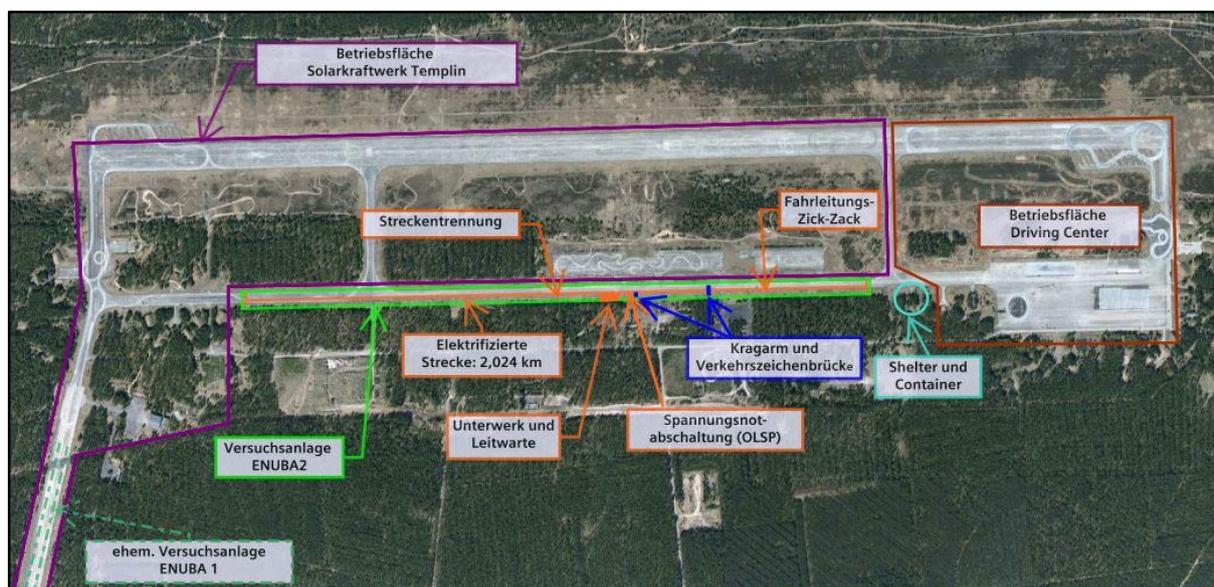


Bild 48 Luftbild mit Betriebsflächen der Versuchsanlage und benachbarter Unternehmen

Um die Versuchsanlage errichten zu können, musste durch die Stadt Templin der Bebauungsplan für das Solarkraftwerk Templin geändert werden. Dies erfolgte in der Sitzung der Stadtverordnetenversammlung der Stadt Templin am 24.10.2012. Parallel dazu und unter Anerkennung der zukünftigen Festsetzungen des Bebauungsplans wurde zum 26.07.2012 beim Bauordnungsamt Prenzlau der Bauantrag zur Errichtung der neuen Versuchsanlage eingereicht. Die Baugenehmigung erfolgte am 18.09.2012. Die Baufreigabe wurde am 05.10.2012 erteilt.

Damit waren die planerischen und rechtlichen Grundlagen zum Aufbau der Versuchsanlage auf dem Taxiway geschaffen. Die Arbeiten fanden von Mitte Oktober 2012 bis Mitte Februar 2013 statt. Die Fertigstellung der baulichen Anlagen wurde am 26.02.2013 angezeigt.

Zur Versuchsanlage gehören außerdem:

- Ein umgebauter Shelter mit geschützter und gesicherter Abstellmöglichkeit für die Versuchsfahrzeuge sowie eingerichteter Werkstatt zur Durchführung kleinerer Reparaturen.
- Ein Aufenthaltscontainer als Arbeits- und Pausenraum für das Versuchspersonal.

Diese zusätzlichen Anlagen werden ebenfalls zusammen mit dem Taxiway vom Grundstückseigentümer des Solarkraftwerks gemietet.

3.3.2 Einrichtungen der Straßenverkehrstechnik

Gemäß den Untersuchungszielen war der Nachweis der Integrationsfähigkeit des Oberleitungssystems in eine autobahntypische Umgebung einer der Schwerpunkte bei der Planung der Versuchsanlage. Daher wurden als typische Einrichtungen sowohl eine Wegweiserbrücke in Form eines Kragarms als auch eine Wechselverkehrszeichenbrücke installiert. Der Kragarm steht in der Nähe des Unterwerks und hat eine Durchfahrtshöhe von 5,65 m über dem Hauptfahrstreifen, s. Bild 49.

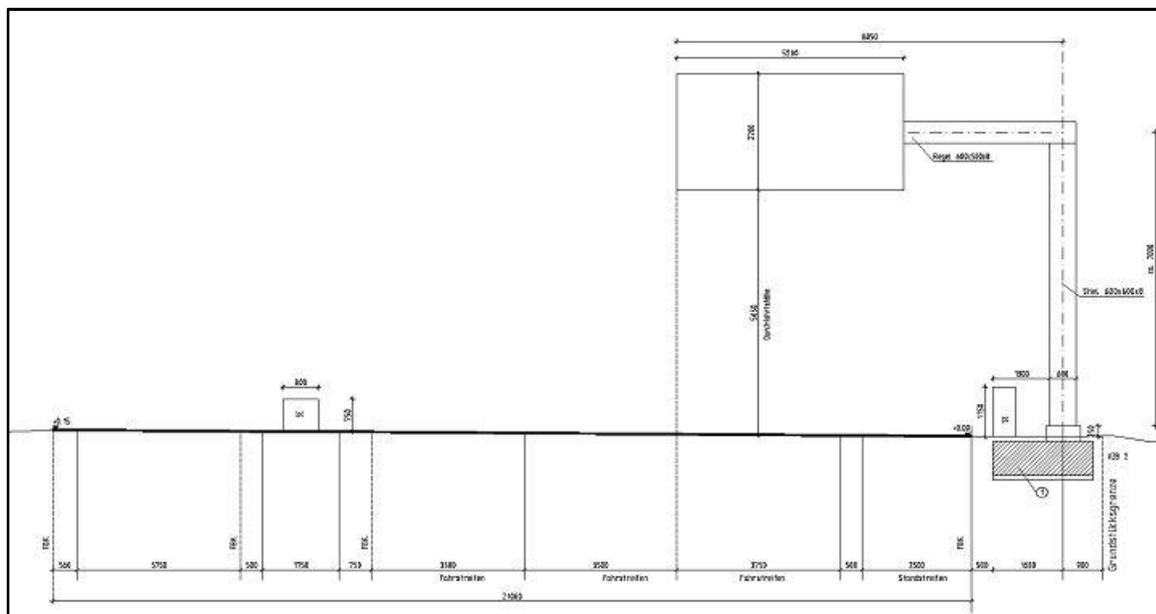


Bild 49 Wegweiserbrücke als Kragarm mit 5,65 m Durchfahrtshöhe

Die Durchfahrtshöhe von 5,65 m erlaubt die Beibehaltung der Regelfahrdrahthöhe der Versuchsanlage von 5,15 m, jedoch musste der Abstand der Tragseile zu den Fahrdrähten verringert werden, s. Abschnitt 3.3.3 mit Details zum angepassten Fahrleitungssystem.

Im Abstand von 240 m hinter dem Kragarm befindet sich auf der Versuchsanlage eine Wechselverkehrszeichenbrücke mit einer Durchfahrtshöhe von 5,00 m über dem elektrifizierten Fahrstreifen, s. Bild 50. Die Durchfahrtshöhe von 5,00 m erfordert eine Absenkung der Regelfahrdrahthöhe von 5,15 m. Daher wurde eine Kettenwerksabsenkung projektiert, die unter der Brücke eine Fahrdrahthöhe von 4,70 m ermöglicht, Details s. Abschnitt 3.3.3.



Bild 50 Wechselverkehrszeichenbrücke mit 5,00 m Durchfahrtshöhe

Folgende straßenverkehrstechnische Komponenten wurden für das Verkehrsleitsystem installiert:

- drei Induktions-Doppelschleifen zur Fahrzeugerkennung
- mehrere Überkopfdetektoren (ÜKD) zur Erfassung der Spurbelegung
- zwei ANPR-Kameras zur Kennzeichenerkennung

Auf die Einbindung dieser Komponenten in das Leitsystem wurde bereits in Abschnitt 3.2.3 und in Bild 40 eingegangen.

Sowohl die für Autobahnen typischen Elemente wie Wegweiserbrücke und Wechselverkehrszeichenbrücke als auch die Maste des Oberleitungssystems bilden Hindernisse im Seitenraum, sodass entsprechend ausgelegte Fahrzeugrückhaltesysteme erforderlich sind. Begleitend zur technischen Bewertung des Fahrleitungssystems zusammen mit der Bundesanstalt für Straßenwesen, s. Abschnitt 3.1.1, wurde auch die Versuchsanlage abschnittsweise mit verschiedenen Rückhaltesystemen ausgestattet. Im rechten Seitenraum wurde im westlichen Teil der Versuchsanlage ein Rückhaltesystem der Aufhaltstufe H1 installiert. Im östlichen Abschnitt wurde das H2-klassifizierte System Super Rail Eco installiert, s. Bild 51.

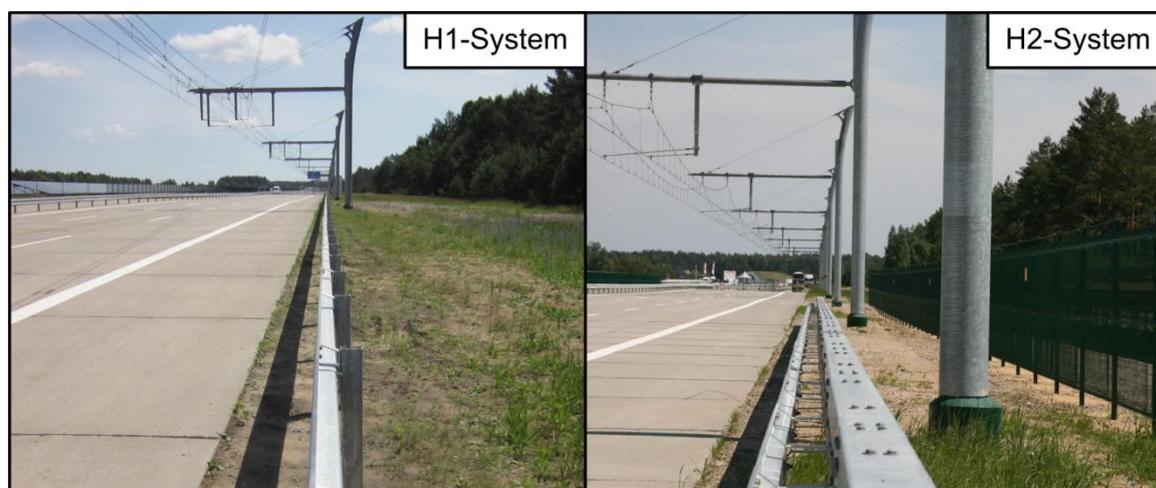


Bild 51 Rückhaltesysteme unterschiedlicher Aufhaltstufen auf der Versuchsanlage

Im Mittelstreifen kann in Verbindung mit dem Anprallssockel der Wechselverkehrszeichenbrücke das System Super-Rail VZB eingesetzt werden. Dieses ist speziell für den Einsatz an Bauwerken konzipiert (vgl. Bild 52). Auf der Teststrecke ist zwischen Sockelwand und Fahrbahnkante ein Abstand von 0,77 m vorhanden. Die Super-Rail VZB besitzt eine Systembreite von 0,5 m, wodurch der Mindestabstand von 0,25 m zur Fahrbahnkante eingehalten werden kann.



Bild 52 Rückhaltesystem und Anprallssockel an der Wechselverkehrszeichenbrücke

Zum Abschluss der Arbeiten wurde die Fahrbahn in der elektrifizierten Fahrtrichtung in Anlehnung an den Regelquerschnitt RQ36 gemäß der RAA - Richtlinie für die Anlage von Autobahnen [13] markiert.

3.3.3 Neubau und Änderungen am Fahrleitungssystem

Wie bei der ersten Versuchsanlage wurden zwei Nachspannlängen einer zweipoligen Kettenwerksfahrleitung gebaut. Die nutzbare Fahrleitungslänge beträgt ca. 2,0 km. Der Fahrdrahtabstand zwischen Plus- und Minuspol beträgt unverändert 1,35 m. Beide Kettenwerke bestehen aus je einem mit 10 kN nachgespannten Tragseil der Kupfer-Magnesium-Legierung BzII mit 120 mm² Querschnitt und einem mit 20 kN nachgespannten magnesiumlegierten Kupferfahrdrabt RiM 150 mm² (CuMg0,5). Die Nachspannung der Leiter erfolgt über eine Gewichtsnachspaneinrichtung.

Die wichtigsten konstruktiven Änderungen am Fahrleitungssystem betreffen folgende Aspekte:

- Installation einer Tragseilabsenkung an der Wegweiserbrücke (Bild 49) zur Gewährleistung des Schutzabstands zum Wegweiserschild. Die Projektierung mit Verkürzung der Mastabstände auf 40 m und die Verringerung der Systemhöhe auf 0,5 m zeigt Bild 53. Das Fahrleitungsfeld mit der Wegweiserbrücke zeigt Bild 54.
- Installation einer Kettenwerksabsenkung und Ersatz der Tragseile durch Fahrdrähte bei der Unterspannung der Wechselverkehrszeichenbrücke (Bild 50). Die Projektierung mit Verringerung der Fahrdrathöhe auf 4,70 m zeigt Bild 55. Die für jeden Pol als zwei Fahrdrähte geführte Fahrleitung (Tragseilersatz) zeigt Bild 56.
- Bei Eisenbahnen bildet die Fahrleitung in Kurven einen Sekantenzug zwischen den einzelnen Masten, der gleichzeitig zu einem Zick-Zack des Fahrdrahts und einem gleichmäßigen Verschleiß der Schleifleisten führt. Für das eHighway-System ist zur Vereinfachung der Regelung des aktiv nachgeführten Stromabnehmers und zur optischen Beruhigung ein möglichst kurvenförmiger Verlauf der Fahrdrähte wünschenswert. Daher wurde am Beginn der Teststrecke eine Kurvenfolge mit Radien von 700 m und 900 m gebaut, in der die Fahrleitung windschief, d. h. mit kurvenförmigem Verlauf der Fahrdrähte ausgebildet ist (s. Bild 57).
- Da unter Umständen, z. B. wegen der Anordnung von Parallelfeldern oder Absenkungen, die Fahrleitung in Kurven nicht immer windschief ausgeführt werden kann, wurde im Teilabschnitt östlich der Verkehrszeichenbrücke die Fahrleitung zum Zick-Zack umgebaut, um eine Vergleichsstrecke zur Bewertung unterschiedlicher Sensorsysteme und der Stromabnehmerdynamik zu erhalten. Den Abschnitt mit nachgebildetem Sekantenzug (Zick-Zack) zeigt Bild 58.
- Der Ausgleich der temperaturbedingten Längenänderungen von Tragseil und Fahrdrabt sowie die Dynamik des Kettenwerks bei Riss des Fahrdrahts unterscheiden sich bei gemeinsamer und getrennter Nachspannung von Fahrdrabt und Tragseil. Während bei der ersten Versuchsanlage nur gemeinsame Nachspanneinrichtungen mit im Mast liegender Gewichtssäule ausgeführt wurden, verfügt die westliche Nachspannlänge der neuen Versuchsanlage über getrennte Nachspanneinrichtungen mit außen am Mast liegenden Gewichtssäulen (s. Bild 59).
- Wie in Abschnitt 3.4.6 vertieft ausgeführt, ist das Schadensbild bei Riss eines Fahrdrahts abhängig vom Abstand zwischen den Hängern, mit denen das Tragseil den Fahrdrabt trägt. Im östlichen Teil der Versuchsanlage (s. Bild 58) wurde der Hängerabstand auf 3,0 m verkürzt.
- Längere elektrifizierte Abschnitte müssen durch Streckentrennungen in einzelne Speisebereiche getrennt werden. Dies erfolgt am zweckmäßigsten durch Streckentrenner. Zur Untersuchung des Verhaltens der Fahrzeuge bei Wechsel der Speiseabschnitte mit unterschiedlichen Momentanwerten der Fahrleitungsspannung und der Kontaktgüte des Stromabnehmers wurden auf Höhe des Unterwerks im Pluspol der Fahrleitung zwei Streckentrenner mit 5,0 m Abstand installiert. Auf deren Typ und die durchgeführten Untersuchungen geht Kapitel 1.1.1 ein.
- Der Wechsel der Fahrdrähte der einzelnen Nachspannlängen erfolgt in sogenannten Parallelfeldern. Auf der ersten Versuchsanlage waren die Parallelfelder der beiden Fahrleitungspole um zwei Längsfelder zueinander verschoben. Dies erleichterte die Regelungs- und Sensorikaufgabe, da gleichzeitig maximal drei Fahrdrähte zu detektieren waren. Aufgrund der dabei erzielten guten Versuchsergebnisse konnte bei der Neuerrichtung der Versuchsanlage auf die Längsverschiebung der Parallelfelder verzichtet werden, s. Bild 60.

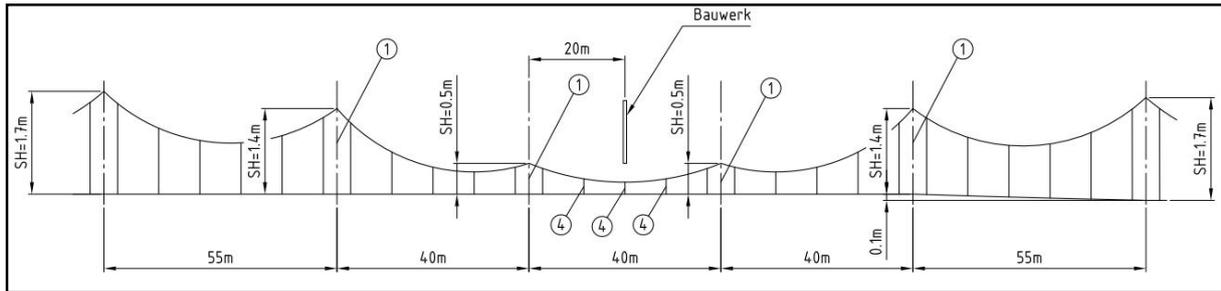


Bild 53 Absenkung des Tragseiles an der Wegweiserbrücke (Kragarm)

Legende: 1 - Stützpunkt mit Tragseilabsenkung, 4 - Gleithänger



Bild 54 Tragseilabsenkung im Bereich des Kragarms auf der Versuchsanlage

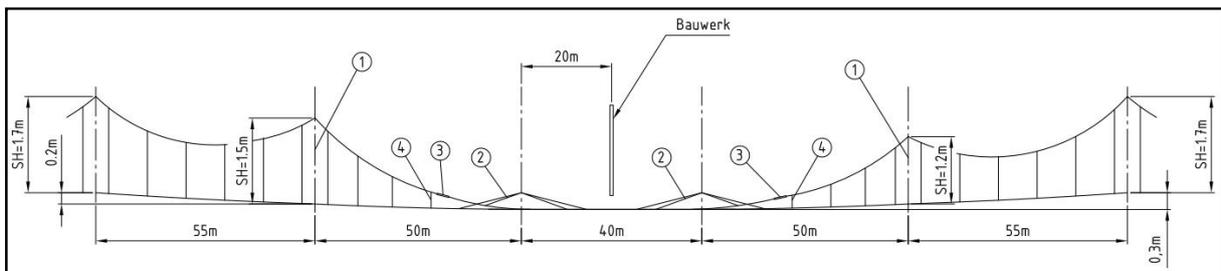


Bild 55 Kettenwerksabsenkung und Ersatz der Tragseile durch Fahrdrähte

1 - Stützpunkt mit Tragseilabsenkung 2 - Stützpunkt mit Beiseilaufhängung
 3 - Übergang Tragseil auf Fahrdraht 4 - Gleithänger



Bild 56 Detailaufnahme zur Fahrdrahtführung unter der Wechselverkehrszeichenbrücke



Bild 57 Windschiefe Fahrleitung mit kurvenförmiger Fahrdrabtführung



Bild 58 Kurvennachbildung mit Zick-Zack-Verlauf der Fahrleitung

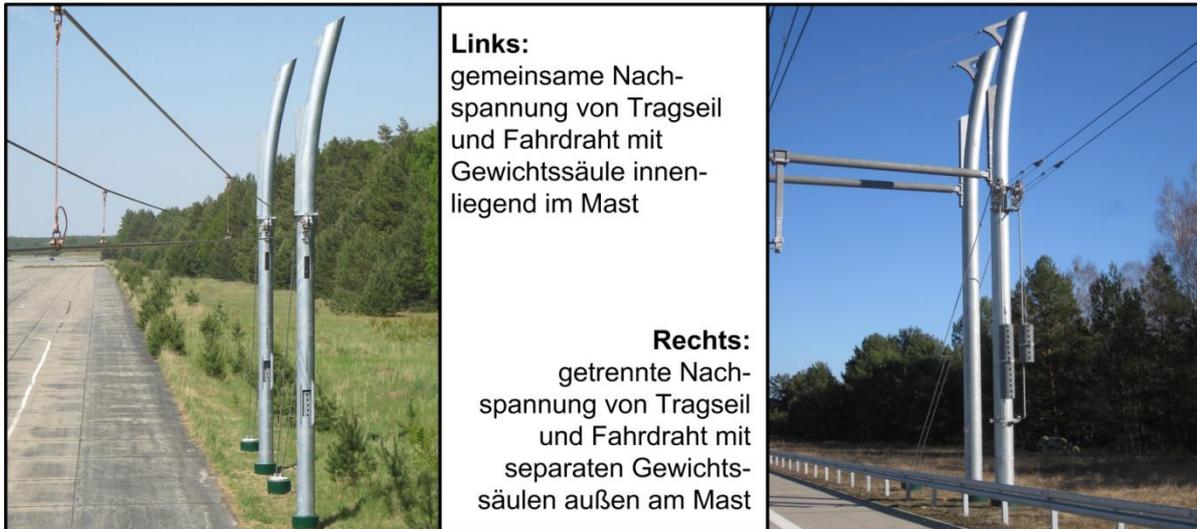


Bild 59 Gemeinsame und getrennte Nachspanneinrichtungen

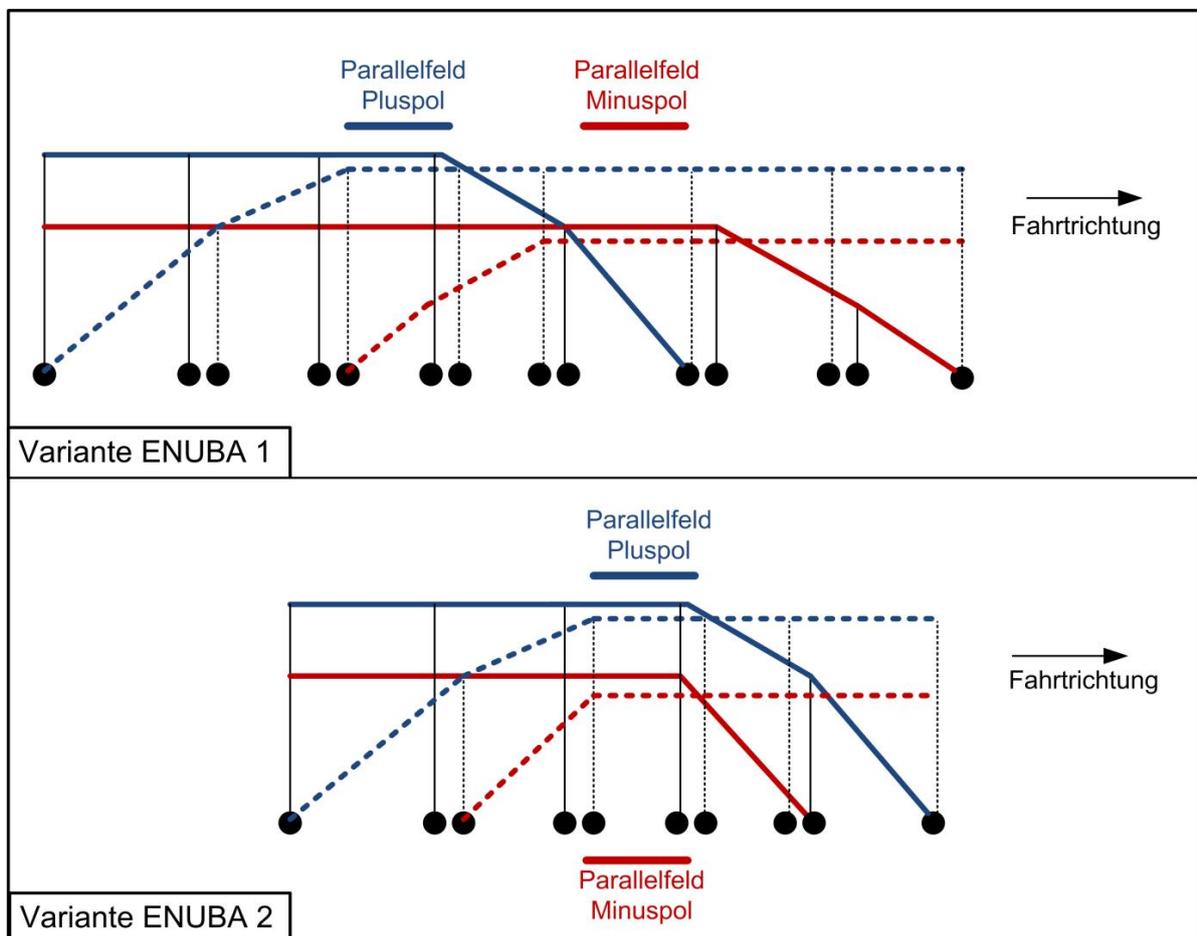


Bild 60 Unterschiedliche Ausführungsvarianten der Parallelfelder

3.3.4 Änderungen an der Stromversorgung

Wie bereits in den vorangegangenen Unterkapiteln ausgeführt, wurde die Versuchsanlage auf dem Taxiway neu errichtet. Das Unterwerk wurde komplett wiederverwendet und durch Schwerlasttransport und Kran versetzt. Bild 61 zeigt Unterwerk, Umschalteneinrichtung, Einspeisemast und Leitstelle am neuen Standort, ungefähr mittig entlang des elektrifizierten Abschnitts.

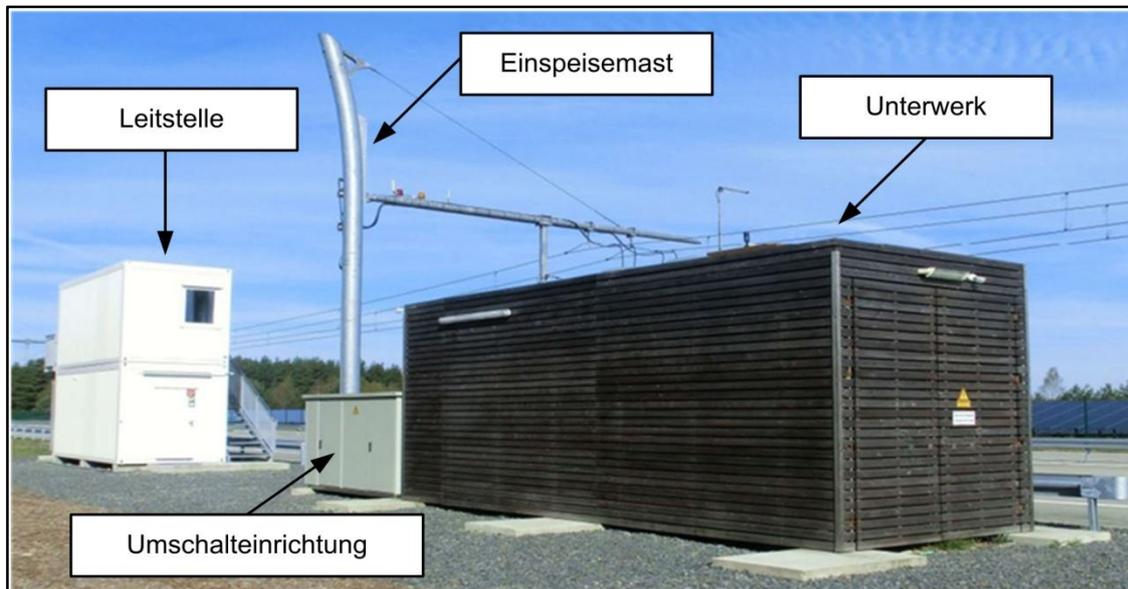


Bild 61 Unterwerk, Umschalteneinrichtung und Leitstelle am neuen Standort

Das Unterwerk wurde um eine Umschalteneinrichtung ergänzt. Diese hat folgende Aufgaben:

- Anschlusspunkt eines optionalen, weiteren Unterwerks für höhere Spannungen (z. B. DC 1,5 kV), die bei bestimmten eHighway-Anwendungen alternativ zum Einsatz kommen könnten
- Bereitstellung einer einfachen Möglichkeit zur Umkehr der Fahrleitungspolarität über eine Kombination von gegeneinander verriegelten Trennern und Sammelschienenabschnitten
- Installation eines Erdungstrenners zur dauerhaften, betrieblichen Erdung des Minuspols zur Erprobung des zukünftigen, regelmäßigen Schutz- und Isolationskonzepts

Weiterhin wurden folgende Ergänzungen an der Stromversorgung vorgenommen, s. auch Bild 62:

- Installation von zwei Streckentrennern und einer neutralen Zone sowie von zwei handbetrieblenen Trennern am Mast 26. Auf die Details der installierten Streckentrenner und die durchgeführten Untersuchungen wird in Kapitel 1.1.1 eingegangen.
- Installation einer Fahrleitungs-Notabschaltung mit einem Erdungsdraufscharter am Mast 28. Diese Einrichtung dient der Erprobung und Veranschaulichung des in Abschnitt 3.1.1 sowie in Bild 9 (S. 24) vorgestellten Konzepts zur Notabschaltung für Rettungskräfte.

