

**FuE-Programm "Erneuerbar Mobil" des  
Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)**

**Abschlussbericht**

Vorhabenbezeichnung:

**ELANO**  
-  
**Elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge  
an Oberleitungen**

Laufzeit des Vorhabens:

vom: 01.01.2016

bis: 31.12.2019

Zuwendungsempfänger:

Siemens Mobility GmbH  
Technology and Innovation  
eHighway  
Otto-Hahn-Ring 6  
81739 München

Förderkennzeichen:

**16EM3001-1**

# ELANO

## Elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge an Oberleitungen



**Schlussbericht der  
Siemens Mobility GmbH**  
Version V2.1 vom 28. August 2020  
(zur Veröffentlichung)

**Projektlaufzeit: 01.01.2016 - 31.12.2019**  
**FKZ: 16EM3001-1**

Gefördert durch:



des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit unter den Förderkennzeichen 16EM3001-1 gefördert. Die inhaltliche Verantwortung liegt bei den Autoren des Berichts. Im Rahmen der Regelungen des ELANO-Förderprojekts hält die Siemens Mobility GmbH sämtliche Rechte an den in diesem Bericht und den zugehörigen Anlagen enthaltenen Informationen.

## **Executive Summary**

The project acronym ELANO (German for *Elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge an Oberleitungen*) would best be interpreted as electrically propelled heavy-duty vehicles with external power supply via overhead contact lines. In this sense the project ELANO continued the successful series of research and development projects (ENUBA and ENUBA 2) that started in 2010 with public grants by the German Federal Ministry of the Environment to develop and test power supply and drive technologies for externally supplied trucks and busses on German highways. In this executive summary the reader will get key information about background, main goal and purpose of the project. This will then be complemented by an overview of the structure and main results of the research work. Finally, the project outcomes will be set into a broader context of the related research and development work regarding electric road systems. Thus, the reader will be enabled to evaluate the projects benefits and to determine further necessary steps in order to decarbonise road freight traffic within the next decade.

As outlined before the ELANO project – running for four years from January 2016 to December 2019 – continued the interdisciplinary technological and socio-economic research work of the ENUBA and ENUBA 2 projects that were started to find answers to the – more and more pressing – question, how heavy-duty vehicles (i. e. trucks over 18 tons and busses) could best be decarbonised without the technical drawbacks of battery-only solutions and without the economical inadequacy of the fuel cell technology. This continuously growing segment of road traffic, which is in line with the global and continental megatrends of growing traffic volumes, solely relies on burning fossil fuels. Focal idea of the so-called eHighway technology is to equip the highway sections with the highest truck traffic volumes with overhead contact lines to transfer electric energy to the trucks, that need to be equipped with a pantograph serving as a current collector. This technical approach benefits from more than a century experience with electrified trolleybus and tramway systems in a road environment and allows for an almost direct use of the electric energy. Consequently, the efficiency rating of the eHighway technology on overhead line sections ranges as high as 80 %. In short sections that cannot be electrified due to technical limitations the trucks run on internal battery storages that were recharged before during drives on the contact line. In longer sections that should not be economically electrified due to low traffic volumes the trucks run on either battery systems (depending on their specific capacity) or other internal power sources like range extending PtL (power to liquid) or small fuel cell drive systems as back-ups.

Based on the results of the predecessors ENUBA and ENUBA 2 the project ELANO primarily set out to optimise the whole contact system comprising of the overhead contact line and the pantographs in terms of functionality, reliability, and safety. This work stream was accomplished by a number of research items dealing with an optimised system design regarding the interactions of power supply and sizing of internal batteries, improved and standardised truck to pantograph interfaces, and extensive truck and infrastructures testing in various surroundings. The project structure, main topics and core results can be summarised as follows:

- In the sub-project *system design* (SYS) emphasis was laid on questions such as the optimal share of contact-line to non-electrified sections including the power dimensioning, the integration of buses into the eHighway system, and basic considerations regarding an accounting and billing system. Moreover, this sub-project supported the other sub-systems in the course of their interdisciplinary optimisations. Key findings were:
  - Highway sections with reasonable high truck traffic should strive for high electrification shares whenever possible. This reduces peak power demands and prevents over-dimensioning of the power supply system.
  - For high truck traffic volumes both electric power supply and truck drivetrain design should envisage higher nominal supply voltages in the range of DC 1000 – 1500 V.
- In the sub-project *pantograph* (PAN) a fundamental rework of the mechatronic architecture and system design was carried out. Developed with an engineering process based on requirements management and verification methods taken over from the trucking industry the new pantograph features a tram-like base frame with two independent upper arms. This architecture allows for quicker and safer contacting and disconnecting and could be significantly simplified in terms of

number of components and thus production costs. Nevertheless, this rework required intensive interaction with the interface partner contact line as part of the power supply system.

- In the sub-project *traction power supply system* (TSV for *Traktionsstromversorgung*) research and development focussed on two aspects. On the one hand the contact line design was inter-actively optimised along with the pantograph as the interface partner. This included – amongst others – the amendment of the contact line components catalogues by a number of specific clamps that prevent entangling of the pantograph horns during quick lane changes. For the sub-stations electric protection devices for the next generation of communications protocols were developed and tested to support a modular layout of the electric protection concept which is especially necessary for larger eHighway applications.
- Main focus of the sub-project *electric vehicle and drive technologies* (EFZ for *Elektrische Fahrzeugtechnik*) was to study, simplify and standardise the various interfaces and interactions between the electric drive system of the truck, the pantograph and the overhead contact line. This included conceptual works regarding the electric protection concept, design and testing of electric filter equipment and finally simulation-based research on hybrid drive architectures with different battery sizes.
- Finally, in the sub-project *lab and field testing* (TEB for *Test- und Erprobungsbetrieb*) all component, sub-system and integrated system testing was bundled. This sub-project featured a variety of test set-ups including noise emission testing to compare various drive trains and modes, vibration testing of tractor trucks equipped with pantographs, and design and testing of automated infrastructure monitoring systems for pantograph and contact line inspections.

As a support function the sub-project *project management and steering* (PS) included all control, monitoring functions to carry out the ELANO project.

The variety of research items and results gained shows, that it was worthwhile and even necessary to integrate the research questions for the different sub-systems into an interdisciplinary project. During the project duration a continuous exchange and collaboration with the other national and international research projects dealing with electrified road systems was established. Research results gained concerning the optimised pantograph architecture and contact line system layout were immediately exchanged with the German field trial projects for the eHighway technology to be incorporated into these field trials that started public operation of eHighway trucks on highways in May 2019 (ELISA) and March 2020 (FESH).

As mentioned in sub-project SYS significant work was started in the field of energy metering, billing, and financing schemes of the infrastructure investments. Initial results showed strong interdependencies with the different infrastructure financing concepts in the EU member states. As ERS (Electric Road Systems) will create more environmental benefits when implemented in a joint international approach, such action needs to be coordinated with adaptive interoperable financing and metering schemes along with technical interoperability standardisation. These work items are being studied in detail in an own research and development project *AMELIE* with Siemens Mobility as lead partner. Another example of mutual influences on other R & D projects is the cooperation of Siemens in the *OL – Lkw* project, lead by Volkswagen AG, to study and develop optimised drive trains and systems designs for electric road systems vehicles.

Along with the other research projects such as *StratON* and *Roadmap OH-Lkw* that proved economic viability and environmental benefits of large scale eHighway implementations the *ELANO* project provided the necessary technical base to bring direct energy supplies of heavy-duty vehicles into the foreground of sustainable road transport technologies. Together with the field trials and their operational and conceptual results the eHighway technology is ready to be further studied and implemented in dedicated roll-out strategies to realise the environmental benefits necessary as transport sector contributions to achieve emission reduction goals.



**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>EINFÜHRUNG UND ZIELSTELLUNG .....</b>	<b>8</b>
1.1	Gesamtziel des Forschungsvorhabens .....	8
1.2	Einordnung des Projekts ELANO in den förderpolitischen Rahmen.....	9
<b>2</b>	<b>VORAUSSETZUNGEN UND STRUKTUR DES PROJEKTS.....</b>	<b>11</b>
2.1	Organisatorische Voraussetzungen des Vorhabens.....	11
2.2	Stand der Technik zu Projektbeginn .....	11
2.2.1	Technologiebasis ENUBA und ENUBA 2.....	11
2.2.2	Hybridisierung in der Lkw-Branche .....	13
2.3	Projektstruktur und Arbeitsziele .....	14
2.3.1	Projektstruktur und Überblick.....	14
2.3.2	Ziele und Inhalte der Themenfelder .....	15
2.3.2.1	<i>Technologie Gesamtsystem - SYS</i> .....	15
2.3.2.2	<i>Entwicklungsprogramm Stromabnehmer – PAN</i> .....	16
2.3.2.3	<i>Innovationen bei Traktionsstromversorgung und Fahrleitung - TSV</i> .....	17
2.3.2.4	<i>Elektrische Fahrzeugtechnik - EFZ</i> .....	18
2.3.2.5	<i>Test-/Erprobungsbetrieb und Laborprüfungen -TEB</i> .....	19
2.3.2.6	<i>Projektsteuerung, Dokumentation und Systemintegration - PS</i> .....	20
2.3.3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	21
2.3.3.1	<i>Wesentliche interne Partner</i> .....	21
2.3.3.2	<i>Wesentliche externe Partner im Bereich „FuE-Fremdleistungen“</i> .....	21
2.3.3.3	<i>Wesentliche Partner im Bereich „Sonstige Leistungserbringer“</i> .....	22
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE DES FÖRDERVORHABENS.....</b>	<b>24</b>
3.1	Technologie Gesamtsystem - SYS .....	24
3.1.1	Einführungsmodelle und Referenzszenarien für die Elektrifizierung des schweren Straßengüterverkehrs (SYS.1).....	24
3.1.1.1	<i>Einführungsmodelle und Referenzszenarien (SYS.1.1-SYS.1.4)</i> .....	24
3.1.1.2	<i>Querschnittstudie zu Status Quo und Trends für Traktionsbatterien (SYS.1.5)</i> .....	26
3.1.2	Elektromobilitätstrategie und Synergien mit anderen Fahrzeugklassen (SYS.2) ...	27
3.1.3	Energieversorgung - Netzintegration und Abrechnungssysteme (SYS.3) .....	30
3.1.3.1	<i>Netzintegration und Versorgung durch Erneuerbare Energien (SYS.3.1 / SYS.3.2)</i> .....	30
3.1.3.2	<i>Abrechnungssysteme (SYS.3.3 / SYS.3.4)</i> .....	32
3.1.4	Infrastrukturgestütztes Autonomes Fahren – Literaturrecherche und Schnittstellenanalyse zu Fahrzeug und PAN (SYS.4.1) und Identifizierung der eHighway-Anwendungsfelder (SYS.4.2).....	35
3.1.5	Optimierung der Schnittstelle Fahrleitung – Stromabnehmer (SYS.5).....	36
3.1.6	Technologien für vollelektrische Fahrzyklen (SYS.6).....	38
3.1.6.1	<i>Stillstandsladen (SYS.6.1)</i> .....	38
3.1.6.2	<i>Optimierte Systemspannung aus Fahrzeug- und Infrastruktursicht (SYS.6.2)</i> .....	40
3.1.6.3	<i>Sicherheitsanalyse Gesamtsystem nach Common Safety Methods - CSM (SYS.6.3)</i> .....	43
3.2	Themenschwerpunkt Stromabnehmerentwicklung - PAN.....	48
3.2.1	Aufgabenstellung / Hintergründe.....	48
3.2.1.1	<i>1. Generation (ENUBA)</i> .....	48
3.2.1.2	<i>2. Generation (ENUBA 2)</i> .....	49
3.2.1.3	<i>Zielstellung 3. Generation (ELANO)</i> .....	49
3.2.2	Vorgehensweise .....	50
3.2.2.1	<i>1. Iterationszyklus - „Konzeptentwicklung, Grundlagenforschung und Labormuster“</i> .....	50
3.2.2.2	<i>2. Iterationszyklus - „Funktionsmuster, Prüflabore, Testaufbau“</i> .....	51
3.2.2.3	<i>3. Iterationszyklus - „Aufbau abschließender Prüfmuster“</i> .....	51
3.2.3	Ergebnisse .....	52

3.2.3.1	<i>Positionierung in Arbeitshöhe und Vertikalbewegung im Arbeitsbereich (PAN.1 / PAN.2)</i> ..	52
3.2.3.2	<i>Horizontalbewegung der Arme im Arbeitsbereich (PAN.3)</i> .....	53
3.2.3.3	<i>Kontaktsystem Wippen und Arme (PAN.4)</i> .....	54
3.2.3.4	<i>Sicherheitsorientiertes Sensorikkonzept (PAN.5)</i> .....	55
3.2.3.5	<i>Steuerung und Safety-Controller für Sicherheitsanforderungen (PAN.6)</i> .....	56
3.2.3.6	<i>Qualifizierung der Diagnosesysteme und der Servicekonzepte (PAN.7)</i> .....	57
3.2.3.7	<i>Einsatzumfeldangepasste Integration für Komponenten (PAN.8)</i> .....	57
3.2.3.8	<i>Stromabnehmer für andere Nutzfahrzeugplattformen (PAN.9)</i> .....	58
3.2.3.9	<i>Gewährleistung funktionaler Sicherheit nach ISO 26262 (PAN.10)</i> .....	58
3.2.3.10	<i>Elektrische Sicherheit und Schutzkonzept (PAN.11)</i> .....	59
3.2.3.11	<i>Musterbau / Aufbau von Funktionsmustern (PAN.12)</i> .....	60
3.2.3.12	<i>Erprobung und Bewertung von Funktionsmustern (PAN.13)</i> .....	61
3.2.3.13	<i>Normative Vorgaben, Zulassung und Homologation (PAN.14)</i> .....	63
3.2.3.14	<i>Software-Sicherheit (PAN.15)</i> .....	64
3.2.4	Fazit.....	64
3.2.5	Ausblick und weitere Entwicklungen .....	66
3.3	Innovationen bei Stromversorgung und Fahrleitung- TSV .....	67
3.3.1	Systemoptimierung Stromversorgung und Fahrleitung (TSV.1) .....	67
3.3.2	Systemoptimierung Fahrleitungskonstruktionen (TSV.2) .....	69
3.3.2.1	<i>Optimierung des horizontalen und vertikalen Arbeitsbereichs der Fahrleitung (TSV.2.1 / TSV.2.2)</i> .....	69
3.3.2.2	<i>Streckentrenner für hohe Fahrzeugdichten (TSV.2.3 / TSV.2.4)</i> .....	71
3.3.2.3	<i>Neuentwicklung von Fahrleitungsklemmen (TSV.2.5)</i> .....	72
3.3.3	Fahrleitungsmonitoring und Diagnose (TSV.3).....	75
3.3.4	Neuentwicklung modulares DC-Schutz- und Steuergerät (TSV.4).....	77
3.3.5	Intelligentes Energie-Management-System (iEMS) (TSV.5) .....	78
3.3.6	Federnachspannung für zweipolige Kettenwerksfahrleitungen (TSV.6) .....	80
3.3.7	RFID-Technologie zur Last- und Stromabnehmersteuerung (TSV.7).....	82
3.4	Elektrische Fahrzeugtechnik - EFZ.....	84
3.4.1	Systemauslegung für mehrfach-hybride Antriebssysteme (EFZ.1).....	84
3.4.2	Fahrzeugschnittstellen und Stromabnehmerintegration (EFZ.2).....	86
3.4.2.1	<i>Vereinheitlichte Schnittstellendefinition für alle Medien (EFZ.2.1)</i> .....	86
3.4.2.2	<i>Optimiertes Hilfsbetriebkonzept für mehrfach hybride Lkw (EFZ.2.2)</i> .....	88
3.4.2.3	<i>Optimierte Varianten zur Umsetzung des Fahrzeugschutzkonzepts (EFZ.2.3)</i> .....	90
3.4.2.4	<i>EMV-Management von fahrleitungsgespeisten Hybrid-Lkw (EFZ.2.4)</i> .....	92
3.4.3	Umrüstung und Weiternutzung der ENUBA-Erprobungsträger (EFZ.3 / EFZ.4) ...	94
3.4.3.1	<i>ENUBA – Actros #1 als Stromabnehmer-Erprobungsträger (EFZ.3)</i> .....	94
3.4.3.2	<i>ENUBA-Actros #2 - Aufrüstung Stromabnehmer-Steuerung (EFZ.4)</i> .....	97
3.4.4	Optimierte Antriebssteuerungen für den Oberleitungsbetrieb (EFZ.7).....	98
3.5	Test-/Erprobungsbetrieb und Laborprüfungen – TEB.....	101
3.5.1	Erprobungsbetrieb auf der eHighway Versuchsanlage in Groß Dölln.....	101
3.5.1.1	<i>Betrieb der Versuchsanlage Groß Dölln (TEB.1)</i> .....	101
3.5.1.2	<i>Betrieb der Erprobungsträger (TEB.2)</i> .....	103
3.5.1.3	<i>Erprobung vor Ort (TEB.3)</i> .....	103
3.5.2	Alltagserprobung – Klimafaktoren (TEB.4) .....	104
3.5.3	Automatisierte eHighway-Messsysteme (TEB.5).....	106
3.5.3.1	<i>Datenanalysesystem (TEB.5.1 / TEB.5.2)</i> .....	106
3.5.3.2	<i>Monitoringsysteme für Stromabnehmer und Fahrleitung (TEB.5.3 / TEB.5.4)</i> .....	108
3.5.3.3	<i>Potenzialanalyse und Erprobung teilautomatisierter Infrastrukturinspektionen (TEB.5.5)</i> ..	113
3.5.4	Externe Prüfungen und Messsysteme - Systemprüfstand (TEB.6).....	114
3.5.4.1	<i>Typprüfungen (TEB.6.1 – TEB.6.3)</i> .....	114
3.5.4.2	<i>Externe Tests (EMV, Klima, Windkanal) (TEB.6.4)</i> .....	116
3.5.4.3	<i>Fahren auf Belastungs-Strecken von Lkw-Herstellern (TEB.6.5)</i> .....	117
3.5.4.4	<i>Schallemissionsmessungen mit Mikrofon-Arrays verschiedener Hybrid-Modi (TEB.6.7)</i> ...	119
<b>4</b>	<b>WEITERENTWICKLUNGEN DURCH DRITTE - EINORDNUNG DER PROJEKTERGEBNISSE</b> .....	<b>121</b>
4.1	Wesentliche Projektergebnisse aus anderen eHighway Projekten .....	121

---

4.2	Einordnung der Projektergebnisse des Forschungsvorhabens .....	123
<b>5</b>	<b>ERGEBNISVERWERTUNG .....</b>	<b>124</b>
5.1	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	124
5.2	Nutzen entsprechend Verwertungsplan .....	125
5.3	Weitere Ergebnisverwertung .....	127
<b>6</b>	<b>FÖRDERZIELE UND ZUKUNFTSAUSSICHTEN .....</b>	<b>128</b>
<b>7</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>131</b>
7.1	Abkürzungen .....	131
7.2	Quellen .....	136
7.3	Abbildungsverzeichnis .....	143
7.4	Tabellenverzeichnis .....	146

# 1 Einführung und Zielstellung

## 1.1 Gesamtziel des Forschungsvorhabens

Dem Spannungsfeld aus Globalisierung und Wirtschaftswachstum, wachsenden Verkehrsaufkommen und ambitionierten Klimaschutzzielen tragen Politik, Verkehrsindustrie und Transportwirtschaft durch vielfältige Maßnahmen Rechnung. Diese wirken sowohl auf einzelne Verkehrsträger und -mittel als auch auf das Verkehrssystem als Ganzes und lassen sich nach dem ASI-Modell kategorisieren [1]:

- Dabei sind dem ersten Hebel „avoid“ (en. für vermeiden) enge Grenzen gesetzt, da national und international nicht von einer Verringerung des Güterverkehrsaufkommens ausgegangen wird.
- Der zweite Hebel „shift“ (en. für verlagern) fasst alle Ansätze zur Verlagerung der Transporte auf den jeweils effizientesten Verkehrsträger zusammen. Den Wachstumsprognosen wird bereits durch massive Investitionen in den Eisenbahnverkehr begegnet, um den aktuellen Anteil von ca. 20 % des deutschen Güterverkehrs beibehalten zu können. Ein sogar überproportionales Wachstum ist kaum darstellbar, sodass der Straßentransport seine führende Rolle behält.
- Das Augenmerk muss also auf den dritten Hebel „improve“ (en. für verbessern) des ASI-Modells gerichtet werden, der Effizienzsteigerung in den jeweiligen Verkehrsträgern.

Dies bedeutet auch für den Straßengüterverkehr einschließlich der schweren Nutzfahrzeuge in langlaufenden Verkehren, dass erhebliche Effizienzsteigerungen erforderlich sind. Wirkmächtiger als Verbrauchsreduzierungen sind alle Ansätze, in denen elektrische Antriebe in den Fahrzeugen eingesetzt werden. Diese haben inhärent höhere Wirkungsgrade als Verbrennungsmotoren und können bei einer kontinuierlichen, segmentierten oder punktuellen elektrischen externen Energiezufuhr zu den Fahrzeugen den Straßengüterverkehr teilweise oder komplett von fossilen Energieträgern und den damit verbundenen hohen Emissionen entkoppeln.

Zur Erschließung dieser Handlungsalternative förderte die Bundesregierung mit den Projekten ENUBA [2] und ENUBA 2 [3] die Entwicklung eines ganzheitlichen Systems zur Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen, den Aufbau von Stromabnehmern für hybridisierte Lkw zum Betrieb an einer speziell angepassten Fahrleitungsinfrastruktur sowie die systematische Erforschung der technischen, ökologischen und ökonomischen Wechselwirkungen innerhalb des Verkehrssystems und seiner Umwelt. Meilensteine der Entwicklung waren der Funktionsnachweis dieser Elektromobilitätslösung als Ganzes im Projekt ENUBA [2] sowie im Nachfolgeprojekt ENUBA 2 [3] die prototypische Integration eines umfassend weiterentwickelten Stromabnehmers in den engen Bauraum einer Sattelzugmaschine des Kooperationspartners Scania. Ebenfalls in ENUBA 2 wurde die bauliche, betriebliche und sicherheitstechnische Integration in den Verkehrsraum analysiert. Die abgeleiteten Empfehlungen bereiteten die Erprobung im öffentlichen Raum im Rahmen der Feldversuche ELISA, FESH und eWayBW vor, deren Ziele der Nachweis der Alltagstauglichkeit der Fahrzeuge sowie der anwendungsnahe Systemaufbau und Betrieb der Oberleitungsinfrastruktur in der Einsatzumgebung sind.