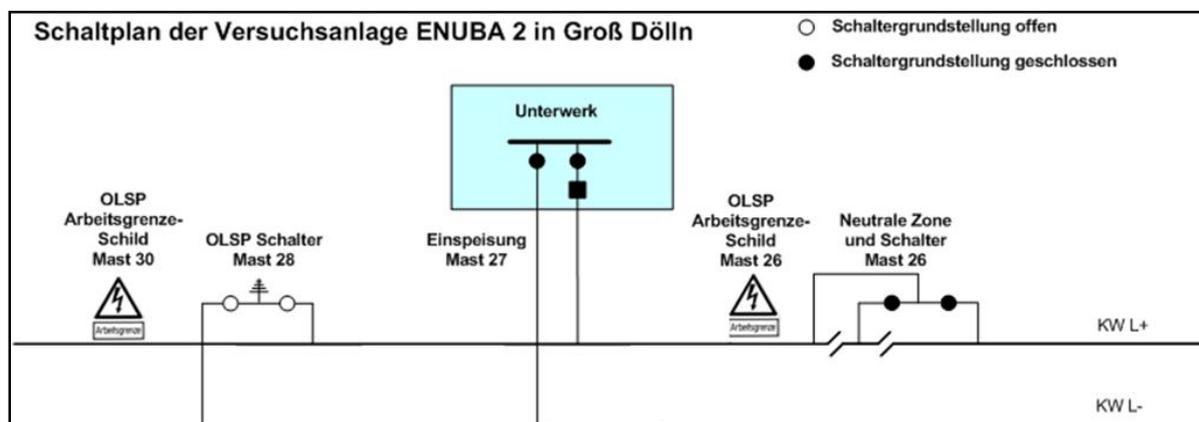


Bild 62 Schaltplan der Versuchsanlage mit neutraler Zone und Notabschaltung

3.3.5 Integration von Stromabnehmer und Sattelzugmaschine

Ein wesentlicher Meilenstein bei der Fertigung des Prototypen, war die Integration des weiterentwickelten Stromabnehmers in die hybridisierte Sattelzugmaschine von Scania. Auf die beiden Entwicklungsstufen des Stromabnehmers, d. h. das Labormuster auf dem Diesel-Mock-up und das Funktionsmuster mit Integration aller leistungselektrischen Komponenten wurde bereits in Abschnitt 3.2.1 eingegangen.

Nach Abschluss der ersten Testphase mit der noch nicht hybridisierten Sattelzugmaschine wurde diese zu Scania nach Södertälje in Schweden gebracht, wo zunächst der Umbau des Antriebsstrangs erfolgte. Danach wurde dort auch der weiterentwickelte Stromabnehmer einschließlich der seitlichen Boxen mit der Leistungselektronik und Stromabnehmersteuerung mechanisch, elektrisch und steuerungstechnisch integriert. Das Aufsetzen des Stromabnehmers auf die Sattelzugmaschine mit einem Deckenkran zeigt Bild 63.

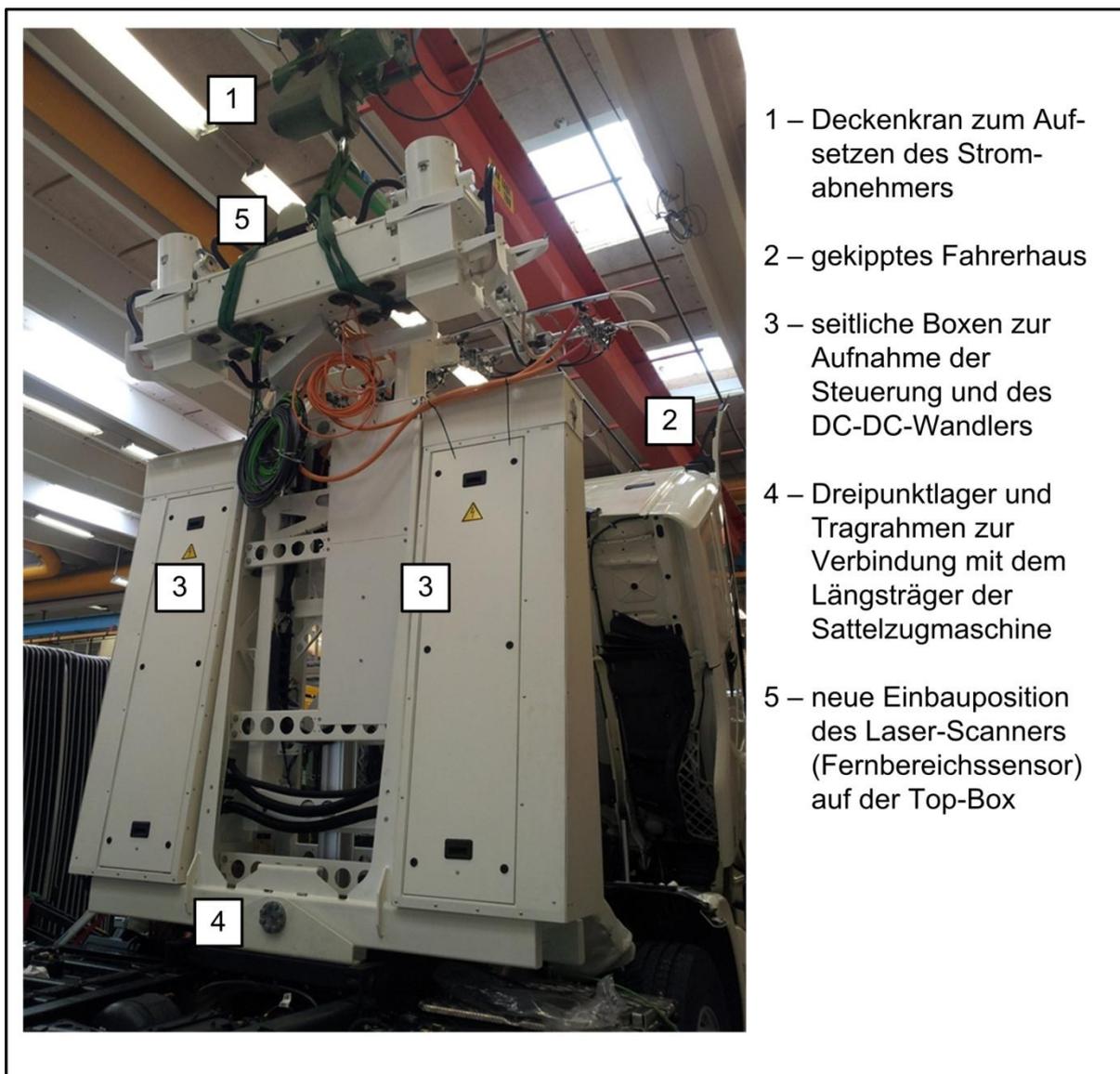


Bild 63 Integration des Stromabnehmers auf die Sattelzugmaschine

Während der Inbetriebsetzung des Fahrzeugs wurde die Kommunikation zwischen der Fahrzeug- und der Stromabnehmersteuerung auf einem Rollenprüfstand geprüft, bevor es wieder auf die Versuchsanlage überführt wurde. Auf die Tests in externen Prüf-Labors und auf der Versuchsanlage wird in Abschnitt 3.4 eingegangen.

3.4 Erprobung im Labor, auf Versuchsanlage und BAB - EP

3.4.1 Testplanung

Bedingt durch die lange Projektlaufzeit und die verschiedenen Fertigstellungszeitpunkte der Fahrzeuge, Infrastrukturen und weiteren Anlagen, erstreckte sich die Testplanung und -durchführung fast über die gesamte Projektlaufzeit.

Die vertiefte Darstellung der Ergebnisse der Erprobungen in Labors, auf der Versuchsanlage und auf weiteren Testfahrten konzentriert sich dabei auf die hybridisierte Scania-Sattelzugmaschine mit integriertem Stromabnehmer und deren Erprobung im Zusammenwirken mit der Infrastruktur. Tabelle 11 gibt einen Überblick über die durchgeführten Tests mit Verweis auf die Unterkapitel, in denen die Ergebnisse detailliert vorgestellt werden.

Tabelle 11 Testserien mit Zuordnung zur vertieften Ergebnisdarstellung

Themen der praktischen Erprobungen und Testserien	Beteiligte Teilsysteme				Unterkapitel
	Fahrzeug	Fahrleitung	Stromversorgung	Leitsysteme	
Intergrationstest Stromabnehmer und Inbetriebnahme der HTE-Funktionen (DC-DC-Wandler und Schützensteuerung)	X				3.4.2
Systemtests Stromabnehmer einschl. User Stories	X			X	3.4.2
Dauertests (vorrangig Fahrspiele Scania)	X				3.4.2
Umbau Fahrleitung Zick-Zack, Tests von Sensorik/Aktorik	X	X			(3.3.3), 3.4.2
Externe Untersuchungen der Sattelzugmaschine (EMV-Labor, Klimakammer, Dauerprüfstand)	X				3.4.3
Einbau und Erprobung Streckentrenner und Zusatzwiderstände, Fahren in neutrale Abschnitte	X	X			3.4.4
Fahrleitungsschwingung und Bewertung Kontaktgüte	X	X			3.4.4
Messung EMV-Emissionen im elektrischen Betrieb	X		X		3.4.5
Geräuschimmissionen in verschiedenen Betriebs-Modi	X				3.4.5
Wirkungsgrad und Energiefluss im elektrischen Betrieb	X	X	X		(3.1.4), 3.4.5
Grenzsituationen Infrastruktur (Fahrdraht-Riss)		X			3.4.6
Grenzsituationen Fahrzeuge (Schnell-Absenkung des Stromabnehmers)	X	X			3.4.6
Einfahrt in kurzgeschlossenen Netzabschnitt	X	X			3.4.6
Intergrationstest Stromabnehmer und Inbetriebnahme der HTE-Funktionen (DC-DC-Wandler und Schützensteuerung) der Sattelzugmaschine mit Traktionsbatterie im Trailer	X		X		3.5.3
Systemtests der verschiedenen Antriebsmodi der Batterie-SZM einschließlich max. Reichweiten im Batteriemodus	X				3.5.3

Neben den in Tabelle 11 aufgeführten Themen wurden zahlreiche weitere Tests durchgeführt. Diese waren integrierte Bestandteile der in den Abschnitten 3.1 und 3.2 vorgestellten Bewertungen und Konzepte, sodass deren Ergebnisse unmittelbar in die Erstellung der Konzepte einfließen. Dementsprechend ermöglicht Tabelle 12 die Zuordnung der weiteren, auf der Versuchsanlage durchgeführten Untersuchungen und Testserien zu den in vorangegangenen Unterkapiteln bereits vorgestellten Konzepten.

Tabelle 12 Testserien mit Zuordnung zu den bereits vorgestellten Konzepten

Themen der praktischen Erprobungen und Testserien	Beteiligte Teilsysteme				Unterkapitel
	Fahrzeug	Fahrleitung	Stromversorgung	Leitsysteme	
Beurteilung Sichtbarkeit der Schilder vor und nach Umbau als Teil der Technischen Bewertung (TB17)		X			3.1.1
Überprüfung Wendekreis BO-Kraft (Kreisfahrt) als Teil der Technischen Bewertung (TB45)	X				3.1.1
eHighway-Lkw reparieren, warten, Kabine kippen sowie Prüfpunkte für technische Zulassung elektrifizierter Lkw / PAN	X				3.1.1
Notabschaltung der Fahrleitung - OLSP (Einbau Arbeitsgrenzschilder und Tests der OLSP als Teil der Technischen Bewertung (TB21 und TB23)		X	X		3.1.1, 3.3.3
TÜV-Abnahme geerdeter Betrieb und Tests zur Isolationsüberwachung auf den Fahrzeugen, auch als Teil der Technischen Bewertung (TB 21)	X		X		3.1.1, 3.3.4
Integration und Erprobung der Smart-Road-Funktionen und Kommunikationswege durch das DLR				X	3.1.6
Augmented Reality als Teil der Smart-Road-Anwendungen	X				3.1.6
Interaktionsstudien zu Betriebsabläufen	X	X	X	X	3.1.6, 3.2.3
Versuche zu verschiedenen Varianten der Stromabnehmer-Sensorik, z. B. Stereo-Kameras	X				3.2.1
Integration und Erprobung des Technischen - Monitoring - Systems				X	3.2.3
Test und Erprobung Energiemessung auf den Fahrzeugen	X				3.2.4

3.4.2 Erprobung der Scania-Sattelzugmaschine auf der Versuchsanlage

Den Schwerpunkt der Erprobungen auf der neuen Versuchsanlage bildeten zahlreiche Tests und Messfahrten mit der Scania-Sattelzugmaschine. Dabei ist zwischen folgenden Testphasen zu unterscheiden:

- Integrationstests des Stromabnehmers an der Fahrleitung, sowohl rein mechanisch als auch mit Leistungsbezug und bei Rückspeisung
- Integrationstests von Stromabnehmer und Hybridantriebstechnik zur Abstimmung der verschiedenen Betriebsmodi und Umschaltvorgänge
- Intensive Erprobung des Stromabnehmers in allen betriebsüblichen Situationen
- Vergleichsmessungen bei Änderungen an Infrastruktur (Einbau Zick-Zack der Fahrleitung) oder am Fahrzeug (geänderte Position des Laserscanners der Fernbereichssensorik) sowie bei der Integration neuer Funktionen (Windkraftkompensation der Andruckkraft)
- Fortsetzung der regelmäßigen Erprobungen und Präsentationen zur Bewertung der Alltagstauglichkeit und Betriebsstabilität

Für die Integrations- und Interaktionstests wurde ein umfangreicher Testplan mit über 120 Testfällen aufgestellt und erfolgreich abgeprüft, sodass daran anschließend der Testplan zum Gesamtsystem mit dem Schwerpunkt auf Betriebsverhalten und Fahrsituationen daran angeschlossen werden konnte. Auch dieser umfasste über 90 Testfälle, von denen einzelne auch Langzeitbeobachtungen zum Verhalten bei verschiedenen Witterungssituationen abbilden.

Nach Abschluss der dokumentierten Einzeltests wurde mit Dauerfahrten und Wiederholungen typischer Fahrmanöver begonnen. Seit August 2014 wurden dabei mit der Scania-Sattelzugmaschine über 750 Einzelfahrten durchgeführt. Zählt man die zahlreichen Präsentationen mit, ergibt sich eine Gesamtzahl von mindestens 850 Fahrten. Bei einer nutzbaren Fahrleitungslänge von 2 km entspricht das 1700 km elektrischer Fahrt an der Fahrleitung und ca. 2000 km dieselektrischer Fahrt im Hybridmodus, da dort die Zu- und Abfahrten zur Anlage und Rangierfahrten mitzuzählen sind.

Bild 64 a zeigt die Reaktion des Stromabnehmers bei Fahrt über eine Bodenwelle. Die Schleifleisten verlieren durch das Nicken des Fahrzeugs kurz den Kontakt zum Fahrdraht, kehren aber wieder zurück, sodass die elektrische Fahrt fortgesetzt werden kann. Bild 64 b zeigt die aktive Nachführung des Stromabnehmers bei Fahrt durch den Zick-Zack-Abschnitt der Fahrleitung, vgl. Abschnitt 3.3.3.

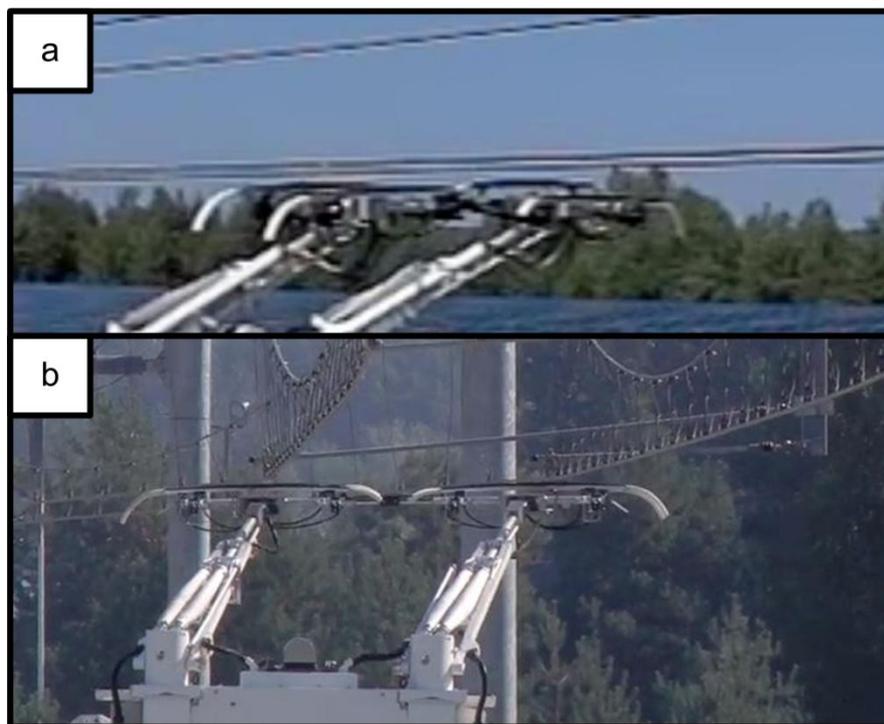


Bild 64 Erprobung der Scania-Sattelzugmaschine: a - Fahrt über Bodenwelle, b - Stromabnehmernachführung im Zick-Zack der Fahrleitung

Der Nachweis des horizontalen (seitlichen) Arbeitsbereichs der Stromabnehmers ist einer der wichtigsten funktionalen Systemtests, da die aktive horizontale Nachführung dafür sorgt, dass der Stromabnehmer bei Bewegungen des Fahrzeugs innerhalb der Fahrspur weiterhin Kontakt zur Fahrleitung hält. Die seitliche Nachführung erfordert eine schnelle Detektion der Fahrdrähte, woraufhin die neue Soll-Lage des Stromabnehmers in Bezug auf die Fahrzeugmitte berechnet wird und die Servo-Motore der Arme angesteuert werden. Bild 65 zeigt den Testaufbau zur Kalibrierung und Verifikation des seitlichen Arbeitsbereichs in der Kurve und in der Geraden während der Integrationstests.

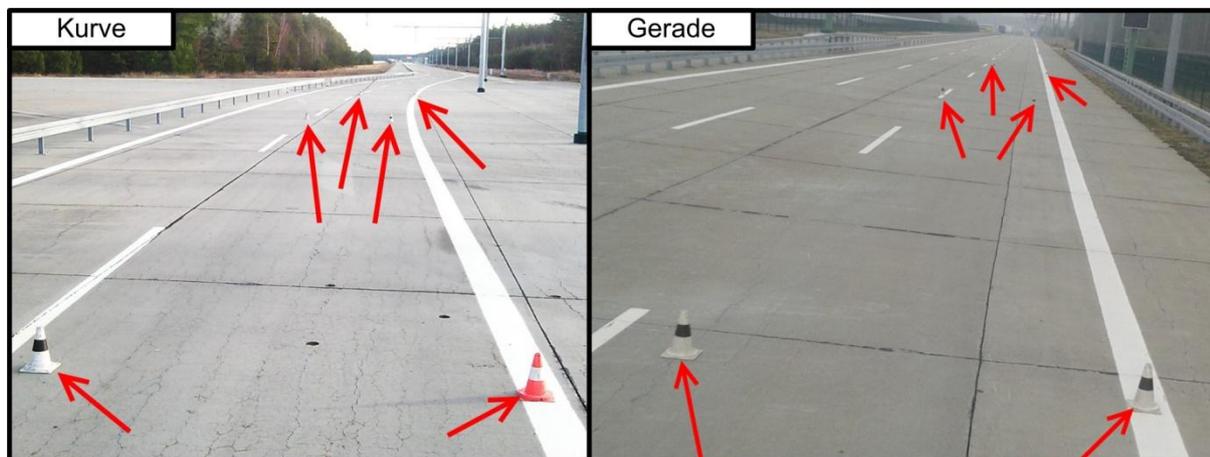


Bild 65 Testaufbau zur Verifikation des seitlichen Arbeitsbereichs des Stromabnehmers

In der windschiefen Ausführung folgen die Fahrdrähte ideal der Kurve der elektrifizierten Fahrspur, sodass sich die Regelungsaufgabe für den Stromabnehmer auf den Verschleißausgleich (sog. Wear-Leveling) und den Ausgleich ggf. ungenauer Spurhaltung des Lkw-Fahrers beschränkt. Demgegenüber stellt der Zick-Zack der Fahrleitung als alternative Bauform für Kurven eine größere regelungstechnische Herausforderung dar. Die Fahrleitung bildet dann einen Sekantenzug gegenüber dem kurvenförmigen Fahrspurverlauf. Dies bedeutet abrupte Richtungswechsel der Fahrdrähte an den Stützpunkten (Maste), was schnell durch die Sensorik erkannt und in zügige Umsteuerung der Stromabnehmerarme umgesetzt werden muss. Bild 66 zeigt Messschriebe einer Fahrt mit der Scania-Sattelzugmaschine durch den zum Zick-Zack umgebauten Fahrleitungsabschnitt. Am Streckenende wird die Fahrleitung nach rechts und oben herausgeführt. Nach Verlassen des gültigen Arbeitsbereichs für die Fahrleitung wird der Stromabnehmer zentriert (Soll-Lage 0 mm).

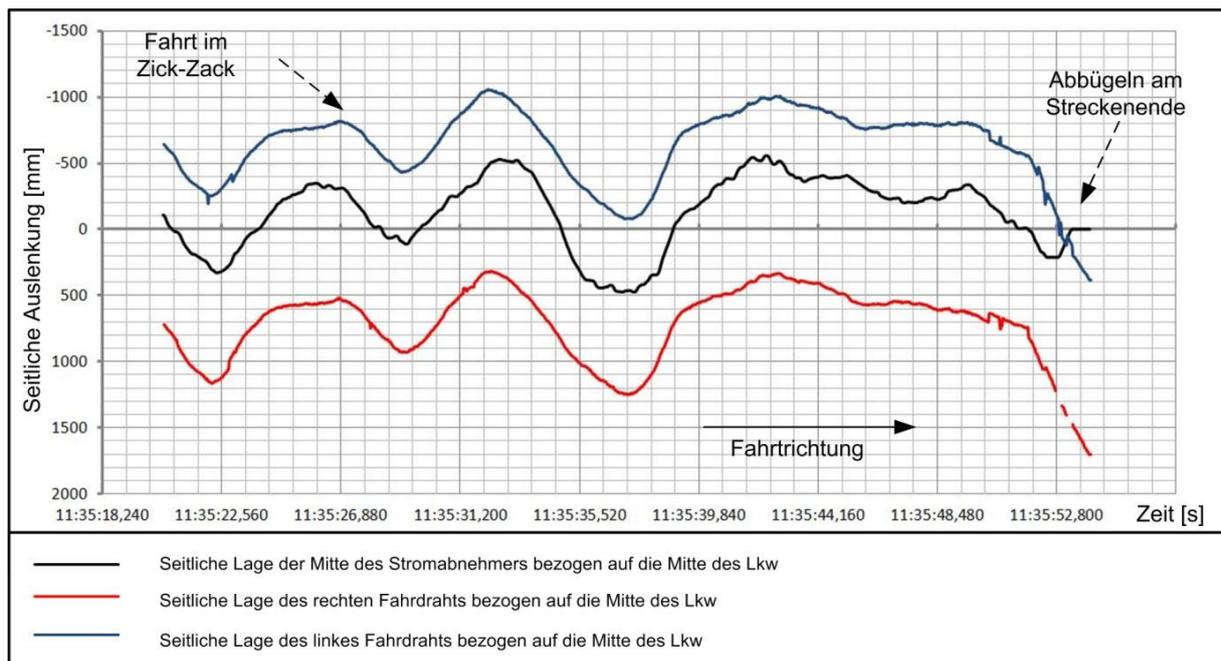


Bild 66 Fahrdrahtdetektion und Nachführung des Stromabnehmers im Zick-Zack

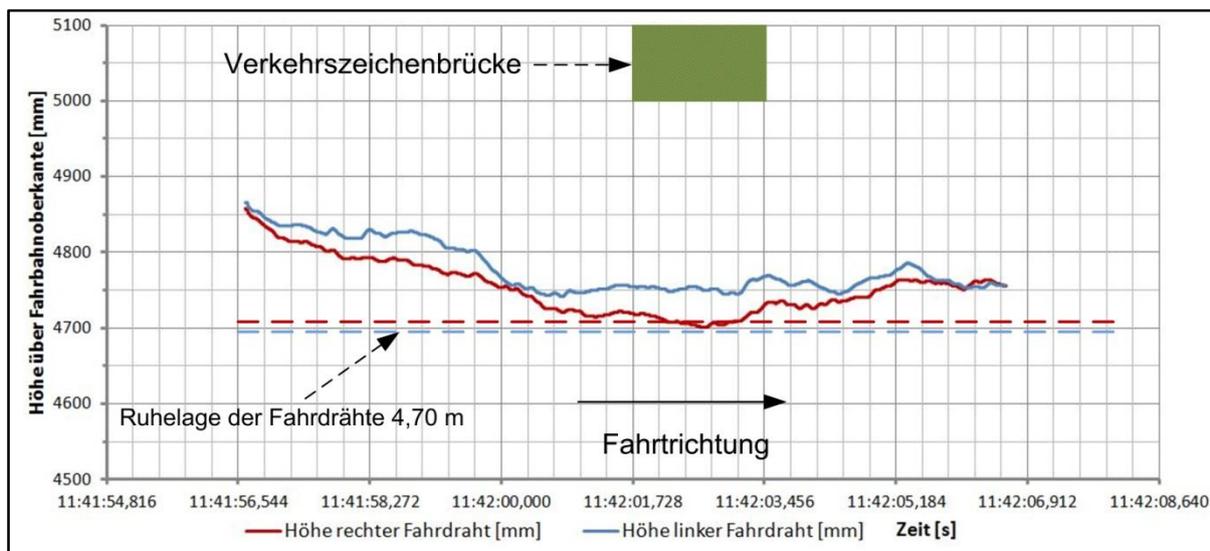


Bild 67 Gemessene Fahrdrahthöhen bei Durchfahrt an der Verkehrszeichenbrücke

Neben dem horizontalen Arbeitsbereich des Stromabnehmers ist auch der vertikale Arbeitsbereich von großem Interesse. Von der niedrigsten bis zur höchsten, zulässigen Fahrdrahtlage soll der Stromabnehmer zuverlässig Kontakt mit der Fahrleitung haben. Dabei soll die Kontaktkraft zur Begrenzung des mechanischen Verschleißes weder zu groß noch zur Vermeidung zu hohen elektrischen Verschleißes zu klein sein. Bild 67 zeigt die gemessenen Fahrdraht- und Schleifleistenhöhen bei Passage der Schilderbrücke mit der Kettenwerksabsenkung von 5,10 m auf 4,70 m direkt unter der Verkehrszeichenbrücke (vgl. Bild 50, Bild 55 und Bild 56). Auch bei Durchfahrt eines Stromabnehmers wird der elektrische Schutzabstand von mindestens 50 mm eingehalten.

Die Untersuchungen zur Fahrdynamik in Abschnitt 3.1.4 zeigten, dass sich durch den angehobenen Stromabnehmer im elektrischen Betrieb der Luftwiderstand erhöht. Dies bedeutet bei zunehmender Geschwindigkeit auch eine quadratisch wachsende Kraftkomponente, die neben dem Andruck durch das pneumatische System auf die Wippen wirkt. Dieser Fahrtwindeffekt wird durch Gegen- oder Rückenwind überlagert, sodass die resultierende Windgeschwindigkeit wirkt. Um über den gesamten Geschwindigkeitsbereich und auch bei wechselnden äußeren Windbedingungen gutes Kontaktverhalten zu gewährleisten, wurde am Stromabnehmer ein Windmesser installiert und die pneumatische Kraftregelung mit einem Kompensationsfaktor zum Ausgleich der Windkräfte versehen. Bild 68 zeigt die mittels Anhubmessung bei verschiedenen Geschwindigkeiten gemessenen Fahrdrahtanhub mit aktivierter (kompensiert) oder deaktivierter (unkompensierter) Windkraftkompensation.

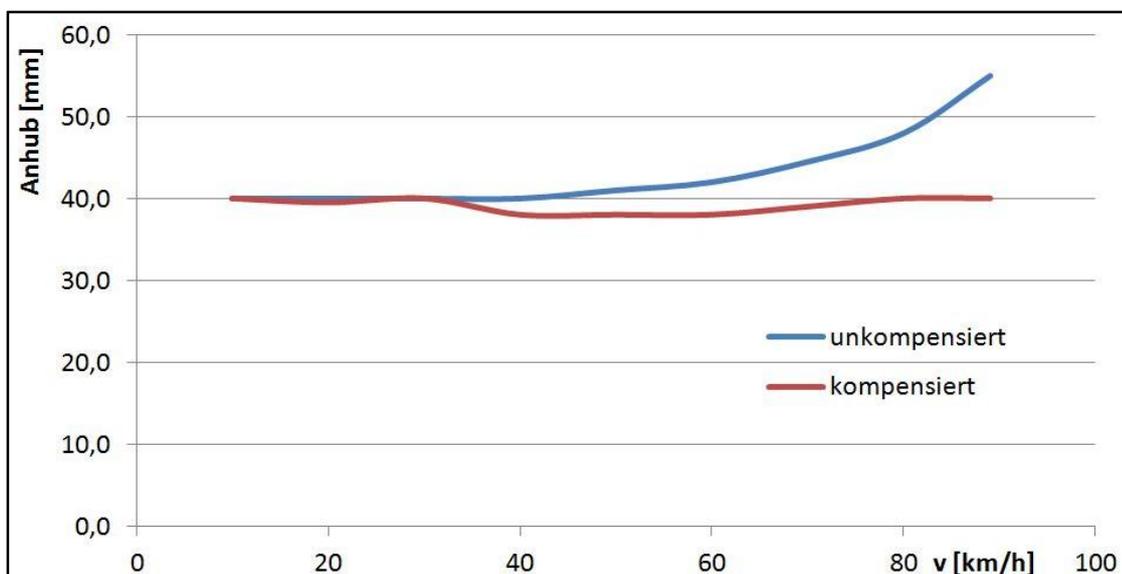


Bild 68 Fahrdrahtanhub über Geschwindigkeit mit und ohne Kompensation der Windkraft

3.4.3 Externe Laboruntersuchungen an der Scania-Sattelzugmaschine

Im Rahmen der Weiterentwicklung des Stromabnehmer-Systems und seiner Integration in die hybridisierte Scania-Sattelzugmaschine (SZM) wurden in Zusammenarbeit mit der Firma EDAG (s. 2.3.3.1) folgende Laboruntersuchungen in Anlehnung an typische Prüfprozeduren der Fahrzeugindustrie durchgeführt:

- Dauerlauf- und Klimatests
- Vibrationstests
- EMV-Tests (Untersuchung der Störfestigkeit)

Diese Tests sollen Aufschluss über den bereits erreichten Entwicklungsstand hinsichtlich Robustheit und Alltagstauglichkeit des neu entwickelten Stromabnehmers geben. Da für das Labormuster die anspruchsvolle Integration in den begrenzten Bauraum im Vordergrund stand, musste mit Funktionseinschränkungen in den Randbereichen der Testspektren gerechnet werden. Die tatsächlich festgestellten Defizite werden bei der Weiterentwicklung in Richtung Serienreife berücksichtigt.

Dauerlauf- und Klimatest

Inhalt dieser Prüfserie war die Durchführung einer Dauerlaufprüfung bei verschiedenen klimatischen Bedingungen zur Bewertung der Betriebsfestigkeit des Systems. Dafür wurden die drei Einzelbewegungen An- und Abbügeln (Testinsel 1), seitliches Wearleveling (Testinsel 2) sowie Heben und Senken des Lifts (Testinsel 3) mit separaten Versuchsaufbauten untersucht, s. Bild 69.

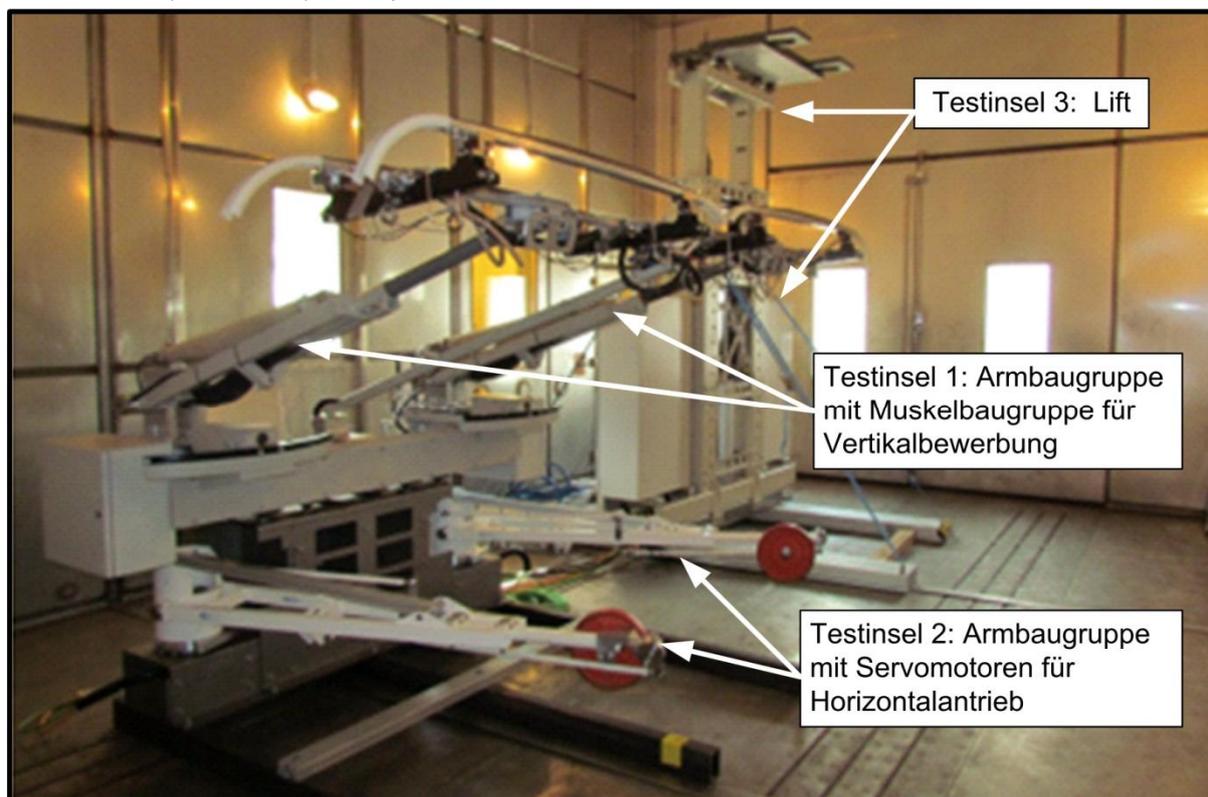


Bild 69 Prüfaufbau mit den drei Testinseln in der Klimakammer

Die Prüfung wurde nicht nach einem genauen Anforderungsprofil mit einer definierten Anzahl von Zyklen durchgeführt, sondern es wurden für jeden der drei Prüfaufbauten so viele Zyklen durchgeführt, wie im jeweiligen Testzeitraum realisierbar waren. Zu Beginn wurde unter Raumtemperatur geprüft und anschließend gemäß Tabelle 13 die Klimabedingungen variiert.

Tabelle 13 Variation der klimatischen Prüfbedingungen für die Dauerlauftests

Temperatur	Raumtemperatur	60°C	55°C	-10°C
Relative Luftfeuchte		Ungeregelt	95%	ungeregelt
Laufleistung	50%	15%	15%	20%
Laufzeit	84 h	25 h	25 h	34 h

Im Anschluss an die Dauerlaufprüfungen wurden einmalige Funktionsprüfungen bei -30°C und $+80^{\circ}\text{C}$ durchgeführt.

Vibrationstest

Für den Vibrationstest wurde eine Topbox mit Armen auf den Lift montiert, vgl. Bild 32 (S. 49). Alle Komponenten haben vorab die zuvor beschriebene Dauerlaufprüfung unter den verschiedenen Klimabedingungen durchlaufen, weshalb eine Vorschädigung nicht ausgeschlossen werden kann. Die Vibrationstests erfolgten mit einem von Scania bereitgestellten typischen Schwingungs-Lastkollektiv.

EMV-Immissionsmessung

Die EMV-Tests wurden in dem akkreditierten EMV-Labor **MBtech EMC GmbH** in Waiblingen durchgeführt. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der Prüfung der Störfestigkeit der Pantographen-Komponenten. Der Test wurde mit der Sattelzugmaschine auf dem Rollenprüfstand in der Absorberhalle der Firma Mbtech durchgeführt. Bei der Testdurchführung wurden die Rollen durch die Sattelzugmaschine angetrieben, der Lift des Pantographen war ausgefahren und die Stromabnehmerarme auf Arbeitshöhe gehoben. Die Pantographenarme wurden kontinuierlich seitlich bewegt. Das Prüfspektrum erstreckte sich von 20 - 2.000 kHz bei unterschiedlichen Feldstärken.



Bild 70 Scania-Sattelzugmaschine in der EMV-Messhalle

3.4.4 Untersuchungen zur Kontaktgüte Stromabnehmer - Fahrleitung

Dem Kontaktpunkt Stromabnehmer - Fahrleitung bzw. genauer Schleifleiste - Fahrdrabt kommt bei elektrischen Verkehrssystemen überragende Bedeutung zu. Einerseits sollen bei jeder Geschwindigkeit die erforderlichen Traktionsströme über die ortsveränderliche Kontaktfläche übertragen werden. Andererseits bestimmt die Auslegung von Fahrleitung und Stromabnehmer sowie deren Zusammenwirken maßgeblich den Verschleiß. Dieser soll möglichst gering sein, um zu möglichst langen und damit wirtschaftlichen Austauschintervallen bei Fahrdrähten und Schleifleisten zu gelangen. Der Verschleiß setzt sich wiederum aus mechanischen und elektrischen Anteilen mit gegenläufiger Abhängigkeit von der Kontaktkraft zusammen, s. Bild 71.

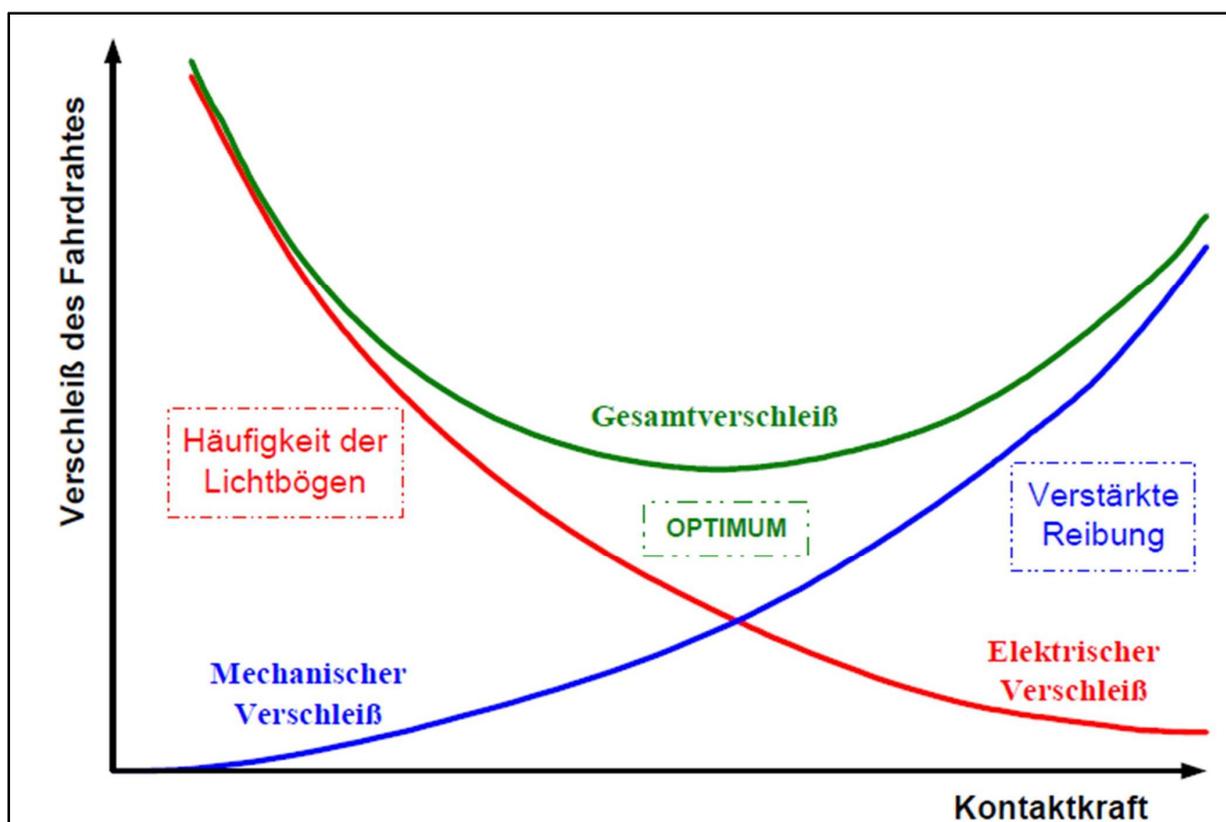


Bild 71 Verschleiß des Fahrdrahtes in Abhängigkeit der Kontaktkraft [48]

Aufbauend auf verschiedenen bekannten Untersuchungsansätzen und Bewertungsverfahren wurde auch im Projekt ENUBA 2 das Kontaktsystem Stromabnehmer - Fahrleitung intensiv untersucht. Dabei wurde auf folgende Aspekte eingegangen, die anschließend vertieft dargestellt werden:

- Untersuchungen am Stromabnehmer der ersten Generation (ENUBA), u. a. zur Kontaktkraft, zum Wirkungsgrad und zum Übergangswiderstand als Bewertungsgröße der Kontaktgüte
- Messung der Kontaktkraft am Stromabnehmer der ersten Generation (ENUBA) durch faseroptische Sensoren an den Stromabnehmerarmen
- Untersuchungen zur Elastizität verschiedener Fahrleitungsbauformen und anschließende Validierung eines Simulationstools zur Nachbildung des Kontaktverhaltens bei Kolonnenfahrten
- Untersuchungen zum mechanischen und elektrischen Verhalten an den eingebauten Streckentrennern bei unterschiedlichen Fahrzeugbewegungen und unterschiedlicher Ausführung der Isolationsstrecken

Kontaktkraft, Wirkungsgrad und Übergangswiderstand

Da Messungen der Kontaktkraft im regelmäßigen Betrieb sehr aufwändig sind, wird für Straßen- und Eisenbahnstromabnehmer häufig auf statische Typprüfungen mit einem vorgegebenen Kontaktkraftverlauf zurückgegriffen. In Anlehnung an EN 50206-2 [49] wurde zusammen mit dem auf Bahnanwendungen spezialisierten Messdienstleister DTK - Deutzer Technische Kohle GmbH ein umfangreiches Messprogramm an den Stromabnehmern der ersten Generation abgestimmt, s. [27].

Bild 72 zeigt die normative Vorgabe und den an den Erprobungsträgern der ersten Generation gemessenen Kontaktkraftverlauf. Während sich EN 50206-2 [49] auf einpolige Stromabnehmer bezieht, ist in Bild 72 b die Summenkontaktkraft für beide Arme angegeben, sodass die zulässige Differenz zwischen Aufwärts- (Kurve a) und Abwärtsbewegung (Kurve b) näherungsweise eingehalten wird.

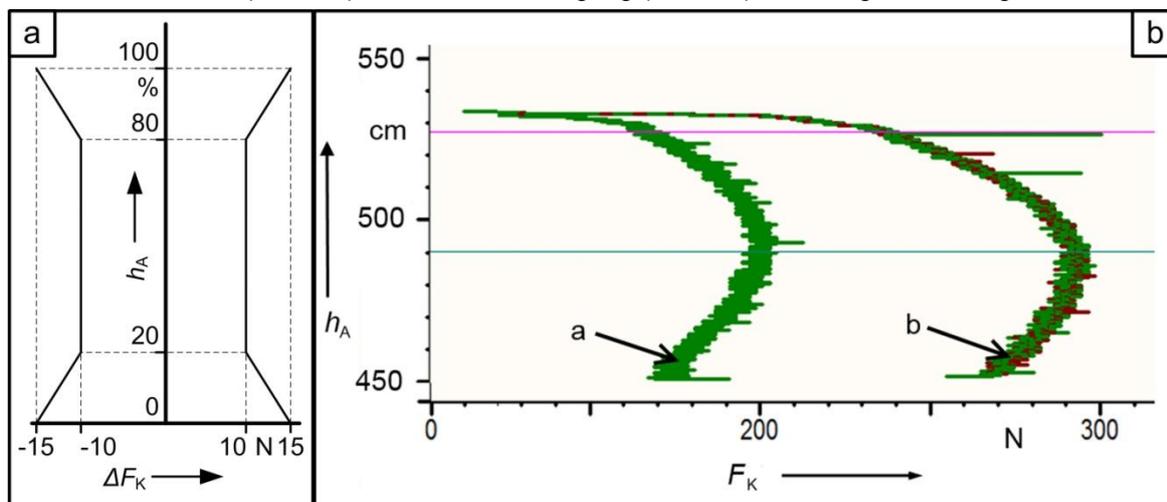


Bild 72 Hysterese der Kontaktkraft: a - Vorgabe nach EN 50206-2 [49], b - gemessener Verlauf bei statischer Andruckkraftmessung am Stromabnehmer des Actros-Lkw [27]

Weitere Messungen wurden während der Fahrt durchgeführt. Dabei wurde die Kontaktkraft mit einer Kraftmessdose gemessen. Bild 73 zeigt einen hohen Kraftunterschied. In einer Fahrtrichtung wehte mäßiger Gegenwind, sodass die Abhängigkeit von der Überlagerung von Fahrt- und Umgebungswind deutlich wird, woraufhin später die Windkraftkompensation implementiert wurde (vgl. Abschnitt 3.4.2).

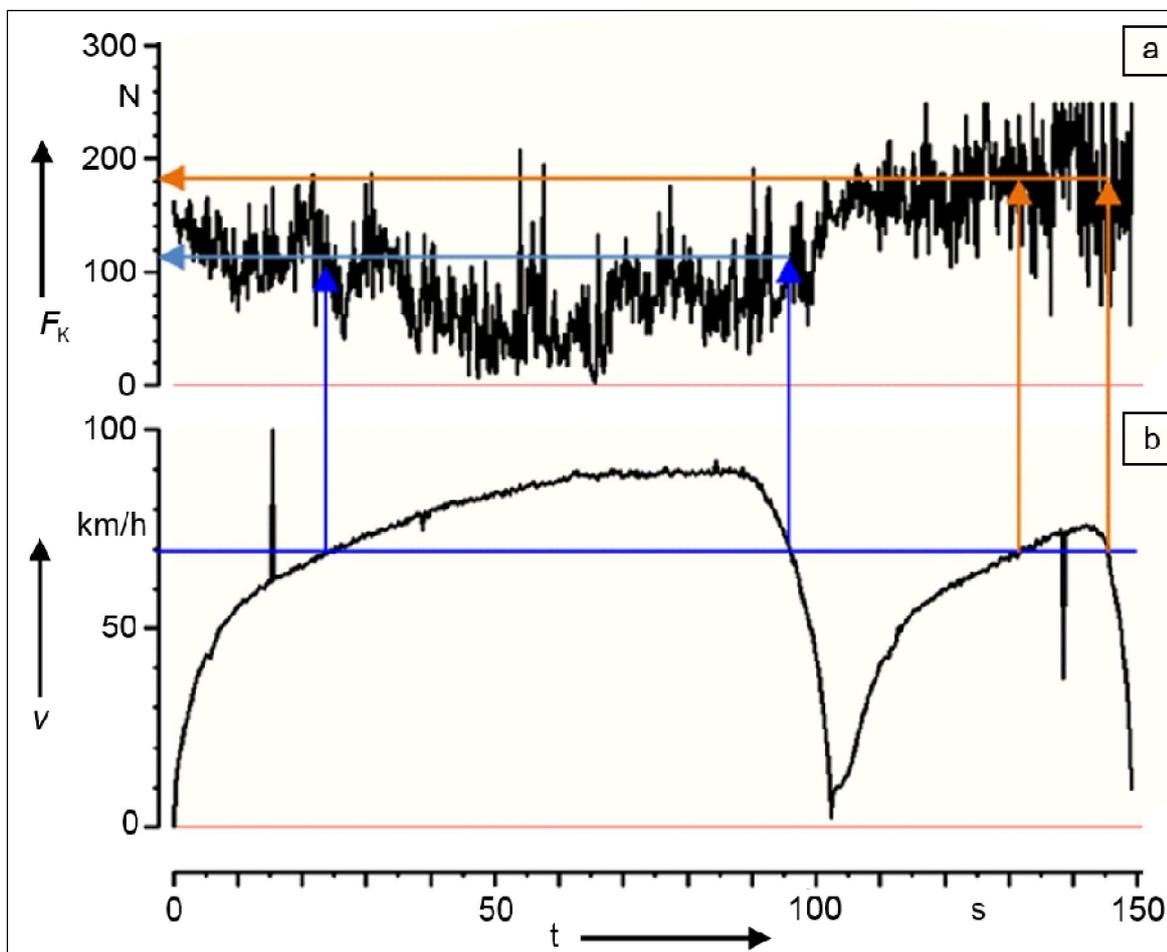


Bild 73 Kontaktkraft (a) und Geschwindigkeit (b) bei verschiedenen Fahrtrichtungen [27]

Auf weitere Ergebnisse wird detailliert in [27] eingegangen. So konnte u. a. durch eingebaute Störstellen nachgewiesen werden, dass der Übergangswiderstand eine gut geeignete Messgröße zur Identifizierung von Störstellen im Fahrleitungssystem bzw. Straßenverlauf ist. Aus den elektrischen Messungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten und übertragenen Leistungen konnte außerdem der Wirkungsgrad des Stromabnehmers bestimmt werden. Der beträgt ca. 99 % und liegt damit weit über den mit induktiven Übertragungssystemen erreichbaren Werten (vgl. Abschnitt 3.1.4).

Messung der Kontaktkraft durch faseroptische Sensoren

Wie bereits dargestellt, ist die Kontaktkraft eine Schlüsselgröße und bestimmt maßgeblich das Zusammenspiel der Kontaktpartner. Im regelmäßigen Betrieb, z. B. bei der Abnahme von neu elektrifizierten Streckenabschnitten, werden mit erheblichem Aufwand und speziell entwickelten Messstromabnehmern dynamische Messungen durchgeführt, s. [50]. Daher wurde mit den Stromabnehmern der ersten Generation als Technologieträger der Versuch unternommen, durch einen vereinfachten Messaufbau mit jeweils nur einem faseroptischen Sensor auf den Stromabnehmerarmen die Kontaktkraft im Betrieb zu messen. Dies würde sowohl Rückschlüsse auf das Kontaktverhalten erlauben als auch eine gut geeignete Messgröße für eine Kontaktkraftregelung bereitstellen, [51]. Beispielhaft zeigt Bild 74 einen Verlauf der Kontaktkraft bei 50 km/h in der Geraden. Deutlich sichtbar sind die Kontaktkraftspitzen im Abstand von ca. 65 m (Mastabstand). Zum Ausgleich typenabhängiger Effekte bei verschiedenen Stromabnehmern und anderer Störeffekte müssen die Untersuchungen fortgesetzt werden, bevor die Kontaktkraft als Eingangsgröße für die Regelung zur Verfügung steht.

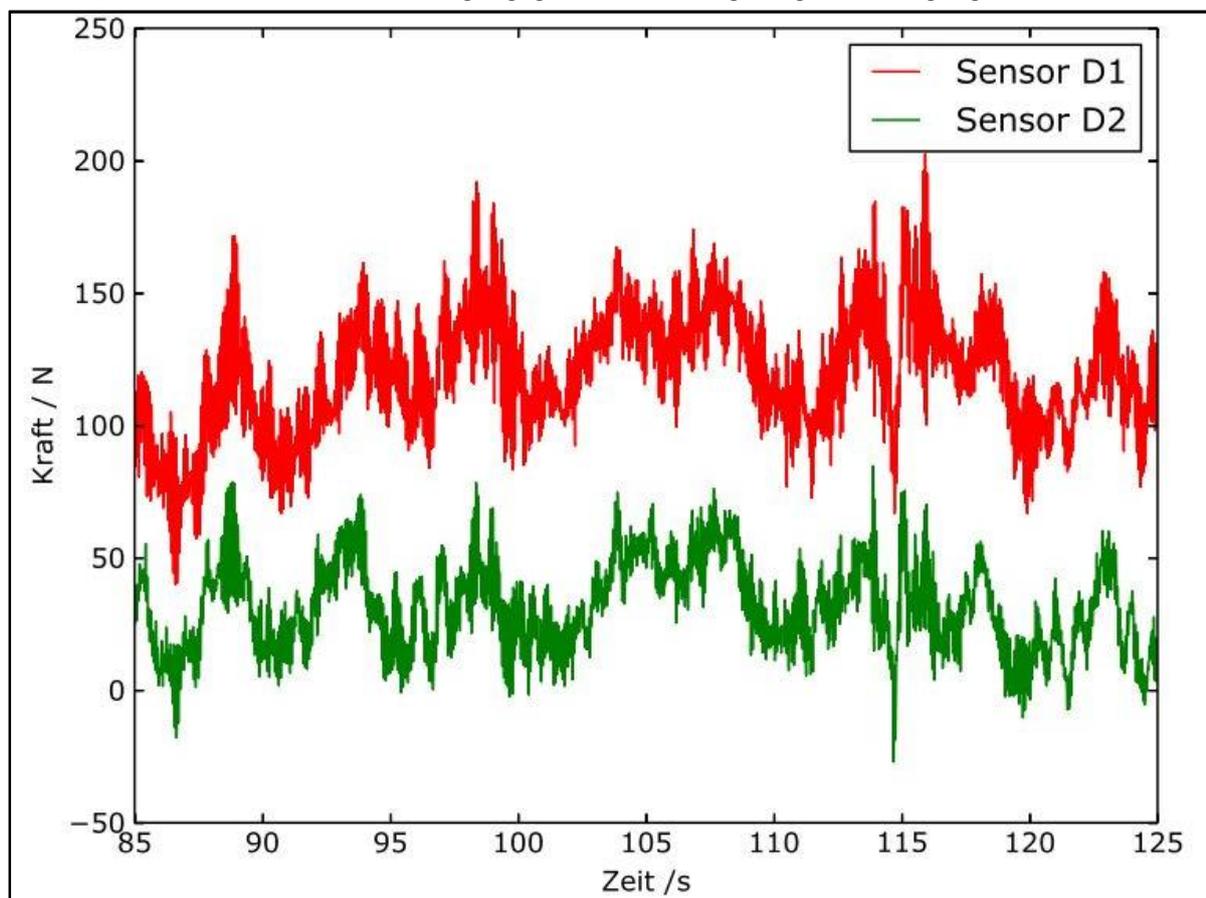


Bild 74 Kontaktkraftmessung bei 50 km/h in der Geraden [51]

Untersuchungen zur Elastizität - Simulation von Kolonnenfahrten

Fahrleitung und Stromabnehmer sind schwingungsfähige Systeme, die zur Stromübertragung miteinander in Kontakt stehen. Schwingungen können einerseits durch Unebenheiten im Fahrweg angeregt werden, die sich auf den am Fahrzeugrahmen befestigten Stromabnehmer übertragen (s. Bild 64 bei Überfahrt einer Bodenwelle). Andererseits können sogenannte „harte Punkte“ in der Fahrleitung,

z. B. durch zusätzliche Bauelemente oder punktuelle Masseanhäufungen, den Stromabnehmer und den Fahrdrabt zu Schwingungen anregen, die im Extremfall ebenfalls zu Lichtbögen und Kontaktverlust führen können. Als Kenngrößen zur Beschreibung der Schwingungsneigung und Änderungen zwischen Stützpunkt und Feldmitte können die Elastizität und der Ungleichförmigkeitsgrad herangezogen werden. Nach [50] sind diese definiert als:

$$e = \frac{y_{stat}}{F_0} \left[\frac{mm}{N} \right] \quad \text{mit } e - \text{Elastizität, } F_0 - \text{Anpresskraft, } y_{stat} - \text{Fahrdrabtanhub} \quad (4)$$

$$u = 100 \cdot \frac{e_{max} - e_{min}}{e_{max} + e_{min}} \quad [\%] \quad \text{mit } u - \text{Ungleichförmigkeitsgrad} \quad (5)$$

In [52] wird das umfangreiche Mess- und Simulationsprogramm der TU Dresden zur Kontaktgüte detailliert beschrieben. Bei Messungen in der Geraden mit lotrechten Kettenwerken und windschiefen Fahrleitungsabschnitt in der Kurve wurden die Elastizitäten bestimmt und können für die Gerade mit berechneten Werten auf Basis einer FEM-Simulation (FEM - Finite-Elemente-Methode) verglichen werden. Für die windschiefe Fahrleitung liegt das notwendige FEM-Modell noch nicht vor. Tabelle 14 führt die Werte getrennt für beide Fahrleitungspole (nördliches und südliches Kettenwerk) sowie für Stützpunkt (Mast) und Feldmitte auf, die sich im Anhub vor allem durch den Seitenhalter mit seinem zusätzlichen Gewicht unterscheiden, das anteilig mit auf dem Fahrdrabt ruht.