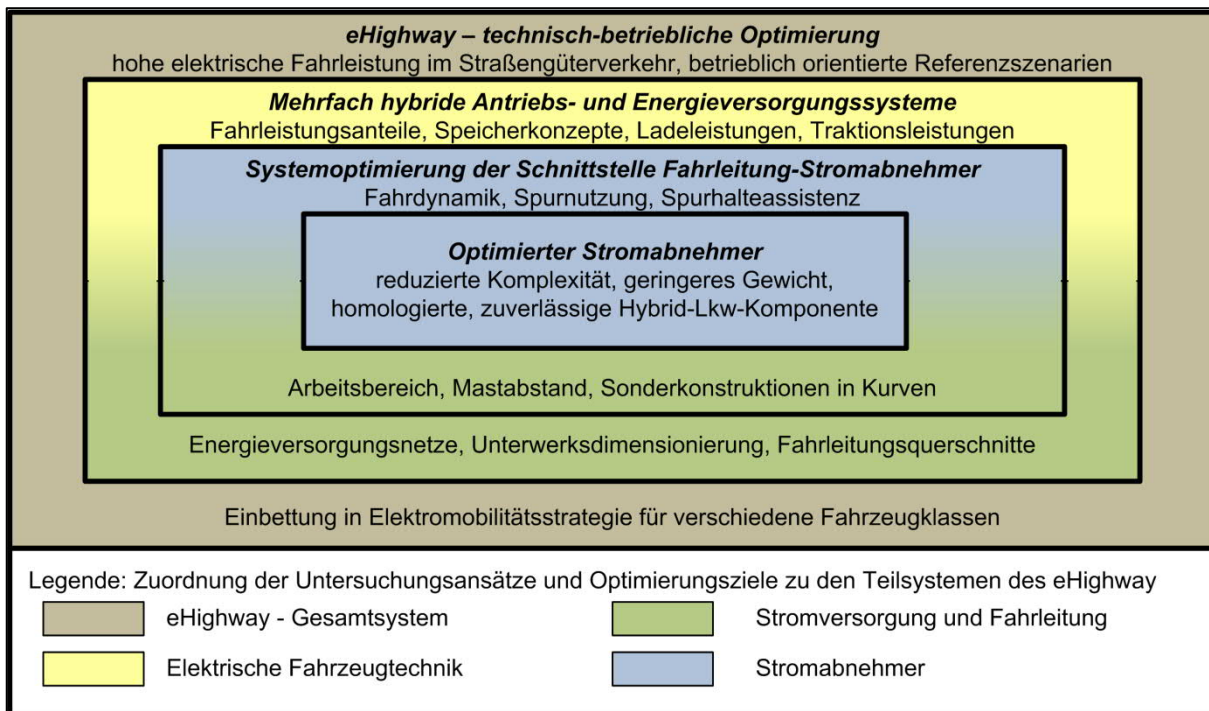
Übergeordnetes Ziel des parallel zu diesen Feldversuchen laufenden Projekts ELANO war demgegenüber die Weiterentwicklung der Schlüsselkomponenten, insbesondere des Stromabnehmers, um zum Abschluss des Projektes den hohen Beanspruchungen des Einsatzes auf schweren Lkw im Fernverkehr vollständig gewachsen zu sein. Gleichrangig und begleitend dazu erfolgte die technisch-wirtschaftliche Optimierung des Gesamtsystems unter den folgenden zwei Gesichtspunkten:

- Konfiguration mehrfach hybrider Antriebs- und Energieversorgungssysteme mit unterschiedlich großen Fahrzeug-Energiespeichern beim Einsatz auf unterschiedlich langen Fahrleitungsabschnitten, in denen sowohl die momentane Traktionsenergie als auch die elektrische Energie zur Ladung der Fahrzeugspeicher für nicht elektrifizierte Abschnitte übertragen wird.
- Gemeinsame Optimierung der Schnittstelle Fahrleitung - Stromabnehmer unter Berücksichtigung fahrdynamischer Erkenntnisse zu Spurnutzungsverhalten und Spurhalteassistenten sowie der Zwangspunkte der Fahrleitungsprojektierung zur Identifikation betrieblich robuster und technisch-wirtschaftlich günstiger Ausprägungen beider Teilsysteme.

Die umfassende Weiterentwicklung des Stromabnehmers war und ist somit eng mit der notwendigen Optimierung der Schnittstelle Stromabnehmer-Fahrleitung verknüpft, die wiederum Abhängigkeiten zu der optimalen Konfiguration mehrfach hybrider Antriebs- und Energieversorgungssysteme aufweist.



Abbildung 1 verdeutlicht die Einbettung des umfassenden Weiterentwicklungsprogramms für den Stromabnehmer in die begleitenden Optimierungsschritte. Ausgehend von diesen übergeordneten Projektzielen wurden für die Teilsysteme zahlreiche Teilziele für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten abgeleitet. Diese Arbeitsziele werden in Abschnitt 2.3.2 getrennt nach den Teilsystemen vorgestellt und bilden dann die Basis der Vorstellung der Ergebnisse des Projekts in Kapitel 3.



**Abbildung 1: Weiterentwicklung des Stromabnehmers eingebettet in die Systemoptimierung**

## 1.2 Einordnung des Projekts ELANO in den förderpolitischen Rahmen

Bis vor wenigen Jahren und insbesondere bis zu den Projektvorbereitungen 2015 waren Brennstoffzellen in Kombination mit Elektromotoren die einzige ernsthaft diskutierte alternative Antriebsform für schwere Nutzfahrzeuge, abgesehen von einzelnen Versuchen mit kleinen und mittleren Batteriebusen im Stadtverkehr. Trotz bereits hoher Aufwendungen in Forschung und Entwicklung sind die technologischen Hürden der Brennstoffzellentechnologie weiterhin hoch und gleichzeitig bleibt der systemisch erzielbare Gesamtwirkungsgrad hinter konventionellen Verbrennungssystemen zurück [4].

Zeitgleich wurden in Reaktion auf alternative Forschungsansätze sowohl in Strategiepapieren der Fachministerien als auch in verkehrswissenschaftlichen Studien verschiedene Antriebskonzepte auch für schwere Nutzfahrzeuge diskutiert. Tabelle 1 (S. 10) gibt einen Überblick zu den wichtigsten Studien und Strategiepapieren und stellt deren inhaltliche Bezüge zum Forschungsprojekt ELANO her.

Die in Tabelle 1 vorgestellten verkehrspolitischen Leitlinien bzw. wissenschaftlichen Leitbilder unteretzten die Fachministerien durch Förderprogramme. Das Projekt ELANO wurde auf Grundlage der Richtlinien zum Förderprogramm „Erneuerbar Mobil“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) [5] gefördert. Es setzt die Entwicklung und Erprobung von Elektromobilitätslösungen bei schweren Nutzfahrzeugen fort und greift folgende förderrelevante Themen und Ziele aus [5] [6] auf:

- Einzelfallförderung von Projekten mit besonderer Bedeutung und hoher Relevanz im Rahmen des Aktionsprogramms „Klimaschutz 2020“ [7]

### Zielbeitrag des Projekts ELANO:

Systemoptimierung zur Einbettung kombinierter Energieversorgungs- und Laderegime sowie die optimierte Systemauslegung von Stromversorgung, Fahrleitung und Stromabnehmer.

- Ermittlung der Umwelt- und Klimafaktoren durch Feldversuche in ausgewählten Fahrzeugversuchen und Anwendungsbereichen.

Zielbeitrag des Projekts ELANO:

Nutzung der Versuchsanlage und -fahrzeuge zur umfassenden Erprobung unter realitätsnahen Bedingungen. Arbeiten auf Gesamtsystemebene zur Analyse von Einsatzprofilen.

- Erschließung des Klima- und Umweltvorteils von Elektrofahrzeugen im Zusammenwirken mit Energieversorgungssystemen.

Zielbeitrag des Projekts ELANO:

Untersuchungen zur Netzintegration der Oberleitungstechnologie und zu Abrechnungssystemen sowie Erforschung von Energiemanagementfunktionen in der Traktionsenergieversorgung.

**Tabelle 1: Studien und Strategien zu alternativen Antrieben für schwere Nutzfahrzeuge**

Quelle	Titel und inhaltliche Bezüge zum Forschungsprojekt
[6]	<p>MKS - Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (BMVBS):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fortsetzung der Technologieentwicklung mittels anwendungsorientierter Forschungs- und Entwicklungsprogramme für Elektromobilität und Brennstoffzelle zur Diversifizierung der Energiebasis.</li> <li>• Entwicklung einer europäischen Strategie für Nutzfahrzeuge, einschl. Messverfahren für unterschiedliche Fahrzeugkonzepte und gesetzlich festgelegter Maßnahmen zur Effizienzsteigerung.</li> <li>• Direkter Einsatz elektrischer Energie aus erneuerbarer Erzeugung als langfristige Elektrifizierungsoption auch für schwere Nutzfahrzeuge technologisch unterstützen und vorbereiten.</li> </ul>
[7]	<p>Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 (BMU):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchführung eines Feldversuchs zur Erprobung elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen als Weiterführung des laufenden BMU-Projekts ENUBA in der Legislaturperiode 2013-2017.</li> <li>• Unterstützung eines umfassenden und technologieneutralen Konzepts auf europäischer Ebene für die Zeit nach 2020. Dazu flankierende Förderung zur Entwicklung, Erprobung und Markteinführung von Technologien, die zur Erreichung ambitionierter Grenz- und Zielwerte notwendig sind.</li> </ul>
[8]	<p>Mehr aus Energie machen - Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz (BMWi):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchführung eines Feldversuchs zur Erprobung des verstärkten Einsatzes elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen.</li> <li>• Erschließung mittel- und langfristiger Energieeinsparziele zur Verringerung der Abhängigkeit des Kraftfahrzeugverkehrs von Mineralölprodukten durch konsequente Einführung der Elektromobilität.</li> <li>• Fortgesetzte Unterstützung der Entwicklung und Erprobung elektrischer Antriebe für Kraftfahrzeuge. Ergreifung weiterer Maßnahmen zur Erhöhung ihrer Marktdurchdringung.</li> </ul>
[9]	<p>Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr 2050 (UBA):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkte Nutzung des Stroms in den jeweiligen Fahrzeugen ist die effizienteste, ökologischste und meist auch ökonomischste Option. Forschungsbedarf besteht für den Lkw-Fernverkehr, da keine der postfossilen Energieversorgungsoptionen eindeutige Vorteile hat und auch im Jahr 2050 rein batterieelektrische oder Plug-in-Varianten nicht möglich sein werden.</li> <li>• Beim Lkw-Fernverkehr stellt die direkte Nutzung von Strom aus der Oberleitung in Bezug auf Treibhausgasemissionen und Kosten die günstigste Alternative dar. Auch unter Berücksichtigung der Infrastrukturkosten kann der Oberleitungs-Lkw im Vergleich mit anderen postfossilen Energieversorgungsoptionen seine relativ günstige Position halten.</li> </ul>
[10]	<p>eMobil 2050 - Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz (Ökoinstitut):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei leichten Nutzfahrzeugen setzen sich batterieelektrische Antriebskonzepte durch und werden ab 2040 zur dominierenden Technologie. Bei schweren Nutzfahrzeugen spielen batterieelektrische Antriebe auch langfristig nur eine untergeordnete Rolle.</li> <li>• Im Szenario „Grenzenlos eMobil“ kommen ab 2030 zunehmend oberleitungsgebundene Fahrzeuge im Fernverkehr zum Einsatz. Zusammen mit anderen Maßnahmen können durch den umfassenden Einsatz elektrischer Fahrzeuge bis 2050 die Treibhausgasemissionen ggü. 1990 um 85 % gesenkt werden.</li> </ul>

Die Zusammenstellung der in Tabelle 1 dargestellten Strategien und Studien zur Elektromobilität und Dekarbonisierung und die im Projekt ELANO aufgegriffenen förderrelevanten Ziele verdeutlichen die zentrale Rolle der Erforschung und Erprobung von Elektrifizierungstechnologien für schwere Nutzfahrzeuge im Lkw-Fernverkehr. Dies wird nicht zuletzt durch die Aufnahme der eHighway-Technologie in die neue Hightech-Strategie der Bundesregierung deutlich [11]. Das Forschungsprojekt ELANO ordnet sich somit strategisch in die Forschungsleitlinien von drei beteiligten Bundesministerien ein. Es ist damit ein wesentlicher Baustein zur Erreichung der miteinander verknüpften umwelt-, verkehrs- und energiepolitischen Ziele, die in integrierten verkehrswissenschaftlichen Szenarien [12] als notwendig und erreichbar erachtet werden. Zusammen mit den Feldversuchen und den weiteren Technologieprojekten bilden die Ergebnisse des Projekts ELANO die technologische und systemtechnische Basis für die Elektrifizierung des schweren Straßengüterverkehrs.

## 2 Voraussetzungen und Struktur des Projekts

### 2.1 Organisatorische Voraussetzungen des Vorhabens

Wesentliche Grundlage für das Forschungs- und Entwicklungsprojekt ELANO war das bei Siemens vorhandene Know-how sowie die langjährige Erfahrung sowohl im Bereich des Auf- und Ausbaus elektrischer Verkehrssysteme als auch im Bereich der Ausrüstung von Fahrzeugen mit Elektroantrieben. Das Projekt wurde von der Division *Mobility* der Siemens AG getragen, die während der Projektlaufzeit in die selbstständige Konzerngesellschaft *Siemens Mobility GmbH (SMO)* ausgegründet wurde.

*Siemens Mobility* verfügt als Systemhaus für alle Anwendungsgebiete elektrischer Verkehrssysteme über Kompetenzen im gesamten Lebenszyklus - von der Konzeption und Auslegung über die Errichtung und Inbetriebnahme bis hin zum Betrieb und zur Instandhaltung. Als Kompetenzzentrum für marktvorbereitende Analysen und Entwicklungen übernahm die Abteilung *Technologie & Innovation* die Gesamtprojektleitung und verantwortete gleichzeitig die Weiterentwicklung des Stromabnehmers sowie den Betrieb der Versuchsanlage. Ein wesentlicher interner Projektpartner war die Geschäftseinheit *Electrification* als weltweit anerkannter Anbieter für zuverlässige und effiziente Elektrifizierungslösungen im Nah- und Fernverkehr.

Weitere wichtige technologische Grundlagen für dieses Vorhaben bildeten die zahlreichen, erfolgreich abgeschlossenen Forschungs- und Entwicklungsprojekte der Siemens AG auf den Gebieten der Hybridantriebssysteme für Stadtbusse, der Bahnelektrifizierung sowie der Verkehrsmanagementsysteme. Darüber hinaus hat Siemens mit der erfolgreichen Durchführung der Vorgängerprojekte ENUBA [2] und ENUBA 2 [3] die vorhandene Qualifikation als verlässlicher Forschungspartner für derartig komplexe und neuartige Entwicklungsprojekte unter Beweis gestellt. Unter diesen organisatorischen Voraussetzungen konnte das Forschungsprojekt ELANO kompetent, inhaltlich umfassend und zielorientiert bearbeitet werden.

### 2.2 Stand der Technik zu Projektbeginn

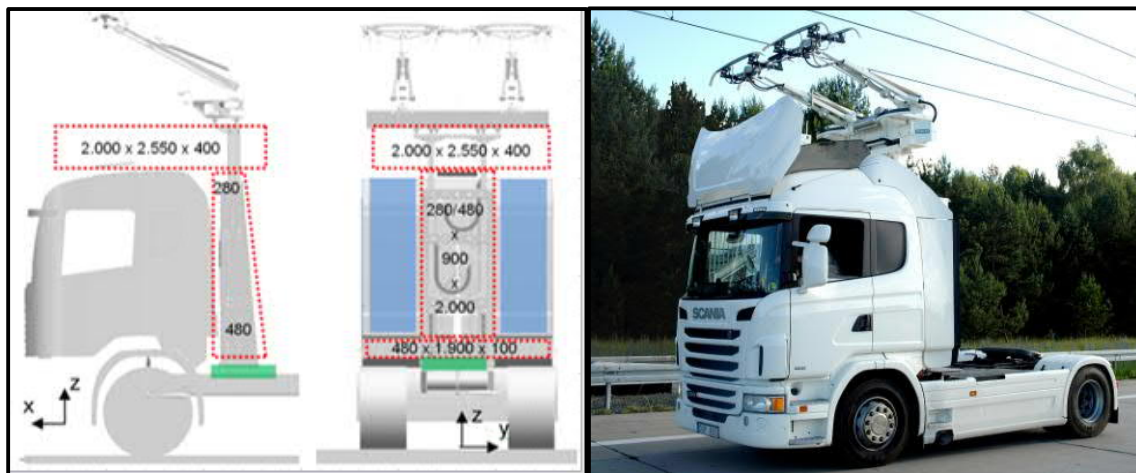
#### 2.2.1 Technologiebasis ENUBA und ENUBA 2

Die systematischen Untersuchungen der Elektrifizierungsoptionen für schwere Nutzfahrzeuge mittels Oberleitungen und speziell entwickelter Stromabnehmer begannen 2010 mit dem Projekt ENUBA (Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen) [2]. Motiviert durch die nachgewiesene grundsätzliche technische Machbarkeit wurden die Entwicklungstätigkeiten im Rahmen des Projekts ENUBA 2 intensiviert und ausgeweitet [3]. Einen Überblick über die inhaltlichen Schwerpunkte und die Ergebnisse der beiden Forschungsprojekte gibt Tabelle 2 (S. 12). Ein Hauptziel von ELANO war die Weiterentwicklung des Stromabnehmers einschließlich einer Optimierung der Gesamtarchitektur, die auf den Ergebnissen und Erprobungserfahrungen mit den Vorgängergenerationen aufbaute.

Abbildung 2 zeigt den ersten Typ Funktionsmuster aus dem Projekt ENUBA, der auf einem etwa 1,5 m langen Komponententräger hinter der Fahrerkabine angeordnet war.



Abbildung 2: Lkw-Stromabnehmer der ersten Generation im Projekt ENUBA [13]



**Abbildung 3: Lkw-Stromabnehmer der zweiten Generation im Projekt ENUBA 2 [3]**

Der wichtigste Entwicklungsschritt beim Stromabnehmer in ENUBA 2, s. Abbildung 3, war die Verkürzung des Bauraums auf 0,5 m, sodass auch Sattelzugmaschinen (SZM) für den Betrieb mit Sattelaufliegern mit Stromabnehmern ausgerüstet werden konnten.

**Tabelle 2: Inhalte und Ergebnisse der Förderprojekte ENUBA [2] und ENUBA 2 [3]**

Projekt	ENUBA	ENUBA 2
Laufzeit	05/2010 - 09/2011	05/2012 - 12/2015
Stromabnehmer	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entwicklung eines zweipoligen, aktiv geregelten Stromabnehmers, auf großem Komponententräger (1,5 m Bautiefe)</li> <li>2 Funktionsmuster für die Integration in Versuchsfahrzeuge</li> <li>1 Labormuster für Funktionstests</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimierung und Verkürzung des Stromabnehmers zur Integration in eine Sattelzugmaschine (0,5 m Bautiefe)</li> <li>2 Funktionsmuster für die Integration in unterschiedliche Versuchsfahrzeuge</li> <li>1 Labormuster für externe Labortests</li> </ul>
Fahrzeugtechnik	<ul style="list-style-type: none"> <li>serieller Hybridantrieb mit Ultra-Kondensatoren als Energiespeicher für kurze Unterbrechungen und Wechsel zwischen Diesel- und Oberleitungsbetrieb</li> <li>Umbau durch Siemens in Eigenregie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Sattelzugmaschine mit parallelem Hybridantrieb und kleiner Traktionsbatterie (in Kooperation mit Scania)</li> <li>1 Sattelzugmaschine mit serielltem Hybridantrieb und großer Traktionsbatterie im Trailer (Siemens in Eigenregie)</li> </ul>
Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>Versuchsanlage mit 1,2 km nutzbarer Länge ohne Kurve und ohne verkehrstechnische Peripherie (z. B. Rückhaltesysteme, Leitstelle, Schilderbrücke)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Versuchsanlage mit 2,1 km nutzbarer Länge mit Doppel-S-Kurve und mit umfangreicher straßenverkehrstechnischer Ausstattung (z. B. Rückhaltesysteme, integrierte Leitstelle, Wechselverkehrszeichen- und Wegweiserbrücke)</li> </ul>
Umweltwirkung und Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>initiale, makroskopische Abschätzungen unter Berücksichtigung vereinfachter Fahrleistungsannahmen</li> <li>Umweltwirkung reduziert auf Analyse der CO<sub>2</sub>-Einsparpotentiale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>tiefgründige, unabhängig begleitete Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aufbauend auf realen Verkehrsaufkommen</li> <li>unabhängig begleitete, vergleichende gesamtsystemische Analyse der stofflichen und nichtstofflichen Umweltwirkungen</li> </ul>
Gesamtsystem	<ul style="list-style-type: none"> <li>Systemauslegung und Erprobung mit dem Schwerpunkt Interaktion der Teilsysteme auf der Versuchsanlage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>umfassende Gefährdungs- und Risikoanalyse (GuR) des Systems sowie vertiefte technische Bewertung der Integrationsfähigkeit in bauliche und betriebliche Abläufe auf Fernstraßen</li> </ul>

Die Stromabnehmer beider Generationen, vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3, verfügten über horizontale und vertikale Bewegungsachsen mit pneumatischen und elektrischen Aktoren. Die horizontale Beweglichkeit ermöglichte zusammen mit der Schleifleistenbreite einen Oberleitungsbetrieb der Fahrzeuge in der gesamten Breite der elektrifizierten Fahrspur, führte aber zu einer sehr komplexen mechatronischen Architektur. Zentraler Ansatzpunkt und Ziel von ELANO war es daher, unter Beachtung der Bauraumvorgaben und unter Ausnutzung der Synergien mit Spurhalteassistenten eine einfachere, robuste und auch hinsichtlich der Komponentenkosten optimierte Architektur für den Stromabnehmer zu entwickeln.



### 2.2.2 Hybridisierung in der Lkw-Branche

Im schweren Straßengüterverkehr ist als Antrieb weiterhin fast ausschließlich der Dieselmotor im Einsatz. Aber die Hybridisierung rückt bei Fernverkehr-Lkws immer mehr ins Bewusstsein der Lkw-Hersteller. Derzeit werden unterschiedliche Antriebssysteme in schweren Nutzfahrzeugen am Markt eingeführt, die einen gewissen Grad an Elektrifizierung beinhalten.




















Folgende Varianten alternativer Hybridantriebssysteme wurden dazu in [14] näher betrachtet:

- Parallelhybrid
- Serieller Hybrid
- Leistungsverzweigender Hybrid
- Mild-Hybrid
- Batterie-Lkw
- batterie-Lkw mit Range Extender
- Brennstoffzellen-Batterie-Lkw

Antriebstechnologien, die mit einer ausreichend dimensionierten elektrischen Maschine ausgestattet sind, eignen sich für den Betrieb an einer elektrischen Oberleitung. Von den Hybrid-Antriebssystemen ist der Mild-Hybrid nicht geeignet. Eigenschaften und Voraussetzungen auf der Seite des Hybrid-Antriebssystems, damit ein Lkw für den Oberleitungsbetrieb umgerüstet werden kann, werden in [14] diskutiert.

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.

Aus der Vielzahl der schon regelmäßig eingesetzten oder in Entwicklung und Erprobung befindlichen Fahrzeug-Technologien und den fahrdynamischen, betrieblichen und infrastrukturellen Randbedingungen ergibt sich ein umfangreicher Lösungsraum. Die folgende Abbildung 4 verdeutlicht die Kombinationsmöglichkeiten, aus denen für den jeweils geplanten Einsatz eine Vorzugskonfiguration abgeleitet werden kann.

eHighway Lkw	Antriebssystem	Fahrzeugseitige Stromversorgung	Verbrennungsmotor	Nicht-elektrische Energiequelle
 Zugmaschine (2 Achsen)	 Parallelhybrid	 Batterie (klein)	 Motor (klein)	 Diesel
 Zugmaschine (3 Achsen)	 Serieller Hybrid	 Batterie (mittel)	 Motor (mittel)	 Biokraftstoff
 Gliederzugmaschine (2 Achsen)	 Vollelektrifiziert	 Batterie (groß)	 Motor (groß)	 CNG/LNG
 Gliederzugmaschine (3 Achsen)		 Brennstoffzelle		 H <sub>2</sub>
 Gliederzugmaschine (4 Achsen)				

**Abbildung 4: Möglichkeiten zur Konfiguration eines eHighway Lkw**

Entscheidende Erfolgsfaktoren für den Bereich der Lkw-Energieversorgung sind einerseits die Verfügbarkeit der Energiespeicher und ggf. Brennstoffe und andererseits das Vorhandensein einer geeigneten Versorgungsinfrastruktur. Für die beabsichtigten Emissionsreduktionen sind die elektrischen Energiespeicher sowie die alternativen Brennstoffe von hoher Bedeutung.

Durch die Möglichkeit, verschiedene Hybridantriebskonzepte mit einer Fahrleitung als externe Energieversorgungsquelle zu kombinieren, entsteht eine breite technologische Basis als Rückgrat vielfältiger energieoptimierter Logistikketten.



## 2.3 Projektstruktur und Arbeitsziele

### 2.3.1 Projektstruktur und Überblick

Ein Elektromobilitätskonzept wie das eHighway-System weist mehrere Teilsysteme und zahlreiche zwei- oder mehrseitige Schnittstellen und Abhängigkeiten auf, die kontinuierlich und systematisch so weit entwickelt wurden, dass die Voraussetzungen für die Erprobung und Qualifizierung des Systems in seiner Einsatzumgebung gegeben sind.