Tabelle 14 Elastizität der Fahrleitung in der Geraden und im windschiefen Abschnitt

	Stützpunkt e_{min} [52]	Feldmitte e_{max} [52]	Ungleichförmigkeit u
Gerade (lotrechte Kettenwerke, Tragseil lotrecht über Fahrdrabt)			
nördliches Kettenwerk	0,28	0,59	36%
südliches Kettenwerk	0,27	0,56	35%
FEM-Simulation	0,26	0,60	39%
Windschiefe Fahrleitung in Kurve (vgl. Bild 57)			
nördliches Kettenwerk	0,53	0,74	16%
südliches Kettenwerk	0,55	0,72	14%

Tabelle 14 zeigt zum einen, dass für das lotrechte Kettenwerk die gemessenen Werte sehr gut mit den Ergebnissen der vorhandenen FEM-Simulation übereinstimmen. Zum anderen wird erwartungsgemäß deutlich, dass sich lotrechtes Kettenwerk (Gerade) und windschiefe Fahrleitung hinsichtlich der Elastizität zumindest am Stützpunkt deutlich unterscheiden. Mit Verweis auf [50] liegen die Elastizitäten im Bereich typischer Hochgeschwindigkeitsfahrleitungen, was sich plausibel mit den eingesetzten Materialien, Querschnitten und Konstruktionsparametern erklären lässt. Der Ungleichförmigkeitsgrad entspricht in der Geraden eher dem Wert der „normalen“ Fernverkehrsfahrleitung Re 100. In der Kurve mit windschiefer Fahrleitung werden wiederum Werte wie bei Hochgeschwindigkeitsfahrleitungen erreicht, bei denen ebenfalls eine möglichst geringe Ungleichförmigkeit angestrebt wird, um bei der schnellen Befahrung durch abwechselnd harte und weiche Abschnitte keine oder nur geringe Schwingungen anzuregen.

Zur Plausibilisierung der statisch gemessenen Fahrdrabtanhübe wurden auch dynamische Messungen durchgeführt. Dabei wurden sowohl das optische System des IfB - Institut für Bahntechnik (s. [52]) als auch die zu dem Zeitpunkt bereits installierte Fahrdrabtanhubmessung als Teil des technischen Monitoringsystems (vgl. Abschnitt 3.2.3) eingesetzt. Die Messungen wurden im windschiefen Abschnitt in Feldmitte und im geraden Abschnitt am Stützpunkt durchgeführt. Auf Basis der zuvor beschriebenen statischen Anhubmessungen und daraus bestimmten Elastizitäten konnte auch das FEM-Modell angepasst werden, sodass zur Einordnung der Messwerte nun auch im windschiefen Abschnitt Simulationswerte herangezogen werden können.

Bild 75 (S. 81) stellt die gemessenen den berechneten Werten gegenüber. Durch das angepasste Simulationsmodell können nun auch in windschiefen Abschnitte Fahrdrabtanhübe berechnet werden. Ebenso wird deutlich, dass die als Teil des technischen Monitoringsystems installierte Fahrdrabtanhubmessung für Stützpunkte aussagekräftige Messwerte liefert, die sowohl zur Beurteilung der Eigen-

schaften des Fahrleitungssystems als auch der Kontaktgüte herangezogen werden können. Die automatisierte Messung und Zuordnung der Werte zu einzelnen Stromabnehmern eröffnet vielfältige Möglichkeiten zur Zustandsdiagnose und vorausschauenden Instandhaltung.

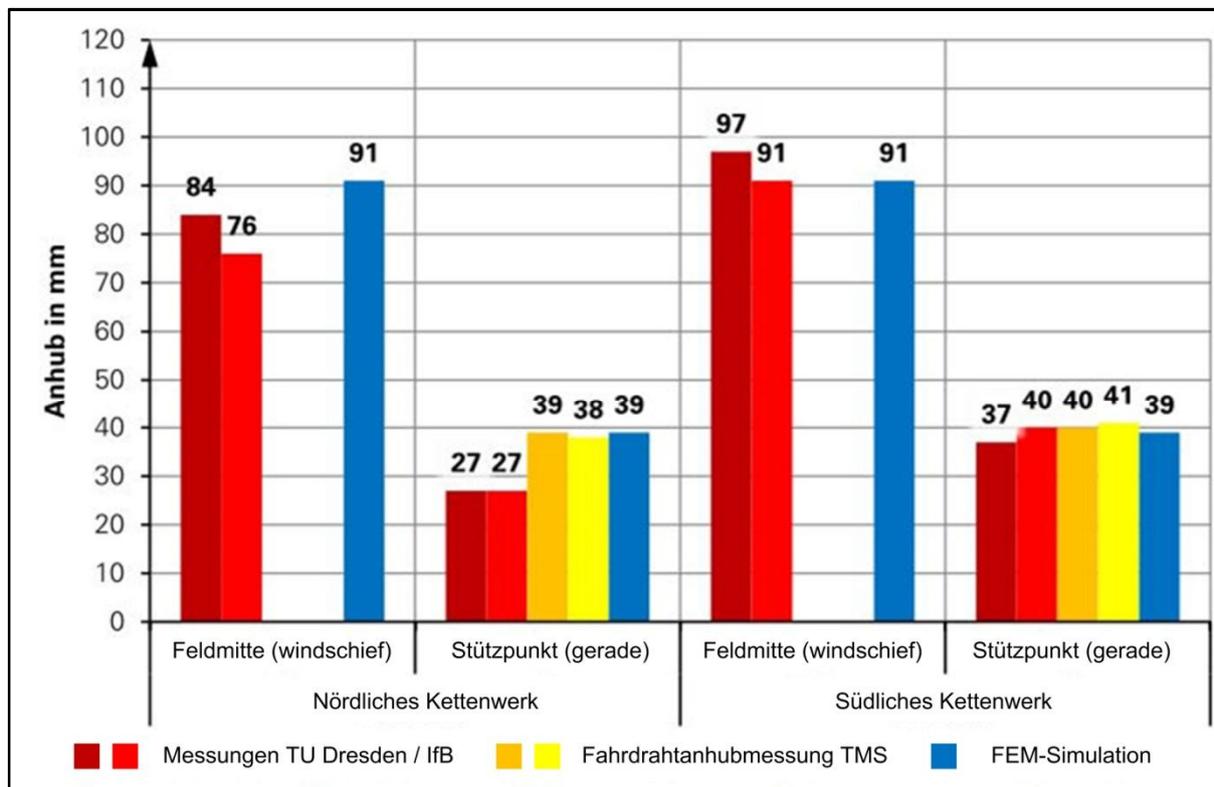


Bild 75 Vergleich gemessener und berechneter Fahrdrachtanhübe [52]

Nach der Validierung des Simulationsmodells wurden in [52] weitere umfangreiche Rechnungen zum Kolonnenverkehr mit variierenden Geschwindigkeiten, Nennwerten der Kontaktkraft und Fahrzeugabständen durchgeführt. Zur Beurteilung der Ergebnisse wurde das Gütekriterium nach [53] genutzt:

$$G = 0,3 \cdot F_m - \sigma_{\max} \geq 0 \text{ N} \quad (6)$$

mit G - Gütekriterium, F_m - mittlere Kontaktkraft, σ_{\max} - Standardabweichung der Kontaktkraft

Dabei konnte für alle Szenarien, d. h. auch mit zufälligem Abstand und Kontaktkraftvariation, nachgewiesen werden, dass das Gütekriterium eingehalten wird und auch bei gegenüber dem Eisenbahnverkehr deutlich dichteren Fahrzeugabständen kein Aufschwingen der Fahrleitung zu erwarten ist.

Untersuchungen zum Kontaktverhalten und Lichtbogenbildung an Streckentrennern

Wie bereits in den Abschnitten 3.3.3 und 3.3.4 zum Neuaufbau der Versuchsanlage beschrieben, wurde nahe des Unterwerks eine Streckentrennung unter Einsatz zweier im Pluspol der Fahrleitung installierter Streckentrenner eingerichtet. Damit wurde baulich die Voraussetzung geschaffen, um im Rahmen einer Forschungsarbeit mit der TU Dresden folgende Aspekte zu untersuchen:

- Kontaktverhalten verschiedener Stromabnehmertypen am Streckentrenner
- Verhalten der Fahrzeuge beim Wechsel zwischen verschiedenen Speiseabschnitten einhergehend mit Sprüngen der Fahrleitungsspannung durch unterschiedliche Vorbelastung
- Entstehung und Änderungen am Verhalten der Abrisslichtbögen in Abhängigkeit des bezogenen Traktionsstroms sowie der Anordnung der Kufen am Streckentrenner

Bild 76a (S. 82) zeigt einen der beiden eingebauten Streckentrenner, Bild 76b die Variante mit symmetrischer Anordnung der Kufen, die ebenfalls bei zahlreichen Messfahrten untersucht wurde. Der Übergang zwischen verschiedenen Speiseabschnitten wurde durch variabel konfigurierbare Widerstände nachgebildet, die zwischen den getrennten Streckenabschnitten eingeschaltet werden können.

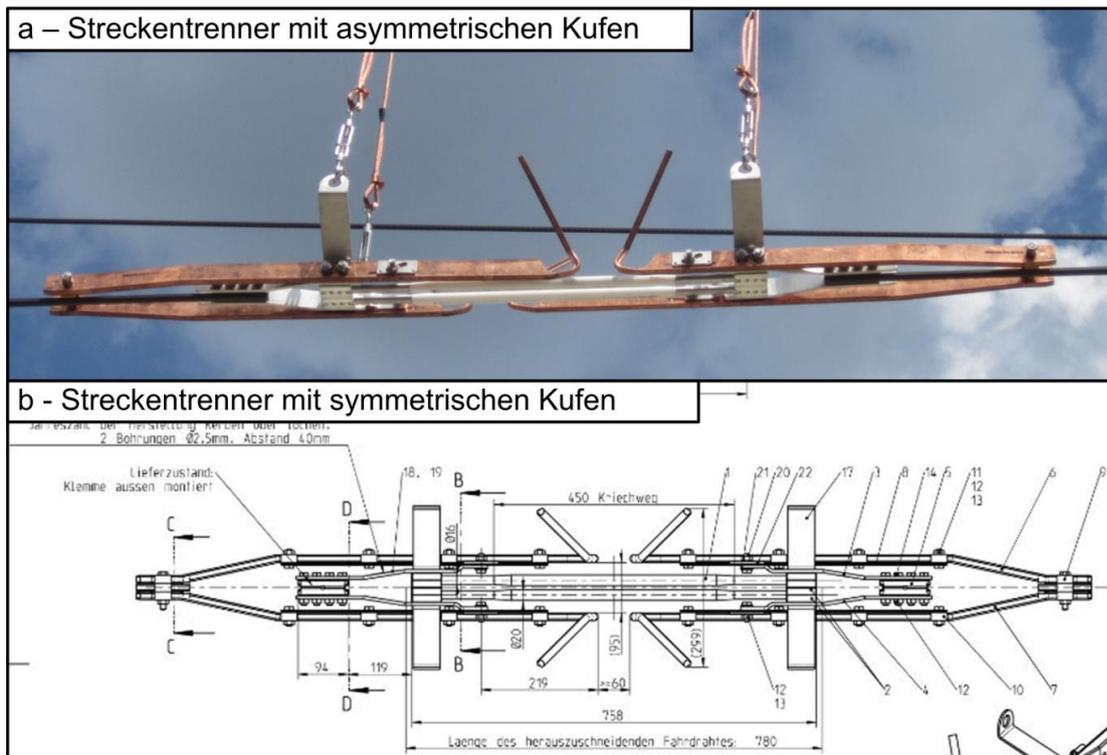


Bild 76 Leichtbaustreckentrenner: a - Einbausituation mit asymmetrischen Kufen, b - Zeichnung der Variante mit symmetrischen Kufen

Bild 77 zeigt einen Messschrieb bei Überfahrt des Streckentrenners. Es sind oben eine Spannungsspitze von 1,2 kV beim Abriss des Lichtbogens erkennbar sowie die Lichtbogenstromspannung (mittig) und der Stromübergang (unten) von dem einen zum anderen Streckenabschnitt.

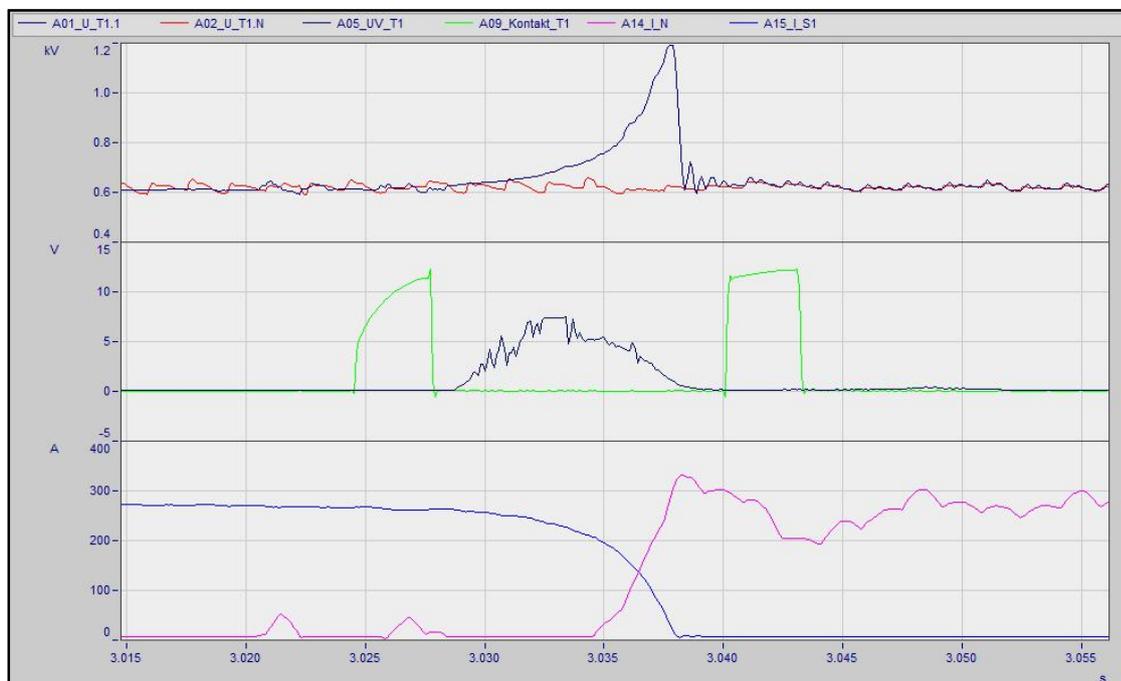


Bild 77 Elektrische Größen bei der Streckentrennerüberfahrt mit ca. 300 A Traktionsstrom

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die für das Systemverhalten maßgebliche Schnittstelle Fahrleitung - Stromabnehmer intensiv untersucht wurde. Die bisherigen Erkenntnisse legen nahe, dass die aus Bahnanwendungen bekannten Phänomene auch beim eHighway-System auftreten und durch eine abgestimmte Systemauslegung beherrscht werden. Damit ist auch beim eHighway ein ähnlich zuverlässiger und robuster Betrieb wie bei leistungsfähigen Bahnsystemen möglich.

3.4.5 Weiterführende Emissions- und Immissionsmessungen

Soweit auf der Versuchsanlage und mit den Prototypen durchführbar, wurden weitergehende Untersuchungen zur Absicherung der im Rahmen der technischen (s. Abschnitt 3.1.1) und ökonomisch-ökologischen Bewertung (s. Abschnitt 3.1.2) getroffenen Annahmen durchgeführt. Dazu gehörten:

- Untersuchung zur EMV-Störaussendung im elektrischen Betrieb an der Fahrleitung
- Untersuchungen zu Geräuschimmissionen in unterschiedlichen Betriebsmodi
- Untersuchungen zum Energiebedarf bei Dauerfahrten

EMV-Störaussendung im elektrischen Betrieb an der Fahrleitung

Im Zuge der technischen Bewertung (s. Abschnitt 3.1.1) wurde ein umfassendes EMV-Konzept aufgestellt, das u. a. Anforderungen an die Fahrzeugtechnik formuliert. Im Betrieb an der Fahrleitung können die Nachweisverfahren aus einschlägigen Bahnnormen als technisch naheliegend herangezogen werden. Daher wurden auf der Versuchsanlage Untersuchungen zur Störaussendung der Erprobungsträger durchgeführt, s. Bild 78. Wie schon bei den in Abschnitt 3.4.3 beschriebenen Dauerlauf- und Klimastabilitätstests haben diese Untersuchungen orientierenden Charakter, um Ansatzpunkte im Hinblick auf die weitere Serienentwicklung zu identifizieren. Durch Änderungen an der Anordnung der Komponenten und zusätzliche Filter können die bisher noch festgestellten Ausreißer bei der Weiterentwicklung eliminiert und die Grenzwerte in allen Betriebsarten eingehalten werden.

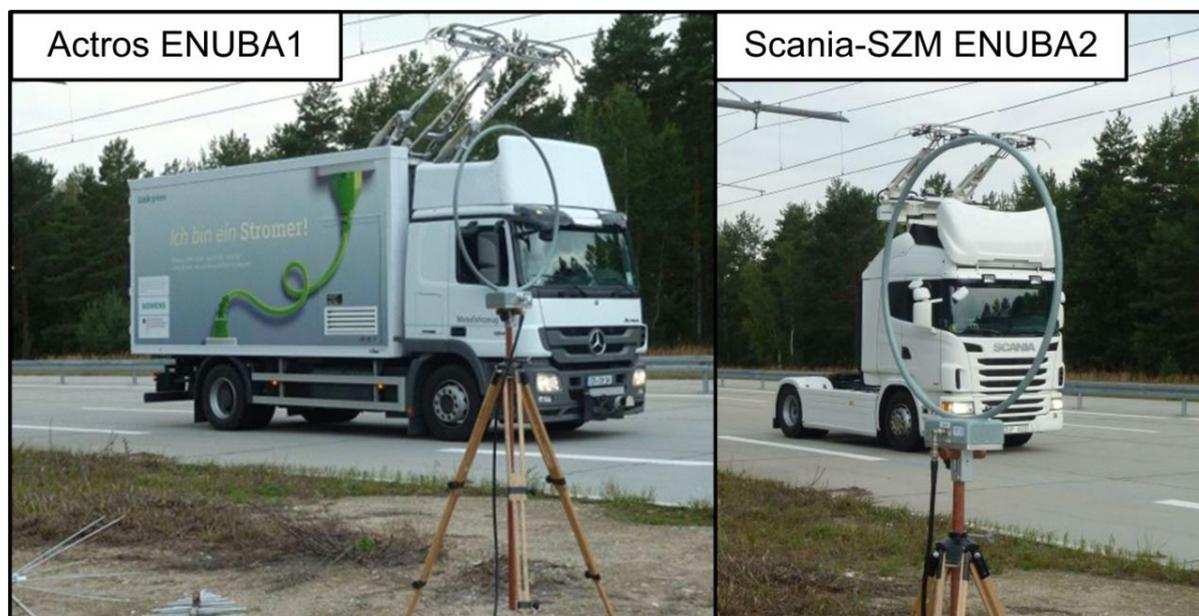


Bild 78 Messung der EMV-Störaussendung im elektrischen Betrieb

Untersuchungen zu Geräuschimmissionen in unterschiedlichen Betriebsmodi

Die bereits in der ersten Projektphase durch die TU Dresden durchgeführten Untersuchungen zum Vergleich der Schallimmissionen der Erprobungsträger im Diesel-Betrieb und im elektrischen Betrieb an der Fahrleitung (s. [1]) wurden im Projekt ENUBA 2 für die Scania-Sattelzugmaschine wiederholt. In [44] werden die Ergebnisse detailliert dargestellt. Wesentliche Erkenntnisse sind:

- Auch bei der Scania-Sattelzugmaschine sind im elektrischen Betrieb an der Fahrleitung bis ca. 50 km/h z. T. deutliche Verringerungen der Schallimmissionen nachweisbar, s. Bild 79.
- Auch bei den Innenraummessungen können bis 50 km/h Verringerungen der Schallimmissionen bis zu 3 dB (A) im angebugelten Betrieb (ohne Dieselmotor) nachgewiesen werden. Bei höheren Geschwindigkeiten dominieren auch im elektrischen Betrieb die Rollgeräusche, sodass keine deutlichen Unterschiede zwischen den Betriebs-Modi wahrnehmbar sind.

- Bei den Erprobungsträgern (Actros-Lkw) wurden in der ersten Projektphase die zusätzlichen Kolbenkompressoren als zusätzliche und deutlich wahrnehmbare Schallquelle identifiziert. Durch Vergleichsmessungen konnte nachgewiesen werden, dass der nachträgliche Ersatz durch elektrische Kompressoren zu deutlichen Verringerungen um 10 dB(A) im Stand, um 5 dB(A) bei 15 km/h und um 2 dB(A) bei 50 km/h führt.

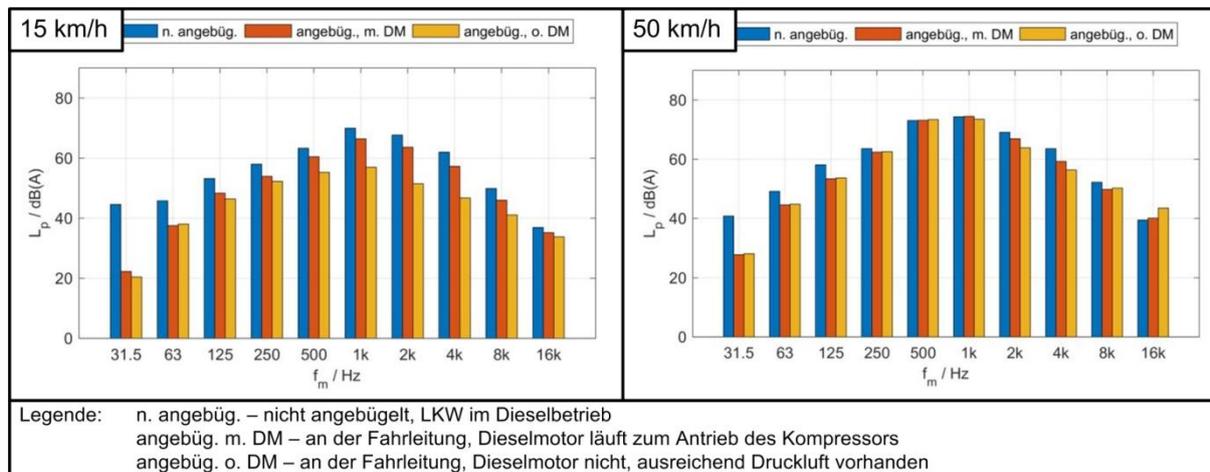


Bild 79 Vergleich der Schallimmissionen der Scania-SZM in verschiedenen Betriebsmodi

Untersuchungen zum Energiebedarf bei Dauerfahrten

In Abschnitt 3.1.4 wurde bereits auf die Untersuchungen im Kontext Energiebedarf und Wirkungsgrade der Teilsysteme sowie Änderungen am Fahrwiderstand eingegangen. Die dabei herangezogenen Messungen wurden auf der Versuchsanlage durchgeführt, vgl. Tabelle 7. Die gewonnenen Ergebnisse bestätigten, dass der auf das Fahrzeug bezogene Wirkungsgrad bei einem elektrischen Antriebssystem etwa doppelt so hoch wie bei einem Antriebssystem mit Verbrennungsmotor ist.

Wegen der kurzen nutzbaren Fahrleitungslänge auf der Versuchsanlage und den nicht autobahntypischen Randbedingungen wurden zur Absicherung für die ökonomisch-ökologische Bewertung angenommenen Energiebedarfskennwerte umfangreiche Fahrten mit einem auf 28,5 t Gesamtgewicht ballastierten Lkw-Zug durchgeführt, s. Bild 80. Es wurden insgesamt 2400 km Fahrstrecke auf den BAB A1, A2, A3 und A7 zurückgelegt. Der am Zwischenkreis gemessene mittlere Energiebedarf betrug 1,3 kWh/km. Zuzüglich des um etwa 10 % höheren Energiebedarfs mit gehobenem Stromabnehmer ergibt sich ein Energiebedarf ab Fahrleitung von 1,43 kWh/km. Dies sind recht genau 50 % des als Flottenmittel für schwere Fern-Lkw mit mittlerer Zuladung (27,5 t) nach [45] belegten Energiebedarfs von 2,95 kWh/km (bzw. 29,74 l / 100 km). Das höhere Gewicht des Messzuges berücksichtigt das Zusatzgewicht für Stromabnehmer und Hybridantriebstechnik.



Bild 80 Lkw-Zug für Langstreckenfahrten im dieselektrischen Betrieb

3.4.6 Systemtests in Grenzsituationen

Anders als ein Feldversuch oder Probetrieb auf öffentlichen Straßen bietet eine abgegrenzte Versuchsanlage die unverzichtbare Möglichkeit, bestimmte Tests in Grenzsituation durchzuführen. Sowohl vor dem Abbau der Versuchsanlage aus der ersten Projektphase im Sommer 2012 als auch im Zuge des Testprogramms auf der neuen Versuchsanlage wurde eine Reihe von Tests in mechanischen oder elektrischen Grenz- und Fehlersituationen durchgeführt. Die im Hinblick auf Fehlerbild und Vermeidungsmaßnahmen abgeleiteten konstruktiven Änderungen wurden entwicklungsbegleitend umgesetzt und in ihrer Wirkung kontrolliert, s. Tabelle 15 und Bild 81.

Tabelle 15 Tests in Grenzsituationen und abgeleitete Erkenntnisse

Nr.	Testfall	Erkenntnisse ENUBA	Änderung und Kontrolle ENUBA 2
#1	Riss des Fahr- drahts	Beim eisenbahntypischen Längsabstand der Hänger zw. Fahrdrabt und Tragseil von 10 m reichen die Rissenden bis auf die Fahrbahn und bilden mechanische Hindernisse im Fahrweg.	Durch Verkürzung des Längsabstands der Hänger zw. Fahrdrabt und Tragseil auf 3 m reichen die Rissenden nicht mehr auf die Fahrbahn und bilden keine mechanischen Hindernisse im Fahrweg. <ul style="list-style-type: none"> • s. Bild 81 a nach einem absichtlichen Schnitt des linken Fahrdrabts
#2	Einfahrt in einen geerdeten und kurzgeschlossenen Abschnitt	Bei schlagartigem Ausfall der Fahrleitungsspannung und Kurzschluss der Pole erfolgt eine Entladung des Energiespeichers auf dem Fahrzeug, bis die Hauptsicherung den Kurzschlussstrom unterbricht. <ul style="list-style-type: none"> • je nach Speichertopologie kann die kurzzeitige Speisung auf den Kurzschluss u. U. nicht verhindert werden Die Hauptsicherung sollte einfach zugänglich und austauschbar sein. <ul style="list-style-type: none"> • abgeleitete konstruktive Anforderung 	Das Energiemanagement erkennt die fehlerhafte Spannung und regelt die Leistungsabgabe herunter, sodass nicht auf den Kurzschluss gespeist wird. <ul style="list-style-type: none"> • bevorzugtes Fahrzeugverhalten
#3	Schnellabsenken des Stromabnehmers nach Ausweichen und Verlassen der Fahrspur	Bereits bei ENUBA umfangreich und erfolgreich getestet. Ausgangspunkt der Notabsenkung war jeweils die durchgängige Fahrdrabthöhe von 5,10 m.	Wiederholungstests bei ENUBA 2, da an der Verkehrszeichenbrücke die Fahrdrabthöhe auf 4,7 m reduziert ist (vgl. Abschnitt 3.3.3). Auch bei einem Verlassen der Fahrspur in diesem Bereich darf sich der Stromabnehmer durch die Entlastung nicht plötzlich nach oben bewegen, um ein Einfädeln in die Fahrleitung bei schneller Rückkehr in die elektrifizierte Fahrspur zu verhindern. <ul style="list-style-type: none"> • s. Bild 81 b bei Verlassen der Fahrspur an der Verkehrszeichenbrücke

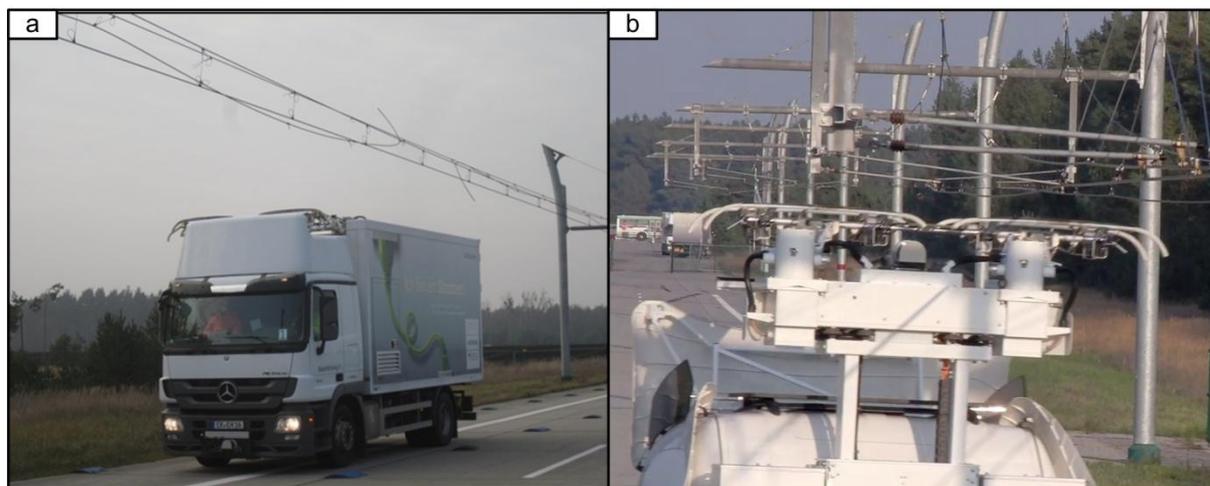


Bild 81 Tests in Grenzsituationen: a - Riss des Fahrdrabts, b - Notabsenkung

3.5 Konzeption und Erprobung einer SZM mit Traktionsbatterie im Trailer

3.5.1 Motivation und Fahrzeugkonzept

Die bisherigen Analysen, Entwicklungen und Erprobungen konzentrierten sich auf den elektrischen Betrieb einer hybridisierten Sattelzugmaschine an einer Oberleitung. Dabei ist die direkte Nutzung der extern zugeführten Traktionsenergie für den Antrieb der Fahrzeuge maßgeblich für die hohe Effizienz des Systems. Gleichzeitig können sowohl unter wirtschaftlichen als auch unter technischen Aspekten bestimmte Teile des Straßennetzes und der individuellen Transportketten nicht sinnvoll durchgängig mit Fahrleitungen elektrifiziert werden. Demgegenüber besteht der Anspruch und zur Erreichung der Klimaschutzziele sogar die Notwendigkeit, den Verkehrssektor insgesamt und den Straßengüterverkehr im Speziellen von fossilen Energieträgern unabhängig zu machen ([63], [62]). Ein wesentlicher technologischer Hebel zur Erreichung hoher elektrischer Fahrleistungen ist demnach, die elektrische Antriebsenergie nicht nur auf den wirtschaftlich sinnvoll elektrifizierbaren Streckenabschnitten, z. B. hochbelastete Netzabschnitte und Magistralen des Güterverkehrs, sondern auch auf den durchschnittlich schwächer belasteten Vor- und Nachlaufstrecken oder Verbindungsstücken verfügbar zu machen. Dies setzt auf den Fahrzeugen entweder zusätzliche, fahrleitungsunabhängige Antriebssysteme wie z. B. Brennstoffzellensysteme oder bedarfsgerecht dimensionierte Energiespeicher, insbes. Batterien, voraus, die während der Fahrt an der Fahrleitung aufgeladen werden können.

Im Projektverlauf konnte am Beispiel des gemeinsam mit Scania entwickelten Erprobungsträgers bereits gezeigt werden, dass der weiterentwickelte Stromabnehmer in eine hybridisierte Sattelzugmaschine integriert werden kann (vgl. Unterkapitel 3.2.2 und 3.3.5). Darauf aufbauend wurde in Abstimmung mit Projektträger und Fördermittelgeber entschieden, im Rahmen einer Projektverlängerung einen weiteren Erprobungsträger als hybridisierte Sattelzugmaschine mit einem Stromabnehmer umzurüsten und zur Erhöhung der elektrischen Reichweite zusätzlich mit einer Traktionsbatterie im Auflieger auszustatten, vgl. Bild 82.

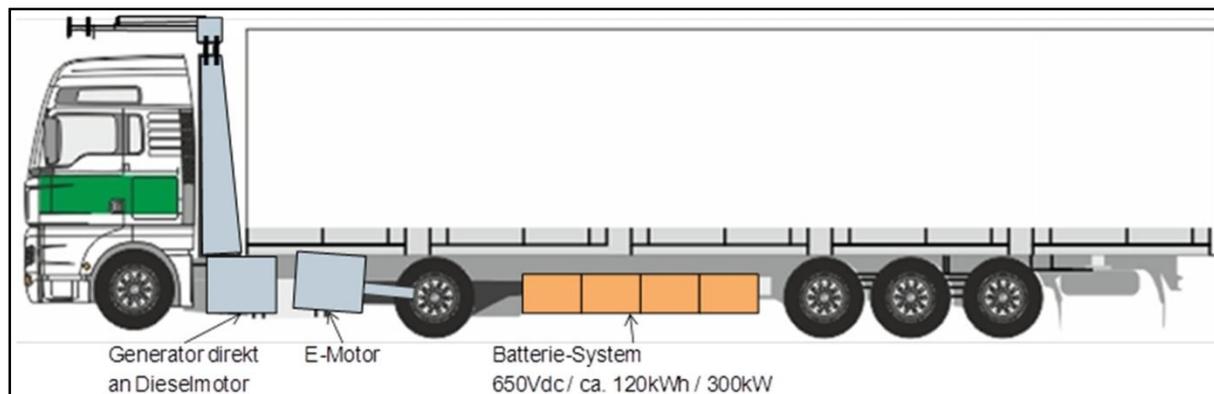


Bild 82 Grundkonzept einer Sattelzugmaschine mit seriellem Hybridantrieb, Stromabnehmer und Traktionsbatterie

Neben den zusätzlich erforderlichen Untersuchungen zur optimalen Dimensionierung des Fahrzeugantriebs und des Energiespeichers können mit diesem Erprobungsträger wichtige praktische Erfahrungen zur Fahrzeugumrüstung und -integration sowie zum elektrischen Betrieb schwerer Sattelzüge gesammelt werden. Eine wesentliche Eigenschaft des realisierten Systems ist die emissionsfreie Fahrfähigkeit der Fahrzeugkombination bestehend aus Sattelzugmaschine und Auflieger - nicht nur beim Betrieb an der Oberleitung sondern auch rein aus der Traktionsbatterie auf nicht elektrifizierten Abschnitten. Dafür wurde eine Traktionsbatterie mit einem Energieinhalt von 120 kWh unter dem Auflieger installiert, was eine maximale Reichweite der Fahrzeugkombination von ca. 75 km ermöglicht.

Eine weitere wichtige Eigenschaft des Systems stellt die Möglichkeit des Nachladens der Traktionsbatterie während der Fahrt an der Oberleitung dar, um nach dem Verlassen der Fahrleitung weiterhin emissionsfrei fahren zu können. Dieses Konzept ermöglicht sowohl die abschnittsweise Elektrifizierung von Straßen als auch die antriebsmissionsfreie Weiterfahrt im nachgeordneten Straßennetz. Dafür ist neben der Batterie auch ein Ladesystem unter dem Auflieger installiert, welches ein Nachladen der Traktionsbatterie mit einem hohen Lade-Faktor von $C \approx 2,6$ als Verhältnis zwischen Ladeleistung und

Batterieinhalt erlaubt. Je größer der Lade-Faktor ist, desto kürzer können die elektrifizierten gegenüber den nicht elektrifizierten Abschnitten sein. Beispielsweise könnte die im umgerüsteten Erprobungsträger installierte Traktionsbatterie mit dem ausgewählten Ladesystem innerhalb von etwa 25 Minuten beim Fahren an der Oberleitung auf einem ca. 35 km langen, durchgängig elektrifizierten Streckenabschnitt bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h vollständig geladen werden. Zusätzlich ist mittels des Ladesystems ebenfalls ein Nachladen der Batterie in Warte- und Stillstandszeiten des Aufliegers (z. B. nachts oder während der Be- und Entladung) über einen handelsüblichen Pkw-Ladestecker möglich.

3.5.2 Hauptkomponenten und Umrüstung des Fahrzeugs

Als Basisfahrzeug wurde ähnlich dem ersten Entwicklungsprojekt ENUBA ein Actros von Mercedes-Benz ausgewählt und diesmal als Sattelzugmaschine zu einem dieselektrischen Lkw mit seriellem Hybridantrieb umgebaut und mit einem Stromabnehmer ausgerüstet. Als Stromabnehmer wurde der bereits bei der Kooperation mit Scania realisierte Typ verwendet, der bei der Integration in eine Sattelzugmaschine nur sehr geringen Platzbedarf mit einer Baulänge von 0,5 m erfordert. Der inzwischen bewährte Prozess mit definierten Standard-Schnittstellen (vgl. 3.2.2) kommt erneut zur Anwendung und zeigt, dass durch klare Vorgaben für Steuerung, Pneumatik, Elektrik und Mechanik ein Stromabnehmer an ein nahezu beliebiges Träger-Fahrzeug angeschlossen werden kann.

Die in Bild 83 dargestellte Systemübersicht zeigt die Hauptkomponenten und deren Verschaltung für die Sattelzugmaschine mit seriellem, dieselektrischem Antriebsstrang und links im Bild den Auflieger mit Batteriesystem. Das Gesamtsystem sieht eine doppelte Isolierung aller aus der Oberleitung gespeisten Komponenten vor, was den Betrieb an einer geerdeten Oberleitungs-Infrastruktur erlaubt.

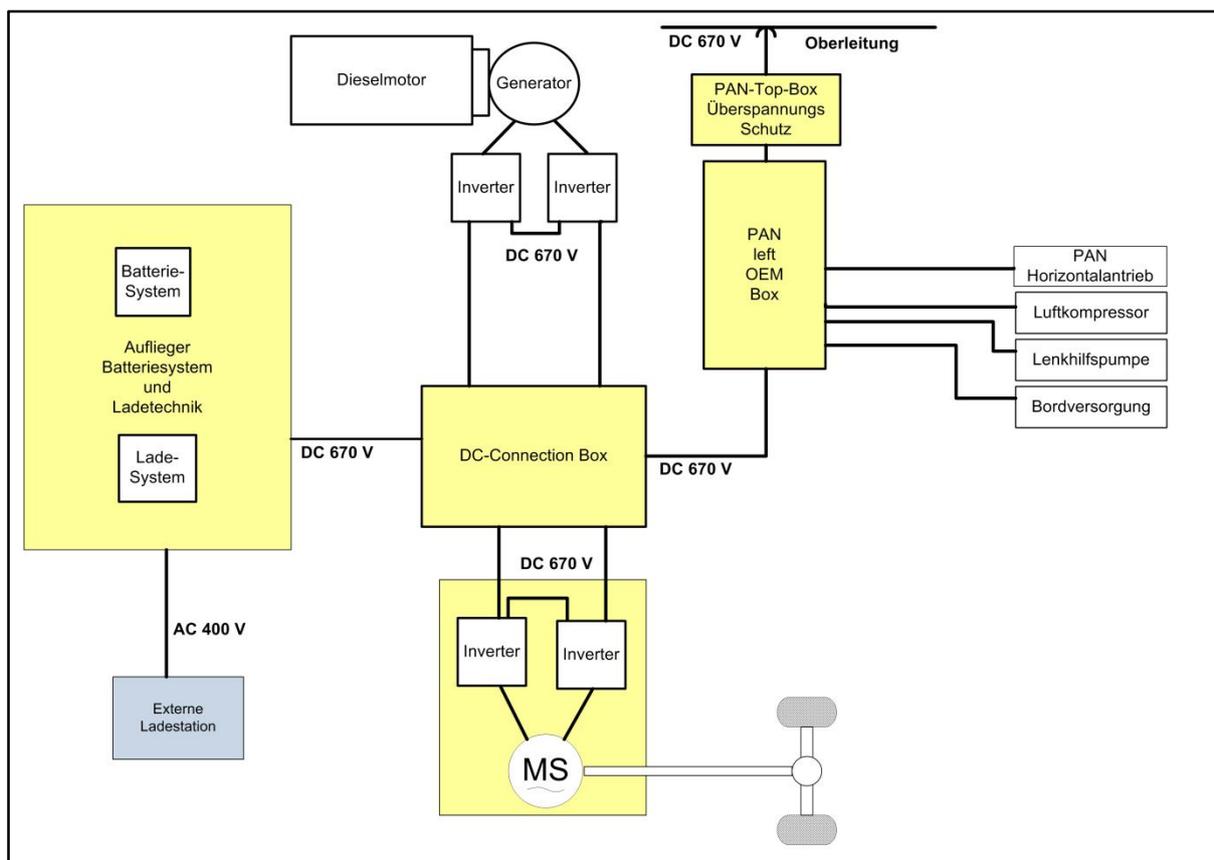


Bild 83 Vereinfachtes Blockschaltbild des Antriebs- und Batteriesystems

Für die Umrüstung des Antriebssystems und die Integration des Stromabnehmers wurde erneut mit dem Fahrzeugumrüster Paul Nutzfahrzeuge GmbH (Vilshofen, früher Passau) zusammengearbeitet. Die elektrischen Antriebskomponenten wurden von der Abteilung Hybrid Drives der Siemens Division „Process Industries and Drives“ bezogen.

Die Integration und das Zusammenwirken mit Batteriesystem und Ladeeinrichtungen wurden als Eigenentwicklung erbracht.

In der Zugmaschine wurden folgende Komponenten und Systeme integriert:

- Generator (permanent erregte Synchronmaschine), direkt am Dieselmotor und Stromrichter (ELFA-Technologie)
- eigenständiges Kühlsystem der Generator- und Hilfsbetriebeeinheit
- Antriebsmotor (permanent erregte Synchronmaschine) und Stromrichter (ELFA-Technologie)
- eigenständiges Kühlsystem der Antriebseinheit
- elektrische Hilfsbetriebeversorgung
- Pantograph und dessen Steuerung in der rechten Pantograph-Box (RPB)
- Linke OEM-Box (LOB) mit elektrischen Komponenten zur Energieverteilung
- Bedien- und Anzeigeelemente in der Fahrerkabine
- Stecksystem für die elektrische Anbindung des Aufliegers an die Zugmaschine

In den Sattelaufleger wurden im Bereich des Palettenfaches folgende Komponenten integriert:

- Traktionsbatteriesystem
- eigenständiges Kühlsystem der Traktionsbatterie und Ladeeinheiten
- Kabel und Stecker für die Anbindung an die Zugmaschine
- Ladeeinheiten für die Traktionsbatterie aus der Oberleitung

Als Basis der elektrischen Antriebsausrüstung wird ein serieller, diesel-elektrischer Antriebsstrang realisiert. Dieser Antriebsstrang besteht aus einem elektrischen Antriebsmotor (Synchronmaschine) mit zwei zugeordneten ELFA-II-Umrichtern mit integriertem Spannungsschutzmodul. Für die Fahrt ohne Oberleitung sind ein Diesel-Generator-Set in der Zugmaschine und eine Traktionsbatterie im Auflieger vorgesehen. Das Diesel-Generator-Set besteht aus dem vorhandenen Dieselmotor der Zugmaschine und einem angebauten, leistungsfähigen Generator (ebf. als Synchronmaschine) mit den zugeordneten ELFA-II-Umrichtern für die Bereitstellung der elektrischen Fahrleistung. Für den Betrieb an der Oberleitung ist das Diesel-Generator-Set wegschaltbar und damit abtrennbar vom Antrieb, was durch entsprechende Schütze in der Gleichstrom-Verteilerbox gewährleistet wird. An diese Verteilerbox wird neben dem Antrieb, der direkt verbunden ist, auch der Pantograph über die LOB und die im Auflieger befindliche Traktionsbatterie angebunden.

Das Zuschalten der Traktionsbatterie an den Antriebszwischenkreis erfolgt mit Schützen auf dem Auflieger. Die Leistungskabel zwischen Auflieger und Verteilerbox weisen außerdem eine Trennstelle zum Auflieger (Steckverbindung mit Leistungskontakten) auf, damit ein definiertes elektrisches Trennen des Batterieaufliegers von der Zugmaschine möglich ist. Die Komponenten in der LOB sind so ausgewählt, dass sie auf möglichst kleinem Bauraum eine maximale elektrische Leistung ermöglichen, was nur durch den Einsatz von flüssigkeitsgekühlten Komponenten erreicht werden kann. Im Wesentlichen betrifft dies die Filterdrossel und den potentialtrennenden DC/DC-Steller.

3.5.3 Inbetriebnahme und Erprobung

Integration und Inbetriebnahme des Sattelzugs erfolgten in Vilshofen. Nach Abschluss der Tests, noch ohne Fahrleitungssystem, wurde das Fahrzeug übergeben (Bild 84) und für die Überführungsfahrt nach Groß Dölln fertiggestellt. Wesentliche Voraussetzung dafür waren die TÜV-Abnahmen.

Zulassung und TÜV-Abnahmen

Für die Zulassung der Erprobungsfahrzeuge zum Betrieb auf den öffentlichen Straßen ist eine Ausnahmegenehmigung nach § 70 StVZO von der zuständigen Behörde erforderlich. Diese Ausnahmegenehmigung wurde bei der Regierung von Oberpfalz in Bayern erwirkt. Die Voraussetzung für die Erteilung der Ausnahmegenehmigung war eine Begutachtung seitens des zuständigen TÜVs. Die beauftragte TÜV-Begutachtung bestand aus zwei Teilen:

- Gutachten zur Erlangung der Betriebserlaubnis gemäß §21 StVZO (S19(2) StVZO) durch die TÜV SÜD Auto Service GmbH Passau
- Testbericht gemäß der EC/EU-Regulation No. ECE-R 100 (Elektroabnahme) durch die TÜV SÜD Auto Service GmbH München

In Rahmen der elektrischen Prüfungen nach ECE-R100 wurden neben der Sichtkontrolle aller Hochspannungskomponenten und Kabelverlegung auch die Messungen des Isolationswiderstandes, der Durchgängigkeit der Erdungsverbindungen sowie die Begutachtung der funktionalen Sicherheit durch den beauftragten TÜV durchgeführt.



Bild 84 Sattelzugmaschine und Auflieger bei der Übergabe in Vilshofen

Testbetrieb

Bereits bei der ersten Überführung zwischen dem Sitz des Systemintegrators Firma Paul GmbH in Vilshofen und der Versuchsanlage in Groß Dölln wurden wichtige Erkenntnisse über das Verhalten der Erprobungsfahrzeuge gesammelt. Die Entfernung zwischen beiden Standorten beträgt ca. 700 km und stellt eine normale Belastungsfahrt für den Hybrid-Antriebsstrang dar. Es fanden weitere Überführungsfahrten des Sattelzuges statt, z. T. mit beladenem Auflieger, sodass die Gesamtmasse des Sattelzuges ca. 40 t betrug. Die Erkenntnisse aus diesen Überführungsfahrten wurden für die weitere Optimierung des Antriebssystems berücksichtigt. Insgesamt hat das Erprobungsfahrzeug ca. 5.000 km auf den öffentlichen Straßen bis zum Frühjahr 2016 absolviert.

Im Herbst 2015 begannen die Arbeiten zur Inbetriebsetzung, Optimierung und Erprobung des gesamten Systems auf der Versuchsanlage in Groß Dölln. Einer der wesentlichen Schwerpunkte der Inbetriebsetzung war die Ablaufsteuerung und Stabilisierung des Systemverhaltens bei den Übergängen zwischen den folgenden Betriebsmodi:

- diesel-elektrischer Betrieb ohne Batterie
- Batterie-Hybrid-Betrieb mit Batterie-Nachladung durch den Diesel
- reiner Batteriebetrieb ohne Batterie-Nachladung durch den Diesel
- Betrieb an der Oberleitung, einschließlich Batterie-Nachladung

Die Übergänge zwischen den einzelnen Betriebsmodi müssen in allen möglichen Situationen, z. B. beim Beschleunigen oder elektrischen Bremsen, einwandfrei funktionieren. Dazu mussten umfangrei-

che Optimierungen im Gesamtsystem und in einzelnen Subsystemen vorgenommen werden. Zahlreiche Tests und Versuche wurden für die Verbesserung des Systemverhaltens zuerst mit dem leeren Auflieger und dann mit dem beladenem Auflieger auf der Versuchsanlage durchgeführt.

Die Systemtests auf der Versuchsanlage beinhalteten sowohl die Tests zur Verifikation der Anforderungen aus der Spezifikation für die Sattelzugmaschine mit dem Batterieauflieger als auch die Überprüfung wichtiger Überwachungs- und Schutzfunktionen der Komponenten. Der Schwerpunkt der Systemtests lag vor allem in der Nachweisführung wichtiger Systemeigenschaften wie z. B. der Systemleistung, deren Grenzen in Abhängigkeit von der Oberleitungs-Spannung, der Reichweite im reinen Batteriebetrieb sowie dem Laden des Batteriesystems beim Betrieb an der Oberleitung. Beispielfähig wurde der Rückgang des Ladezustands der Batterie (SOC - State of Charge in %) während zweier Dauerfahrten im Batteriebetrieb untersucht:

- Überlandfahrt (Autobahn) des voll beladenen 40-t-Lastzugs
- Stadtfahrt (häufiges Anhalten, Beschleunigen) des teilbeladenen Lastzugs mit 21 t

Der Füllstand der Batterie (SOC - state of charge) betrug beim Start jeweils ca. 90 %. Die „Stadtfahrt“ wurde auf der Versuchsanlage durchgeführt und war durch viele Beschleunigungs-, Brems- und Wendevorgänge gekennzeichnet. Dieses für Autobahnen nicht repräsentative Regime führt zu einem recht hohen Energiebedarf von ca. 1,4 kWh/km. Die „Überlandfahrt“ wurde als Autobahnfahrt mit dem auf 40 t beladenen Lastzug durchgeführt. Die Fahrt verlief ohne Staus und führte zu einem durchschnittlichen Energiebedarf von nur 1,3 kWh/km. Dieser Wert liegt trotz der gegenüber dem Flottenmittel (Gesamtgewicht 27,5 t) höheren Zuladung noch unter dem Erwartungswert, der gemäß Handbuch der Emissionsfaktoren [45] über das Verhältnis der Wirkungsgrade konventioneller und elektrischer Antriebssysteme hergeleitet werden kann, vgl. auch Abschnitt 3.4.5. Die Ergebnisse zeigen eindrucksvoll, dass das System in der Lage ist, bei der vollgeladenen Batterie (ab ca. 90 % SOC) Entfernungen bis zu 75 km im Batterie-Modus emissionsfrei auch mit einem 40-t-Lkw zu bewältigen.

Charakteristische Kennwerte für einen Beschleunigungsvorgang an der Fahrleitung zeigt Bild 85.

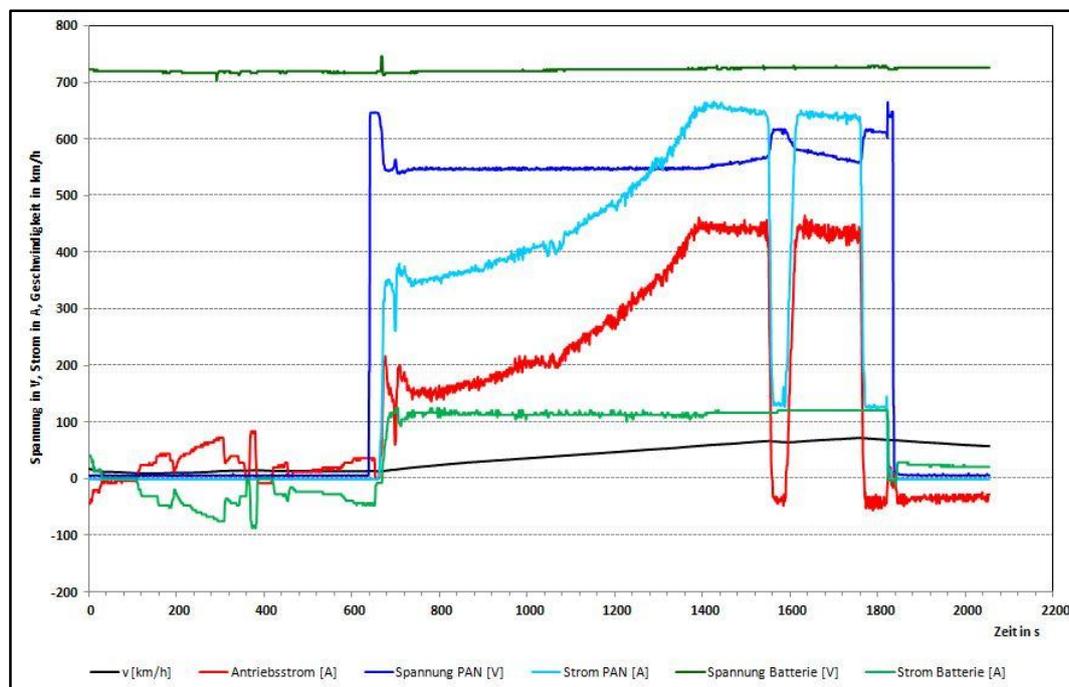


Bild 85 Elektrische Kenngrößen beim Betrieb an der Oberleitung

Bild 85 zeigt typische Verhältnisse der Leistungsaufteilung beim Betrieb an der Oberleitung. Der Fahrer beschleunigt das Fahrzeug bis auf 70 km/h und der Fahrzeuggesamtstrom (Strom PAN - hellblau) steigt bis auf 660 A während der Beschleunigungsphase. Der Batteriestrom (hellgrün) wird durch das implementierte Lademanagement über das Ladesystem in den Auflieger übertragen, um die Traktionsbatterie während der Fahrt mit ca. 110 A zu laden. Das Beispiel zeigt die wichtige Systemeigenschaft, dass das Laden der Traktionsbatterie während des Betriebs an der Oberleitung möglich ist.

4 Weiterentwicklungen durch Dritte - Einordnung der Projektergebnisse

4.1 Dekarbonisierung und Electric Road Systems (ERS)

Die Diskussion von Klimaschutzzielen und den davon abgeleiteten Zielen zur Senkung der globalen Treibhausgasemissionen wird zunehmend unter dem Leitmotiv „Dekarbonisierung“ zusammengefasst. Damit ist vorrangig die weitgehende Unabhängigkeit aller Sektoren und Gesellschaftsbereiche von fossilen Energieträgern gemeint, deren Einsatz ab 2050 auf ein klimaneutrales Maß reduziert sein soll [54]. Diese Strategie bildet auch den Rahmen der Erforschung postfossiler Antriebssysteme für den Verkehr. Dieser Sektor stellt in Deutschland den drittgrößten Emittenten dar, vgl. Bild 86, wobei der Handlungsdruck hier jedoch besonders groß ist, da anders als in den beiden noch größeren Sektoren (Energiewirtschaft und Industrie) seit 1990 keine Senkungen erzielt werden konnten [55].