Die in den folgenden Unterkapiteln zum Gesamtsystem und zu den Teilsystemen beschriebenen Arbeitspakete waren wesentlich für die Erreichung der übergeordneten Projektziele. Eine Gruppierung der Arbeiten war durch Zuordnung zu den Teilsystemen bzw. zur Gesamtsystemintegration und Projektsteuerung möglich. Diese Haupthandlungsfelder werden nachfolgend kurz charakterisiert und in Abschnitt 2.3.2 vorgestellt. Die detaillierte Beschreibung der Ziele und Ergebnisse auf Arbeitspaketebene ist Gegenstand von Abschnitt 3.

Das Projekt ELANO konzentrierte sich zum einen auf die individuelle Weiterentwicklung zentraler Komponenten und Schnittstellen in den Teilsystemen Stromabnehmer, Energieversorgung und Fahrzeugtechnik. Diese Arbeiten wurden eingerahmt durch die als Querschnittsthemen zu betrachtenden Optimierungen an zentralen Schnittstellen und auf Ebene des Gesamtsystems. Diese Arbeiten wurden ergänzt durch fortgesetzte praktische Tests mit Erprobungsträgern auf der Versuchsanlage sowie in internen und externen Prüflaboren. Einen Überblick über die Projektstruktur und zur Zuordnung einzelner Arbeitspakete zu den Handlungsfeldern gibt Abbildung 5.

Die zunächst anschließende Vorstellung der Arbeitsschwerpunkte in den Unterkapiteln orientiert sich ebenfalls an dieser Einteilung. Die Arbeiten im Projekt ELANO lassen sich in den folgenden sechs Themenfeldern zusammenfassen:

- SYS - Technologie Gesamtsystem (vgl. Abschnitt 2.3.2.1)
- PAN - Entwicklungsprogramm Stromabnehmer (vgl. Abschnitt 2.3.2.2)
- TSV - Innovationen bei Traktionsstromversorgung und Fahrleitung (vgl. Abschnitt 2.3.2.3 )
- EFZ - Elektrische Fahrzeugtechnik (vgl. Abschnitt 2.3.2.4)
- TEB - Test-/Erprobungsbetrieb und Laborprüfungen (vgl. Abschnitt 2.3.2.5)
- PS - Projektsteuerung, Dokumentation und Systemintegration (vgl. Abschnitt 2.3.2.6)

<b>SYS – Technologie Gesamtsystem</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systemanalyse und -simulation für Referenzszenarien der Kombinationen aus dynamischer und stationärer Versorgung</li> <li>• Technische Strategien zur Netzintegration und zur Versorgung durch erneuerbare Energien</li> <li>• Vereinfachungen und Optimierung der Schnittstelle Stromabnehmer – Fahrleitung</li> </ul>			
<b>PAN</b>	<b>TSV</b>	<b>EFZ</b>	<b>TEB</b>
<i>Entwicklungsprogramm Stromabnehmer</i>	<i>Traktionsstromversorgung</i>	<i>Elektrische Fahrzeugtechnik</i>	<i>Test- und Erprobungsbetrieb</i>
Mehrere Iterationszyklen mit: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anforderungsanalyse durch geänderte Systemvorgaben</li> <li>• Variantenbewertung</li> <li>• Architekturentscheidung</li> <li>• Funktionsmuster</li> <li>• Integration in Erprobungsträger</li> <li>• Tests und Laborerprobung</li> <li>• Härtung für Einsatzumfeld</li> <li>• Funktionale Sicherheit zur Umsetzung EN 26262</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• eHighway-Fahrleitung</li> <li>• Monitoringsysteme</li> <li>• Intelligentes Energiemanagement</li> <li>• Modulares Schutz- und Steuergerät</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modulare, mehrfach hybride Antriebe und Speicher</li> <li>• EMV bei extern versorgten elektrischen Fahrzeugen</li> <li>• Integration der Hilfsbetriebe</li> <li>• Umrüstung Erprobungsträger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betrieb der Versuchsanlage</li> <li>• Betrieb der Erprobungsträger</li> <li>• Vergleichsfahrten, Alltagserprobung</li> <li>• ext. Prüflabor</li> <li>• Qualifizierung Prüfstände</li> </ul>
<b>PS - Projektsteuerung</b>			
Systemintegration, Projektberichterstattung und -dokumentation, EHS-Management, Qualitätsmanagement			

Abbildung 5: ELANO Projektstruktur und Kernthemen von Forschung und Entwicklung

## 2.3.2 Ziele und Inhalte der Themenfelder

### 2.3.2.1 Technologie Gesamtsystem - SYS

Gegenstand dieses Themenfelds waren alle betriebs- und systemtechnischen Analysen auf Gesamtsystemebene zur Ausdifferenzierung und Optimierung des eHighway-Systems als Basis und Rahmen der in Abbildung 1 (S. 9) dargestellten Arbeiten auf Teilsystemebene und an deren Schnittstellen. Dazu gehörten einerseits teilsystemübergreifende Arbeiten zu zentralen Kenngrößen, wie beispielsweise der Systemspannung oder optimaler Energiespeichergrößen. Andere Arbeitspakete widmeten sich verschiedenen Bausteinen einer ganzheitlichen Technologiestrategie, in denen beispielsweise Fragen zur Abrechnung, zur Netzintegration oder zu den Synergien mit anderen Fahrzeugklassen und Ladetechnologien zu bearbeiten waren.

Die Arbeiten in diesem Themenfeld gliederten sich in folgende sechs Arbeitspakete:

- SYS.1 - Einführungsmodelle und Referenzszenarien für die Elektrifizierung des schweren Straßengüterverkehrs
  - Betriebliche und wirtschaftliche Analyse von Einsatzspektren
  - Identifizierung von Betriebs- und Einführungsmodellen
  - Simulation von Referenzszenarien auf Basis realer Strecken- und Fahrzeugdaten
  - Ergebnisanalyse zur Ableitung von Basisparametern für Teilsysteme
  - Querschnittstudie zu Status Quo und Trends für Traktionsbatterien
- SYS.2 - Elektromobilitätstrategie und Synergien mit anderen Fahrzeugklassen
  - Synergien mit Pkw-Elektromobilität
  - Integration von Fernbussen im eHighway-System
  - Synthese der Anforderungen als ergänzende Auslegungsgrundlagen
- SYS.3 - Energieversorgung - Netzintegration und Abrechnungssysteme
  - Strategien zur Netzintegration und zur Versorgung durch Erneuerbare Energien einschließlich Lastflussanalysen und Speichermanagement in autarken Teilnetzen
  - Basisszenarien und darauf zugeschnittene Abrechnungssysteme einschließlich Erprobung eines eHighway-Abrechnungskonzepts
- SYS.4 - Infrastrukturgestütztes Autonomes Fahren
- SYS.5 - Optimierung der Schnittstelle Fahrleitung - Stromabnehmer
  - Analyse von Verkehrsgrößen und Verifikation der Anforderungsdefinitionen
  - Erarbeitung vereinfachter Fahrleitungs- und Stromabnehmerarchitekturen
  - Konkretisierung und Qualifizierung optimierter Lösungskonzepte
- SYS.6 - Technologien für vollelektrische Fahrzyklen
  - Anforderungen und Technologien für das Stillstandsladen schwerer Nutzfahrzeuge
  - Optimierung der Systemspannung aus Fahrzeug- und Infrastruktursicht
  - Sicherheitsanalyse Gesamtsystem nach Common Safety Methods (CSM)

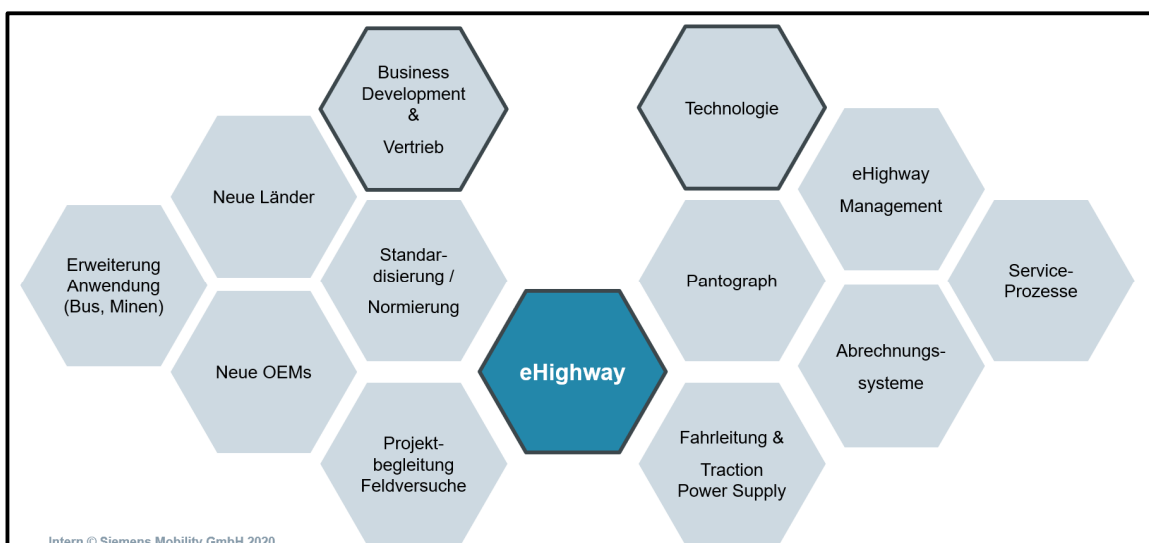


Abbildung 6: Entwicklung einer integrierten Elektromobilitätslösung

### 2.3.2.2 Entwicklungsprogramm Stromabnehmer – PAN

Zur Erreichung einer am Markt unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten akzeptierten Elektromobilitätslösung mit der Kernkomponente „Stromabnehmer“ für schwere Lkw ist dessen umfassende Weiterentwicklung und Optimierung mit folgenden zentralen Zielen erforderlich:

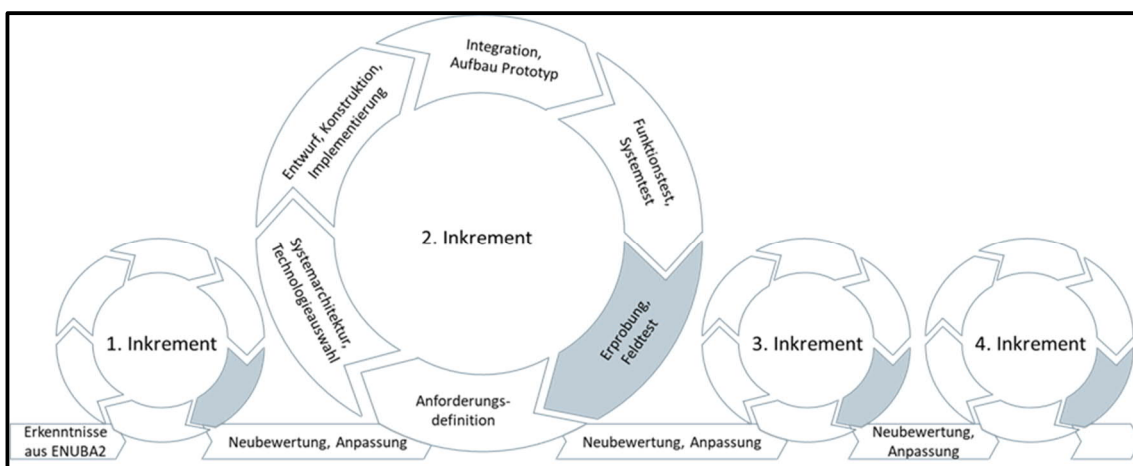
- deutliche Verringerung der Komponenten- und System-Komplexität, des Zusatzgewichts und der Material-, Fertigungs- und Inbetriebsetzungsaufwände
- Erhöhung der Zuverlässigkeit und Robustheit sowie Wechsel auf durchgängig kraftfahrzeugtaugliche, homologationsfähige Bauteile und Komponenten in allen Funktionseinheiten

Beide Optimierungsziele werden ineinander verschränkt im Entwicklungsprojekt ELANO für den Stromabnehmer verfolgt. Insbesondere die erforderliche Reduktion der Komplexität erfolgt dabei im Wechselspiel mit der Optimierung des Gesamtsystems aus Betrieb, Infrastruktur und Fahrzeug. Die Optimierung startet mit einer tiefgründigen Analyse der Anforderungssituation und führt im Ergebnis zu bestätigten, erhöhten oder vereinfachten Einzel-Anforderungen an den Stromabnehmer als Basis der Weiterentwicklung. Die Entwicklung und Erprobung des Stromabnehmers basiert dabei auf dem nach Stand der Technik am besten geeigneten, iterativ-inkrementellen Technologieentwicklungsprozess in der industriellen Forschung, welcher im Rahmen des Forschungsprojektes in mehreren aufeinander folgenden Entwicklungszyklen (Inkrementen) durchlaufen wird, s. Abbildung 7. Der Stromabnehmer hat ausgehend von der Anforderungsanalyse zahlreiche Funktionen, sodass im mechatronischen Konzept eine Unterteilung in folgende Arbeitspakete für die verschiedenen Funktionseinheiten möglich ist:

- PAN.1 - Positionierung in Arbeitshöhe
- PAN.2 - Vertikalbewegung im Arbeitsbereich
- PAN.3 - Horizontalbewegung der Arme im Arbeitsbereich
- PAN.4 - Kontaktsystem, Wippen und Arme
- PAN.5 - Sicherheitsorientiertes Sensorikkonzept
- PAN.6 - Steuerung und Safety-Controller für Sicherheitsfunktionen
- PAN.7 - Qualifizierung der Diagnosesysteme
- PAN.8 - Einsatzumfeldangepasste Integration für Komponenten
- PAN.9 - Anpassentwicklungen für weitere Anwendungen

Ergänzend zu den Funktionseinheiten sind in folgenden Querschnittsthemen über den gesamten Entwicklungsprozess kontinuierlich Arbeiten erforderlich:

- PAN.10 - Gewährleistung funktionaler Sicherheit nach ISO 26262 [15]
- PAN.11 - Elektrische Sicherheit und Schutzkonzept
- PAN.12 - Musterbau - Aufbau von Funktionsmustern
- PAN.13 - Erprobung und Bewertung von Funktionsmustern
- PAN.14 - Normative Vorgaben, Zulassung und Homologation
- PAN.15 - Software-Sicherheit



**Abbildung 7: Iterativ-inkrementeller Entwicklungsprozess mit Feedback-Loop**

### 2.3.2.3 Innovationen bei Traktionsstromversorgung und Fahrleitung - TSV

Fahrleitungen und besonders Oberleitungen gelten mit großer Berechtigung als bewährte und robuste Anlagen zur kontinuierlichen Energieversorgung von Fahrzeugen. Auch die Energieversorgung von Straßenfahrzeugen weist über 130 Jahre Entwicklungs- und Erfahrungsgeschichte auf. Folglich standen im Mittelpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für dieses Teilsystem Anpassentwicklungen und Verbesserungen speziell für die Einsatzumgebung des elektrifizierten Schwerlastverkehrs auf Autobahnen. Maßgebliche Treiber dieser Anpassentwicklungen waren die Kombination von Traktionsenergieversorgung und Nachladung fahrzeugseitiger Energiespeicher in Verbindung mit zufälligem, stochastischem Verkehrsaufkommen ohne Fahrplan sowie die geänderten Lichtraumanforderungen im Ergebnis der beidseitigen Optimierung der elektromechanischen Schnittstelle Stromabnehmer-Oberleitung. Dies erforderte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in folgenden sieben Arbeitspaketen:

- TSV.1 - Systemoptimierung Stromversorgung und Fahrleitung
  - Referenzszenarien zur Kombination von Traktion und Nachladung – Szenarioauswahl und -simulation; Synthese abgeleiteter Anforderungen an Traktionsstromversorgung
  - Vorprojektierung modularer Unterwerke einschließlich Integration von Pkw-Schnelllade-Systemen in DC-Unterwerke
- TSV.2 - Systemoptimierung Fahrleitungskonstruktionen
  - Optimierung des horizontalen und vertikalen Arbeitsbereichs durch Sonderkonstruktionen für windschiefe Kurven
  - Neuentwicklung und Erprobung von Streckentrennern für hohe Fahrzeugdichten sowie Fahrleitungsklemmen für spezielle Lichtraumanforderungen (s. Abbildung 8)
- TSV.3 - Fahrleitungsmonitoring und Diagnose
  - Unabhängige Stromversorgung und Kommunikation
  - Einbindung der CMS-Datenquellen in zentrale Auswertungssysteme
- TSV.4 - Neuentwicklung modulares DC-Schutz- und Steuergerät
  - Entwicklung einschließlich Software-Entwurf und -Realisierung; Entwurf, Layout, Konstruktion und Integration der Hardware; Funktions- und Systemtests bis hin zur Typprüfung
- TSV.5 - Intelligentes Energie-Management-System (iEMS)
  - Umfassende Anforderungsanalyse und Umsetzungskonzept, Entwicklung der Energiemanagement-Funktionen, Konzept einer Real-Time-Simulation auf Basis von Offline-Modellen sowie Systemintegration und Pilotierung eines iEMS-Prototyps
- TSV.6 - Federnachspannung für zweipolige Kettenwerksfahrleitungen
  - Anforderungsdefinition, Machbarkeitskonzept und Realisierungsentscheidung und ggf. Erstmusterfertigung und Pilotierung auf der Versuchsanlage
- TSV.7 - RFID-Technologie zur Last- und Stromabnehmersteuerung
  - Anforderungsdefinition & Kommunikationskonzept; Hard- und Softwareengineering, Installation und Pilotierung auf der Versuchsanlage



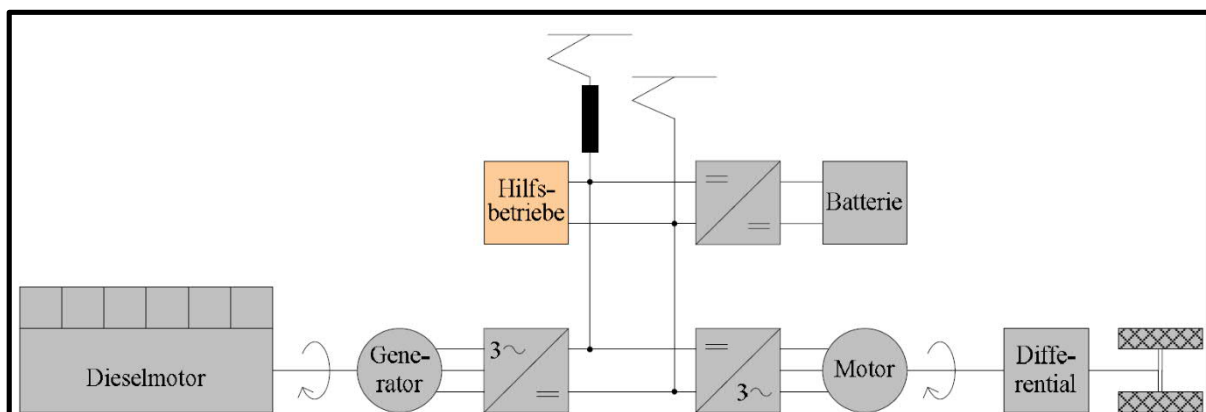
**Abbildung 8: Probearbeit am Versuchsaufbau der neu entwickelten Klemmen und Seitenhalter auf der Versuchsanlage in Groß Dölln**

### 2.3.2.4 Elektrische Fahrzeugtechnik - EFZ

Neben der Traktionsstromversorgung bildet das Fahrzeug das zweite essentielle Teilsystem in jedem elektrischen Verkehrssystem. Ergänzend zu den in Abschnitt 2.3.2.2 vorgestellten Entwicklungszielen und Arbeitsschritten zum Stromabnehmer (PAN) konzentrierten sich die Arbeiten im Teilsystem elektrische Fahrzeugtechnik (EFZ) einerseits auf die Bereitstellung und Weiterentwicklung der verschiedenen Erprobungsträger für den Versuchsbetrieb. Einen weiteren Schwerpunkt bildeten andererseits zahlreiche Arbeitspakete zur Optimierung der Systemauslegung für elektrische Lkw mit verschiedenen Antriebsmodulen sowie die Verallgemeinerung der Hilfsbetriebe-, Schutz- und EMV-Anforderungen für oberleitungsgespeiste Lkw.

Zu diesem Teilsystem waren Forschungsarbeiten in folgenden sieben Arbeitspaketen geplant:

- EFZ.1 - Systemauslegung für mehrfach-hybride Antriebssysteme
  - Systemanforderungen für kombinierte Traktions- und Laderegime
  - Optimierte Systemauslegung eines mehrfach hybriden Fahrzeug-Antriebskonzeptes (einschl. Dieselmotor, Speicher, Ladetechnik, s. Abbildung 9)
- EFZ.2 - Fahrzeugschnittstellen und Stromabnehmerintegration
  - EFZ.2.1 Vereinheitlichte Schnittstellendefinition für alle Medien
  - EFZ.2.2 Optimiertes Hilfsbetriebekonzept für mehrfach hybride Lkw
  - EFZ.2.3 Optimierte Varianten zur Umsetzung des Fahrzeugschutzkonzeptes
  - EFZ.2.4 EMV-Management von fahrleitungsgespeisten Hybrid-Lkw
- EFZ.3 - ENUBA-Actros #1 als Stromabnehmer-Erprobungsträger
  - Anforderungsanalyse und elektro-mechanisches Design; Rückbau des alten Stromabnehmers und Erweiterung des Fahrzeugrahmens
  - Design, Konstruktion und Bereitstellung des neuen mechanischen Einbauraums sowie Bereitstellung aller Hilfsmedien und Datenverbindungen
  - Umbau, Inbetriebsetzung und TÜV-Abnahme des Erprobungsträgers
- EFZ.4 - ENUBA-Actros #2 - Aufrüstung Stromabnehmer-Steuerung
  - Weiterentwicklung Steuerungssoftware für PAN Actros #2 einschließlich Re-Konfiguration Hardware und Integrationsplanung für Steuerung und Bedienung
- EFZ.5 - Modularisierung mobiler Speichersysteme für elektrische Nfz\*
- EFZ.6 - „Range Extender“ für schwere elektrische Nutzfahrzeuge\*
- EFZ.7 - Optimierte Antriebssteuerungen für den Oberleitungsbetrieb
  - Anforderungsanalyse komplexer Antriebs- und Speichersteuerungen mit Lösungskonzept und Entwicklung Funktionsmuster
  - Adaption der Steuerungslandschaft und vorbereitende Tests für Systemerprobung und Integration in ein bestehendes Fahrzeugkonzept



**Abbildung 9: Hauptkomponenten eines mehrfach hybriden Antriebsstrangs mit Batterie, Dieselmotor, Oberleitungseinspeisung und seriellem Hybridantrieb**

\*Anmerkung zu EFZ.5 und EFZ.6: diese Projektelemente sind entfallen



### 2.3.2.5 Test-/Erprobungsbetrieb und Laborprüfungen -TEB

Der sichere und zuverlässige Betrieb der Versuchsanlage als Testcenter Elektromobilität sowie die Vorbereitung und Durchführung einschließlich Auswertung und Diskussion von Messungen und Tests an den Erprobungsträgern sowie der neuentwickelten Teilsysteme und Fahrzeuge standen im Fokus dieses Themenfelds. Neben den regelmäßigen Inspektionen und Instandhaltungsarbeiten bildeten externe Prüfungen und Messungen sowie die Entwicklung, Integration und Erprobung automatisierter Messsysteme für Dauermessungen weitere Schwerpunkte. Diese wurden für die Versuchsanlage entwickelt, können aber auch in den Feldversuchen eingesetzt werden, um dort Felddaten verschiedener Infrastrukturen und Fahrzeuge erheben zu können. Zu dem Themenfeld gehörten folgende Arbeitspakete:

- TEB.1 – Testcenter Elektromobilität - Betrieb der Versuchsanlage
  - Anlagenbetrieb (Arbeits- und Gesundheitsschutz, Pflichtunterweisungen, Betriebsleitung) sowie Planung und Koordination des Versuchsbetriebs inklusive Inspektions-/ Wartungsarbeiten und Durchführung von Reparaturen oder Änderungen
- TEB.2 – Testcenter Elektromobilität - Betrieb der Erprobungsträger
  - Koordination und Durchführung der regelmäßigen Pflichtwartungen und Inspektionen sowie von Reparaturen und Änderungen, s. Abbildung 10
- TEB.3 – Testcenter Elektromobilität - Erprobungsbetrieb / Testpersonal
  - Schulung und Einsatz der Elektrofachkräfte nach DIN VDE 0105-100 [16] für den Testbetrieb, Koordination der Testteams (Ingenieure, Techniker, Monteure)
- TEB.4 – Ermittlung von Klimafaktoren unter realen Anwendungsbedingungen
  - Erprobungsfahrten in alltagsnahen Betriebsabläufen inklusive Untersuchungen zur Alltagstauglichkeit eines Batteriesystems für Sattelzüge
- TEB.5 – Automatisierte Messsysteme für Langzeitreihen
  - Weiterentwicklung und Einbindung infrastrukturbasierter Monitoringsysteme für Stromabnehmer und Fahrleitung einschließlich Erprobung von Alternativsystemen für Schleifleistenmonitoring und Potenzialanalyse und Erprobung teilautomatisierter Infrastrukturinspektionen
- TEB.6 – Externe Prüfungen und Messsysteme – Systemprüfstand
  - Definition von Gütekriterien und Typprüfungsprozeduren und Qualifizierung eines Typ-Prüfstands für eHighway-Stromabnehmer
  - Externe Tests zu EMV, Klima, Aerodynamik sowie Fahrten auf Belastungs-Strecken von Lkw-Herstellern; Schallmessungen mit Mikrofon-Arrays zum Vergleich der Hybrid-Modi



**Abbildung 10: Oberleitungsinspektion auf der Versuchsanlage in Groß Dölln mit Zweiwegefahrzeug für Oberleitungsarbeiten**

### 2.3.2.6 Projektsteuerung, Dokumentation und Systemintegration - PS

Für die effiziente und zielorientierte Durchführung dieses komplexen und zugleich stark diversifizierten Entwicklungsprojekts mit einer Vielzahl an Beteiligten und Schnittstellen waren einerseits eine technisch-organisatorische Projektleitung sowie andererseits eine strukturierte, die einzelnen Arbeitspakete und Arbeitsschritte umfassende Systemintegration einschließlich einer intensiven Systemevaluation von elementarer Bedeutung.