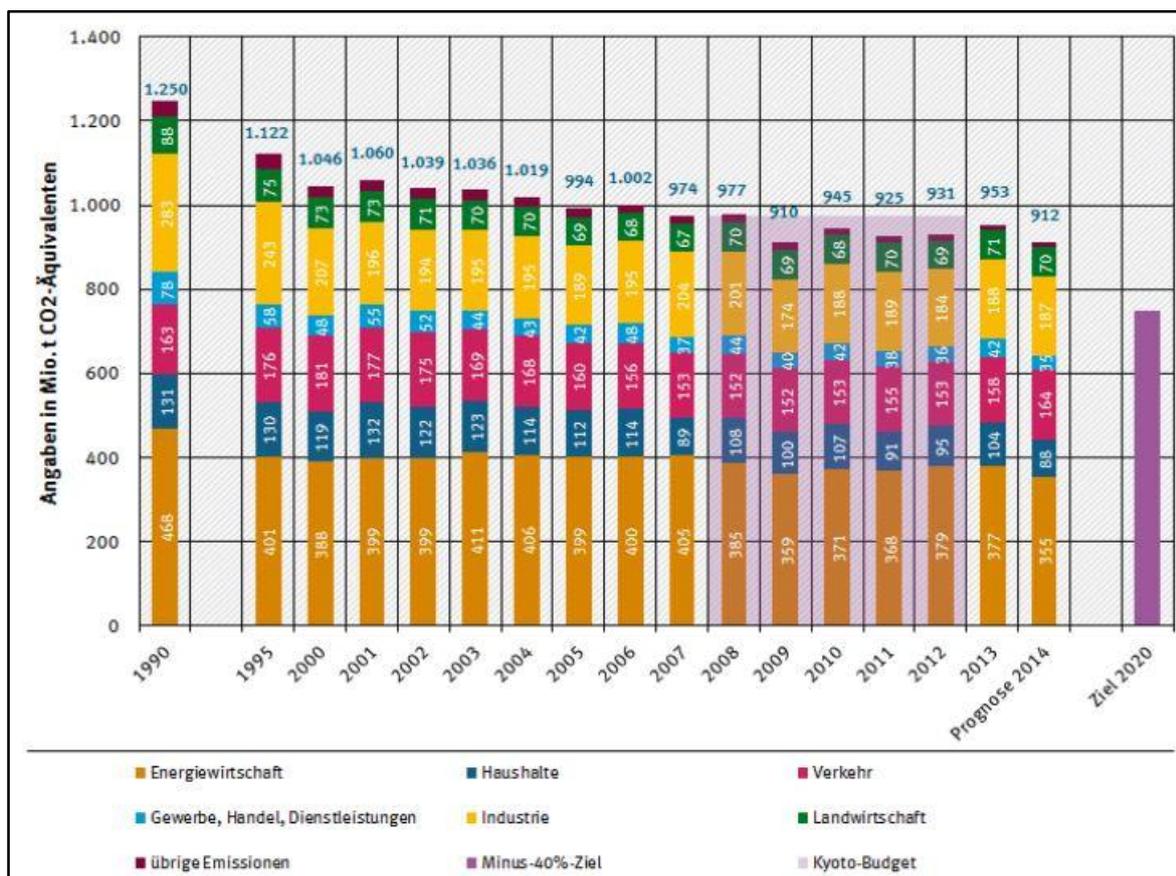


Bild 86 Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren ab 1990 [55]

Europaweit verbrauchen dabei Pkw 48 % der im Transportsektor eingesetzten Energie. Weitere 33 % werden für Lkw, Busse und leichte Nutzfahrzeuge benötigt. In dieser Gruppe sind Lkw für Ferntransport der größte Verbraucher. In Folge des vorhergesagten Wachstums im Güterverkehr wird der prozentuale Anteil der Emissionen schweren Nutzfahrzeuge an den gesamten Treibhausgasemissionen des Transportsektors der EU steigen. Bis 2030 schließen schwere Nutzfahrzeuge zu den Pkw als größten Emittenten von Treibhausgasemissionen auf ([56], [57], [58]).

Dieser Tendenz muss zunächst mit Maßnahmen zur Vermeidung von Transporten und zur Verlagerung auf das jeweils umweltfreundlichste Transportmittel begegnet werden. Die Flexibilität und die Fähigkeit zur Feinerschließung sowie die Wachstumsprognosen verdeutlichen jedoch die Unverzichtbarkeit und fortgesetzte Dominanz des Güterverkehrs auf der Straße. Folglich liegt der wichtigste Ansatzpunkt zur Senkung der Treibhausgasemissionen im Transportsektor maßgeblich in der Elektrifizierung des Straßenverkehrs. Dabei werden zusammenfassend alle Technologien zur direkten, d. h. dynamischen Versorgung der Fahrzeuge mit elektrischer Antriebsenergie als ERS - Electric Road Systems (dt. etwa: Elektrische Straßensysteme) bezeichnet [59].

Für Pkw stehen zunehmend rein fahrzeugseitige Lösungen für die Nutzung elektrischer Energie zur Verfügung (u. a. Batterien und Brennstoffzellen), wobei die über stationäre Ladesysteme oder Wasserstoff-Tankstellen bereitgestellte Antriebsenergie auf dem Fahrzeug zwischengespeichert wird. Diese Technologien können jedoch nicht die Anforderungen schwerer Nutzfahrzeuge hinsichtlich der betrieblichen Anforderungen sowie der ökonomischen und ökologischen Erfordernisse erfüllen. Für Nutzfahrzeuge kommen daher solche Electric Road Systems in Frage, deren Nutzung während der Fahrt begonnen und unterbrochen werden kann. Im Zusammenspiel mit Hybridkonfigurationen (z. B. Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellen) und auf das Fahrprofil abgestimmten Energiespeichern auf dem Fahrzeug bleibt die betriebliche Flexibilität der Fahrzeuge erhalten. Diese Konfigurationen werden für die verschiedenen Anwendungsfälle und Fahrleistungsanteile angepasst, wie in Bild 87 gezeigt.

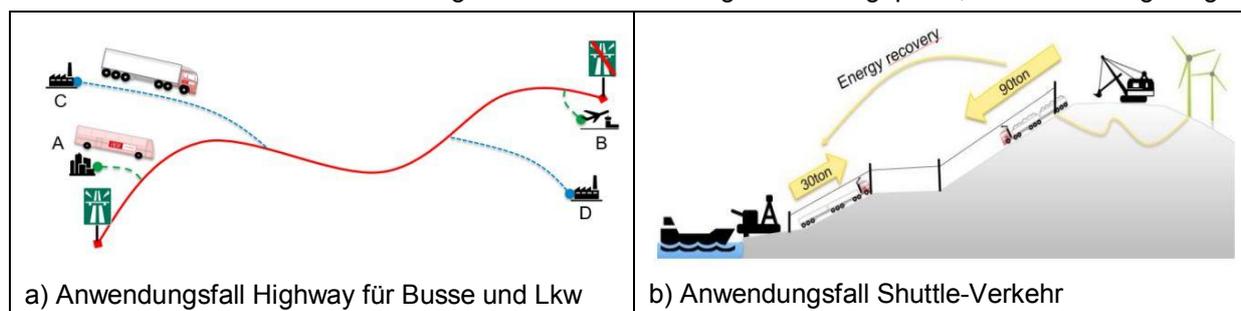


Bild 87 Anwendungsfälle für Electric Road Systems [59]

Der Begriff Electric Road Systems umfasst dabei verschiedene Technologien zur Energiebereitstellung und -übertragung auf die Fahrzeuge und bildet dabei häufig die Klammer für Technologievergleiche, Machbarkeitsstudien und Potenzialabschätzungen. Diese haben entweder einen technischen Fokus, wie beispielsweise in England [60] und Schweden [61] oder bewerten zusammenfassend den möglichen Beitrag zur Erreichung der Senkungsziele für die Treibhausgasemissionen ([62], [63]).

4.2 Alternativtechnologien für Electric Road Systems

Als ERS im engeren Sinne werden die verschiedenen Möglichkeiten zur dynamischen Übertragung der Antriebsenergie auf die Fahrzeuge entsprechend Bild 1 (s. S. 11, linke Bildhälfte) angesehen. Am Beispiel einer Vergleichsstudie aus Schweden veranschaulicht Bild 88 die drei Prinzipien konduktive Übertragung mittels Oberleitung (unten links), konduktive Übertragung mittels Stromschiene (unten rechts) und induktive Energieübertragung (oben mitte).

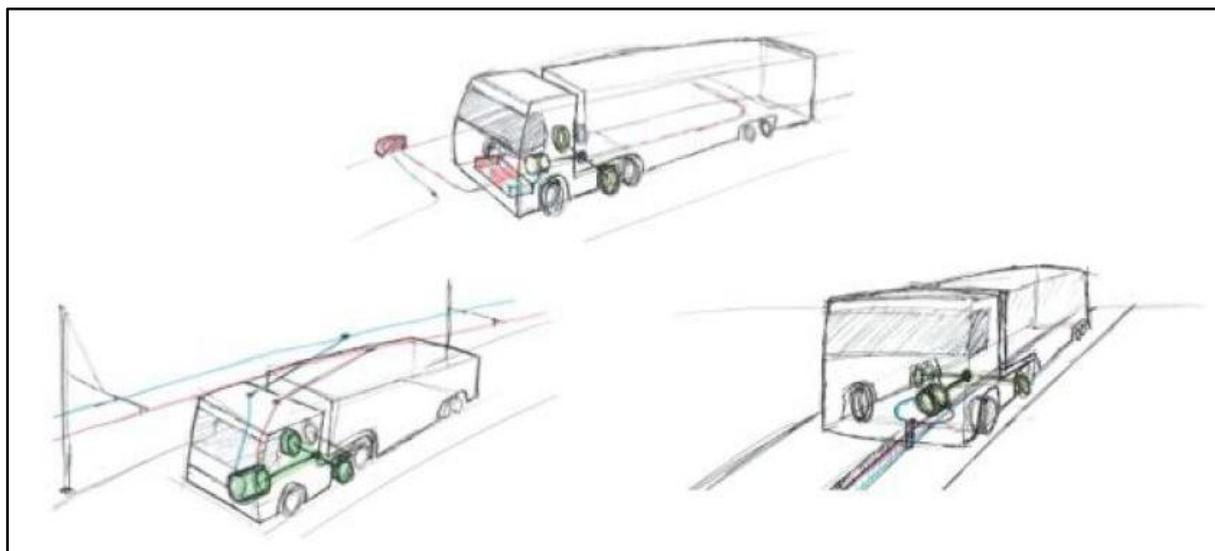


Bild 88 Veranschaulichung der verschiedenen ERS-Technologien [61]

Anlage 7.1 verdeutlicht die Wirkungsprinzipien der drei Übertragungssysteme, stellt die benötigten Hauptbaugruppen dar und gibt einen kurzen Überblick zu den wesentlichen Vor- und Nachteilen der Systeme. Die weitere Vorstellung des Entwicklungsstands der Alternativtechnologien konzentriert sich somit im Folgenden auf die konduktive Energieübertragung mittels Stromschiene sowie die induktive Energieübertragung mittels Spulensystemen.

Konduktive Energieübertragung mittels Stromschienen

Die konduktive Energieübertragung mittels segmentierter Stromschienen ist ähnlich der Elektrifizierung mit Oberleitungen ein Übernahmekonzept aus dem Bahn- bzw. Straßenbahnbereich. Unter dem Produktnamen APS - Alimentation par le sol (dt. etwa: Versorgung über den Boden) vermarktet Alstom die Technologie für Straßenbahnsysteme, wenn als Alternative zu Oberleitungen architektonisch sensible Innenstadträume optisch nicht beeinträchtigt werden sollen [64], [65].

Den systemtechnisch wesentlichen Unterschied veranschaulicht Bild 89. Bei Straßenbahnen können die Stromschienen-Segmente so ausgelegt werden, dass ein Fahrzeug sie vollständig überdeckt. Die Segmente werden nur zugeschaltet, wenn sich ein Fahrzeug über ihnen befindet. Straßenfahrzeuge (Pkw, Lkw) sind vergleichsweise deutlich kürzer, sodass es technisch und wirtschaftlich nicht möglich ist, nach dem gleichen Überdeckungsprinzip kurze Stromschienenabschnitte zu installieren. Folglich wird beim Zu- und Abschalten der Segmente berücksichtigt, dass der Verkehr läuft und daher das Einschalten der Segmente nahe eines sich annähernden Fahrzeugs möglich ist, da nicht mit gefährlich dicht kreuzenden Fußgängern gerechnet werden muss. Dies stellt hohe Anforderungen an die sichere Erkennung des Verkehrsablaufs zur Ansteuerung der Segmente. Die Segmente und zugehörigen, laststromschaltfähigen Schaltelemente müssen trotz dieses geschwindigkeitsabhängigen Raumabstands deutlich zahlreicher als im Anwendungsfall „Straßenbahn“ sein und stellen hohe Anforderungen an die robuste Integration in den Straßenkörper [61].

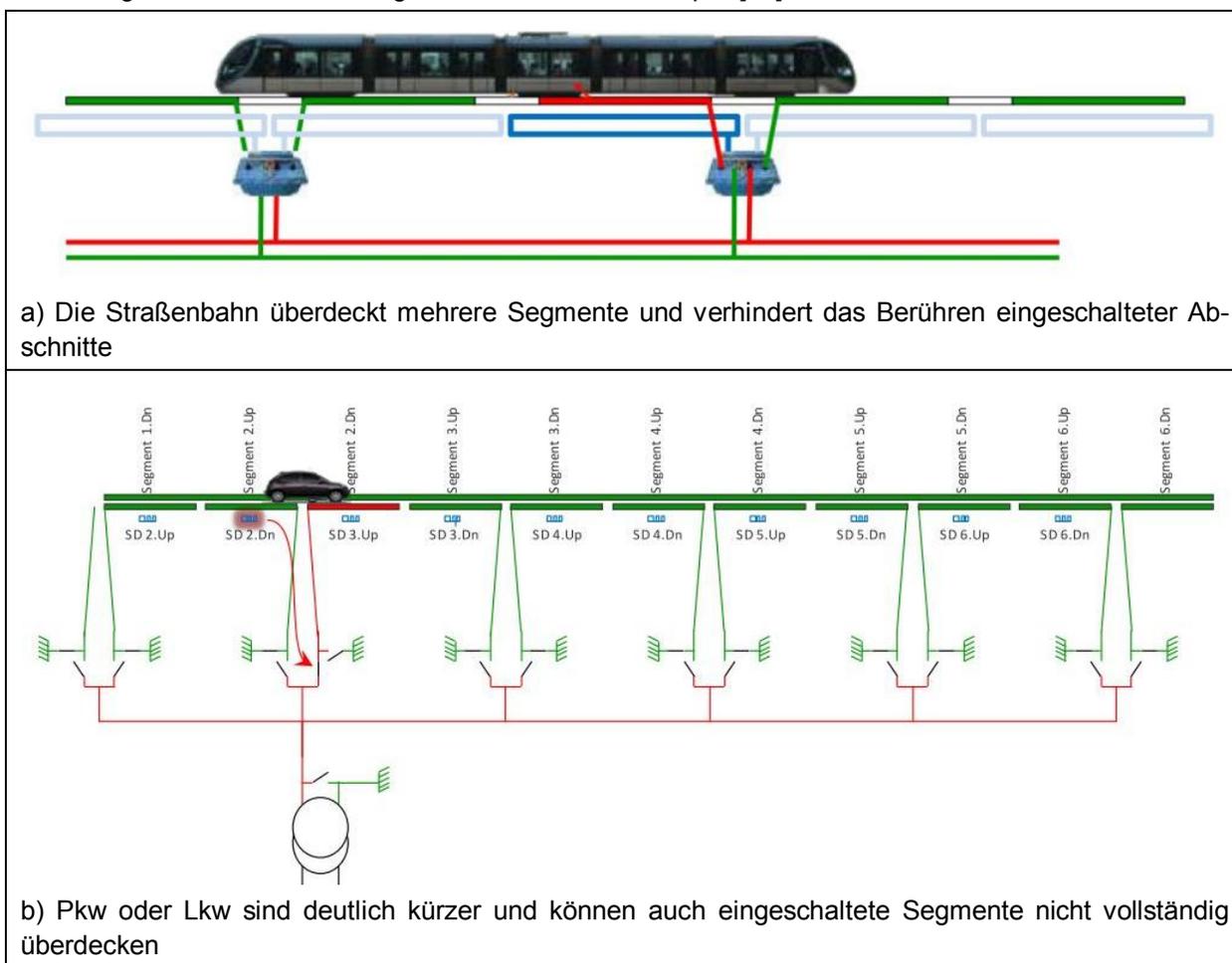


Bild 89 Vergleich APS-Technologie für a) Straßenbahn und b) Pkw [61]

Ein Versuchsaufbau zur Bewertung der Anwendbarkeit des Stromschienensystems wird in Schweden u. a. durch Volvo und Alstom betrieben und wurde durch die schwedische Verkehrsbehörde Trafikverket gefördert [61], s. Bild 90. Herausfordernde Schwerpunkte der Erprobung sind das Kontaktsystem, die unterbrechungsfreie Stromübertragung mit hoher Kontaktgüte, die Robustheit ggü. Witterungseinflüssen und Straßenbedingungen sowie das elektrische Schutzkonzept.

Erfahrungen aus Straßenbahnanwendungen belegen, dass u. a. durch die vielen Schaltspiele hohe Anforderungen an die Schaltelemente der Einzelsegmente gestellt werden. Wenn gegenüber Straßenbahnanwendungen mit Taktfolgen von max. 60 s im Pkw- oder Lkw-Verkehr die Fahrzeugfolgezeiten z. T. nur im Bereich weniger Sekunden liegen, nehmen diese Anforderungen deutlich zu.



Bild 90 Versuchsanordnung für ein Stromschienensystem für Lkw [61]

Induktive Energieübertragung über Spulensysteme

Bei der induktiven Energieübertragung wird durch eine Primärspule im Fahrweg ein pulsierendes Magnetfeld erzeugt, das im Folgeschritt in der Sekundärspule im Fahrzeug eine Spannung induziert, die einen Stromfluss antreibt. Anders als bei stationären Transformatoren kann das Magnetfeld nicht in einem Eisenkern geführt werden, da für die Fortbewegung Primär- und Sekundärspule mechanisch entkoppelt sein müssen. In solchen Anwendungsfällen ist der Wirkungsgrad der Energieübertragung maßgeblich von einer guten Überdeckung der Spulensegmente abhängig, um Streuungen des Magnetfelds zu verringern. Damit gilt ähnlich wie beim Stromschienensystem, dass die Fahrwegsegmente (Primärspulen) nicht deutlich größer als die Fahrzeugsegmente (Sekundärspulen) sein sollten.

Beim induktiven Nachladen von Bussen in Haltestellen wird in einzelnen Anwendungen zur Erhöhung des Wirkungsgrads im Stillstand die fahrzeugseitige Spule abgesenkt, um den Luftspalt zu verringern. Dabei kann der Wirkungsgrad der Übertragung bis auf 90 % erhöht werden [66]. Beim dynamischen Laden muss der Luftspalt größer bleiben und es entstehen durch die laufende Lageänderung von Fahrzeug zu Fahrweg größere Streufelder, sodass bei optimaler Abstimmung max. 85 % Wirkungsgrad der Energieübertragung (d. h. nicht des Gesamtsystems) erreicht werden [67]. Anders als bei den konduktiven Systemen mittels Stromschienen oder Oberleitungen konnte in den induktiven Konzepten bisher noch keine Rückspeisung fahrzeugseitig nicht benötigter Bremsenergie ins Versorgungsnetz realisiert werden, was sich wiederum ungünstig auf den Gesamtwirkungsgrad auswirkt.

Schwerpunkte der Anwendung der induktiven Energieübertragung sind Bussysteme. Dabei gibt es von KAIST in der als OLEV für On-line Electric Vehicle (dt. etwa: Elektrofahrzeug an der Leitung) bezeichneten Technologie mehrere Versuchsstrecken in Korea. Durch Kombination mit einem großen Energiespeicher auf dem Fahrzeug genügt es, nur ca. 15 % der urbanen Fahrstrecke mit einem Übertragungssystem auszustatten. Bezieht man die für Stadtbusse typischen Haltestellen, Endstellen und Halte an Kreuzungen ein, verringert sich der Bedarf an dynamisch, d. h. mit eher geringerem Wir-

kungsgrad übertragbarer Energie weiter. Die so ausgerüsteten Fahrspuren werden nur durch die Busse befahren, was wahrscheinlich eher auf betriebliche Gründe (Beschleunigung / Bevorrechtigung der Busse) und bauliche Gründe (Schonung des Fahrwegs) zurückzuführen ist. Bild 91 zeigt den Systemaufbau am Beispiel der OLEV-Technologie von KAIST [67].

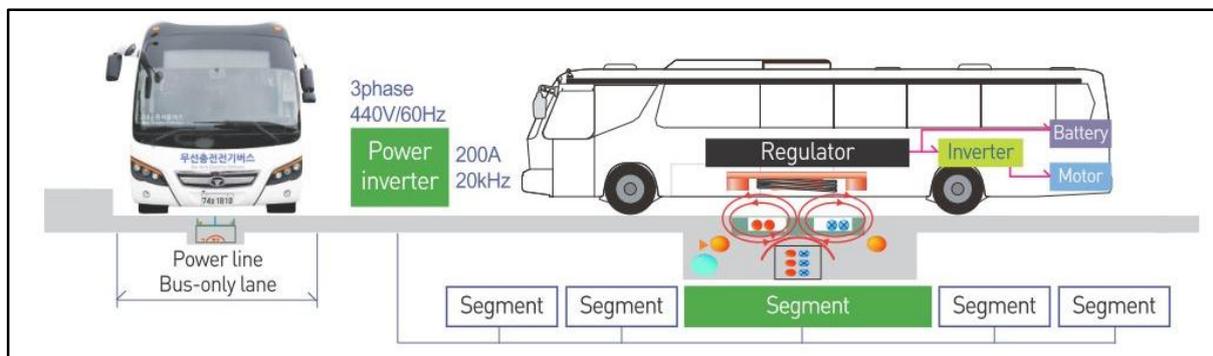


Bild 91 Induktive Energieübertragung am Beispiel OLEV von KAIST [67]

Für die Anwendung im Straßengüterverkehr wird die induktive Energieübertragung u. a. in Norwegen diskutiert und dort unter dem Projektnamen ELINGO für ELEktrisk infrastruktur for GOdstransport (dt. etwa: Elektrische Infrastruktur für den Güterverkehr) veranschaulicht. Ähnlich wie Schweden gibt sich Norwegen ambitionierte Klimaschutzziele, die auch im Verkehr umfassende Elektrifizierungsbemühungen begründen. Es wird diskutiert, die dynamische induktive Energieübertragung für Pkw und Lkw zu erproben, um im Quervergleich zu den praktischen Erfahrungen aus den schwedischen Projekten zur Energieübertragung mittels Stromschienen und Oberleitungen den geeignetsten technologischen Ansatz abzuleiten [68].

4.3 Internationalisierung der eHighway-Technologie

Die Internationalisierung der eHighway-Technologie bzw. der Energieversorgung von Lkw mittels Oberleitungen erfolgt sowohl durch den Aufbau von Erprobungsträgern in verschiedenen Anwendungsfällen als auch durch die Ausweitung der Analysen zum Aufbau elektrifizierter Netze.

Wachstumsmarkt Hafenhinterlandverkehr am Beispiel L. A.

Im August 2014 gab die Siemens AG bekannt, im Einzugsgebiet der Häfen von Long Beach und Los Angeles die eHighway-Technologie öffentlich zu erproben [69]. Zum Einsatz kommen verschiedene Fahrzeuge, die den Oberleitungsbetrieb mit einer großen Traktionsbatterie (s. Bild 92), einem CNG-Antrieb sowie einem konventionellen Diesel-Hybrid verbinden. Der Testbetrieb beginnt Anfang 2017.



Bild 92 Amerikanischer eHighway-Truck für den Betrieb bei L. A. auf der Versuchsstrecke

Erprobung des elektrischen LKW-Verkehrs in Schweden

Im Juni 2015 gab Siemens bekannt, zusammen mit Scania in einem von der schwedischen Verkehrsbehörde Trafikverket geförderten Demonstrationsprojekt einen Abschnitt der Autobahn E16 als eHighway auszurüsten und dort einen zweijährigen öffentlichen Versuchsbetrieb durchzuführen [70]. Die zwei Kilometer lange Fahrleitungsanlage wurde in sehr kurzer Zeit errichtet. Sondergenehmigungen seitens der Verkehrsbehörde Trafikverket waren nicht erforderlich. Die Betriebsaufnahme erfolgte im Juni 2016. Bild 93 zeigt eine der ersten Versuchsfahrten.



Bild 93 Aufbau der Fahrleitung im Feldversuch in Schweden

Ziel beider öffentlicher Erprobungen ist die Gewinnung von Felddaten aus dem Alltagsbetrieb zur Validierung der technischen, ökonomischen und ökologischen Vorteile des elektrifizierten Straßengüterverkehrs. Ebenso wichtig sind die Erfahrungen, die bei der Projektierung, Planung, Genehmigung und dem späteren Betrieb von eHighway-Systemen im öffentlichen Raum gewonnen werden können.

Sowohl in Schweden als auch in Kalifornien werden bereits Anschlussprojekte diskutiert, sodass mit einem fortgesetzten Interesse an der Technologie sowie ihrer weiteren Verbreitung zu rechnen ist.

Weitere europäische Initiativen - Frankreich, England, Österreich

Neben dem breiten Interesse an verschiedenen ERS-Technologien in Schweden (vgl. [61]) wurden umfangreiche Untersuchungen u. a. in folgenden Ländern durchgeführt und z. T. auch veröffentlicht:

- In England ließ der Fernstraßenbetreiber Highways England verschiedene Elektrifizierungstechnologien untersuchen. Die direkte, konduktive Energieübertragung wurde dabei vielversprechender als das induktive System bewertet [60].
- In Frankreich konzentrierte sich das Umwelt- und Verkehrsministerium in einer bisher unveröffentlichten Studie auf die Elektrifizierung von Autobahn-Achsen mit Oberleitung und kam zu einer positiven wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung [71].
- In Österreich wurden durch den Verein der Kraftfahrzeugtechnik unterschiedliche Fahrzeug- und Betriebsmodelle für den Einsatz elektrischer Zugmaschinen mit dem verkehrlichen Schwerpunkt auf den alpenquerenden Transitrouten untersucht [72].

4.4 Einordnung der Projektergebnisse des Verbundvorhabens

In Querschnittsuntersuchungen zu den technischen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen verschiedener Elektrifizierungskonzepte für den Straßengüterverkehr wird deutlich, dass für das Einsatzgebiet Lkw-Fern-Verkehr keine andere Technologie so weit entwickelt ist wie das Oberleitungssystem. Eine orientierende Einordnung der verschiedenen ERS-Technologien im Hinblick auf die Nähe zu kommerziell selbsttragenden Projekten und Anwendungen gibt Bild 94.

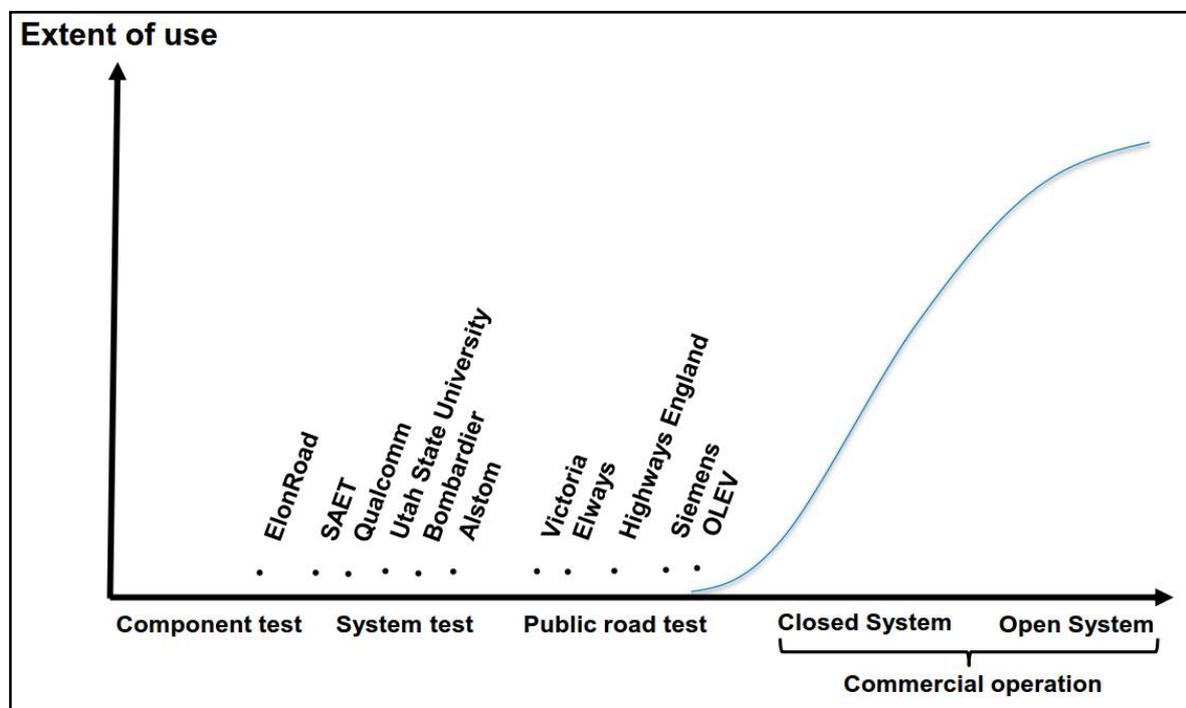


Bild 94 Einordnung der ERS-Technologien hinsichtlich der Einsatzreife [59]

Unter Beachtung der in Kapitel 3 ausführlich dargestellten Projektergebnisse lassen sich diese wie folgt thesenartig in den nationalen und internationalen Stand der Entwicklungen und Bewertungen im Bereich elektrischer Straßensysteme (ERS) einordnen:

- Das Projekt ENUBA 2 fokussierte auf eine interdisziplinär breite Entwicklung und Bewertung der effizientesten Elektrifizierungs-Technologie und verbreiterte dadurch die Wissensbasis für Aufbau, Betrieb und Bewertung der Energieversorgung von Lkw mit Oberleitungen.
- Das Oberleitungssystem ist in der Errichtung günstiger und lässt sich einfacher als die alternativen ERS-Technologien unter Beachtung der baulichen und betrieblichen Randbedingungen in den öffentlichen Straßenraum integrieren.
- Die Energieversorgung schwerer Lkw mittels Oberleitungen ist in nicht elektrifizierten Abschnitten kompatibel mit anderen elektrischen Fahrzeugtechnologien und konnte diese vorteilhafte Kombinationsfähigkeit in verschiedenen Fahrzeugkonzepten nachweisen.
- Die im Rahmen des Projekts ENUBA 2 weiterentwickelte Technologie erfährt breites internationales Interesse und trägt dazu bei, Deutschland auch im Bereich der Elektromobilität für schwere Nutzfahrzeuge als Entwicklungs- und Industriestandort zu etablieren.
- Die eHighway-Technologie wird als vielversprechend im Hinblick auf kommerziell selbsttragende Projekte eingeschätzt.
- Die Elektrifizierung des schweren Straßengüterverkehrs mittels Oberleitungen und unter betrieblichen Aspekten optimal konfigurierten Fahrzeugplattformen ermöglicht es, auch im Transportsektor die Senkungsziele der Treibhausgasemissionen zu erreichen.