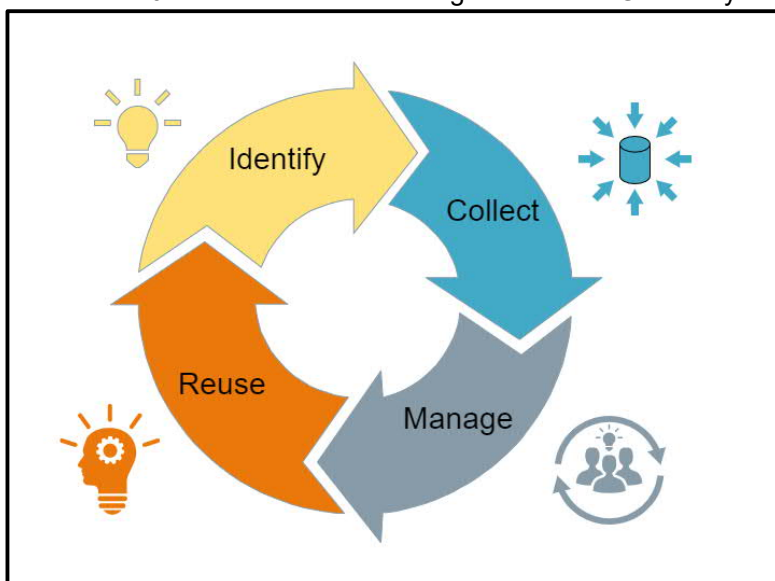
Nur mittels der konsequenten Erfassung und Verfolgung aller Anforderungen, der Identifizierung von Projektrisiken einschließlich Etablierung von geeigneten Maßnahmen zur Risikominimierung und eines umfassenden Interface-Managements zur Sicherstellung der technischen Funktionalitäten zwischen den Teilsystemen als Bestandteile eines koordinierten Entwicklungsprozesses konnte die Erreichung der Entwicklungsziele gewährleistet werden.

Weitere Elemente dieses Arbeitsbereichs waren die Anwendung der gängigen Projektmanagement-Methoden zur Planung und Steuerung von Kosten, Terminen, Arbeitsabläufen und Ressourcen, das Konfigurations- und Dokumentenmanagement sowie die zielgerichtete Etablierung und Bearbeitung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung als Bestandteil eines integrierten Qualitätsmanagements.

Darüber hinaus diente die Umsetzung einschlägiger Maßnahmen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes der Gewährleistung eines sicheren Betriebs von Versuchsanlage, Teststand und Laboratorien ohne Personenunfälle und Sachschäden.

Zu dem Themenfeld gehörten folgende Arbeitspakete:

- PS.1 - Projektberichterstattung und Dokumentation
  - Status-Dokumentation zum Projektfortschritt
  - Konfigurations- und Dokumentenmanagement
- PS.2 - Projektsteuerung und -koordination
  - Gesamtprojektleitung
  - Teilprojektleitung aller Themenfelder
- PS.3 - Systemintegration, Interfacemanagement, Testplanung
  - Gesamtsystemintegration Forschungs- und Entwicklungsthemen
  - Gesamtsystemintegration Versuchsanlage
  - Systemintegration aller Themenfelder
  - Interfacemanagement (Gesamtsystem)
  - Testplanung Gesamtsystem (Versuchsanlage, ext. Prüfungen)
- PS.4 - Qualitätsmanagement und EH&S-Management
  - Qualitätsmanagement auf Gesamtsystemebene
  - Arbeitsschutz und -organisation für Gesamtsystem



**Abbildung 11: Kontinuierlicher Lessons-Learned Prozess zur Qualitätssteigerung und Kostenreduzierung in Entwicklungsprojekten**

## 2.3.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

### 2.3.3.1 Wesentliche interne Partner

Als Kompetenzzentrum für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs mittels oberleitungsbasierter Energieversorgung ist die Abteilung „eHighway“ innerhalb der Siemens Mobility GmbH verantwortlich für die Technologie- und Marktentwicklung mit dem Ziel der Etablierung und Realisierung dieses umweltfreundlichen Verkehrskonzepts. Im Projekt ELANO leitete diese Einheit darüber hinaus das Gesamtprojekt und war für den Betrieb der eHighway-Versuchsanlage Groß Dölln zuständig.

Ein wesentlicher interner Entwicklungspartner im Projekt ELANO war die Einheit „Solutions for Smart Products and Advanced Technologies – SPA“. Die SPA ist zuständig für die Realisierung von Forschungs-, Entwicklungs- und Engineering- Aufträgen für Produkte und Lösungen aller Einheiten der Siemens Mobility. Ein zentrales Ziel der Einheit ist, die Eignung unterschiedlicher Forschungs-, Lösungs- und Produktansätze zu prüfen. Dazu gehören auch die praktische Erprobung innerhalb der eigenen oder in externen Testumgebungen sowie die Ableitung von Änderungs- und Verbesserungsvorschlägen.

Im Projekt ELANO konnte die Abteilung SPA ihre vielfältigen Kompetenzen auf den Fachgebieten Robotik, Automatisierungstechnik, Mechatronik und Sensorik, Lokalisierungsverfahren und Kommunikationssysteme, Bildverarbeitung und Mustererkennung sowie Cloud Computing einschließlich Big-Data-Analysen in zahlreichen Arbeitspaketen unter Beweis stellen.

Ein weiterer bedeutender interner Projektpartner war die Mobility Geschäftseinheit „Electrification“ als weltweit anerkannter Anbieter für zuverlässige und effiziente Elektrifizierungslösungen im Nah- und Fernverkehr mit Produkten, Systemen und Lösungen aus den Gebieten Bahnstromversorgung, Fahrleitung und Netzleittechnik. Das Spektrum reicht von elektromechanischen Fahrleitungskomponenten bis hin zu hochintegrierten Regelungs- und Steuerungstechnologien für die Bahnstromversorgung.

Im Projekt ELANO war die Einheit „Electrification“ neben der oben genannten Abteilung „eHighway“ ein eigenverantwortlicher Entwicklungspartner und konnte seine vielfältigen Kompetenzen auf den Fachgebieten Planung/Entwicklung von Fahrleistungsanlagen, Schutz- und Leitechnik, intelligente Verkehrssteuerung sowie Smart Monitoring & Analytics effizient und zielgerichtet einbringen.

### 2.3.3.2 Wesentliche externe Partner im Bereich „FuE-Fremdleistungen“

#### Institut für Bahntechnik GmbH

Die im Vorprojekt ENUBA 2 zu Teilaspekten des eHighway-Systems bereits erarbeiteten Gefährdungs- und Risikoanalysen (GuR) wurden, orientiert an dem EU-Regelungsrahmen für den Bahnsektor entsprechend [17] systematisch und strukturiert fortgeführt und dabei Lücken in den bisherigen Bewertungen geschlossen. Das IFB hat den Prozess methodisch und fachlich begleitet und die Erfahrungen aus der Eisenbahntechnik und deren Zulassungsverfahren in die Analyse einfließen lassen.

#### IAV GmbH

Die IAV, ein Spezialist für Automotive Engineering und Entwicklungspartner der Automobilindustrie, hat einen auf die besonderen Anforderungen der eHighway-Lkw zugeschnittenen Spurhalteassistenten (Lane Keeping Assist LKA) prototypisch entwickelt und dieses System für die ersten Stufen der Erprobung des neuartigen Stromabnehmers der dritten Generation in einen Test-Lkw integriert.

#### Panto Inspect A/S

Im Themenfeld der Infrastruktur-basierten Überwachung und Bewertung von Stromabnehmersystemen und deren Befahreigenschaften an eHighway-Fahrleitungssystemen hatte das dänische Unternehmen den Auftrag, zwei Pantographen-Scannersysteme auf dem Versuchsgelände Groß Dölln zu installieren und im weiteren Verlauf des Projektes, auf Basis der Messdaten aus dem Langzeit-Erprobungsbetrieb mit verschiedenen Lkw, notwendige Adaptionen und Optimierungen vorzunehmen. Ziel war die spezifische System-Qualifizierung für den Einsatz der Scanner in eHighway-Anwendungen.

### Qamcom Research and Technology AB

Qamcom Research and Technology bietet Produkte und Lösungen im Bereich Wireless Connectivity (5G) und autonome System (z.B. Autonomes Fahren und autonome Maschinen) sowie IoT Lösungen an. Auf Basis der langjährigen Erfahrungen für Radaranwendungen in Sicherheits-, Automotive und Überwachungsanwendungen wurde Qamcom beauftragt, einen Radardetektor zur Erkennung der Oberleitung anzupassen und im Rahmen eines Dauerteststandes in Groß Dölln die Verfügbarkeit unter verschiedenen Umwelteinflüssen zu erproben und die Einsetzbarkeit im Rahmen einer sicherheitsrelevanten Automotive-Anwendung zu beurteilen.

### TTTech Auto AG

Die TTTech Auto AG bietet Lösungen im Automobilbereich an und ist spezialisiert auf sichere und serientaugliche Software- und Hardware-Plattformen. Im Rahmen des Projektes zur Steuerung des Pantographen erhielt die TTTech Auto AG den Auftrag, den Sicherheitsnachweis für die Steuereinheit TTC580 nach der Automotive Norm ISO26262 [15] mit dem Automotive Safety Integrity Level ASIL-C zu erbringen. Der Nachweis schließt dabei die Erfüllung der geforderten Metriken – angepasst an die Sicherheitsziele, Umweltbedingungen und das Einsatzprofil des Pantographen ein.

### Scania AB Schweden

Über die oben genannten Dienstleister hinaus war das Unternehmen Scania AB Schweden ein Forschungspartner im Sinne eines assoziierten Partners, der seine Leistungen im Rahmen der Scania Technologie-Roadmap eigenverantwortlich erbracht hat.

### 2.3.3.3 Wesentliche Partner im Bereich „Sonstige Leistungserbringer“

Der Erprobungsbetrieb mit mehreren Lkw auf dem Versuchsgelände in Groß Dölln und den eHighway Feldversuchsstrecken in Hessen und Schleswig-Holstein sowie der Betrieb der Versuchsanlage selbst ist notwendigerweise mit zahlreichen Dienstleistungen verbunden, die zu Sicherheit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Versuchsanlage beitragen. Dazu gehörten im Projekt ELANO u. a.:

- Reparaturen und Umbauten am elektrischen Fahrleitungssystem
  - SPL Powerlines GmbH  
Die SPL Powerlines GmbH hat das Deckenstromschiene-/ Oberleitungssystem im Shelter installiert sowie diverse Modifikationen und Optimierungen an der Oberleitungsanlage der Teststrecke durchgeführt.
- Umbauten, Reparaturen und Optimierungen an den Versuchsfahrzeugen
  - Paul Nutzfahrzeuge GmbH  
Die Paul Nutzfahrzeuge GmbH hat den Umbau des Lkw Actros #1 zum multifunktionalen Erprobungsträger für Test- und Mesfahrten im Rahmen der Pantographenentwicklung durchgeführt.
  - CTM Fahrzeugbau GmbH  
Die CTM Fahrzeugbau GmbH hat Arbeiten an der Sattelzugmaschine Emma sowie am zugehörigen Batterieauflieger im Rahmen von Fehleranalysen / Reparaturen sowie Modifikationen und Umbauten zur Optimierung der Lkw-Antriebssteuerung ausgeführt.
  - Endres GmbH & Co KG  
Die Endres GmbH & Co KG hat die zyklischen Wartungen und Sicherheitsprüfungen an den Versuchsfahrzeugen sowie kleinere Instandsetzungsarbeiten ausgeführt.
  - Akasol AG  
Die Akasol AG hat im Projekt ENUBA 2 das Energiespeichersystem für den Batteriesattelzug Emma geliefert und im Rahmen von ELANO Evaluationen im Zuge der diversen Betriebserprobungen sowie Instandhaltungsarbeiten ausgeführt.
- Reparaturen und Umbauten an Systemen und Einrichtungen auf dem Versuchsgelände
  - Elektro Thomas GmbH

Die Elektro Thomas GmbH hat Kabelverlege- und Elektroinstallationsarbeiten an diversen elektrischen Anlagen auf dem Versuchsgelände Groß Dölln ausgeführt. Dies umfasste sowohl Arbeiten auf der Teststrecke (z. B. Wechselerkehrszeichenbrücke, WLAN-Kommunikation) als auch im Shelter (z. B. schutztechnische Einrichtungen) und in der Leitstelle (z. B. Modifikationen am Server).

- Straßenverkehrstechnik Thiele GmbH

Durch die SVT GmbH wurden Teile der Fahrbahnmarkierungen auf der Teststrecke ausgebessert / erneuert, um auf diese Weise die Erkennungsgenauigkeit unterschiedlich beschaffener Markierungsgütern durch die Spurhalteassistenten der Versuchsfahrzeuge testen zu können.

- Bewachung des Versuchsgeländes

- Panthera Security

Die Bewachungsleistung für das eHighway-Versuchsgeländes wurde durch die Firma Panthera Security erbracht.



## 3 Ergebnisse des Fördervorhabens

### 3.1 Technologie Gesamtsystem - SYS

#### 3.1.1 Einführungsmodelle und Referenzszenarien für die Elektrifizierung des schweren Straßengüterverkehrs (SYS.1)

##### 3.1.1.1 Einführungsmodelle und Referenzszenarien (SYS.1.1-SYS.1.4)

##### Aufgabenstellung

Im Arbeitspaket SYS.1.1-1.4 wurden die Anforderungen für die Auslegung von Antriebs-, Speicher- und Energieversorgungssystemen des eHighways untersucht, um daraus Erkenntnisse für Randbedingungen, Abhängigkeiten und Wechselwirkungen dieser Systeme zu gewinnen. Die gewonnenen Ergebnisse ermöglichen eine Beurteilung des Lastverlaufes der Energieversorgungsinfrastruktur in Abhängigkeit von verschiedenen Betriebssituationen, wie z.B. Verkehrsdichten.

##### Vorgehensweise

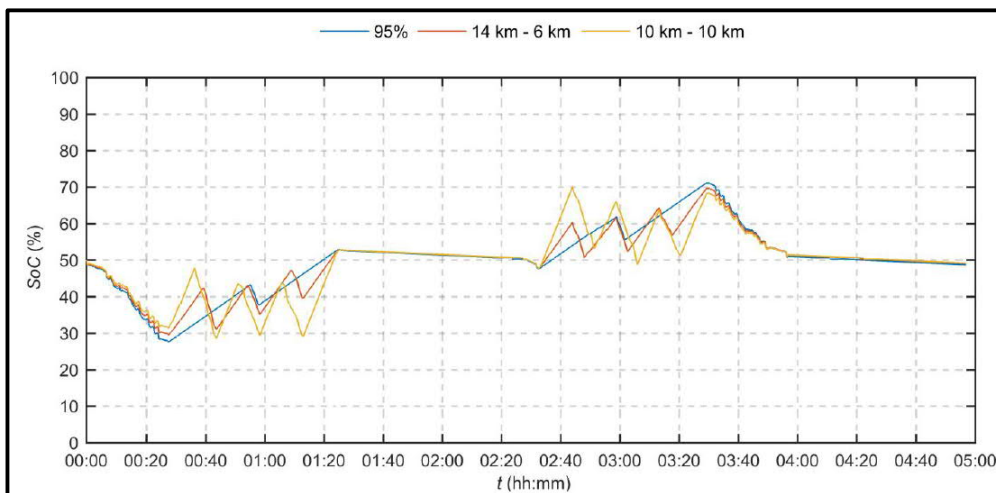
Hierzu wurde zunächst eine betriebliche und wirtschaftliche Analyse von Einsatzspektren anhand von archivierter FCD (Floating Car Data) für schwere Nutzfahrzeuge vorgenommen, was auch die Ermittlung von Fahrweiten auf dem Autobahnnetz und dem sekundären Netz beinhaltete. Die Ausführungen zu FCD stützen sich auf einen Bericht [18] der Bergischen Universität Wuppertal als Forschungspartner. Dabei weisen die Längen der zurückgelegten Fahrstrecken im Haupt- und Sekundärnetz in Deutschland deutliche Unterschiede auf. Der Durchschnittswert aller unterbrechungsfreien Einzelfahrten eines Tages auf dem Autobahnnetz beträgt 73 km und auf dem sekundären Netz 33 km, wobei mehrere Einzelfahrten pro Tag durchgeführt werden. Der Anteil von Langstrecken- und Transitarfahrten scheint im Datensatz unterrepräsentiert.

**Tabelle 3: Fahrstrecken im Haupt- und sekundären Netz**

	Hauptnetz			Sekundärnetz		
	Median	Durchschnitt	95% Perzentil	Median	Durchschnitt	95% Perzentil
alle	38 km	<b>73 km</b>	240 km	18 km	<b>33 km</b>	106 km
max	94 km	<b>123 km</b>	350 km	35 km	<b>53 km</b>	158 km
min	31 km	<b>70 km</b>	216 km	9 km	<b>16 km</b>	56 km

Darauf aufbauend wurden Betriebs- und Einführungsmodelle identifiziert, Kennwerte von Versuchsfahrzeugen abgeleitet und diese dann mit Hilfe eines Simulationsprogramms (MATLAB Simulink) plausibilisiert. Aus den FCD wurden daraufhin Referenzszenarien (Streckenverläufe) und verschiedene Elektrifizierungsgrade definiert, um einen Vergleich von Kenndaten zu ermöglichen. Unter anderem wurden Kenndaten wie z. B. Netzenergieaufnahme, rekuperierte Energie am Rad und Ladeenergie „Energy Storage System (ESS) – Batterie“ definiert und bewertet. Als Referenzstrecken wurden die Strecken „Köln-Frankfurt“ und „Hamburg-Lübeck“ betrachtet (vgl. Kap.3.4.1).

Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die Referenzstrecken auch bei nur anteiliger Elektrifizierung mit der gewählten Fahrzeugkonfiguration ohne das Zuschalten des Dieselmotors, d. h. rein elektrisch, bewältigt werden können. Es hat sich allerdings auch gezeigt, dass bei geringeren Elektrifizierungsgraden erhebliche zusätzliche Einspeiseleistungen benötigt werden, um nicht-elektrifizierte Strecken zu überbrücken. In Abbildung 12 sind die Verläufe der Ladezustände (en. SOC für State of Charge) der Fahrzeugbatterien bei verschiedenen Elektrifizierungsgraden auf der gewählten Referenzstrecke Hamburg-Lübeck dargestellt. Die Angabe „10 km - 10 km“ bezeichnet den Wechsel von je 10 km langen elektrifizierten und nicht elektrifizierten Abschnitten und damit einen Elektrifizierungsgrad von 50 %. Die Angabe „14 km – 6 km“ bezeichnet einen Elektrifizierungsgrad von etwa 66 % bei abwechselnd 14 km elektrifizierten und dann 6 km langen, nicht elektrifizierten Abschnitten. Bei 95 % Elektrifizierung gibt es nur sehr kurze Unterbrechungen. Die Abschnitte mit annähernd waagrecht verlaufenden Kennlinien beschreiben die Vor- und Nachlaufstrecken des Umlaufs, die ebenfalls nicht elektrifiziert sind.



**Abbildung 12: Vergleich der Batterie-SoC für unterschiedliche Elektrifizierungsgrade für einen Umlauf im Referenzszenario „Hamburg-Lübeck“**

Um dieses Ergebnis weiter zu untersuchen, wurde im Zuge einer weiteren Forschungsarbeit eine umfangreiche Lastflussstudie unter Berücksichtigung von verschiedenen Fahrzeugfolgen (Taktzeiten) sowie unterschiedlicher Stromversorgungssysteme (Spannungsebenen) erstellt. Simuliert wurden die verschiedenen Szenarien mit Hilfe des Programmes Sitras® Sidytrac, dessen Nutzung auch bei Bahnanwendungen weit verbreitet ist. Ergebnisgrößen dieser Simulationen waren u. a. die Anzahl und der Abstand von Unterwerken (UW) unter Berücksichtigung von verschiedenen Spannungsebenen, Strecken-Topologien und Elektrifizierungsgraden.

**Tabelle 4: Untersuchte Fahrzeugfolgen (Takt) bei verschiedenen Systemspannungen**

Takt	Lkw pro h und Richtung	DTV* pro Richtung	600 V System**	750 V System	1500 V System***
5 s	720	17280		X	X
10 s	360	8640	X	X	X
20 s	180	4320	X		
30 s	120	2880	X		
60 s	60	1440	X		

\* DTV- durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke

\*\* hier wurde nur das prototypische Spannungsband um  $U_{min1} = 500 V$  angesetzt

\*\*\* hier wurde das normenkonforme Spannungsband nach EN 50163 [19] angesetzt

**Hauptergebnisse**

Es hat sich in [20] gezeigt, dass für die untersuchten Referenzstrecken ein durchgängiger elektrischer Betrieb von eHighway-Lkw ab einem Elektrifizierungsgrad von 50 % und entsprechend großem On-Board Energiespeicher grundsätzlich möglich ist. Dies geht jedoch mit dichteren Unterwerksabständen, höheren Fahrleitungsquerschnitten und großen benötigten Fahrzeugspeichern einher, die sehr vielen Lastzyklen unterworfen werden, was sich nachteilig auf deren Lebensdauer und somit kostentreibend auswirkt. Insgesamt günstiger sind höhere Elektrifizierungsgrade, wobei sich die fahrzeugseitige Speichernutzung auf die Überbrückung unvermeidlicher Elektrifizierungslücken und die wirtschaftlich nicht elektrifizierbaren Vor- und Nachläufe im sekundären Netz beschränkt.

Außerdem konnte dargestellt werden, dass durch eine Erhöhung der Systemspannung eine signifikante Reduzierung der Anzahl von Unterwerken und somit der Infrastrukturkosten erzielbar ist. Eine höhere Systemspannung setzt jedoch eine detaillierte Untersuchung der Auswirkungen auf die Technik der Hybridfahrzeuge voraus (vgl. Kap. 3.4.1).

### 3.1.1.2 Querschnittstudie zu Status Quo und Trends für Traktionsbatterien (SYS.1.5)

#### **Aufgabenstellung**

Gegenstand des Arbeitspaketes SYS.1.5 war eine Untersuchung geeigneter Batterietechnologien für den Einsatz als Traktionsbatterie auf schweren Nutzfahrzeugen. Neben der Beschreibung des Stands der Technik für Traktionsbatterien wurden verschiedene Trends in der Weiterentwicklung vorgestellt und mögliche in Zukunft verfügbare neue Zellchemien diskutiert. Zusätzlich erfolgte die Vorstellung einiger neu entwickelter, batteriebetriebener Nutzfahrzeuge und die Diskussion der Anforderung dieser an ihre Traktionsbatterie. Alle Ergebnisse wurden im Ergebnisbericht [21] zusammengefasst.

#### **Vorgehensweise / Ergebnisse**

Initial wurde eine Vergleichsbetrachtung für Traktionsbatterien im Bereich von verschiedenen ÖPNV Omnibus Applikationen erstellt. Basis hierfür sind Anwendungen im Bereich des Depotladens, die eine erhöhte Reichweite sowie eine adäquate Laderate erfordern. Darüber hinaus wurden Beispiele für Gelegenheitsladen aufgezeigt, die sich durch höhere Laderaten bei geringeren Batteriekapazitäten auszeichnen. In diesem Zusammenhang wurden auch rein batteriebetriebene Lkw betrachtet, um den heutigen Stand der möglichen Reichweiten aufzuzeigen. Die Tabelle 5 markiert einen Vergleich der Leistungsdaten für verschiedene Beispiele dieses Lkw-Typs.

**Tabelle 5: Übersicht von Baureihen für eLKW mit Traktionsbatterie**

Modell	Hersteller	Maximalgewicht	Reichweite
eActros	Daimler	25 t	Bis 200 km
eCascadia	Freightliner	36 t	Bis 400 km
Electric tough	BYD	36 t	Bis 200 km
FE Electric	Volvo	27 t	Bis 200 km
E44	E Force	44 t	Bis 300 km
eTruck	MAN	26 t	Bis 200 km
CF Electric	DAF/CDL	40 t	Bis 100 km
Semi*	Tesla	36 t	Bis 800 km

\* Produktionsbeginn für 2021 angekündigt, bisher nicht realisiert

Für die praktische Anwendung bei schweren Nutzfahrzeugen sind die Faktoren Energiedichte, Laderate, Zyklenfestigkeit und Preis für einen wirtschaftlichen und praktischen Betrieb ausschlaggebend.

**Tabelle 6: Übersicht aktueller Lithium-Ionen-Batterie-Technologien, Daten auf Zellebene**

Kathode	NMC	NCA	LFP	NMC, NCA
Anode	Graphit	Graphit	Graphit	Li-Titanat
Energiedichte [Wh/kg]	130 -260	130 - 260	80 - 130	60 - 95
Nennspannung [V]	3,6	3,6	3,2 – 3,3	2 – 2,5
Laderate [C]	0,7 - 3	Bis 0,7	Bis 4	Bis 6
Entladerate [C]	1 - 8	1 - 2	Bis 5	Bis 10
Zyklen	500 - 5000	300 - 2000	1000 - 8000	3000 - 18000
Preis [€/kWh]	220	305	220	400

Tabelle 6 enthält eine Übersicht der aktuell für den mobilen Fahrzeugeinsatz gebräuchlichen Batterietechnologien in Lithium-Ionen-Technologie. Dabei ist ersichtlich, dass sich für LFP/Graphit und NMC/Li Titanat Batterien jeweils Vorteile für einen Einsatz in Oberleitungs-Hybrid (OH)-Lkws bei Laderate und Zyklen ergeben.

Die Preisprognosen für verschiedene Typen von Batteriezellen wurden in den vergangenen Jahren deutlich nach unten korrigiert. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass der Anteil des giftigen und teuren Kobalts weiter verringert werden konnte. Anhand von NMC-Zellen wurden verschiedene Studien zu dieser Entwicklung ausgewertet und in Abbildung 13 dargestellt.

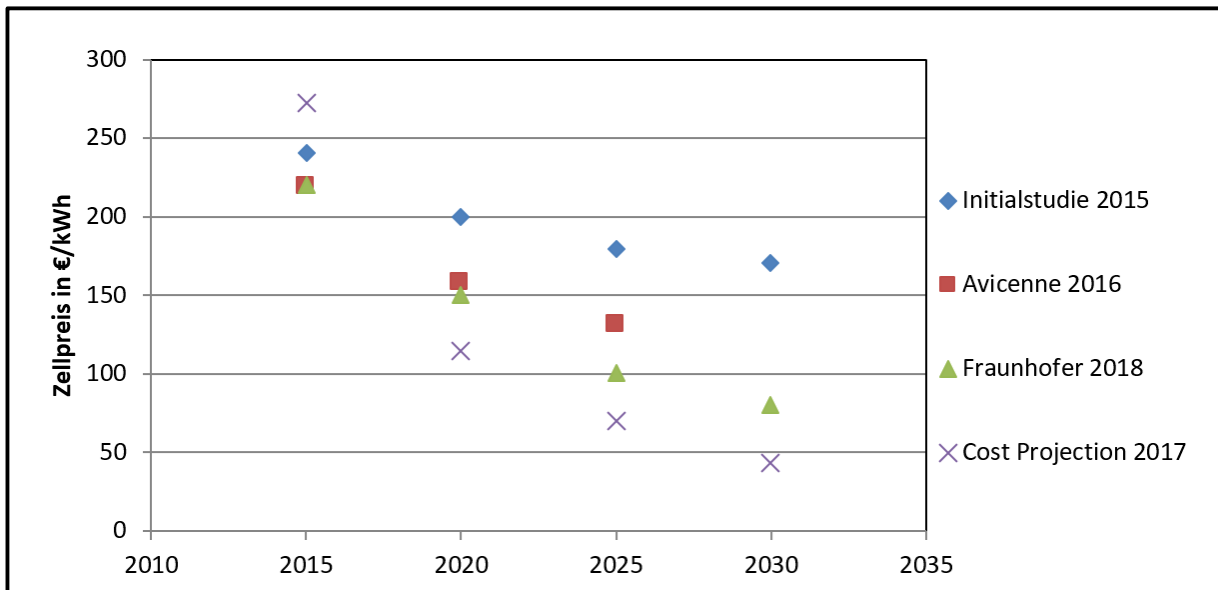


Abbildung 13: Verschiedene Preisprognosen für NMC-Zellen [21]

### Fazit

Gegenüber der 2015 erstellten Initialstudie haben sich die Prognosen der Weiterentwicklungen deutlich verbessert. Vor allem in Bezug auf die realisierbare Energiedichte von Lithium-Ionen-Zellen wurde die für die Zukunft angenommene Verbesserung nach oben korrigiert. Auch die Entwicklung der Verkaufspreise dieser Zellen wird Stand heute deutlich optimistischer prognostiziert.

Als aussichtsreichste Technologien für die Anforderungen der Traktionsbatterie können daher, ebenso wie im Referenzjahr 2015, Weiterentwicklungen bestehender Lithium-Ionen-Batteriesysteme wie NMC- oder LFP-Batterien angesehen werden. Weiterhin könnten Feststoffbatterien mit Lithium-Metall-Anode möglicherweise den Anforderungen entsprechen. Hier gilt es jedoch die Herausforderungen der Laderate und Zyklenfestigkeit zu überwinden. Eine Möglichkeit könnten Zellen auf Titan-Nioboxid-Basis darstellen, da diese über eine ausgezeichnete Zyklenfestigkeit und Leistungsdichte verfügen.

Wie in Kapitel 3.1.1.1 aufgezeigt, ist ein großer On-Board Energiespeicher von Vorteil, um einen durchgängigen elektrischen Betrieb bei einer 50-%igen Oberleitungsabdeckung zu ermöglichen. Aber selbst bei optimistischsten Annahmen bzgl. der Weiterentwicklung der Batterietechnologie wird für den schweren Straßengüterverkehr ein rein elektrischer Betrieb über Batteriesysteme ohne Oberleitungen auf regelmäßig befahrenen Streckenabschnitten mittel- und langfristig nicht wirtschaftlich realisierbar sein. Maßgeblich dafür sind die hohen Zusatzgewichte, geringen Lebensdauern, mehrfachen Wechsel des Batteriesystems während der Lebenszeit und die langen Standzeiten für das Laden in Verbindung mit den hohen elektrischen Leistungsanforderungen an die Ladepunkte.

## 3.1.2 Elektromobilitätsstrategie und Synergien mit anderen Fahrzeugklassen (SYS.2)

### Aufgabenstellung

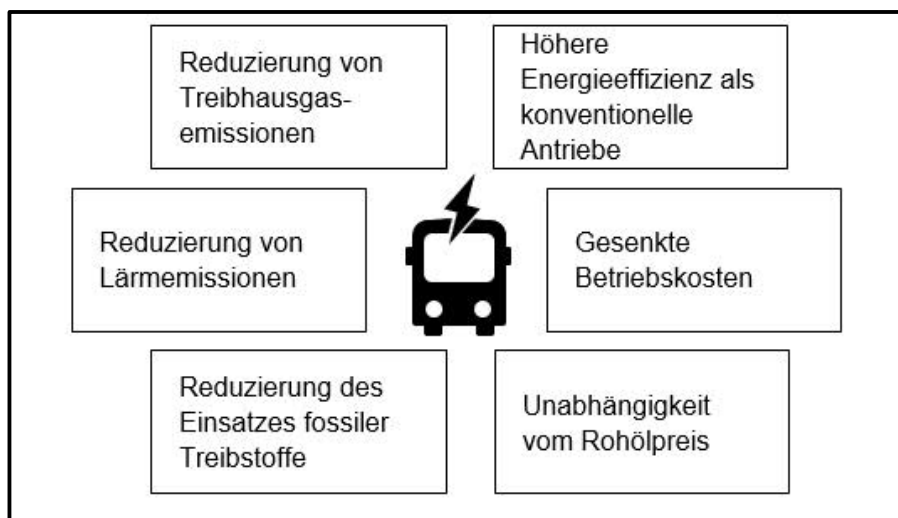
Damit der Verkehrssektor als Ganzes seinen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann, ist es zweckmäßig, die Elektrifizierung des schweren Straßengüterverkehrs in eine umfassende Elektromobilitätsstrategie einzubetten. Nur durch eine auf alle Fahrzeugklassen abgestimmte Strategie können Synergien bei der Energieversorgung und -nutzung identifiziert und systemoptimierend ausgenutzt werden. Zunächst wurden die grundlegenden Anforderungen und Zielsetzungen formuliert und mit Ergebnissen aus früheren Untersuchungen in einen Kontext gestellt.

### Synergien mit Pkw-Elektromobilität

In enger Zusammenarbeit mit der Fachabteilung der Bahnenergieversorgung (vgl. Kap 3.3.1 „Vorzugslösung für gemeinsame Versorgung mit weiteren Ladesystemen“) wurde eine Studie zur Analyse der Synergiepotenziale mit Elektromobilitätslösungen für Pkw erstellt. Der Schwerpunkt wurde dabei bewusst auf die technische Integration stationärer Ladesysteme in die Unterwerke zur Speisung der eHighway-Strecken gelegt. Synergien zu möglichen, kontinuierlich-dynamischen Energieversorgungs-lösungen für Pkw wurden aufgrund mangelnder technologischer Reife der Lösungen nicht vertieft [22].

### Integration von Fernbussen im eHighway-System

In dieser Studie wurde der Fokus auf die Fahrzeugklasse Bus gelegt. Mit der Elektrifizierung von Bussen lassen sich, im Vergleich zu Bussen mit konventionellen Antrieben, eine Vielzahl an Vorteilen und Verbesserungen erreichen. Wesentliche Vorteile sind in der Abbildung 14 dargestellt:



**Abbildung 14: Vorteile der Elektrifizierung von Bussen**

In einem ersten Schritt wurden im Fahrzeugsegment Fernbusse die eingesetzten Bustypen und Verkehrsmengen bewertet. Es wurde eine initiale Markteinschätzung zum Fernbusverkehr erstellt, die zeigte, dass der seit 2013 liberalisierte Fernbusmarkt extrem dynamisch ist. Erst seit 2015 werden offizielle Kennzahlen in Deutschland erhoben. Im Jahr 2015 teilten sich den Markt etwa 15 große Marktteilnehmer und viele kleinere. Flixbus war mit > 70 % der Marktführer. Etwa 23 Mio. Fahrgäste nutzten ca. 300 Buslinien in Deutschland. Die 9600 Verbindungen mit circa 3,8 Mio. Fahrplankilometern stellten zwischen fast allen Großstädten zahlreiche Fernbusverbindungen her. Die Auslastung betrug im Jahr 2015 ca. 59 %, wobei jeder Fahrgast im Durchschnitt 330 km mit dem Fernbus zurücklegte.

In einer Masterarbeit [23] wurden sowohl die Einsatzgebiete von Bussen im Stadt-, Regional- und Fernverkehr als auch die technischen Lösungen zur statischen, stationären (Kurzzeit) und dynamischen Energieversorgung von Elektrobussen charakterisiert und davon ausgehend Einsatzfelder für die eHighway-Technologie diskutiert. Es ist festzuhalten, dass die Entwicklung moderner elektrischer Busse noch am Anfang steht. Es herrscht große Unsicherheit darüber, welche Technologie sich kurz- und mittelfristig für den Linienbuseinsatz durchsetzen wird bzw. welche Technologie für welchen Einsatzzweck das größte Potenzial bietet. Die hohen zurückzulegenden Distanzen im Fernbusverkehr sind mit derzeitigen Technologien elektrisch kaum zu bewältigen und erfordern wie im Lkw-Verkehr Kombinationen aus Energiespeichern und möglichst kontinuierlicher, batterieschonender Ladung.

### Fazit

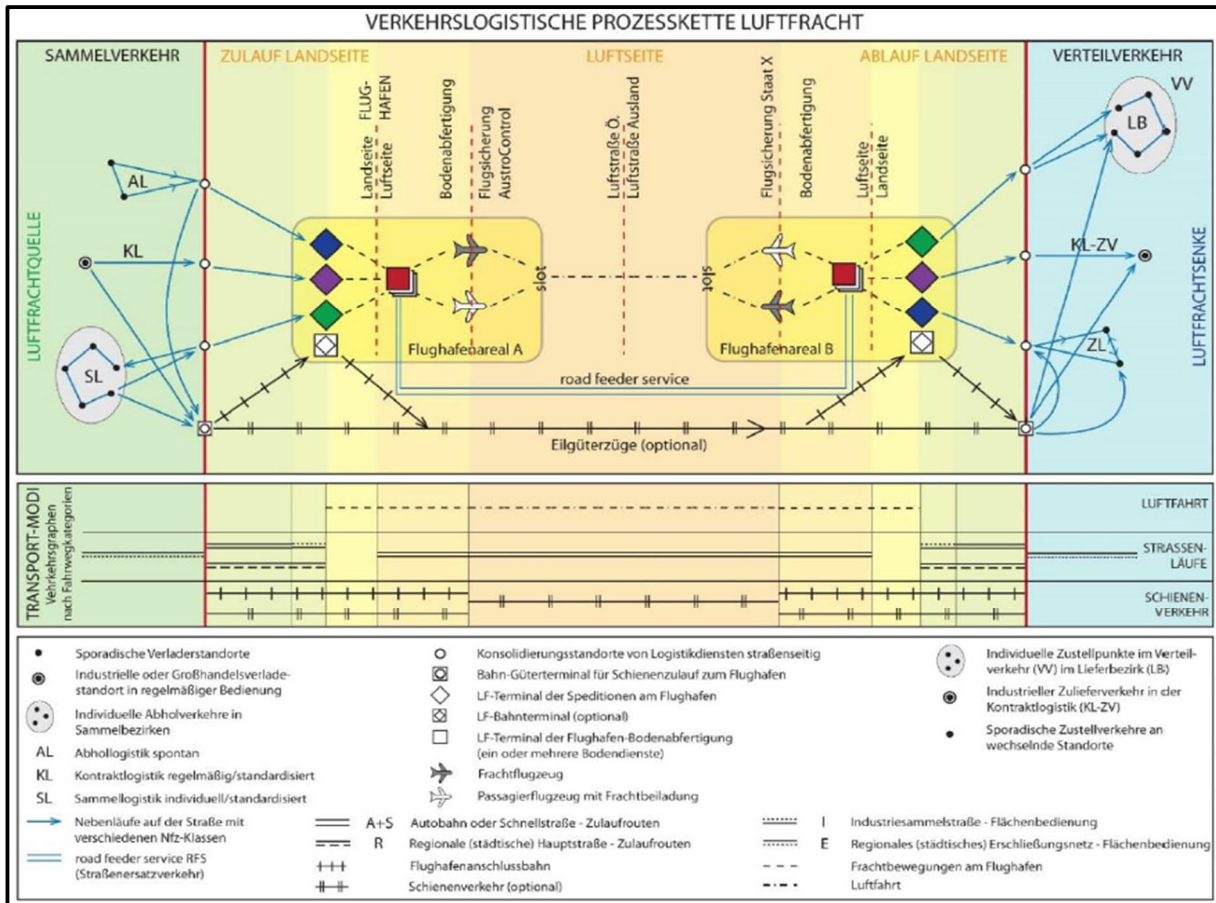
Auch wenn die Bus-Verkehrsmengen auf Autobahnen allein eine Elektrifizierung nicht rechtfertigen, können in bestimmten Relationen und Anwendungsfällen Busse eine sinnvolle Systemerweiterung für den eHighway darstellen. Darüber hinaus ist ein weiterer Technologietransfer im urbanen Umfeld und in Ballungsräumen möglich.



**Synergiepotenziale im Regional- und Lieferverkehr**

Am Beispiel des Frankfurter Flughafens Fraport wurde die Güterverkehrsstruktur analysiert. Luftfracht stellt nur 0,1 % des Transportaufkommens in Deutschland dar (2017: 4,8 Mio t von insgesamt 4,6 Mrd. t) und wirkt sich nur punktuell an den größten Flughäfen verkehrsbelastend für das Straßennetz aus.

Die Luftfrachttransportketten definieren komplexe Herausforderungen, die von einer Vielzahl an Akteuren geprägt sind. Jede Luftfrachttransportkette setzt sich im Allgemeinen aus der Abfolge „Vorlauf im Landverkehr“, „Flug“ und „Nachlauf im Landverkehr“ zusammen (vgl. folgende Abbildung 15).



**Abbildung 15: Verkehrslogistische Prozesskette Luftfracht [24]**

Im Landverkehr ist nahezu ausschließlich der Straßengüterverkehr im Einsatz. Zusätzlich wird auch zunehmend Luftfrachtersatzverkehr (Road Feeder Service, RFS) zwischen zwei Flughäfen auf der Straße abgewickelt. In diesem Fall handelt es sich somit um einen Luftfrachtverkehr, der die Ausnahmeregelungen von Wochenend- und Nachtfahrverboten ausnützen kann, obwohl er als Straßengüterverkehr durchgeführt wird.

**Fazit**

Obwohl jede Tonne Nutzlast im Straßenverkehr um ein Vielfaches emissionsärmer befördert wird als im Lufttransport, werden auch hier Ansatzpunkte gesucht, den landgebundenen Verkehr emissionsärmer zu gestalten. Als erster Schritt eignet sich insbesondere der RFS-Verkehr, da für diesen Punkt-zu-Punkt-Verkehr eine Luftverkehrsgesellschaft die Verantwortung trägt und dieser Sachverhalt durch wenige Beteiligte die Umstellung auf elektromobile Alternativen vereinfacht.

Darüber hinaus existiert zum heutigen Zeitpunkt keine elektromobile und gleichzeitig wirtschaftliche Lösung für mittlere und schwere Lkw im Verteilverkehr. Die RWTH Aachen widmet sich in dem Projekt LiVe [25] diesem Problem, um Lösungen zu finden, die es den Anwendern ermöglichen, diese Fahrzeuge hinsichtlich der Lebenszykluskosten optimiert einzusetzen.

### 3.1.3 Energieversorgung - Netzintegration und Abrechnungssysteme (SYS.3)

Die zusammen als Traktionsstromversorgung bezeichneten Energieversorgungsanlagen, bestehend aus den Unterwerken und der Oberleitungsanlage, bildet einerseits ein Teilsystem, das baulich, betrieblich und sicherheitstechnisch in die Fernstraße (Autobahn) integriert werden muss. Andererseits bildet die Traktionsstromversorgung ein elektrisches Energieverteilungsnetz, das elektrotechnisch und hinsichtlich Betriebsführung und Abrechnung mit den übergeordneten Netzebenen in Beziehung steht. Im Mittelpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu diesen Fragen stehen die elektrotechnische Systemauslegung und Netzintegration (Unterkapitel 3.1.3.1) sowie die Entwicklungen und Erprobungen eines bevorzugten Abrechnungssystems (Unterkapitel 3.1.3.2).

#### 3.1.3.1 Netzintegration und Versorgung durch Erneuerbare Energien (SYS.3.1 / SYS.3.2)

##### Aufgabenstellung und Untersuchungsmethode

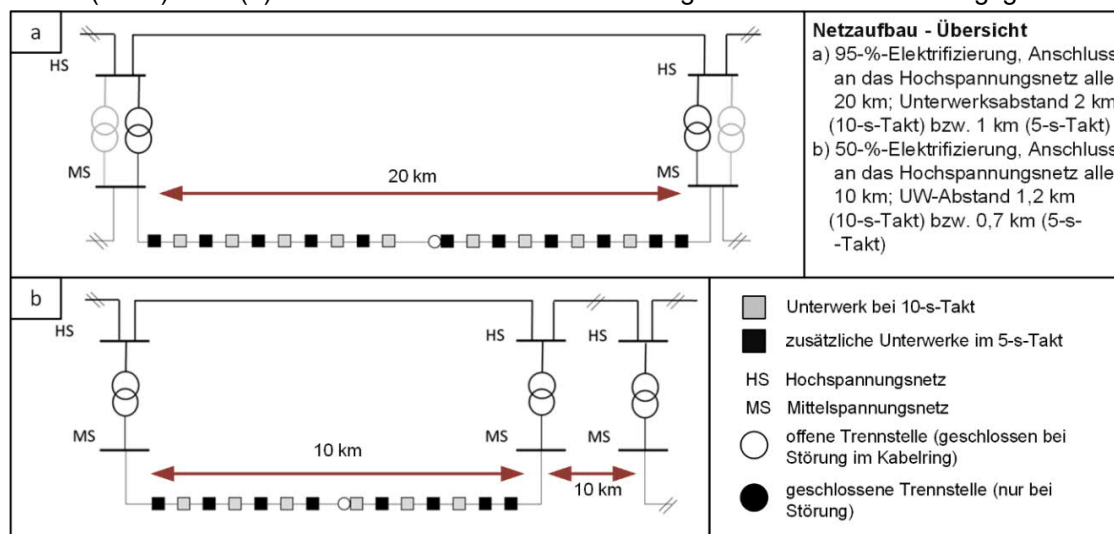
Die Netzanbindung an die übergeordneten Mittel- und Hochspannungsebenen sowie die Abschätzung der Versorgungspotenziale und -bedarfe durch Erneuerbare Energien (EE) konnte im Rahmen des Projekts ELANO weder flächendeckend für ein gesamtes Zielnetz (zu großes Netz) noch für eine der konkreten Feldversuchsstrecken (zu kleine Netze) erfolgen. Daher wurde zur Erforschung der Aspekte der Netzintegration eine Fallstudie durchgeführt, in der folgende Forschungsfragen zu beantworten waren:

- Mit welchen maximalen Lasten je Unterwerk und Umspannwerk muss in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens (10-s-Takt oder 5-s-Takt) und des Streckenprofils (A1: flach; A3: mittelgebirgig) in einem 100 km langen, durchgängig elektrifizierten Netzsegment gerechnet werden?
- Wie wirken sich einseitige Staus als Überlast (Maximallast) auf die Dimensionierung der Transformatoren aus?
- Wie ändern sich die Systemauslegung und Netzanschlüsse, wenn die Elektrifizierung nur zu 50 % abschnittsweise in jeweils 10 km langen Teilsegmenten mit 10 km langen Lücken zwischen diesen erfolgt?
- Welche Herausforderungen und Potenziale bestehen für die Versorgung des Netzsegmentes in der Fallstudie durch erneuerbare Energien (EE)?

Eingangsgrößen für die Fallstudie waren Untersuchungen zur gemeinsamen optimierten Dimensionierung der Fahrzeuge mit unterschiedlich großen Energiespeichern und deren Energieversorgung über die Oberleitungsanlage (vgl. dazu die Unterkapitel 3.1.1.1, 3.3.1 und 3.4.1).