5 Förderziele und Zukunftsaussichten

Die im Verbundforschungsvorhaben ENUBA 2 durchgeführten wirtschaftlichen, ökologischen und technologischen Untersuchungen tragen vielfältig zur Erfüllung der Förderziele im Rahmen des Programms „Erneuerbar Mobil“ bei, vgl. Kapitel 1.2 und [2].

Aus der Zusammenschau der in Kapitel 3 für alle Handlungsstränge detailliert dargestellten Forschungsergebnisse, der Einordnung der eHighway-Technologie in die internationalen Aktivitäten im Bereich ERS - Electric Road Systems (dt.: Elektrische Straßensysteme) in Kapitel 4.4 sowie der im Forschungsvorhaben ENUBA 2 geschaffenen Werte lassen sich zusammenfassend folgende Kernaussagen ableiten:

- Die im Verbundforschungsvorhaben ENUBA 2 weiterentwickelte und interdisziplinär bewertete eHighway-Technologie stellt eine aus wissenschaftlich-technischer Sicht fundiert abgesicherte Handlungsoption zur Dekarbonisierung des schweren Straßengüterverkehrs dar.
- Aus den Erfahrungen des Versuchsbetriebs sowie den Diskussionen mit potenziellen Anwendern und Technologiepartnern wird deutlich, dass zur Etablierung der Technologie einerseits weiterer Forschungsbedarf zur Optimierung des Gesamtsystems besteht, deren größte Herausforderungen die Schaffung günstiger und robuster Fahrzeugkomponenten für den Oberleitungsbetrieb sowie die Ausweitung der elektrischen Fahrleistung über die elektrifizierten Abschnitte hinaus sind.
- Andererseits sind die Gewinnung von Betriebsdaten und -erfahrungen in internationalen Demonstrationsprojekten und dem nationalen Feldversuch die nächsten Meilensteine, um zum einen die erwarteten Systemeigenschaften transparent nachweisen und zum anderen auch weitere Ansatzpunkte zur Erhöhung der für eine Breitanwendung notwendigen technologischen Reife erlangen zu können.
- Darüber hinaus sind sowohl die eHighway-Technologie als auch komplementäre und alternative Energieversorgungs- und Speichersysteme verstärkt in einen breiteren verkehrs-, energie- und klimapolitischen Diskurs einzubeziehen. Die dabei im verkehrs- und umweltpolitischen Handlungsraum der nächsten 5 - 10 Jahre festzulegenden Lösungsstrategien und Migrationspfade beeinflussen maßgeblich die Erreichung der Klimaziele in den Horizonten 2030 und 2050.

Diese Kernaussagen werden im Anschluss vertieft und skizzieren den technischen und anwendungsspezifischen Handlungsrahmen der nächsten Jahre für die Forschungen und Erprobungen zur Etablierung der eHighway-Technologie.

Technologischer Weiterentwicklungsbedarf und Förderbedarf

Wie bereits angerissen, ergaben sich sowohl aus den Entwicklungsarbeiten und Ergebnissen der Erprobung als auch aus den Dialogen mit Anwendern, Verbänden und Industriepartnern wesentliche Anknüpfungspunkte zur Weiterentwicklung und Optimierung. Sie bestätigen übereinstimmend den Wert und die Richtigkeit der bisher erreichten Entwicklungsschritte und machen aber trotzdem deutlich, dass nachfolgend weitere wesentliche Fragen beantwortet werden müssen:

- In welchen Betriebs-Szenarien lassen sich die Einsatzprofile schwerer Nutzfahrzeuge zusammenfassen, die dann die Basis zur Ableitung von Infrastruktur- und Fahrzeugkonfigurationen bilden, mit denen die Fahrleistungen vollständig oder zumindest sehr weitreichend elektrisch erbracht werden können?
- Wie sieht eine hinsichtlich mehrerer Kriterien optimierte Systemauslegung von Energieversorgungssystem, Antriebssystem und Energiespeichern zur Abdeckung der zuvor identifizierten Referenzszenarien aus?
- Wie lässt sich der Stromabnehmer einfacher, robuster und günstiger gestalten, sodass er eine selbstverständliche Komponente zukünftiger elektrifizierter oder hybridisierter Nutzfahrzeuge wird und von den auch im Nutzfahrzeugbereich immer umfassenderen Assistenz- und Automatisierungslösungen profitiert?

Die systematische Beantwortung dieser Fragen bildet den Kern des Forschungs- und Entwicklungsprojekts ELANO - Elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge an Oberleitungen, mit dem sich die Siemens AG um Fördermittel entsprechend der Förderbekanntmachung vom Herbst 2015 bewarb [73].

eHighway - Feldversuch in Deutschland und internationale Erprobung

Auf Basis der Ergebnisse des Projekts ENUBA und der Zwischenergebnisse des Verbundforschungsvorhabens ENUBA 2 gaben im Herbst 2014 das BMUB im „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020“ [74] und das BMWi im Strategiepapier „Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz“ [75] bekannt, einen öffentlichen Feldversuch zur weiteren Erprobung des Betriebs elektrischer Lkw an einer Oberleitung durchführen zu wollen. Daraufhin enthielt die Neuauflage des Förderprogramms „Erneuerbar Mobil“ neben anderen Förderzielen die konkrete Benennung eines Feldversuchs zur Erprobung der ENUBA-Technologie. Gegenstand der Förderung sind [73]:

- Realisierung einer Pilotstrecke zur Energieversorgung elektrisch angetriebener schwerer Nutzfahrzeuge via Oberleitung im öffentlichen Straßenraum sowie eines realitätsnahen, elektrischen Betriebs dieser Fahrzeuge an der Oberleitung
- Erforschung aller relevanten verkehrs- und energietechnischen, ökologischen und ökonomischen Aspekte, die für einen späteren Ausbau des Systems relevant sind
- Untersuchung von Funktionalität und Zuverlässigkeit der neuen Fahrzeug- und Infrastruktursysteme im Realbetrieb

Zur Abgabe von Projektskizzen wurden insbesondere Gebietskörperschaften aufgerufen [73]. Nach Sichtung und Bewertung der eingereichten Vorschläge ist im Laufe des Jahres 2016 mit der Aufforderung der Gebietskörperschaften durch den Fördermittelgeber zur Detaillierung einzelner Skizzen als vollständige Projektanträge zu rechnen.

Mit dem Feldversuch in Deutschland auf einer öffentlichen Straße werden die bereits international begonnen Demonstrationsprojekte in kleinen Pilotanwendungen vertieft, vgl. auch Kapitel 4.3. Dabei fördert zum einen die schwedische Verkehrsbehörde Trafikverket die Errichtung und den Probetrieb auf einem 2 km langen Abschnitt der E16 nördlich von Stockholm mit Betriebsaufnahme im Juni 2016. Projektpartner sind Siemens für die Infrastruktur und Scania für die Hybrid-Lkw.

Zum anderen erfolgt zum Jahresbeginn 2017 der Beginn des Testbetriebs auf einem 1,4 km langen in beide Richtungen elektrifizierten Abschnitt eines Güterkorridors im Großraum Los Angeles. Die Infrastruktur wird von Siemens errichtet und als Fahrzeugpartner agieren der lokale Sonderfahrzeugumrüster Transpower sowie die Volvo-Tochterfirma Mack.

Verkehrspolitischer Handlungsbedarf - Technologie und Transformation

Während sich der technologische Lösungsraum für schwere Nutzfahrzeuge durch die Förderprojekte klarer abzeichnet, wächst der verkehrs- und umweltpolitische Handlungsdruck, wenn die Klimaschutzziele zumindest in den Horizonten 2030 und 2050 auch im Verkehrssektor erreicht werden sollen. Dies wird mit Verweis auf Bild 95 besonders deutlich, da anders als in den anderen Sektoren im Verkehrsbereich bisher keine Senkung der CO₂-Emissionen gegenüber 1990 erzielt wurde und das 40%-Senkungsziel bis 2020 in diesem Sektor wahrscheinlich verfehlt wird [76].

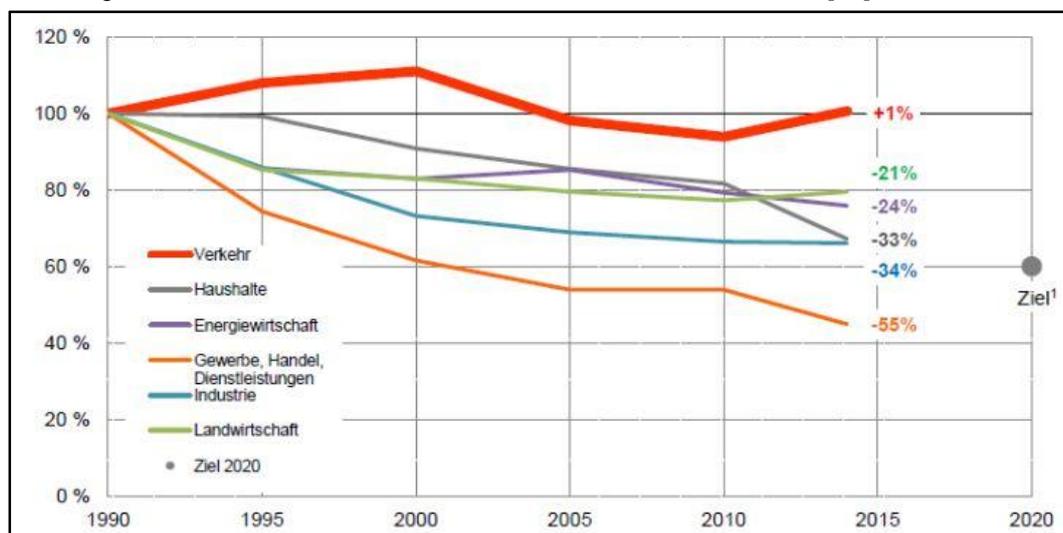


Bild 95 Veränderung CO₂-Emissionen ab 1990 nach Sektoren [76]

Bild 95 zeigt, dass die seit 1990 erzielten Verbesserungen in der Effizienz der Antriebssysteme und der Optimierung der Logistikketten durch Änderungen im Verkehrsmarkt überdeckt und durch das Wachstum der Verkehrsleistung überkompensiert wurden.

Es kommt also darauf an, die durch den Verkehr verursachten Umweltbelastungen stärker als bisher vom angestrebten Wirtschaftswachstum, das als Grundlage von Wohlfahrt und Lebensqualität angesehen wird, zu entkoppeln. Dies wird umso wichtiger, da auch zukünftig von einem wachsenden Verkehrsaufkommen auszugehen ist. So nimmt die Verflechtungsprognose 2030, die die Basis der Neuauflage des Bundesverkehrswegeplans bildet, eine Zunahme der Güterverkehrsleistung auf der Straße von 40 % bis 2030 an [77].

Nach [78] kommen als Ansatzpunkte zur Entkopplung sowohl die Aufkommenseite, also die Verkehrsnachfrage, als auch die Umweltwirkungen der nachgefragten Verkehrsaktivitäten in Betracht. Bild 96 verdeutlicht die möglichen Ansätze.

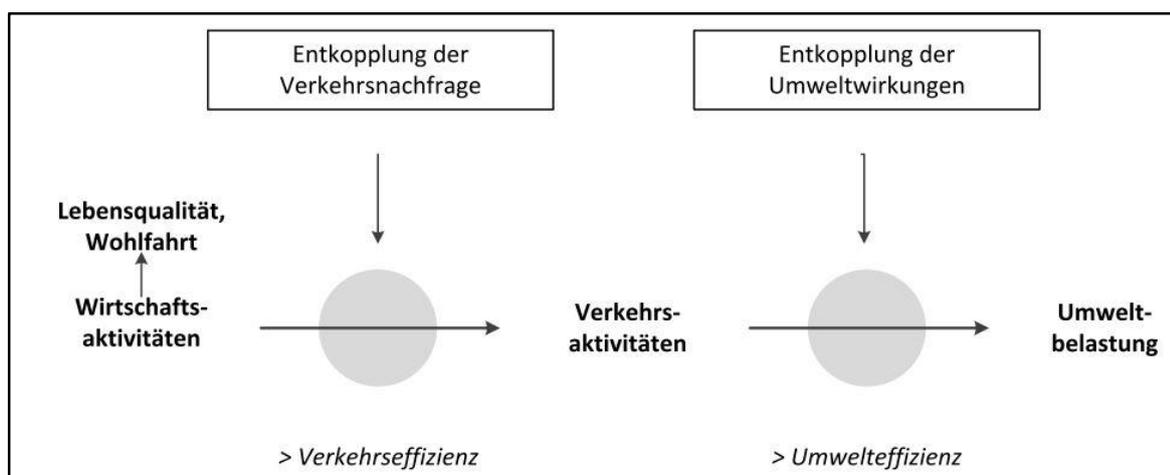


Bild 96 Entkopplungsstrategien im Verkehrsbereich [78]

Das mit den Projekten ENUBA und ENUBA 2 entwickelte System zur Versorgung hybridisierter Lkw mit Traktionsenergie über Oberleitungen und Stromabnehmer stellt für den schweren Straßengüterverkehr eine Schlüsseltechnologie zur deutlichen Reduzierung der verkehrsbedingten Umweltwirkungen dar [79].

Das UBA betrachtet die direkte Nutzung von Strom aus der Oberleitung in Bezug auf Treibhausgasemissionen und Kosten als günstigste Alternative gegenüber anderen postfossilen Energieversorgungsoptionen [62]. In weiterführenden Studien des Öko-Institut wird abgeschätzt, dass durch den weitreichenden Einsatz oberleitungsgebundener Fahrzeuge zusammen mit anderen Maßnahmen bis 2050 die Treibhausgasemissionen ggü. 1990 um 85 % gesenkt werden können [63].

Während also über die umwelt- und klimapolitischen Ziele und Lösungsstrategien bereits Klarheit besteht, müssen im nächsten Schritt die alternativen Antriebs- und Energieversorgungssysteme in die Verkehrspolitik und -planung eingebettet werden. Dabei sind Planung, Errichtung und Betrieb von Verkehrsinfrastrukturen durch lange Verfahrens- und Realisierungszeiten gekennzeichnet, sodass für die Erreichung der angestrebten Emissionssenkungen im Straßengüterverkehr zugeschnittene Migrationspfade erarbeitet werden müssen [80].

Aufeinander abgestimmte, strategisch wirkende Schlüsselinstrumente der Verkehrsplanung sind dabei der Bundesverkehrswegeplan und die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie - MKS[81]. Letztere ist als lernende, diskursive Strategie zur Vernetzung von Expertenwissen und Bewertung von Lösungsansätzen konzipiert, vgl. [81]. Der „Aktionsplan Güterverkehr und Logistik“ [82] nutzt die MKS als Studien- und Analyseinstrument, um systematisch verschiedene Technologien zur Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge zu untersuchen und strebt an, über Förderprogramme und Pilotprojekte die Marktchancen alternativer Kraftstoff- und Antriebssysteme sowie langfristiger Elektrifizierungstechnologien zu erhöhen. Dabei werden 2016 in einem Dialog- und Beteiligungsverfahren auch die Potenziale der Elektrifizierung des schweren Straßengüterverkehrs mittels Oberleitungen und der Kombination mit Traktionsbatterien bewertet [83].

6 Anhang

6.1 Abkürzungen

AC	en.: alternating current, dt.: Wechselstrom
AE	en.: acoustic emission, dt.: Akustische Diagnose
AfA	Absetzungen für Abnutzungen (handelsrechtlich Abschreibungen)
APS	fr.: alimentation par le sol, dt.: Versorgung über den Boden
AN	Antriebssystem (incl. Fahrzeug)
ANPR	en.: automatic number plate recognition, dt.: automatische Kennzeichenerkennung
BAB	Bundesautobahn
BAM	Bundesanstalt für Materialprüfung
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEV	Bahnenergieversorgung
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
<i>BMU</i>	<i>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (bis 2013)</i>
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (ab 2013)
<i>BMVBS</i>	<i>Bundesministerium für Verkehr, Bauen und Stadtentwicklung (bis 2013)</i>
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (ab 2013)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft
BOKraft	Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr
CAN	en.: controller area network, dt.: gesteuertes Datennetz
CMS	en.: contact line monitoring system, dt.: Fahrleitungsüberwachungssystem
cRSP	en.: Common Remote Service Platform; dt.: gemeinsame Fernwartungsumgebung
DC	en.: direct current, dt.: Gleichstrom
DE	dieselelektrisch
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EE	Erneuerbare Energien
EFK	Elektrofachkraft
ELFA	Elektrische Fahrzeug-Antriebe (modulares elektrisches Hybridantriebssystem für Nutzfahrzeuge, Produktfamilie der Siemens AG)
ELANO	Elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge an Oberleitungen
ENUBA	Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
ERS	en.: electric road systems, dt.: Elektrifizierte Straßenverkehrssysteme
FBS	Fernbereichssensorik
FEM	Finite Elemente Methode
FL	Fahrleitung
FNB	Fahrstromnetzbetreiber

FSN	Fahrstromnetz
FMEA	en.: Failure Mode and Effects Analysis, dt.: Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse
(G)Uw	(Gleichrichter-)Unterwerk
HGÜ	Hochspannung-Gleichstrom-Übertragung
HMI	en.: human machine interface, dt.: Mensch-Maschine-Schnittstelle (zur Bedienung und Anzeige)
HTE	en.: hybrid truck equipment, dt.: Zusatzausrüstung für Hybrid-Lkw
HW	Hardware
IBS	Inbetriebsetzung
IGBT	en.: insulated-gate bipolar transistor, dt.: <i>ohne Übersetzung</i> (ein besonderes leistungselektronisches Halbleiterbauelement)
IF	Interface
Ifeu	Institut für Energie und Umwelt
IKEM	Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. V.
IPS	en.: inductive power supply, dt.: Induktive Energieübertragung
IWES	(Fraunhofer-) Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
KEA	Kumulierter Energieaufwand
LBST	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (Forschungs- und Beratungsinstitut)
Lkw	Lastkraftwagen
LOB	Linke OEM-Box
MoRoS	en.: Modem Router Switch, dt.: Modem-Router-Schalter
NBS	Nahbereichssensorik
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NVC	en.: non-visible contact line, dt.: unsichtbare Fahrleitung
OBM	en.: on-board meter, dt.: fahrzeugseitiges Messgerät
OEM	en.: original equipment manufacturer, dt. etwa: <i>Hersteller und Inverkehrbringer</i>
OH-Lkw	Oberleitungs-Hybrid-Lkw
OH-System	System zum Einsatz von Oberleitungs-Hybrid-Lkw
OLEV	en.: on-line electric vehicle, dt. sinngemäß: permanent versorgtes Elektrofahrzeug
OLI	Oberleitungsinfrastruktur
OLSP	Oberleitungsspannungsprüfeinrichtung
PAN	Pantograph (Stromabnehmer)
PEM	permanenterregte Synchronmaschine
PM	Projektmanagement
PSP	Projektstrukturplan
QR	en.: quick response, dt. etwa: Schnellantwort (vor allem in Verbindung mit bestimmte Strichcodes, sog. QR-Codes)
RPB	Rechte PAN-Box
rpm	en.: revolutions per minute, de.: Umdrehungen pro Minute

SA	Stromabnehmersystem
SCADA	en.: supervisory control and data acquisition, dt.: Fernsteuertechnik und Datensammlung
Sitras	en.: Siemens Traction Automation System, dt.: ohne Übersetzung (Produktfamilie der Siemens AG für Bahnenergierversorgungskomponenten)
Sitras RSC	en.: Sitras Rail SCADA, dt. etwa: Sitras Scada-System für Bahnanwendungen (Produkt der Siemens AG)
SOC	State Of Charge
STVZO	Strassenverkehrszulassungsordnung
SV	Stromversorgungssystem
SW	Software
SZM	Sattelzugmaschine
TEU	en.: Twenty-foot Equivalent Unit, dt.: ohne Übersetzung (standardisierte Containereinheit à 20 Fuß Länge)
TMS	Technisches Monitoring System
TOF	en.: time of flight, dt.: Signallaufzeit
Tphpd	en.: Trucks per hour per direction, dt.: LKW pro Stunde und Richtung
TPL	Teilprojektleiter
TRL	Transport Research Laboratory
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UBA	Umweltbundesamt
ÜKD	Überkopfdetektor
VPM	en.: Voltage Protection Module, dt.: Spannungsschutzmodul
V2I	en.: vehicle to infrastructure, dt.: Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation
VQS, 4QS	Vierquadrantensteller
WLAN	en.: Wireless Local Area Network, dt.: drahtloses Datennetzwerk
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

6.2 Quellen

- [1] Siemens AG, I MO CT IMS: ENUBA – Abschlussbericht der Siemens AG, FKZ: 16EM0077. Erlangen, 2011 (unveröffentlichter Abschlussbericht)
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.]: Bekanntmachung über die Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität. Berlin, 2011
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [Hrsg.]: Mobilität und Verkehrstechnologien - Das 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung. Berlin, 2008
- [4] Die Bundesregierung [Hrsg.]: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin, 2009
- [5] Die Bundesregierung: Regierungsprogramm Elektromobilität der Bundesregierung. Hrsg.: BMWI, BMVBS, BMU, BMBF. Berlin, 2011
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [Hrsg.]: Mobilität und Verkehr - Nachhaltigkeit, Sicherheit und Wettbewerbsfähigkeit durch intelligenten Verkehr. Berlin, 2007
- [7] <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/aktuelles/bundesregierung-waehlt-leuchtturmprojekte-der-elektromobilitaet>
- [8] Biesenack, H. u. a.: Energieversorgung elektrischer Bahnen. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2006
- [9] Bendel, H. u. a.: Die elektrische Lokomotive - Aufbau, Funktion, Neue Technik. transpress Verlag GmbH, Berlin, 1994
- [10] Schnieder, E. [Hrsg.]: Verkehrsleittechnik - Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs. Springer Verlag, Berlin – Heidelberg, 2007
- [11] Technische Universität Dresden: Projektabschlussbericht ENUBA 2. Dresden, Juli 2015
- [12] DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik: Projektabschlussbericht ENUBA 2. Braunschweig, Juni 2015
- [13] FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [Hrsg.]: RAA – Richtlinien für die Anlage von Autobahnen. Köln, 2008
- [14] FGSV - – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): RPS – Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme. Bergisch Gladbach, 2009
- [15] BMVBW (Hrsg.): ASR - Technischen Regeln für Arbeitsstätten an Straßenbaustellen
- [16] FGSV (Hrsg.): RSA - Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. 6. Auflage, Oktober 2002
- [17] BMVBW (Hrsg.): Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen, Version 1.1. Bonn, Dezember 2004
- [18] DIN VDE 0105-100: Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 100: Allgemeine Festlegungen. Oktober 2009
- [19] Siemens AG und TU Dresden (Hrsg.): Ökonomische und ökologische Bewertung eines Oberleitungs-Hybrid-Systems für schwere Nutzfahrzeuge - Ergebnisbericht. Dresden / München, Oktober 2014. (interner Bericht)
- [20] BMUB (Hrsg.): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - Schlussbericht. DLR, Fraunhofer, IWES, IfnE. Stuttgart, 2012.
- [21] IKEM: Rechtliche Aspekte der Elektrifizierung von Autobahnen als E-Highway, Tangierte Rechtsbereiche national – Identifikation rechtlicher Barrieren - 2. Teil. IKEM – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität, Berlin, 2014 (interner Bericht)
- [22] Den Boer, E. (CE Delft); Aarnink, S. (CE Delft); Kleiner, F. (DLR); Pagenkopf, J. (DLR): Zero emissions trucks - An overview of state-of-the-art technologies and their potential. CE Delft, Delft, July 2013
- [23] Öko-Institut (Hrsg.): Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen - Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO₂-Minderung. Abschlussbericht im Auftrag der Begleitforschung zum BMWi-Förderschwerpunkt „IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic“. Berlin, Februar 2015
- [24] Lehmann, M.: Grundlagen und Anforderungen an die Teilsysteme elektrischer Bahnen bei Nennspannungen über 25 kV AC und 3 kV DC. Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, 2009, Dissertation.

- [25] Birkel, A.: Energiebedarf und Wirkungsgrad im elektrischen Straßengüterverkehr. Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik, 2014, Masterarbeit.
- [26] Siemens AG, MO TPE SE: ENUBA 2 – Messbericht für den Demonstrator im Förderprojekt ENUBA.. Erlangen, 2015 (interner Bericht)
- [27] Bühs, F.; Dietrich, K.; Deutzer, M.; Keil, G.; Lehmann, M.: Untersuchung eines Stromabnehmers für schwere Nutzfahrzeuge. In: eb - Elektrische Bahnen, Jg. 111 (2013) H. 11, S. 657ff
- [28] Meis, C.; Lehmann, M.; Lienkamp, M.; Spiegelberg, G.: Development, Parameterization and Verification of a Series Hybrid Vehicle Model to investigate Energy Management Strategies. In: CoFAT– Conference on Future Automotive Technology, München, 2014. (Konferenzbeitrag)
- [29] Höpke, E.: Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten. 7. Auflage. 2013. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2013
- [30] Birkel, A.; Hergenhan, C.; Lehmann, M.; Meis, C.: Energiebedarf und Wirkungsgrad im elektrischen Straßengüterverkehr. VWT - Verkehrswissenschaftliche Tage, Dresden, 2014. (Konferenzbeitrag)
- [31] Altmann, M.; Elschner, K.: Energy efficiency in traction power supply for main lines – European Project Rail Energy. In: eb – Elektrische Bahnen, Jg. 107 (2009), H. 4/5
- [32] Elways AB.: <http://elways.se> (Abruf am 18.02.2013)
- [33] TRL - Transport Research Laboratory (Hrsg.): Feasibility analysis and development of on-road charging solutions for future electric vehicles, Task 3.3.1 - Review of existing power transfer solutions. Final report, Brüssel, 2014
- [34] Oertel, W.: Elektrischer Schnellverkehr mit Oberleitungs-Omnibussen auf der Reichsautobahn. In: VtW - Verkehrstechnische Woche, Jg. 30 (1936), H. 3.
- [35] Eckardt, T.: Technische und wirtschaftliche Einsatzpotenziale für den Betrieb kommunaler Nutzfahrzeuge an vorhandenen Oberleitungsinfrastrukturen. Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List". Dresden, 2013. (Diplomarbeit)
- [36] DESTATIS (Hrsg.): Boom bei Linienfernbusen 2013 - Von 3 auf 8 Millionen Fahrgäste. Pressemitteilung des Statistischen Bundesamtes, Wiesbaden, 8. Oktober 2014
- [37] Siemens (Hrsg.): Elektrobuss der Wiener Linien - 12 Midibusse für den Innenstadtbereich. Berlin, 2012 (Produktinformation)
- [38] StVZO – Straßenverkehrs-Zulassungsordnung (zuletzt geändert durch Art. 3 V v. 21.4.2009)
- [39] Wölfel, L.: Untersuchung eines Fahrerassistenzsystems für einen Lkw. Westsächsische Hochschule Zwickau, Fakultät Elektrotechnik, 2014, Diplomarbeit
- [40] Mielke, O.: Monitoring von Fahrleitungen elektrifizierter Eisenbahn- und Straßengüterstrecken. Technische Universität Dresden, Professur Elektrische Bahnen, Diplomarbeit, 2014.
- [41] Angerer, G. u. a.: Kupfer für Zukunftstechnologien - Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Fraunhofer ISI - Systemforschung Elektromobilität FSEM, Karlsruhe, 2010
- [42] Harder, J.: Analyse und Bewertung von Energiebedarfsprofilen im elektrischen Straßengüterverkehr zur Versorgung durch Erneuerbare Energien. Technische Universität Berlin, Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme. Berlin, 2014, Diplomarbeit
- [43] IWES Fraunhofer [Hrsg.]: Projekt Agora Energiewende - Erzeugungsdaten für ausgewählte Wochen aufgeteilt nach Energieträger. Kassel, 2013.
- [44] Stier, J.: Bestimmung des Vorbeifahrtgeräusches elektrisch / dieselektrisch angetriebener Lkw im Rahmen des Projekts „ENUBA 2“ und Vergleich mit Messungen aus „ENUBA“. Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen - Professur für Dynamik und Mechanismentechnik, 2015.
- [45] Infras [Hrsg.]: HBEFA 3.1: Handbook Emission Factors for Road Transport. Bern, 2010.
- [46] DB Energie GmbH [Hrsg.]: Regelungen für den Zugang zum Bahnstromnetz der DB Energie GmbH - Abschluss des Konsultationsverfahrens. Frankfurt / Main, Dezember 2012.
- [47] EnWG: Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Februar 2013 (BGBl. I S. 346) geändert worden ist.
- [48] Pintscher, F.: Kontaktvorgänge und Verschleißverhalten des Systems Fahrdrabt-Schleifleiste. Technische Universität Dresden, Institut für Elektrische Verkehrssysteme, Dissertation. Dresden, 2003.
- [49] DIN EN 50206-2: 2011-02: Bahnanwendungen – Schienenfahrzeuge – Merkmale und Prüfungen von Stromabnehmern. Teil 2: Dachstromabnehmer für Stadtbahnen und Straßenbahnen.