##### Ergebnisse

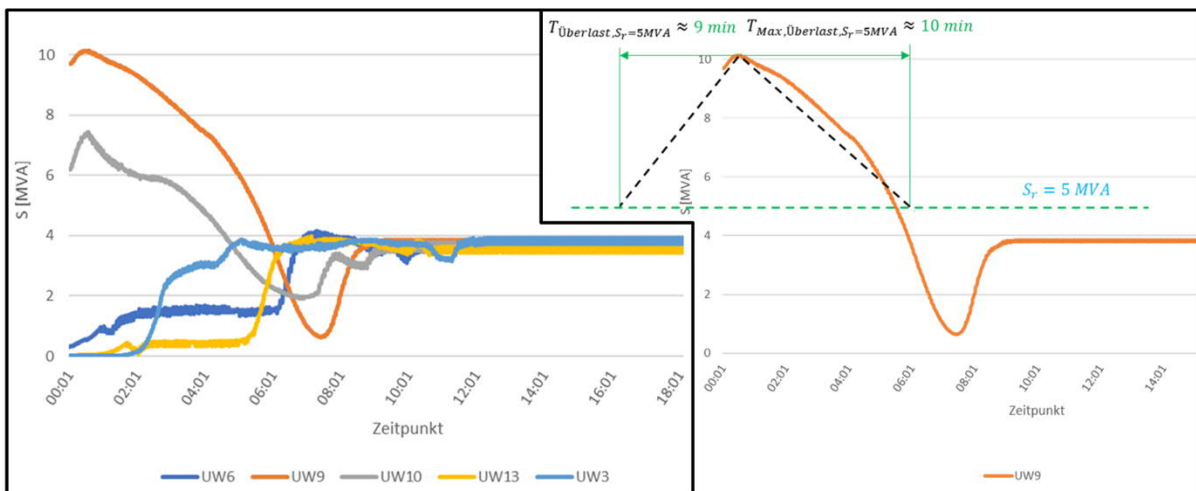
Basis der Systemauslegung sind die in Abbildung 16 gezeigten Netztopologien für (a) eine durchgehende (95 %) bzw. (b) nur abschnittsweise Elektrifizierung mit 50 % Elektrifizierungsgrad.



**Abbildung 16: Netzanschlüsse und -topologien für Voll- und Teilelektrifizierung [26]**

In den Netztopologien in Abbildung 16 sind jeweils 20 km des 100 km langen Netzsegmentes dargestellt, die sich identisch in beide Richtungen fortsetzen. Grundlegende Annahme für die Teilelektrifizierung (50 %) war, dass die Fahrzeuge in den elektrifizierten Abschnitten nicht nur die Traktionsenergie, sondern auch die Energie zum Nachladen der Fahrzeugspeicher aufnehmen (vgl. Unterkapitel 3.3.1 und 3.4.1). Folglich ist die von jedem Fahrzeug abgenommene Leistung höher und eine dichte Fahrzeugfolge führt bei Teilelektrifizierung und der angenommenen Nennspannungsebene von DC 750 V im Fahrleitungsnetz zu sehr dichten Unterwerksabständen. Dieser Effekt verliert an Tragweite, wenn höhere Spannungsebenen gewählt werden, wie sie in Unterkapitel 3.1.6.2 im Projektverlauf als zusätzliche Forschungsfrage aufgenommen wurden.

Im nächsten Schritt erfolgte die Dimensionierung der Transformatoren in den Unterwerken und Umspannwerken sowie der Mittelspannungskabelsysteme. Neben den Dauerlasten bei den verschiedenen Verkehrsstärken und Elektrifizierungsgraden wurden auch die Extremfälle Stau (Abbildung 17) und Unterbrechung des Mittelspannungskabels nahe des Umspannwerkes untersucht.



**Abbildung 17: Überlast bei Stau bei 5-s-Takt und 50 % Teilelektrifizierung [26]**

Den kritischen Dimensionierungsfall bei Teilelektrifizierung und hohem Verkehrsaufkommen zeigt Abbildung 17. Maßgeblich ist die Phase des Wiederanfahrens vieler Fahrzeuge in Verbindung mit hohen Ladeleistungen. Dies führt im am stärksten belasteten Unterwerk zu einer 9-minütigen Überlast mit 200 % der Dauerlast. Die Überlastfähigkeit der vorgesehenen Gießharztransformatoren ist abhängig von der Vorbelastung, der Umgebungstemperatur und der Dauer der Überlast. Die staubbezogene Überlastspitze kann in diesem Szenario 10 Minuten ohne Leistungseinschränkungen übernommen werden. Im Vergleichsszenario mit durchgängiger Elektrifizierung beträgt die staubbezogene Überlast des am stärksten belasteten Unterwerks nur etwa 15 % und könnte über 200 Minuten übernommen werden [27].

Die Bemessungsleistung der Unterwerkstransformatoren beträgt zwischen 3,5 MVA und 5 MVA. Der Einfluss des Streckenprofils und der Verkehrsstärke sind nachrangig und führen zu geringfügig niedrigeren Scheinleistungen, sodass mit diesen Bemessungsleistungen gearbeitet werden kann. Um die 20 Unterwerke bei der 95%-Elektrifizierung über 20 km versorgen zu können, sind zwei 30 kV-Kabelsysteme notwendig. Die gleiche Konfiguration ist auch über 10 km bei der 50%-Elektrifizierung erforderlich, wenn über 10 km 14 Unterwerke zu versorgen sind. In den bis zu 11 Umspannwerken kommen je 100 km bis zu 10 ONAN-Transformatoren mit 40 MVA Bemessungsleistung bzw. 11 ONAF-Transformatoren mit 50 MVA Bemessungsleistung zum Einsatz. [26]

Zur Versorgung des 100 km langen Netzsegmentes mit erneuerbaren Energien (EE) konnte auf den Energiemengen und Lastgängen aus [28] aufgebaut werden. Maßgeblich für die Bestimmung der notwendigen Energieerzeugungsanlagen (EZA) sind die für die Typen unterschiedlichen Volllaststunden sowie die Ausnutzung der installierten Leistung. Als maximale abgenommene Leistung sind für die 100 km 271 MW erforderlich. Dies führt zu einer installierten Leistung von 370 MW. Diese deckt über die Volllaststunden nur einen Teil der jährlichen Energiemenge und muss skaliert werden. Im Ergebnis genügt für die unabhängige Versorgung von 100 km Netz ein Flächenbedarf für EE-Anlagen von etwa

400 ha, was im Falle einer lokalen, dezentralen Energieversorgung einem 20 m breiten Streifen beidseits der Autobahn entspräche [26].

Wesentlich in diesem Zusammenhang ist, dass auf einzelne Verbraucher und Netzsegmente betrachtete unabhängige Versorgungen nicht typisch sind, sondern in hohem Maße regionale und nationale Ausgleichseffekte eintreten. Richtiger wäre daher eine bilanzielle Betrachtung über größere Regionen und Netze. Bereits heutzutage bestehen regionale Überkapazitäten in der Erzeugung von EE, die wegen fehlender Übertragungskapazitäten nicht ausgenutzt werden. Ein flächenartiger, netzförmiger Verbraucher wie ein Oberleitungsnetz für die Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs trägt aktiv zum Abbau dieser Überkapazitäten bei und vergleichmäßig den regionalen Bedarf an EE. In diesem Zusammenhang wird insgesamt auf die EE- und Netzausbaupläne des Bundeswirtschaftsministeriums und im Kontext eHighway auf die Ergebnisse des Projekts StratON [29] verwiesen.

### **Fazit**

Die Untersuchungen zur Netzanbindung und -integration zeigen im hohen Maß die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Teilsystemen. Aus Sicht der Energieversorgung bietet die abschnittsweise Teil-Elektrifizierung keine signifikanten Vorteile, da die insgesamt zu installierenden Leistungen und die abgenommene Energiemenge unverändert hoch sein muss, um die gleiche elektrische Fahrleistung zu ermöglichen. Einsparpotenziale bieten hier nur die etwas geringere Anzahl an Unterwerksstandorten und die geringere Anlagenlänge, die aber wiederum nicht nur anzahl- bzw. längenabhängig sind, sondern auch einen hohen Anteil an leistungsabhängigen Aufwänden umfassen. Zusätzlich erfordert die Teilelektrifizierung signifikant größere Traktionsbatterien.

Die Systemauslegung für die verschiedenen Verkehrsmengen und Extremsituationen (Stau) zeigen einen nur geringen Einfluss des Streckenprofils. Eine nachträgliche Installation von Unterwerken bei höheren Verkehrsstärken ist möglich, wobei das Kabelsystem auf Mittelspannungsebene für die dichtere Fahrzeugfolge ausgelegt sein sollte. Die Orientierung der Bemessungsleistung der Unterwerkstransformatoren mit möglichst hoher Auslastung (>90 %) genügt auch im Extremfall Stau zur Kompensation von Überlasten und deckt sich mit den Erfahrungen aus Bahnanwendungen.

Für die Versorgung elektrifizierter Autobahnabschnitte wurden maximal benötigte Erzeugungskapazitäten für eine unabhängige Versorgung abgeschätzt. Diese konservative (zu hohe) Abschätzung sollte für größere Netze und mit bilanziellem Ausgleich wiederholt und in anderen Forschungsprojekten zur Energiewende im Verkehrssektor weiter untersucht werden.

### **3.1.3.2 Abrechnungssysteme (SYS.3.3 / SYS.3.4)**

#### **Aufgabenstellung**

Je nach Betreibermodell und Einsatz stationärer oder dynamischer Energieversorgungs- und Ladesysteme müssen die im Vorgängerprojekt ENUBA 2 [3] konzipierten und erprobten Abrechnungssysteme für die Referenzszenarien erweitert und auf ihre Zulässigkeit im Kontext des liberalisierten Strommarktes überprüft werden.

Die Erprobungsträger sind dazu mit Energiezählern auszurüsten. Anschließend können die verschiedenen Erprobungsträger zu einer „virtuellen Musterflotte“ zusammengefasst und als reales Muster zur Definition von technischen und Datenschnittstellen mit Energieversorgern herangezogen werden

Die Musterflotte umfasst folgende auszurüstende Fahrzeuge:

- Scania-Sattelzugmaschine „Powel“ aus dem Projekt ENUBA 2
- PAN-Erprobungsträger Actros #2 aus dem Projekt ENUBA (vgl. Kap.3.4.3.2)

#### **Vorgehensweise / Ergebnisse**

Als Basis für ein Abrechnungssystem stand die Betrachtung der bereits heute im Markt verfügbaren Abrechnungsmethoden im Vordergrund. Dabei treffen im eHighway-System zwei Verrechnungsmethoden aufeinander, die in dieser Konstellation bisher im Markt keine kombinierte Anwendung finden.



Während fahrzeugseitig bisher bei Lkw eine Verrechnung der gefahrenen Kilometer unter der Berücksichtigung von unterschiedlichen Fahrzeugklassen zur Anwendung kommt („Mautabrechnung“), basiert der Energiebezug ganz klassisch auf einer Messung der verbrauchten elektrischen Energie in kWh („Energieabrechnung“). Vor- und Nachteile der Verrechnungsmodelle und Fragen zur rechtlichen Einordnung wurden in [30] diskutiert. Um sowohl eine „Mautabrechnung“ als auch eine „Energieabrechnung“ zu pilotieren, wurden zwei voneinander unabhängige Messsysteme in die Erprobungsträger integriert.

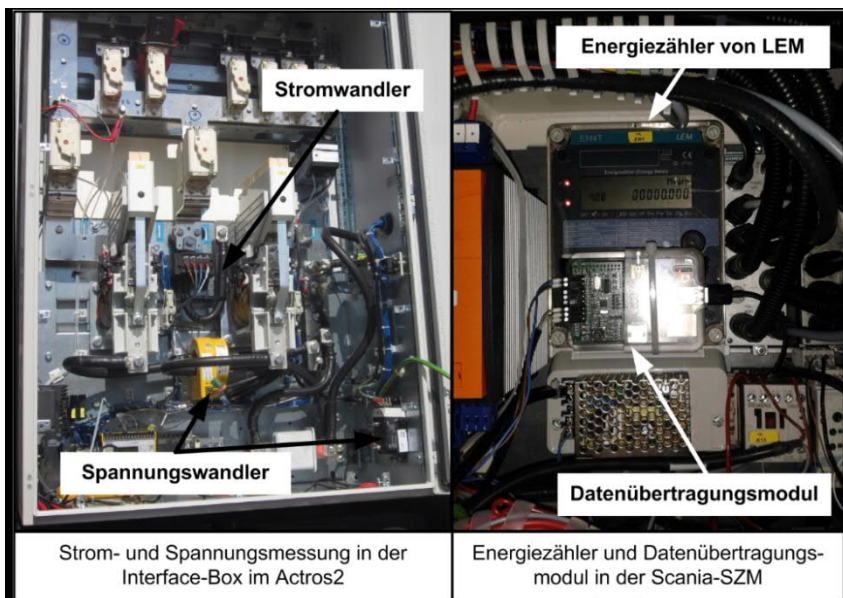
Für die Erfassung der kilometerbezogenen Gebühren auf einer Autobahn wurden die heute für die Mauterhebung weit verbreiteten Sitraffic Sensus OnBoard Units C3080 (vgl. Abbildung 18) verwendet. Mit Hilfe dieser OBUs kann die zurückgelegte Fahrstrecke unter Verwendung von GPS-Daten erfasst und in einem Backoffice System (ETBO) zusammengefasst werden.



**Abbildung 18: Sitraffic Sensus OnBoard Unit C3080**

Da es zum Zeitpunkt des Projekts noch keinen geeigneten DC-Stromzähler für das Einsatzgebiet eHighway gab, wurde auf einen DC-Stromzähler aus der Bahntechnik zurückgegriffen wie in Abbildung 19 gezeigt. Dieser wurde in zwei zusätzliche Erprobungsträger eingebaut, sodass die bezogene Energie der Fahrzeuge erfasst und manuell am Zähler abgelesen werden konnte.

Auf die Weiterleitung der gemessenen Energiemenge in ein Backoffice System wurde aufgrund des in diesem Einzelfall zu hohen Aufwandes verzichtet. Die technischen Möglichkeiten sowie die zu beachtenden rechtlichen Rahmenbedingungen sollen ausgelagert in dem BMWI-Verbundprojekt AMELIE [31] untersucht werden.

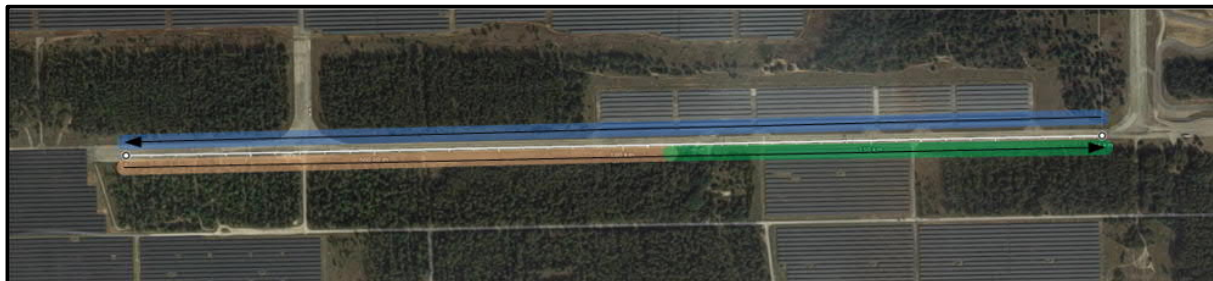


**Abbildung 19: DC-Stromzähler in den Testfahrzeugen Actros #2 und Sattelzugmaschine**

Für die Erfassung der zurückgelegten Fahrstrecke am eHighway wurden innerhalb des ETBO einige Erweiterungen vorgenommen. So wurde z. B. ein Geofencing-Modell für die Teststrecke in Groß Dölln implementiert und Ergänzungen im Datenmodell zur Erfassung der Fahrten an der Oberleitung durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die PAN Signale („Angebügelt“ & „Abgebügelt“) an den I/O-Eingang der OBU weitergeleitet. Unter Berücksichtigung der lokalen Position des Fahrzeuges und des Pantographenzustands konnte eine erste erfolgreiche Erhebung von elektrischen Fahrten an der Oberleitung



durchgeführt werden. Zusätzlich wurde unter Verwendung von unterschiedlichen Geofencing-Modellen eine Abfolge von Streckenabschnitten mehrerer Betreiber mit unterschiedlichen Tarifstrukturen nachgestellt. Die Teststrecke in Groß Dölln wurde dazu in drei Abschnitte eingeteilt (blau/orange/grün), s. Abbildung 20. Der blaue Abschnitt ist ohne Oberleitung, der orange und der grüne Abschnitt verfügen über eine Oberleitung, sind aber für die Erprobung des Abrechnungssystems unterschiedlichen fiktiven Infrastrukturbetreibern zugeordnet. Dies könnten beispielhaft die die Infrastruktur betreibenden Autobahnbehörden benachbarter Bundesländer sein.



**Abbildung 20: Streckenmodell mit unterschiedlichen Abschnitten**

In der Tariftabelle (vgl. Tabelle 7) wurden den Abschnitten Betreiber zugeordnet und zusätzlich drei Gewichts- bzw. Leistungsklassen und die Unterscheidung zwischen „angebügelt“ und „nicht angebügelt“ hinterlegt. Für die sich daraus ergebenden Kombinationen wurden unterschiedliche Preise pro km definiert.

**Tabelle 7: Beispiel für eine Tariftabelle**

	Betreiber 1 (blau)		Betreiber 2 (orange)		Betreiber 3 (grün)	
	angebügelt	nicht angeb.	angebügelt	nicht angeb.	angebügelt	nicht angeb.
leicht	n.a.	0,000 € / km	0,400 € / km	0,000 € / km	0,300 € / km	0,000 € / km
mittel	n.a.	0,134 € / km	0,534 € / km	0,134 € / km	0,534 € / km	0,134 € / km
schwer	n.a.	0,138 € / km	0,538 € / km	0,138 € / km	0,638 € / km	0,138 € / km

Damit ist eine Berücksichtigung der wesentlichen Kostenarten möglich:

- Straßeninfrastruktur (aktuelle Lkw-Maut)
- Elektrifizierungsinfrastruktur
- Leistungsklasse des Fahrzeuges (Energieverbrauch)

Siemens eHighway Toll Services Otto-Hahn-Ring 6 D-81739 Munich		<b>SIEMENS</b>			
Peter Müller Hauptstraße 1 00815 Musterhausen		Munich, 07.12.2017			
INVOICE No.	173807033829				
Period (UTC)	01.11.2017 to 30.11.2017				
LPN:	eHighway-176				
Category:	40 t	Euro 15			
Title	From (UTC)	To (UTC)	Distance	Category	Fee
<b>Betreiber 1</b>					
29.11.2017	11:55:31	15:20:18	14,258 km	non-electric	€ 1,97
30.11.2017	09:09:00	14:26:37	22,653 km	non-electric	€ 3,13
<b>Betreiber 2</b>					
29.11.2017	14:02:06	15:28:10	8,386 km	non-electric	€ 1,16
30.11.2017	08:56:09	15:14:34	17,432 km	non-electric	€ 2,41
<b>Betreiber 3</b>					
29.11.2017	14:03:35	15:29:39	5,842 km	non-electric	€ 0,81
30.11.2017	08:58:57	15:15:39	12,333 km	non-electric	€ 1,70

**Abbildung 21: Beispiel für eine monatliche Rechnung je Fahrzeug**

Außerdem können unterschiedliche Tarifmodelle und Tarifierungen je nach Betreiber realisiert werden.

Damit alle neuen abrechnungsrelevanten Daten in einer Abrechnung dargestellt werden können, wurde zusätzlich innerhalb der ETBO eine Demoversion einer Abrechnung (vgl. Abbildung 21) implementiert.

### **Fazit**

Durch Erweiterung der heute bereits bestehenden Mautlösung wurde eine erste Variante einer kilometerbasierten eHighway Abrechnung („Mautabrechnung“) prototypisch implementiert. Für eine Serienlösung müssen jedoch die notwendigen technischen Maßnahmen genauer bestimmt werden [32]. Neben der Klärung der technischen Umsetzung sind auch noch rechtliche und zertifizierungsrelevante Anforderungen zu beachten. Diese Arbeiten sollen im zwischenzeitlich bewilligten BMWI-Verbundprojekt AMELIE [31] zusammen mit einem rechtswissenschaftlichen Partner intensiviert weitergeführt werden.

Für eine Realisierung der „Energieabrechnung“ ist darüber hinaus zunächst ein geeigneter Stromzähler für das Einsatzgebiet eHighway zu entwickeln, da der verwendete DC-Stromzähler aus dem Bahnbereich für eine spätere Serienlösung im eHighway-System viel zu groß und zu teuer ist.

Ein automotive-gerechter DC-Stromzähler müsste zusätzlich eine Schnittstelle für die Implementierung einer Fernauslesemöglichkeit aufweisen. Neben den technischen Herausforderungen haben sich im Zusammenhang mit einem DC-Stromzähler auch wichtige Zertifizierungsfragen ergeben. So ist zu klären, ob ein mobiler DC-Stromzähler unter eichrechtlichen Bedingungen in ein Fahrzeug zu integrieren ist und was dies für die gesamte Systemkette, bestehend aus Zähler, Fahrzeug und PAN-Kommunikationsmodul zum Back-Office System, bedeutet. Ebenfalls ist zu klären, wer im Umfeld „Autobahn“ die Abrechnung von Energiekosten durchführen darf. Hier ist die Rolle der eHighway-Betreiber, der Serviceprovider bzw. Mautprovider und der Energieversorger noch zu definieren.

### **3.1.4 Infrastrukturgestütztes Autonomes Fahren – Literaturrecherche und Schnittstellenanalyse zu Fahrzeug und PAN (SYS.4.1) und Identifizierung der eHighway-Anwendungsfelder (SYS.4.2)**

#### **Aufgabenstellung**

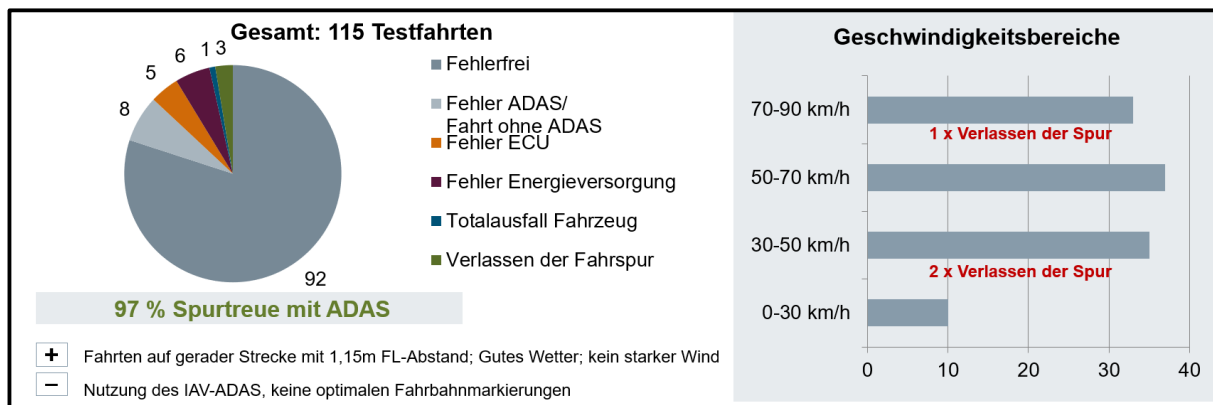
Aufbauend auf den Entwicklungen zum Stand der Technik des autonomen Lkw-Verkehrs sollten in diesem Arbeitspaket die Synergiepotenziale mit der eHighway-Technologie systematisch erforscht und erprobt werden. Der Fokus im Arbeitspaket SYS.4.1 „Literaturrecherche und Schnittstellenanalyse zu Fahrzeug und PAN“ liegt insbesondere auf der Assistenzsystem-gestützten Querführung des Fahrzeugs in der Fahrspur sowie der dabei erreichbaren Spurtreue. Ergänzend sollten die erforderlichen technischen Schnittstellen zum Fahrzeug und zur Infrastruktur analysiert werden.

#### **Vorgehensweise / Ergebnisse**

Im Rahmen der Weiterentwicklung des Pantographensystems erfolgte auch eine Recherche zu kooperativen Systemen im Hinblick auf eine sichere Pantographensteuerung. Dies umfasste insbesondere den Anbügelprozess sowie die Auswertung von Informationen zur Streckenführung und zur Geometrie des Kettenwerks. Dazu wurden auf der eHighway-Versuchsanlage diverse Testreihen mit infrastruktur-basierten Stützstellen zur Übertragung von Lageinformationen durchgeführt.

So wurden z.B. im Streckenverlauf RFID-Tags im Kontext der Bereitstellung von wichtigen Streckeninformationen installiert. Ein Hauptanwendungsfall war ein positionsgenaueres Streckensignal an die Lkw-Antriebssteuerung zum Zwecke der verschleißreduzierten Durchfahrt bestimmter FL-Abschnitte (vgl. Abschnitt 0).

Im Erprobungsträger Actros #1 wurde dazu ein Fahrerassistenzsystem (ADAS) installiert und bis zur Funktionsreife weiterentwickelt und adaptiert (vgl. Abschnitt 3.4.3.1). Anschließend erfolgten Testfahrten hinsichtlich der Lkw-Spurtreue bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (vgl. Abbildung 22).



**Abbildung 22: Auswertung der Testfahrten mit Actros #1**

### Fazit

Das Entwicklungsfeld des (teil-) autonomen Fahrens unter Einbeziehung kooperativer Systeme basierend auf der Interaktion sowohl mit anderen Fahrzeugen als auch mit verschiedenen Einrichtungen der Infrastruktur wird nicht nur durch die Fahrzeughersteller sondern darüber hinaus auch durch zahlreiche IT- und Software-Unternehmen mit großem Aufwand voran getrieben. In ersten Feldversuchen konnte die zunehmende Alltagstauglichkeit dieser Assistenzsysteme bereits unter Beweis gestellt werden.

Vor diesem Hintergrund erfolgte im Projekt ELANO eine Neubewertung der Notwendigkeit, das Thema „Autonomes Fahren“ aus Sicht des eHighway-Systems spezifisch und intensiv weiter voranzutreiben.

Als Ergebnis dieser Bewertung wurden die Arbeiten im Projektelement SYS.4 auf wesentliche Untersuchungen und Bewertungen beschränkt.

Die ausgeführten Arbeiten haben gezeigt, dass bei korrekter Fahrzeugpositionierung die Erkennung der auf der Teststrecke installierten RFID-Tags mit hoher Zuverlässigkeit funktioniert. Dies bestätigt die geeignete Auswahl der Hardwarekomponenten und die prinzipielle Eignung der Technologie für die Fahrzeug- und Stromabnehmersteuerung. Folgende RFID-Szenarien wurden erfolgreich getestet:

- OCL begin
- OCL end in 100 m
- Return to normal operation
- OCL separator in 300 m

## **3.1.5 Optimierung der Schnittstelle Fahrleitung – Stromabnehmer (SYS.5)**

### Aufgabenstellung

Nach der generellen Untersuchung und Demonstration der Machbarkeit in den Vorgängerprojekten „ENUBA“ und „ENUBA 2“ sind wesentliche Aspekte im Projekt ELANO die Optimierung der Systemlösung und technischer Lösungsansätze, die z.B. auch die am Markt durchsetzbaren Kosten für zusätzliche Fahrzeugkomponenten einbeziehen.

In diesem Zusammenhang bestand die dringende Notwendigkeit, das bisherige Stromabnehmerkonzept umfassend zu vereinfachen und dabei die Funktionalität im System und die Wechselwirkungen zu anderen Systemkomponenten zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen.

Im Fokus des eHighway-Systems stand dabei die optimale Definition der Schnittstelle Fahrleitung - Stromabnehmer. Diese Schnittstelle ist fundamental, sowohl für die Systemauslegung der Fahrleitung und ihrer Integration in den Straßenraum als auch für die Systemarchitektur des Stromabnehmers mit seiner Integration in das hybridisierte Trägerfahrzeug.

### Vorgehensweise / Ergebnisse

Im Arbeitspaket SYS.5 fanden zahlreiche Arbeiten statt. Als grundlegende Anforderungsdefinition und Systemauslegung wurden zunächst die gemeinsamen Anforderungen an Stromabnehmer, Fahrleitung

und Einsatzbedingungen in den fortgeschriebenen BDC - Basic Design Criteria dokumentiert, die sich als Grundlage vor allem an der bestehenden Normenlage orientierten.

Zur Analyse des Fahrverhaltens und der Spurtreue wurden bestehende Arbeiten [33], [34], [35] ausgewertet und zudem Testfahrten mit einem Versuchsfahrzeug zur Bestimmung der Spurtreue durchgeführt, vgl. Abschnitt 3.1.4.

Auf Basis der im Arbeitspaket SYS.4.1 (vgl. Abschnitt 3.1.4) durchgeführten Marktanalyse zu geeigneten Fahrerassistenz-Systemen wurde ein optimiertes, vereinfachtes und robusteres Pantographendesign erarbeitet, welches auf die aufwendige, aktive seitliche Nachführung des Stromabnehmers verzichtet. Die Positionierung des Fahrzeuges unterhalb der Fahrleitung erfolgt dabei unter Nutzung eines geeigneten Lenkradassistenzsystems.

So konnte ein deutlich vereinfachtes mechatronisches Konzept für den Stromabnehmer realisiert werden. Gleichzeitig wurde aber auch deutlich, dass im Zusammenspiel mit mechanischen Zwangspunkten (Fahrzeugbreite), verschärften Sicherheitsanforderungen (unerwartetes Verlassen der Spur) und inhärenten Funktionsmerkmalen des neuen Mechatronikkonzepts die Schnittstelle zur Fahrleitung modifiziert und optimiert werden muss.

Die Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Fahrleitung wurden in zahlreichen Workshops, Simulationen, Berechnung und durch Versuche auf dem Teststand in Berlin analysiert und optimiert und dann im Rahmen eines Schnittstellendokuments „General Bulletin - OCL interface description“ [36] dokumentiert. Aus dem Dokument wurden anschließend funktionale Anforderungsdokumente an die Oberleitung und an den Stromabnehmer abgeleitet:

- eHighway General Bulletin - Standard OCL requirements\_A006 [37]
- General Bulletin - Standard PAN requirements\_A008 [38]

Die Anforderungen aus dieser Schnittstellenabstimmung gingen regelmäßig in die parallel laufenden Teilprojekte zur Stromabnehmerentwicklung (vgl. Abschnitt 3.2) und zur Optimierung der Traktionsstromversorgung (vgl. Abschnitt 3.3.2.1) ein.

Die Überprüfung der Annahmen und der erfolgreichen Umsetzung erfolgte ebenfalls im Rahmen der Teilprojekte, welche im Rückfluss wichtige Rückschlüsse und Anpassungen an die Schnittstellendefinition brachten. Zu nennen sind hier z.B. die Analysen des Schleifleistenabriebs am Stromabnehmer der Generation 2 und der Funktionsmuster des PAN der 3. Generation, der Aufbau und Test eines Spurhalteassistenzsystems auf bestehenden Testfahrzeugen, die begleitenden Messungen des Windantriebs der Fahrleitung in Groß Dölln oder auch Systemtests am Stromabnehmer-Teststand.

## **Fazit**

Aufgrund der Überarbeitung des Systemkonzepts und der daraus resultierenden, vertiefenden Betrachtung der Schnittstelle zwischen Stromabnehmer und Fahrleitung hat sich bestätigt, dass diese Schnittstelle eine fundamentale Bedeutung für das Gesamtsystem hat. Die Gründe hierfür sind:

- Die Schnittstelle bestimmt maßgeblich die Systemverfügbarkeit. Sie unterliegt gleichzeitig erheblichen mechanischen und elektrischen Beanspruchungen und einer großen Spannbreite an Umgebungseinflüssen.
- Die Schnittstelle ist sicherheitsrelevant, da die Kollision des Stromabnehmers mit Fahrleitungskomponenten oder das Einfädeln in die Fahrleitung ein wichtiges und dringend zu vermeidendes Schadenszenario darstellt.
- Die eindeutige und abschließende Definition und Dokumentation der Schnittstelle ist Voraussetzung für die Sicherstellung der Kompatibilität und spätere Interoperabilität zwischen Fahrzeug und Infrastruktur und somit entscheidend für die Öffnung des Systems für verschiedene Infrastrukturerichter und Fahrzeugkomponentenhersteller.
- Änderungen an der Schnittstelle können schnell zu Umsetzungsproblemen und Aufwänden auf Fahrzeug- oder Infrastrukturseite führen.
- Aufgrund der dynamischen Abläufe und Bewegungen im System besitzt die Schnittstelle eine hohe Komplexität, die sich oft nur im 3-dimensionalen Raum und unter Berücksichtigung der zeitlichen Bewegungsabläufe erfassen lässt.

Einige Aspekte der Schnittstelle, welche auch schon immer wichtige Bestandteile im Rahmen der Eisenbahn- oder auch O-Bus-Elektrifizierung waren, wurden im Rahmen des Projektes ELANO intensiv diskutiert, hinterfragt, für den eHighway neu definiert und kommuniziert. Hierzu gehören z. B.:

- Die vertikale und horizontale Fahrdrähtlage einschließlich Fahrdrähthöhe über der Fahrbahn und auch der Fahrdrähtabstand zueinander
- Das gegenüber Bauwerken und für alle Verkehrsteilnehmer freizuhalten infrastrukturelle Lichtraumprofil, die dynamische Fahrzeugumgrenzungslinie mit angehobenem Stromabnehmer und die technischen, betrieblichen und witterungsabhängigen Toleranzen der Oberleitung

Zusätzlich haben sich aus der immer detaillierter betrachteten Systemumgebung Autobahn eine Vielzahl an Themenfeldern ergeben, die bei Eisenbahnen und Straßenbahnen keine oder nur eine untergeordnete Bedeutung haben, aber bei nichtspurgeführten Fahrzeugen genauer spezifiziert werden müssen. Hier sind beispielhaft zu nennen:

- Beginn und Ende der Fahrleitung entlang der Strecke
- Einführung der neuen Fahrdrähte im Parallelfeld
- Berücksichtigung eines plötzlichen Ausschlerens vor einer Brücke und Notwendigkeit geeigneter Konstruktionen
- Betrachtung von Wegweisern und Einbauten auf benachbarten Fahrstreifen

Hier konnte zwar teilweise auf den grundsätzlichen Ergebnissen der zuvor erfolgreich abgeschlossenen Projekte ENUBA und EUNBA 2 aufgebaut werden. Mit zunehmendem Erkenntnisgewinn und unter Berücksichtigung der weiterentwickelten, optimierten Stromabnehmerarchitektur mussten die aufgeführten Aspekte aber erneut umfassend und im Zusammenhang erörtert werden.

Im Ergebnis dieser multikriteriellen Untersuchungen steht eine detaillierte und optimierte Schnittstellendefinition, welche die Erkenntnisse aus praktischen Tests mit der überarbeiteten Stromabnehmerarchitektur berücksichtigt und mit Weiterentwicklungen von Standardbauteilen in der Oberleitungsinfrastruktur realisierbar ist.

### 3.1.6 Technologien für vollelektrische Fahrzyklen (SYS.6)

#### 3.1.6.1 Stillstandsladen (SYS.6.1)

##### Aufgabenstellung

Da sich die bisherigen Entwicklungen für OH-Lkws in erster Linie auf eine dynamische Leistungsaufnahme während der Fahrt konzentrierten, wurde zusätzlich zum dynamischen Laden während der Fahrt an der Oberleitung im Zuge eines Variantenvergleichs auch untersucht, welche Möglichkeiten es für das ergänzende, stationäre Laden von Energiespeichern auf OH-Lkws zur Erhöhung der insgesamt möglichen elektrischen Reichweite gibt.

##### Varianten in der Praxis

Grundsätzlich wurden folgende drei verschiedene Systeme identifiziert und untersucht, ob diese sich zum leistungsstarken Energietransfer auf OH-Lkws oder Busse eignen, und somit eine Reichweitenerhöhung ermöglichen (vgl. Abbildung 23).

- Kabelgebundene Plug-In Systeme [39]
- Induktive Ladesysteme, die z.B. bei Bussen erprobt werden [23]
- Pantographen-Ladesysteme (sowohl top-down als auch bottom-up) [40], [41]

Kabelgebundene Ladesysteme sind aus der Pkw-Anwendung bekannt und haben einen hohen Reifegrad. Dabei wird zwischen AC- und DC-Systemen unterschieden, wobei DC-Systeme Laderaten von bis zu 350 kW (CCS) bzw. 200 kW (Chademo) ermöglichen. Diese Systeme basieren auf einer High Level Communication (HLC), die während des Ladevorganges durch einen definierten Handshake zwischen stationärem und fahrzeugseitigem Partner einen sicheren und für die Batterie auf dem Fahrzeug geeigneten Betrieb ermöglicht.





**Abbildung 23: Verschiedene Ladesysteme für OH-Lkw Plug-In, Induktiv, Pantograph**

Induktive Ladesysteme befinden sich noch in der Markteinführung und lassen Laderaten bis zu 200 kW zu. Sie ermöglichen eine Automatisierung beim Ladevorgang, bieten durch die galvanische Trennung zwischen stationärem und mobilem Teil den erforderlichen Berührungsschutz, sind technisch jedoch recht aufwendig in der Installation. Induktives Laden bedeutet, dass zwei Spulen, eine am Boden, eine an der Fahrzeugunterseite, sich möglichst nahekomen müssen. Mit wachsendem Abstand sinkt der Wirkungsgrad rapide und es ergeben sich höhere Energiekosten für jeden Ladevorgang.

Pantographen-Ladesysteme sind in vielen Anwendungen im Einsatz und erlauben Laderaten von bis zu 650 kW. Die Kontaktierung ist bei diesen stationären Systemen meist 4-polig ausgelegt, was die Berücksichtigung eines Schutzleiters und eine entsprechende Überwachung ermöglicht. Die Kommunikation zur Freigabe des Ladevorganges erfolgt über eine WLAN-Verbindung und basiert auf einem speziellen Protokoll. Normierungen sind für diese Ladetechnik noch nicht abgeschlossen. Die Untersuchung [42] hat gezeigt, dass im Bereich der Bottom-Up wie auch bei den Top-Down Pantographen etliche Anwendungsbeispiele existieren, die z.B. beim Flash-Charging und beim Terminal-Charging von ÖPNV Bussystemen zum Einsatz kommen.

Eine Sonderform stellt in diesem Kontext der eHighway Pantograph dar. In der aktuellen Umsetzung verfügt der Stromabnehmer über eine 2-polige Kontaktierung und ist nicht für das Laden im Stillstand optimiert. Aufgrund des geometrischen Designs der Schleifleiste und des auf dem Fahrzeug befindlichen DC-DC-Stellers sind aktuell Ladeleistungen von bis zu 70 kW möglich (bei nominal DC 600 V). Möglichkeiten einer Optimierung für höhere Ladeleistungen wurden aufgezeigt, bewertet und positiv beschieden. Die Ergebnisse wurden in einem Bericht [42] weiter vertieft. Weitere Details zum Vergleich der verschiedenen Stillstandsvarianten wurden in Abbildung 24 zusammengefasst und gegenübergestellt.

Lösung/ Beschreibung	Induktives Laden	Konduktives Laden - Plug In	Top-Down/Bottom-Up Pantograph-Laden	Bottom-Up Pantograph-Laden
<b>Anwendungsbereich</b>	Opportunitätsladen/ eBus	über Nacht /Depotladen/ eBus/eLKW	Depot/Opportunitätsladen e-Bus	Laden während der Fahrt & Depot/Opportunitätsladen eHighway
<b>Energieübertragung</b>	bis 200 kW Ladeleistung	bis 350 kW Ladeleistung (5pol.)	150, 300, 450 kW, ggf. bis 1MW Ladeleistung	30 kW > 30km/h 180 kW < 30km/h 300kW @ Stillstand <sup>1)</sup>
<b>+</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Größe/Gewicht der Batterie</li> <li>Reichweitenerhöhung</li> <li>Automatisiertes Laden</li> <li>Kein Eingriff in das Stadtbild</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einfach zu betreiben</li> <li>Niedrige Investitionskosten</li> <li>Etabliert und hoher Entwicklungsstand</li> <li>Kommunikation über Stecker</li> <li>Flexibilität und Adaptierbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Größe/Gewicht der Batterie</li> <li>Reichweitenerhöhung</li> <li>Automatisiertes Laden</li> <li>Laderegelung @ Infrastruktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sehr hohe Reichweite im OH-Betrieb</li> <li>Erweiterungen der OL möglich</li> <li>Automatisiertes Laden</li> <li>Nachladen in beiden Betriebszuständen</li> </ul>
<b>-</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eingriff in die Straßen-Infrastruktur</li> <li>Wirkungsgrad</li> <li>N.abgeschlossene Normierung</li> <li>Limitierte Ladeleistung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umständliches Handling von dicken Kabeln</li> <li>Keine Automatisierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stress der Batterien</li> <li>High-Level-Kommunikation</li> <li>Eingriff in das Stadtbild</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Infrastruktur (2 elektr. Systeme)</li> <li>Hohe Investitionen des Gesamtsystems</li> <li><sup>1)</sup> Modifikation Pantograph notwendig</li> </ul>

**Abbildung 24: Vergleich und Bewertung von Systemen zum Stillstandsladen**

## **Ergebnis**

Ein automatisiertes Stillstandsladen für Lkw und Busse - durch die Nutzung von Pantographen im Gegensatz zu einem kabelbasierenden Laden - bietet mehrere Vorteile. Bei Bussen, aber auch bei Lkws, ergibt sich ein zeitlicher Vorteil speziell beim Schnell- und Gelegenheits-Laden, um bei Haltezeiten zusätzliche elektrische Energiemengen sicher während kurzer Standzeiten auf das Fahrzeug zu transferieren. Daneben wären auch noch der Komfortzuwachs und Sicherheitsaspekte zu nennen, die bei der praktischen Anwendung im Gegensatz zu einer Plug-In-Lösung als positiv zu bewerten sind.

Trotzdem hat das kabelgebundene Stillstandsladen aus heutiger Sicht technisch und leistungsmäßig den höchsten Reifegrad und kann kurzfristig mit am Markt verfügbaren Komponenten realisiert werden.

Durch eine entsprechende Weiterentwicklung des eHighway Pantographensystems können weitere Verbesserungen und höhere Ladeleistungen erzielt werden, sodass dieses System sowohl für den dynamischen Betrieb an der Oberleitung als auch für ein zusätzliches High-Power-Charging (HPC) im Stillstand genutzt und empfohlen werden kann.

### 3.1.6.2 Optimierte Systemspannung aus Fahrzeug- und Infrastruktursicht (SYS.6.2)

#### **Aufgabenstellung**

Aktuelle elektrische Nutzfahrzeuge für den Betrieb an einer Oberleitung sind von seriellen bzw. parallelen Hybridkonzepten abgeleitet, vgl. 2.2.2. Die hierbei installierte Leistungselektronik basiert auf Leistungshalbleitern der 1200 V-Klasse. Aus Sicht der Leistungselektronik können diese auch bei sehr geringer Spannung von bis zu 0 V betrieben werden, was aber für die Umsetzung von elektrischer Leistung in mechanischen Vortrieb nicht sinnvoll ist, da unter Berücksichtigung eines fahrzeugabhängigen Maximalstromes die verfügbare Antriebsleistung immer weiter abnimmt.

Hybridfahrzeuge haben zusätzlich auch immer einen Energiespeicher, der aktuell meist aus Li-Ionen Batterien besteht. Batteriesysteme, die für den Betrieb an der maximalen Spannung der Antriebskomponenten entworfen sind, weisen anders als die Leistungselektronik und Antriebsmaschinen auch immer eine batterietypspezifische Mindestspannung auf. Im eHighway-System ist diese untere Spannungsgrenze eine für das Gesamtsystem aus Infrastruktur und Lkw von den aktuellen Partnern getroffene Definition und wurde auf 500 V festgelegt [43].

Die maximale Spannung eines elektrischen Fahrzeugsystems wird durch mehrere Hauptkomponenten definiert. Im Wesentlichen sind dies die Leistungshalbleiter und Stützkapazitäten. Dabei muss die anstehende Spannung im Fahrzeug noch deutlich unterhalb der zulässigen Spannungen der Systemkomponenten bleiben, um ausreichende Sicherheit gegenüber systembedingten Überspannungen zu gewährleisten.

Aktuelle elektrische Systeme auf Nutzfahrzeugen sind mit 1200 V-IGBTs ausgestattet, die eine maximale Arbeitsspannung von 750 V DC vorgeben. Daraus leitete sich in Anlehnung an die in der Bahnnorm EN 50163 [19] definierten Spannungssysteme die dort genormte Systemspannung von 600 V DC ab, wobei jedoch für die untere Grenzspannung abweichend von der Norm - bedingt durch die weiter oben geschilderten Energiespeicher-Vorgaben - eine höhere Mindestspannung vereinbart wurde.

Simulationen und Berechnungen haben ergeben, dass diese niedrige Systemspannung bei großen Fahrzeugdichten mit hohem Leistungsbezug, ggf. erhöht durch das zeitgleiche Nachladen von Traktionsbatterien, Nachteile auf der Seite der Infrastruktur mit sich bringt. Diese resultieren aus den hohen Strömen, um auch bei vergleichsweise geringer Spannung hohe Leistungen umsetzen zu können und führen zu dichten Unterwerksabständen und großen Leiterquerschnitten und in der Folge höheren Investitionskosten.

Hieraus ergibt sich die systemtechnische Fragestellung, welche Nennspannung für ein eHighway-System, bestehend aus Oberleitungen, Unterwerken und Hybrid-Fahrzeugen mit Energiespeichern, ein Optimum im Ergebnis einer gesamtsystemischen Betrachtung darstellen würde.

## Vorgehensweise

Zuerst war es wichtig, die möglichen Fahrzeugdichten auf viel befahrenen Strecken zu bestimmen und mittels einer prognostizierten Zunahme des Güterverkehrs festzulegen, was die sinnvolle maximale Kapazität einer eHighway-Strecke ist und welchen Leistungsbedarf entsprechende Oberleitungsfahrzeuge aufweisen. Als Topologie wurde eine ebene Strecke vorausgesetzt, da Steigungen lediglich eine Verschiebung des Leistungsbedarfs einer externen Versorgung auf die Steigungsstrecken bedeuten.

Des Weiteren muss die Auswirkung einer geänderten Systemspannung sowohl auf die Infrastruktur als auch auf die Fahrzeuge ermittelt werden und diese Auswirkung an dem ermittelten Fahrzeugaufkommen gespiegelt werden. Hieraus sollten dann entsprechende Mehr- oder Minderaufwendungen abgeleitet werden, die sich vor allem auch hinsichtlich der Investitions- und Betriebskosten auf das Gesamtsystem auswirken. Das aktuell in den vorhandenen Anlagen implementierte 600V DC-System wurde als Referenzszenario herangezogen.

Als Optimum sollte sich diejenige Systemspannung ergeben, bei der die geringsten Gesamtkosten über Oberleitungsinfrastruktur, einspeisende Unterwerke und Fahrzeuge hinweg entstehen.

## Ergebnisse

Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben im Straßenverkehr muss ein Sicherheitsabstand von 50 Metern bei einer Autobahnfahrt mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h für den Gütertransport mit Lkw eingehalten werden – vgl. §4.3 STVO [44]. Hieraus ergibt sich in einer dichten Fahrzeugfolge zusammen mit der Länge der Fahrzeuge ein Abstand von Fahrerhaus zu Fahrerhaus von 67,5 m, wenn die maximal mögliche Länge eines 40 t-Sattelzuges berücksichtigt wird. Bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h ergibt sich hieraus eine Fahrzeugdichte je Kilometer von max. 14 Fahrzeugen in einem 2-3 s Takt.

Aus verkehrlichen Betrachtungen auf deutschen Autobahnen wurde auf Strecken, die heute bereits stark im Gütertransport befahren werden, eine Fahrzeugdichte von im Mittel ca. 600 Lkw je Stunde ermittelt, was einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) für Schwerlast-Lkw von 14.000 Lkw je Richtung entspricht.