- [50] Kießling, F. u. a.: Fahrleitungen elektrischer Bahnen - Planung, Berechnung, Ausführung. Publicis Verlag, Erlangen, 2014.
- [51] Glück, M.: ENUBA Diagnosesystem Stromabnehmer, Bericht zum Feldtest. fos4X, April 2014. (interner Untersuchungsbericht)
- [52] Terfloth, S.: 2014-EB-004-1 - Untersuchung des Zusammenwirkens von Stromabnehmer und Oberleitung im Forschungsprojekt ENUBA 2. Technische Universität Dresden, Professur Elektrische Bahnen, 2014.
- [53] DIN EN 50367: Bahnanwendungen – Zusammenwirken der Systeme – Technische Kriterien für das Zusammenwirken zwischen Stromabnehmer und Oberleitung für einen freien Zugang. November 2006.
- [54] BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [Hrsg.]: Die Klimakonferenz in Paris. Berlin, 2015. Online unter: <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/?type=98>
- [55] UBA - Umweltbundesamt [Hrsg.]: UBA-Emissionsdaten zeigen Trendwende beim Klimaschutz. Presseinfo Nr. 14 vom 31.03.2015, Dessau-Roßlau. Online unter: <http://www.umweltbundesamt.de/dokument/presse-information-142105>.
- [56] European Environment Agency - EEA [Hrsg.]: Energy consumption by transport mode in the EU-27. Brüssel, 2016. Online unter: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/consumption-by-mode-eu-2>
- [57] European Commission – DG Climate Action [Hrsg.]: Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy. Brüssel, 2011. Online unter: http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/docs/ec_hdv_ghg_strategy_en.pdf
- [58] Transport & Environment - T&E: Too big to ignore – truck CO₂ emissions in 2030. Brüssel, September 2015. Online unter: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2015%2009%20TE%20Briefing%20Truck%20CO2%20Too%20big%20to%20ignore_FINAL.pdf
- [59] Sundelin, H.; Tongur, S.: The Electric Road System - Transition from a system to a System-of-Systems. Draft for peer review. Stockholm, 2016. (unpublished)
- [60] Highways England Company Ltd. [Hrsg.]: Feasibility study - Powering electric vehicles on England's major roads. London, 2015. Online unter: <http://assets.highways.gov.uk/specialist-information/knowledge-compendium/2014-2015/Feasibility+study+Powering+electric+vehicles+on+Englands+major+roads.pdf>
- [61] Victoria Institut - Swedish ICT [Hrsg.]: Slide-in Electric Road System, Conductive project report - Phase 1. Gothenburg, 2015. Online unter: https://www.viktoria.se/sites/default/files/pub/www.viktoria.se/_upload/publications/slide-in_conductive_project_report_phase_1_1.pdf
- [62] UBA - Umweltbundesamt [Hrsg.]: Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050 - Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung. Aus der Reihe: UBA-Texte, 30/2015. Redaktion: Fachgebiet I 3.1 Umwelt und Verkehr. Dessau-Roßlau, April 2015.
- [63] Öko-Institut e. V.: eMobil 2050 - Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. Endbericht zu den Forschungsvorhaben UM 11 96 106 und 16 EM 1001. Berlin, 2014.
- [64] Groneck, C.: Neue Straßenbahnsysteme in Frankreich - Die Wiederkehr eines urbanen Verkehrsmittels. EK-Verlag, Freiburg, 2008.
- [65] Wikipedia: Ground-level power supply. Abgerufen am: 27.05.2016. Online unter: https://en.wikipedia.org/wiki/Ground-level_power_supply
- [66] Schnieder, L. u. a.: Minimale Belastung elektrischer Netze durch Ladevorgänge von Elektrobussen. In: 25. Verkehrswissenschaftliche Tage. Dresden, 2016.
- [67] KAIST [Hrsg.]: OLEV Transport System. Munji-ro (Korea), 2013. Online unter: http://www.smfir.co.kr/20120323/sub02/KAIST_OLEV_eng_201310.pdf
- [68] Rise, T.: ELinGO - ELEktrisk infrastruktur for GODstransport. SINTEF Byggforsk Konferansen Transportforskning. Oslo, 2016. Online unter: <http://www.forskningsradet.no/servlet/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-Disposition&blobheadervalue1=+attachment%3B+filename%3D%22TFKsesjonB.4TorunRise.pdf%22&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1274507883337&ssbinary=true>. Video online unter: <http://blog.sintefenergy.com/energysystemer/elingo-elektrisk-infrastruktur-for-godstransport/>

- [69] Siemens AG [Hrsg.]: Siemens tests eHighway system in California. Pressemitteilung vom 06.08.2014. München, 2014. Online unter: <http://www.siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/2014/infrastructure-cities/mobility-logistics/ICMOL20140812e.pdf>
- [70] Siemens AG [Hrsg.]: Siemens builds first eHighway in Sweden. Pressemitteilung vom 04.06.2015. München, 2015. Online unter: <http://www.siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/2015/mobility/PR2015060246MOEN.pdf>
- [71] MEDDE - Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie: Le concept d'autoroute électrique pour le transport de marchandises. Paris, 2016. (unveröffentlichte Präsentation)
- [72] Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik - ÖVK: Potenziale und Kosten der Elektrifizierung des schweren Nutzfahrzeugverkehrs. Wien, 2016.
- [73] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [Hrsg.]: Richtlinien zum Förderprogramm „Erneuerbar Mobil“ zur Förderung von Vorhaben im Bereich der Elektromobilität vom 23.Oktober 2015. Berlin, 2015.
- [74] BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [Hrsg.]: Aktionsprogramm Klimaschutz 2020. Berlin, 2014.
- [75] BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [Hrsg.]: Mehr aus Energie machen - Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz. Berlin, 2014.
- [76] Canzler, W.: Mobilität und Verkehr im Jahr 2025 - Auf die Zukunft gut vorbereitet? Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Forschungsgruppe Wissenschaftspolitik, Projektgruppe Mobilität. Vortrag auf: Auftaktveranstaltung des „BMVI-Expertenetzwerks Wissen-Können-Handeln“, Berlin, April 2016.
- [77] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [Hrsg.]: Verflechtungsprognose 2030. Berlin 2014.
- [78] UBA - Umweltbundesamt [Hrsg.]: Entwicklung von Indikatoren im Bereich Mobilität für die Nationale Nachhaltigkeitsstrategie. Forschungsbericht der TU Dresden (Fachbereich Verkehrsökologie) im Auftrag des UBA, Fachgebiet I 3.1 Umwelt und Verkehr. Dessau-Roßlau, Februar 2015.
- [79] UBA - Umweltbundesamt [Hrsg.]: Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung Diskussionsbeitrag des Umweltbundesamtes. Redaktion: Fachgebiet I 2.2 Energiestrategien und -szenarien. Dessau-Roßlau, April 2016.
- [80] Leerkamp, B.: Transformationsforschung für einen nachhaltigen Güterverkehr - Die Suche nach Wegen durch den Komplexitätsdschungel. Bergische Universität Wuppertal, Lehr- und Forschungsgebiet Güterverkehrsplanung und Transportlogistik. Vortrag auf der Konferenz: 25. Verkehrswissenschaftliche Tage 2016. Dresden, März 2016.
- [81] BMVBS - Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [Hrsg.]: Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) - Energie auf neuen Wegen. Berlin, 2013.
- [82] BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [Hrsg.]: Aktionsplan Güterverkehr und Logistik - nachhaltig und effizient in die Zukunft. Berlin, 2015.
- [83] BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [Hrsg.]: Fachworkshop „Hybrid-Oberleitungs-Lkw: Potenziale zur Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs“. Berlin, 2016. Online: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/mks-fachworkshop-hybrid-oberleitungs-lkw.html>

6.3 Abbildungsverzeichnis

Bild 1	Antriebs- und Energieversorgungskonzepte für den Straßengüterverkehr	11
Bild 2	Schwerpunkte der Bewertung und Konzeption für Erstanwendungen	14
Bild 3	Weiterentwicklung von Stromabnehmer und Fahrzeug von ENUBA nach ENUBA 2.....	15
Bild 4	Kurvenförmiger Verlauf von Fahrleitung und Fahrbahnmarkierung (© Scania).....	16
Bild 5	Lastzüge zur Ermittlung mittlerer Verbrauchskennwerte und äquivalenter Energiebedarfe	17
Bild 6	Systemaufbau des elektrifizierten Güterverkehrs und wesentliche Wechselwirkungen.....	20
Bild 7	Verkehrsraum und lichter Raum (nach RAA [13], Maße in m).....	22
Bild 8	Höhersetzen der Ausleger zur Verbesserung der Sichtbarkeit (oben) und auf Teilflächen basierendes Verfahren zur Beurteilung von Verdeckungen (unten)	23
Bild 9	Automatisierte Erdungsanlage mit a) Bedientableau und angetriebenem Erdungstrenner sowie b) aktiviertem Arbeitsgrenzschild.....	24
Bild 10	Beispieldatensatz der Fahrdrahtanhubmessung auf der Versuchsanlage	25
Bild 11	Crash-Situationen und Kontaktzonen einer Sattelzugmaschine mit Stromabnehmer.....	26
Bild 12	Beteiligte Partner und Rollen bei der ökonomisch-ökologischen Bewertung	28
Bild 13	Fokus-Workshops der ökonomisch-ökologischen Bewertung	28
Bild 14	Kriterien eines Direktvergleichs zwischen OH-Lkw und konventionellen Diesel-Lkw	29
Bild 15	Direktvergleich der CO ₂ -Emissionen im Szenario 100% EE.....	30
Bild 16	Ökologische Bewertung - Wirkungszusammenhänge	32
Bild 17	Energiefluss im Gesamtsystem für Traktion und Rückspeisung [25].....	35
Bild 18	a) Luftwiderstandsbeiwerte für Straßenfahrzeuge [29]; b) OH-Lkw mit angebugeltem Stromabnehmer.....	36
Bild 19	Stromschiene zur Energieüberttragung auf Fahrzeuge nach [32].....	37
Bild 20	Abfallsammelfahrzeug mit Stromabnehmer für O-Bus-Fahrleitung in Bologna [35]	38
Bild 21	Potenziale zur Trassenbündelung: a) Stromübertragungsnetz (magenta) und Autobahnnetz (schwarz); b) Überschneidungen des Ausbau von BAB und Übertragungsnetzausbau (grüne Markierungen); c) eHighway-Ausbaumodell Stufe 1 und 2	40
Bild 22	Zentrale Variante einer eHighway-Energieversorgung.....	41
Bild 23	Methode zur Energiebedarfsprofil-Analyse.....	42
Bild 24	Vergleich des Energiebedarf des eHighways und regenerativer Energieerzeugung	43
Bild 25	Ausgangslage der Funktions- und Interaktionsanalyse einer eHighway-Leitstelle	44
Bild 26	Wireframe der Smartphone-App für Sicherheitskoordinatoren an Arbeitsstellen	45
Bild 27	Neu gestaltetes Bedienfeld zur Stromabnehmersteuerung (DLR [12]).....	46
Bild 28	Konzeptstudie zum Lkw-Cockpit im Jahr 2020 (DLR [12])	46
Bild 29	Toter Winkel bei Lkw und Lastzügen in Rechtskurven [39]	47
Bild 30	Systemaufbau des Augmented-Reality-Erprobungsträgers [39].....	47
Bild 31	Bauraum für den Stromabnehmer auf einer Sattelzugmaschine	48
Bild 32	3D-Modell des Stromabnehmers mit Liftkonstruktion und verkürzten Armen.....	49
Bild 33	Touchdisplays der unterschiedlichen Entwicklungsstufen.....	50
Bild 34	Intuitive Piktogramme für Kippschalter und Lkw-Display	50
Bild 35	Komplexe Fahrdrahtsituation bei Erfassung durch Stereo-Kamera und Tageslicht	51
Bild 36	Labor- und Funktionsmuster: a) Labor-Versuchsstand für die Arm- und Schwenkbaugruppe, b) Funktionsmuster auf dem Diesel-Mock-up.....	52
Bild 37	Standard-Schnittstellen zur Integration eines Stromabnehmers in einen Lkw.....	53
Bild 38	Hybridisierte Sattelzugmaschine mit Auflieger auf der Versuchsanlage	54
Bild 39	Stationsbild des Unterwerks der Versuchsanlage im Leitsystem Citras RSC.....	55
Bild 40	Streckenbild der Versuchsanlage im Verkehrsleitsystem Conduct ⁺	56

Bild 41	Schilderbrücke mit Wechselverkehrszeichen auf der Versuchsanlage	56
Bild 42	eTruck2X-Kommunikation im Szenario „Mobile Baustelle“: a) Kommunikationspfad, b1/2) ortsabhängig konfigurierte Anzeigebilder für Schilderbrücken [12]	57
Bild 43	Aufbau und Messdatensatz des Inspection Gates „Schleifleiste“	58
Bild 44	Installationen des CMS - Contact Line Monitoring Systems auf der Versuchsanlage	59
Bild 45	Akustisches Spektrum der Fahrleitung bei Fahrt mit 60 km/h.....	59
Bild 46	Systemaufbau und Komponenten zur Energiemessung und Datenübertragung.....	60
Bild 47	Komponenten der Energiemessung im Actros2 (links) und in Scania-SZM (rechts)	60
Bild 48	Luftbild mit Betriebsflächen der Versuchsanlage und benachbarter Unternehmen.....	61
Bild 49	Wegweiserbrücke als Kragarm mit 5,65 m Durchfahrtshöhe.....	62
Bild 50	Wechselverkehrszeichenbrücke mit 5,00 m Durchfahrtshöhe	62
Bild 51	Rückhaltesysteme unterschiedlicher Aufhaltestufen auf der Versuchsanlage	63
Bild 52	Rückhaltesystem und Anprallsockel an der Wechselverkehrszeichenbrücke	63
Bild 53	Absenkung des Trageiles an der Wegweiserbrücke (Kragarm).....	65
Bild 54	Trageilabsenkung im Bereich des Kragarms auf der Versuchsanlage.....	65
Bild 55	Kettenwerksabsenkung und Ersatz der Trageile durch Fahrdrähte	65
Bild 56	Detailaufnahme zur Fahrdrähtführung unter der Wechselverkehrszeichenbrücke	65
Bild 57	Windschiefe Fahrleitung mit kurvenförmiger Fahrdrähtführung	66
Bild 58	Kurvennachbildung mit Zick-Zack-Verlauf der Fahrleitung	66
Bild 59	Gemeinsame und getrennte Nachspanneinrichtungen	67
Bild 60	Unterschiedliche Ausführungsvarianten der Parallelfelder	67
Bild 61	Unterwerk, Umschalteneinrichtung und Leitstelle am neuen Standort.....	68
Bild 62	Schaltplan der Versuchsanlage mit neutraler Zone und Notabschaltung.....	68
Bild 63	Integration des Stromabnehmers auf die Sattelzugmaschine	69
Bild 64	Erprobung der Scania-Sattelzugmaschine: a - Fahrt über Bodenwelle, b - Stromabnehmernachführung im Zick-Zack der Fahrleitung.....	72
Bild 65	Testaufbau zur Verifikation des seitlichen Arbeitsbereichs des Stromabnehmers	73
Bild 66	Fahrdrähtdetektion und Nachführung des Stromabnehmers im Zick-Zack	73
Bild 67	Gemessene Fahrdräht Höhen bei Durchfahrt an der Verkehrszeichenbrücke	74
Bild 68	Fahrdrähtanhub über Geschwindigkeit mit und ohne Kompensation der Windkraft.....	74
Bild 69	Prüfaufbau mit den drei Testinseln in der Klimakammer	75
Bild 70	Scania-Sattelzugmaschine in der EMV-Messhalle.....	76
Bild 71	Verschleiß des Fahrdrahtes in Abhängigkeit der Kontaktkraft [48]	77
Bild 72	Hysteresis der Kontaktkraft: a - Vorgabe nach EN 50206-2 [49], b - gemessener Verlauf bei statischer Andruckkraftmessung am Stromabnehmer des Actros-Lkw [27]	78
Bild 73	Kontaktkraft (a) und Geschwindigkeit (b) bei verschiedenen Fahrtrichtungen [27].....	78
Bild 74	Kontaktkraftmessung bei 50 km/h in der Geraden [51]	79
Bild 75	Vergleich gemessener und berechneter Fahrdrähtanhöhe [52].....	81
Bild 76	Leichtbaustreckentrenner: a - Einbausituation mit asymmetrischen Kufen, b - Zeichnung der Variante mit symmetrischen Kufen.....	82
Bild 77	Elektrische Größen bei der Streckentrennerüberfahrt mit ca. 300 A Traktionsstrom.....	82
Bild 78	Messung der EMV-Störaussendung im elektrischen Betrieb.....	83
Bild 79	Vergleich der Schallimmissionen der Scania-SZM in verschiedenen Betriebsmodi	84
Bild 80	Lkw-Zug für Langstreckenfahrten im dieselelektrischen Betrieb.....	84
Bild 81	Tests in Grenzsituationen: a - Riss des Fahrdrahts, b - Notabsenkung.....	85
Bild 82	Grundkonzept einer Sattelzugmaschine mit seriell Hybridantrieb, Stromabnehmer und Traktionsbatterie.....	86

Bild 83	Vereinfachtes Blockschaltbild des Antriebs- und Batteriesystems.....	87
Bild 84	Sattelzugmaschine und Auflieger bei der Übergabe in Vilshofen	89
Bild 85	Elektrische Kenngrößen beim Betrieb an der Oberleitung.....	90
Bild 86	Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren ab 1990 [55].....	91
Bild 87	Anwendungsfälle für Electric Road Systems [59].....	92
Bild 88	Veranschaulichung der verschiedenen ERS-Technologien [61].....	92
Bild 89	Vergleich APS-Technologie für a) Straßenbahn und b) Pkw [61]	93
Bild 90	Versuchsanordnung für ein Stromschienensystem für Lkw [61]	94
Bild 91	Induktive Energieübertragung am Beispiel OLEV von KAIST [67].....	95
Bild 92	Amerikanischer eHighway-Truck für den Betrieb bei L. A. auf der Versuchsstrecke	95
Bild 93	Aufbau der Fahrleitung im Feldversuch in Schweden	96
Bild 94	Einordnung der ERS-Technologien hinsichtlich der Einsatzreife [59].....	97
Bild 95	Veränderung CO ₂ -Emissionen ab 1990 nach Sektoren [76].....	99
Bild 96	Entkopplungsstrategien im Verkehrsbereich [78].....	100

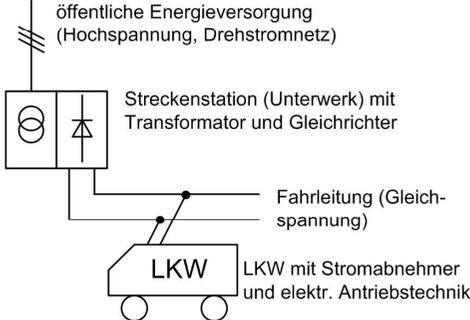
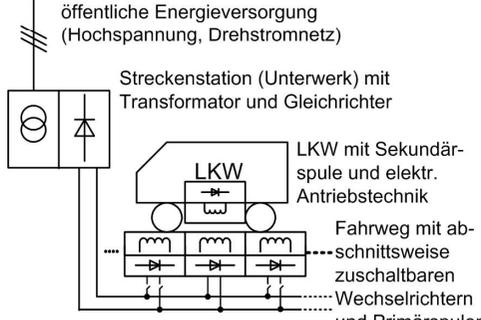
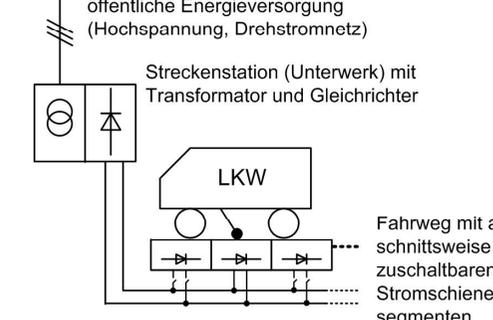
6.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Im Projekt ENUBA 2 aufgegriffene Förderziele und -themen nach [2].....	8
Tabelle 2	Zuordnung der Arbeitsgebiete zu den Verbundforschungspartnern	12
Tabelle 3	Arbeitsgebiete des Kooperationspartners Scania	13
Tabelle 4	Zuordnung der untersuchten Themenbereiche zu den Hauptgruppen.....	21
Tabelle 5	Rollen und Zuständigkeiten in Abhängigkeit der Seriengröße	27
Tabelle 6	Vergleich von OH-Streckennetz (Ausbaumodell) und gesamtem BAB-Netz.....	31
Tabelle 7	Komponentenwirkungsgrade elektrischer Lkw im Oberleitungsbetrieb.....	36
Tabelle 8	Kombination von externer Energieversorgung und On-Board-Antriebssystemen	37
Tabelle 9	Netzspannungen in Deutschland.....	41
Tabelle 10	Anforderungen an Stromabnehmer für den elektrifizierten Straßengüterverkehr	48
Tabelle 11	Testserien mit Zuordnung zur vertieften Ergebnisdarstellung	70
Tabelle 12	Testserien mit Zuordnung zu den bereits vorgestellten Konzepten	71
Tabelle 13	Variation der klimatischen Prüfbedingungen für die Dauerlauftests.....	75
Tabelle 14	Elastizität der Fahrleitung in der Geraden und im windschiefen Abschnitt.....	80
Tabelle 15	Tests in Grenzsituationen und abgeleitete Erkenntnisse.....	85

7 Anlagen

7.1	Vergleich der Systeme zur kontinuierlichen externen Energieversorgung.....	111
7.2	Tool zur koordinierten Planung von Instandhaltungsmaßnahmen	112

7.1 Vergleich der Systeme zur kontinuierlichen externen Energieversorgung

<p>Oberleitung leitungsgebundene Übertragung elektr. Energie mit einer Oberleitung</p>	<p>Induktive Energieübertragung Übertragung elektrischer Energie durch Induktion einer elektrischen Spannung</p>	<p>Bodenstromschiene Übertragung elektrischer Energie durch eine Schiene unterhalb des Fahrzeuges</p>
<p>Prinzipskizze</p> 	<p>Prinzipskizze</p> 	<p>Prinzipskizze</p> 
<p>Wirkungsprinzip</p> <ul style="list-style-type: none"> - aus Stromnetzen wird in Unterwerken Gleichspannung zur Einspeisung in Fahrleitung erzeugt - LKW verfügen über Stromabnehmer und übertragen Strom von Fahrleitung zum Antriebssystem - LKW verfügen über Leistungselektronik, Elektromotor und Energiespeicher - Fahrzeuge können über die Fahrleitung beim Bremsen gewonnene Energie austauschen oder ins vorgelagerte Netz zurückspeisen 	<p>Wirkungsprinzip</p> <ul style="list-style-type: none"> - aus Stromnetzen wird in den Unterwerken Gleichspannung zur Einspeisung in die Zuleitung erzeugt - Fahrweg ist in abschnittsweise zuschaltbare Segmente eingeteilt - LKW verfügen über Spulensysteme (Sekundärspule) in denen bei Überdeckung mit der Fahrwegspule elektr. Spannung induziert und Energie übertragen wird - die LKW verfügen über Leistungselektronik, Elektromotor und Energiespeicher 	<p>Wirkungsprinzip</p> <ul style="list-style-type: none"> - aus Stromnetzen wird in Unterwerken Gleichspannung zur Einspeisung Stromschiene erzeugt - Fahrweg ist in abschnittsweise zuschaltbare Segmente eingeteilt - LKW verfügen über Stromabnehmer und übertragen Strom von Schiene zum Antriebssystem - LKW verfügen über Leistungselektronik, Elektromotor und Energiespeicher
<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stromabnehmer/Antriebstechnik leicht integrierbar - Gleich- oder Wechselspannung möglich - keine nennenswerte elektromagnetische Beeinflussung bei DC-Systemen - bewährte Technik, 120 Jahre Erfahrung - kein direkter Eingriff in den Fahrweg nötig - beweglicher Stromabnehmer kann Fahrzeugbewegungen in der Fahrspur ohne Energieverlust ausgleichen - Abstand der Unterwerke ca. 1-4 km (keine weiteren Schalter und Streckeninstallationen nötig) <p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> - sichtbare Fahrleitung über der elektrifizierten Fahrspur 	<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> - keine sichtbare Fahrleitung, Verkehrsträger Straße bleibt optisch nahezu unverändert <p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> - umfangreiche Installationen im Fahrweg pro Segment - EMV kritisch, da Wechselfeld - Spulensysteme müssen durch LKW überfahrbar sein (mechanisch stark belastete Fahrbahn) - die dafür erforderliche Deck-/Tragschicht erhöht den Abstand zwischen Fahrweg- und Fahrzeugspule und verschlechtert den Wirkungsgrad - längere Fahrwegsegmente, die nicht komplett durch Fahrzeuge überdeckt sind, haben schlechten Wirkungsgrad 	<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> - keine sichtbare Fahrleitung, Verkehrsträger Straße bleibt optisch nahezu unverändert - guter Wirkungsgrad durch konduktive Energieübertragung <p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> - umfangreiche Installationen im Fahrweg pro Segment - Schienensysteme müssen durch LKW überfahrbar sein (mechanisch stark belastete Fahrbahn) - Witterungsbedingungen wie Schnee und Eis oder Verschmutzung können die elektrische Leitfähigkeit deutlich verschlechtern - Individuelle Fahrzeugbelastung auf Stabilisierungsebene sind durch starre Stromabnehmerkopplung schwer bzw. nicht ohne Folgeschäden realisierbar

7.2 Tool zur koordinierten Planung von Instandhaltungsmaßnahmen

Brückenprüfung
[< zurück zu Bewertung anderer Maßnahmen](#)
Bewertungsstatus

Priorität	ID	Maßnahme	Inspektionsstufe	Ort	Richtung	Betroffene Infrastruktur	Antragsteller
3	34526719	Brückenprüfung	Hauptprüfung	A8 Überführungsbauwerk 4711	München - Salzburg Salzburg - München	3. Fahrspur beide Richtungen Standstreifen	■ Straßenmeisterei Eching

Möglicher Zeitraum: 12.05.2014 - 30.05.2014 Dauer: 4

Wunschtermin: 12.05.2014 - 14.05.2014 Freigabe: Für Bis

Sicherheitsauflagen und geplante Schalthandlungen

Gewerk	Sicherheitsauflage	Geplante Schalthandlung
■ VLZ	Schalten der Wechselverkehrszeichen für eine Spursperrung	ID 4577453
■ SM	Sicherung der Arbeitsstelle auf der Fahrspur	
■ DLI	Abschalten der Oberleitung	ID 984567
■ DLI	Anwenden der 5 elektrotechnischen Sicherheitsregeln	ID 984568

Beschreibung durchzuführener Arbeiten
Prüfen von Tragfähigkeit, Beschilderung, Gründungen, massiven Bauteilen, Stahlkonstruktion, Abdichtungen/Fahrbahnen/Entwässerung, Schutzvorrichtungen, Korrosionsschutz, Versorgungsleitungen

Ergänzungen
Bis zu 50 cm Nähe zur Fahrleitung geplant

Kommentare
VLZ Kommentar xyz
SM Kommentar abc

TMS Bitte am 12. und 13. 5., da hier auch andere Arbeiten vorgesehen sind (siehe Maßnahme ID sss)

Alle Maßnahmen

REGION1

REGION2

A8

A81

A92

A93

A99

A952

Wochenansicht 12.-18. Mai 2014

	Montag 12.	Dienstag 13.	Mittwoch 14.	Donnerstag 15.	Freitag 16.	Samstag 17.	Sonntag 18.
DLI							
VLZ							
TMS							
SM							
VB							

Suche: Bauwerk 4711

Von: AB/43

Nach: AB/44

Legende: ■ Oberleitungsinfrastruktur ■ Verkehrsleittechnik ■ Technisches Monitoring OL ■ Straßenmeisterei ■ Verkehrsbehörde ! Abstimmung erforderlich ○ noch nicht genehmigte Maßnahme ○ Teilbereich der eigenen Region