Auf Basis dieser beiden Betrachtungen erfolgte für die Bewertung einer zukünftigen Befahrung von eHighway-Strecken mit Oberleitungs-Lkw die Definition von Szenarien mit Fahrzeugfolgen von 2, 6 bzw. 10 Fahrzeugen je km, um niedrige bis mittlere, hohe und sehr hohe Lkw-Verkehrsaufkommen abzubilden.

Lastkraftwagen mit mittlerer Beladung und einem Gesamtgewicht von ca. 30 Tonnen benötigen auf einer ebenen Strecke ca. 150 kW mittlere Leistung, um ihren Fahrbetrieb aufrecht zu erhalten, vgl. [3].

Um auch außerhalb der Oberleitungsstrecken einen emissionsfreien Güterverkehr gewährleisten zu können, werden Fahrzeuge mit einer Traktionsbatterie benötigt, deren Größe sich nach dem jeweiligen Lkw-Einsatzprofil richtet, s. dazu auch Abschnitt 3.1.1 und 3.4.1. Diese Traktionsbatterie soll an der Oberleitungsinfrastruktur geladen werden. In den Szenarien wurde für Fahrzeuge mit geringerer elektrischer Reichweite aus einer Traktionsbatterie eine Ladeleistung von 150 kW und für Fahrzeuge mit einer größeren elektrischen Reichweite eine Ladeleistung von 300 kW festgelegt, sodass sich hieraus ein Gesamtleistungsbezug von 150 kW, 300 kW und 450 kW ergab, den ein Oberleitungssystem je Fahrzeug in den Varianten ohne, mit mittlerer und höherer Batterieladeleistung bereitstellen muss.

Aus den Simulationsrechnungen von Strecken mit einer Fahrzeugfolge von 2, 6 bzw. 10 Fahrzeugen je Kilometer und einem Leistungsbezug von 150 kW, 300 kW und 450 kW können zunächst nachfolgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Das derzeit realisierte Oberleitungssystem (150 mm<sup>2</sup> Fahrdraht, 120mm<sup>2</sup> Tragseil) stellt mit der dauerhaften Stromtragfähigkeit von etwa 1000 A eine Limitierung der über die Oberleitung transportierbaren elektrischen Leistung im bisherigen Nennspannungssystem von 600 V DC dar.
- Maßnahmen zur Bewältigung sehr hoher Verkehrsaufkommen wären ein geringer Unterwerksabstand von unter 1 km und/oder, wie bei stark belasteten Bahnstrecken üblich, die Verlegung zusätzlicher Kabel/Leitungen parallel zum Kettenwerk, was eine höhere Stromtragfähigkeit der Oberleitungsanlage je Fahrtrichtung ergeben würde.

- Mit der Systemspannung von 600 V DC können geringe bis mittlere Fahrzeugfolgen mit unterer Leistungsaufnahme gut abgebildet werden.
- Je höher die verwendete Systemspannung ist, desto größer kann der Unterwerksabstand gewählt werden und umso geringer ist der Bedarf an zusätzlichen Leitungen parallel zum Kettenwerk, um auch hohe Leistungen von Fahrzeugen bei gleichzeitig hoher Fahrzeugfolge abdecken zu können.

Bei der Kostenschätzung für die Systemauslegungen mit unterschiedlichen Spannungen stellt auf der Seite der Infrastruktur das 600 V DC-System basierend auf den heute noch recht kurzen, realisierten eHighway-Strecken einen Ausgangspunkt dar, der jedoch noch keine Synergieeffekte wie in größeren Netzen berücksichtigen kann. Da die Infrastruktur stark an die Technologie aus der Bahntechnik angelehnt ist und dort eine Systemspannung von 600 V DC in neuen Anlagen kaum mehr Verwendung findet, werden für die Realisierung von 600 V DC und 750 V DC-Systemen bereits jetzt nahezu identische Bauteile verwendet.

Das 750 V DC-System hat hierbei aber den Vorteil, dass bei gleichen Randbedingungen der Abstand der Unterwerke größer werden kann und sich somit ein Kostenvorteil aufgrund geringerer Anzahl von Unterwerken ergibt.

Im Gegensatz zur Bahntechnik, bei der ein System mit einer Nennspannung von 1500 V DC dauerhaft bis zu 1800 V und kurzzeitig Überspannungen bis 1950 V aufweisen darf (vgl. [19]), ist die Spannung 1500 V DC für Straßenfahrzeuge als obere Spannungsgrenze definiert, vgl. Norm ISO 6469-3 [45]. Somit konnte für die weiteren Betrachtungen maximal ein 1200 V DC-Nennspannungssystem berücksichtigt werden. Dieses 1200 V DC-Spannungssystem ist in der Bahntechnologie nur ausnahmsweise vorhanden, z.B. bei der S-Bahn Hamburg, und in den Bahnnormen nicht weiter spezifiziert. Damit kämen auch bei einer eHighway-Infrastruktur mit 1200 V DC die Komponenten des 1500 V DC-Systems zum Einsatz.

Die Kosten für die 1200 V-Systemausrüstung sind bei Unterwerken und Oberleitung höher als bei dem Basissystem mit 600 V DC. Dominant positiv im 1200V DC-System ist aber der nochmalige Anstieg des Unterwerksabstandes im Vergleich zum 750 V DC-System, was wiederum mit einer zusätzlichen Reduzierung der Infrastruktur-Gesamtkosten einhergeht.

Aus Sicht der Infrastruktur, bestehend aus Unterwerken und Oberleitungen, werden die Kosten mit zunehmender Systemspannung geringer gegenüber dem Basissystem von 600 V DC. Diese Kostensparnis ist abhängig vom Elektrifizierungsgrad und dem Verkehrsaufkommen. Eine Erhöhung auf 750 V DC führt zu einer Ersparnis im Bereich zwischen 5% und 10%, für ein 1200 V DC-System kann man von einer Kostenreduktion zwischen 12 % und 24 % ausgehen, jeweils bezogen auf das Basissystem 600 V DC.

Fahrzeuge, die für einen Betrieb an einer Oberleitungsstrecke geeignet sind, benötigen die Möglichkeit eines rein elektrischen Betriebes mit einem ausreichend dimensionierten elektrischen Antriebssystem. Für emissionsfreie Fahrten außerhalb eines Oberleitungsnetzwerkes ist das Vorhandensein einer Traktionsbatterie notwendig, s. Abschnitt 3.1.1.

Nach Aussagen eines aktuellen Herstellers von Hybrid-Oberleitungs-Lkw sind die Kleinserienfahrzeuge anders als O-Busse bisher nicht geeignet, die auf dem Fahrzeug befindlichen elektrischen Systeme direkt, d. h. ohne Trennumwandlung, aus einem Oberleitungssystem mit elektrischer Leistung zu versorgen. Neben dem Pantographen muss noch eine Trennkomponente, ein sogenannter DC-DC-Steller, in die Fahrzeuge integriert werden, da nur mit dieser Komponente ein sicherer und robuster Betrieb der elektrischen Systeme auf dem Oberleitungs-Lkw gewährleistet werden kann. Durch die Trennung mittels DC-DC-Steller kann die elektrische Basiskonfiguration - inkl. Antriebssystem - auch bei einer höheren Oberleitungsspannung unverändert auf dem Fahrzeug beibehalten werden, s. dazu Abschnitt 3.4.2.3.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ConVerT [46], das die Entwicklung eines galvanisch trennenden DC-DC-Stellers zum Ziel hat, werden auch die Auswirkungen unterschiedlicher Systemspannungen auf den DC-DC-Steller betrachtet. Die Analysen haben ergeben, dass für 600 V DC- und 750 V DC-Systeme entsprechende leistungselektronische Bauteile zum Betrachtungszeitpunkt als Massenprodukte am Markt verfügbar sind, um den benötigten DC-DC-Steller kostengünstig realisieren zu können.



Bei einer Systemspannung von 1200 V DC können Verschaltungsvarianten von Teilkomponenten aus der Realisierung von 600 V DC- bzw. 750 V DC-Systemen angewendet werden. Dies ermöglicht ebenfalls den Einsatz von Teilkomponenten aus diesen Spannungsklassen.

Aus dieser Betrachtung ist abzuleiten, dass die Variation und Erhöhung der Systemspannung für die weiterhin benötigte Eingangskomponente DC-DC-Steller preislich eine untergeordnete Bedeutung für die Oberleitungsfahrzeuge hat.

### **Fazit**

Im Rahmen der Bewertung [43] zu möglichen DC-Spannungssystemen für eine Oberleitungsinfrastruktur in Deutschland/Europa wurde festgestellt, dass ein Spannungssystem unterhalb einer maximalen Spannungsobergrenze von 1500V DC festgelegt werden muss.

Für die übergreifende Betrachtung einer Systemspannung sollte nicht die maximal mögliche Fahrzeugdichte und der maximale Leistungsbedarf zugrunde gelegt werden. Hier erscheint für eine Systemauslegung, basierend auf aktuellen Verkehrsmessungen und Prognosen bzgl. zukünftiger Zuwachsraten, eine Festlegung von maximal 10 Fahrzeugen je km sinnvoll. Noch höher frequentierte Strecken müssen dann bei deren Realisierung separat betrachtet und unter Einbeziehung von Verstärkungsmaßnahmen ausgelegt werden.

Die Kostenbetrachtung für die Infrastruktur ergab im zu Grunde gelegten Untersuchungsraum geringere Kosten je höher die Systemspannung ist.

Nach der aktuell betrachteten Systemtechnologie bei Oberleitungsfahrzeugen wird der vorgeschaltete DC-DC-Steller kostentechnisch lediglich geringfügig durch die Systemspannung beeinflusst.

Zwei Punkte müssen in diesem Zusammenhang noch bedacht werden, konnten aktuell aber nicht in die Betrachtung einfließen:

- Bis auf die Aktivitäten im Rahmen des geförderten Projektes ConverT gab es bis zum Abschluss von ELANO keine uns bekannten Produkte bzw. Entwicklungen für einen galvanisch trennenden, kostengünstigen und leistungsfähigen DC-DC-Steller für 750 V DC bzw. 1200 V DC, der auf der Fahrzeugseite als Basis betrachtet werden konnte.
- Die Variante, dass perspektivisch die elektrischen Traktionskomponenten der Lkw direkt aus einer Oberleitungsinfrastruktur versorgt werden könnten und, dass damit der zusätzliche DC-DC-Steller entfallen könnte, wurde nicht betrachtet, da dieser Weg von den Fahrzeugherstellern bis zum Abschluss von ELANO für die Markteinführung von OL-Lkw nicht verfolgt wurde.

Insgesamt führten die Betrachtungen zu der Schlussfolgerung, dass die hier betrachtete höchste Systemspannung von 1200 V DC die langfristig anzustrebende Systemspannung für einen zukünftigen breiten Aufbau von Oberleitungsnetzen ist.

### **3.1.6.3 Sicherheitsanalyse Gesamtsystem nach Common Safety Methods - CSM (SYS.6.3)**

#### **Problemstellung**

Das eHighway-System stellt eine Abwandlung eines nicht spurgeführten Bahnsystems dar, bei der die Energieversorgung mittels Oberleitung und eines Pantographen (PAN) auf das Straßenfahrzeug (Lkw) erfolgt. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale gegenüber den meisten Eisenbahnen sind dabei die Zweipoligkeit des PAN, die fehlende Spurführung, eine höhere Gesamtverkehrsdichte sowie mit den Autobahnen ein anderer genutzter öffentlicher Verkehrsraum.

Ziel der eHighway Risikobewertung ist die Einordnung, Rahmensetzung und Prozessbeschreibung zur Identifizierung und Evaluation von Risiken und Gefährdungen im eHighway-System. Dabei stellt sich das Vorhaben insbesondere der Herausforderung, nicht eine domänenspezifische Methode fachfremd auf alle Teilsysteme und das Gesamtsystem anzuwenden, sondern vielmehr aus der Zusammenschau der beteiligten Teilsysteme und der domänenspezifischen Ansätze zur Risikoidentifizierung und Evaluation einen integrierten Bewertungsansatz methodisch aufzubereiten und anschließend auf das eHighway-System insgesamt anzuwenden. Dazu wurden auch die entwicklungsbegleitenden



Vorarbeiten auf Gesamt- und Teilsystemebene aufgegriffen und fortgeschrieben sowie Erkenntnisse aus Entwicklung und Erprobung einbezogen. Das Hauptaugenmerk soll insbesondere auf die Schnittstellen und das Zusammenwirken der Teilsysteme gelegt werden, da dies durch die teilsystemspezifischen Ansätze zumindest nicht vollständig abgedeckt werden kann. Demgegenüber werden innerhalb der Teilsysteme auf die domänenspezifischen Standardverfahren und Grundsätze zur Risikoakzeptanz verwiesen und auf diesem Weg die entwicklungs- oder auslegungsbegleitenden Arbeiten zur Risikoidentifikation und Evaluation eingebunden.

### **Methodischer Rahmen**

Basis des Bewertungsvorhabens ist die gemeinsame Sicherheitsmethode (CSM - Common Safety Methods) [47] für den Schienenverkehr in Europa gemäß EG352/2009 mit dem in

Abbildung 25 gezeigten Ablaufschema. Ausgangspunkt der Anwendung ist ein bekanntes, vorläufiges System, das eine Änderung erfährt. Sobald diese Änderung als signifikant eingestuft wird, erfolgt eine Risikobewertung des geänderten Systems, die durch eine unabhängige Bewertung (in

Abbildung 25 links) und ein Gefährdungsmanagement (in

Abbildung 25 rechts) zu flankieren ist. Die Risikobewertung umfasst folgenden mehrschrittigen Ablauf (s. Tabelle 8) zu denen die Punkte Systemdefinition, Risikoanalyse, Wahl des Grundsatzes der Risikoakzeptanz, Risikoevaluierung, Ableitung von Sicherheitsanforderungen gehören.

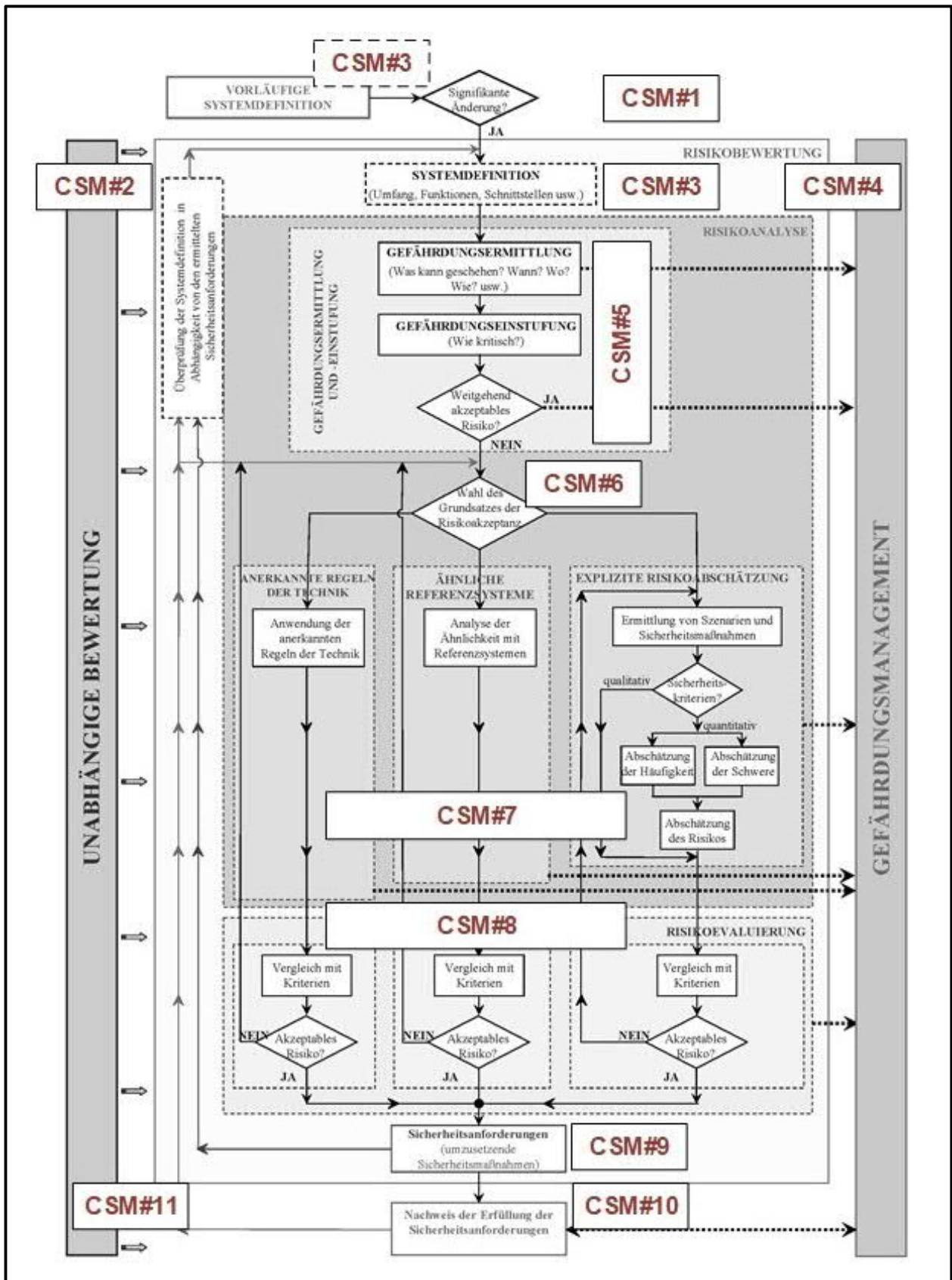


Abbildung 25: Ablaufschema gemeinsame Sicherheitsmethode CSM nach [EG 352/2009] (angepasst)

Dabei wurde den Prozessschritten in Tabelle 8 gefolgt. Details sind dem Bericht „eHighway Risikobewertung Gesamtsystem nach CSM“ [48] und der Risikoanalyse [49] zu entnehmen.

**Tabelle 8: Prozessschritte, Inhalte und Dokumentation der angepassten Risikobewertung nach CSM**

Schritt	Bezeichnung und Inhalt
<b>CSM#1</b>	<b>Bezeichnung:</b> <u>Gefährdungsmanagement</u> – Vorschlagender und Akteure <b>Inhalt:</b> Beschreibung der Organisation des Vorschlagenden und Angaben zu den Experten, die benannt wurden, um das Risikobewertungsverfahren durchzuführen. Beschreibung des Vorhabens sowie der Aufgaben der verschiedenen Akteure.
<b>CSM#2</b>	<b>Bezeichnung:</b> Auswahl einer unabhängigen Bewertungsstelle <b>Inhalt:</b> Externe oder interne Bewertungsstelle für die ordnungsgemäße Durchführung des Risikomanagementverfahrens und Nachweis ihrer Unabhängigkeit.
<b>CSM#3</b>	<b>Bezeichnung:</b> <u>Risikobewertung</u> – <u>Systemdefinition</u> <b>Inhalt:</b> Definition des zu bewertenden Systems mit seinen Systemgrenzen sowie Festlegung der Kriterien zur Feststellung der Signifikanz von Änderungen.
<b>CSM#4</b>	<b>Bezeichnung:</b> Dokumentation des <u>Schnittstellenmanagements</u> <b>Inhalt:</b> Definition der relevanten Schnittstellen im System und über die Systemgrenzen hinweg. Nachweis des Informationsflusses zwischen den Akteuren innerhalb des Systems und über die Schnittstellen hinweg zu anderen Systemen und Akteuren.
<b>CSM#5</b>	<b>Bezeichnung:</b> <u>Risikoanalyse</u> – Gefährdungsermittlung und -einstufung <b>Inhalt:</b> Festlegung der Kriterien zur Sicherheitsrelevanz Durchführung der Gefährdungsermittlung/ -einstufung in Schritten: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ableiten der Fehlfunktionen aller Funktionen</li> <li>• Ableiten der möglichen Gefährdungen</li> <li>• Gefährdungseinstufung für jede Gefährdung als „kritisch“ oder „nicht kritisch“, d. h. breit akzeptiertes Risiko</li> </ul>
<b>CSM#6</b>	<b>Bezeichnung:</b> <u>Risikoanalyse</u> – Wahl des Grundsatzes der Risikoakzeptanz (GdR) <b>Inhalt:</b> Für alle kritischen Gefährdungen die Wahl des Grundsatzes der Risikoakzeptanz treffen und dokumentieren. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anerkannte Regeln der Technik, z. B. anzuwendende Standards</li> <li>• Verweis auf bekanntes und bewährt sicheres Referenzsystem</li> <li>• Explizite Risikoabschätzung</li> </ul>
<b>CSM#7</b>	<b>Bezeichnung:</b> <u>Risikoanalyse</u> – Anwendung GdR auf Fehlfunktion <b>Inhalt:</b> Für jede Gefährdung gemäß des zugeordneten Risikoakzeptanzgrundsatzes dokumentieren
<b>CSM#8</b>	<b>Bezeichnung:</b> <u>Risikoevaluierung</u> – Akzeptables Risiko jeder Gefährdung <b>Inhalt:</b> Nachweis der Einhaltung der Anforderungen, die sich aus der Anwendung des ausgewählten Verfahrens (Anerkannte Regeln der Technik – Referenzsysteme – Explizite Risikoabschätzung) ergeben.
<b>CSM#9</b>	<b>Bezeichnung:</b> <u>Risikobewertung</u> – Ableitung von Sicherheitsmaßnahmen <b>Inhalt:</b> Zusammenstellung und Auflistung der Sicherheitsmaßnahmen
<b>CSM#10</b>	<b>Bezeichnung:</b> <u>Nachweis der Sicherheitsanforderungen</u> <b>Inhalt:</b> Das Risikobewertungsverfahren ist abgeschlossen, wenn nachgewiesen ist, dass alle Sicherheitsanforderungen eingehalten werden und keine weiteren, nach vernünftigem Ermessen vorhersehbaren Gefährdungen zu berücksichtigen sind.
<b>CSM#11</b>	<b>Bezeichnung:</b> <u>Sicherheitsbewertungsbericht der Bewertungsstelle</u> <b>Inhalt:</b> Im Rahmen einer Dokumentenprüfung wird die ordnungsgemäße Anwendung des Risikomanagementverfahrens und der Ergebnisse Haupt-Anwendung einer unabhängigen Bewertung unterzogen. Die Bewertungsstelle hält ihre Schlussfolgerungen in einem Sicherheitsbewertungsbericht fest, den die Bewertungsstelle dem Vorschlagenden unterbreitet.

### **Schlussfolgerungen (Bewertungsergebnis)**

Gemäß Artikel 6 Absatz 1 der CSM-Richtlinie [47] wurden die ordnungsgemäße Anwendung des in Anhang I (der CSM) beschriebenen Risikomanagementverfahrens und die Ergebnisse dieser Anwendung von einer Stelle, die den in Anhang II (der CSM) genannten Kriterien entspricht, einer unabhängigen Bewertung unterzogen. Als unabhängige Bewertungsstelle wurde das IFB Institut für Bahntechnik GmbH beauftragt. Die Schlussfolgerungen sind dem Sicherheitsbewertungsbericht [50] entnommen:

Die Ermittlung, Anwendung und Verwendung der Grundsätze der Risikoakzeptanz, Risikoevaluierung und Ableitung der Sicherheitsanforderungen stellen einen Kompromiss dar, da es sich bei dem vorliegenden System eHighway um kein Eisenbahnsystem im engeren Sinn handelt, sondern um den elektrifizierten Lkw-Verkehr, der sich als gleislose Bahn kategorisieren lässt. Insofern wurde plausibel und erfolgreich versucht, die Elemente der Eisenbahn (insb. Stromversorgung) mit dem Straßenverkehr zu kombinieren und zu einer gesamtheitlichen Bewertung zu kommen. Dieses Vorgehen bezüglich der Integration von domänenspezifisch unterschiedlichen Sicherheitsbewertungsverfahren aus den Teilsystemen des Bahn(gesamt)systems ist Grundgedanke der CSM in Bahnanwendungen. Denn nur so können in einem gemeinsamen Bewertungsverfahren die Auswirkungen von Änderungen im Bahnsystem auf die Teilsysteme Fahrzeug, Leit- und Sicherungstechnik, Fahrweg und Bahnenergieversorgung analysiert werden. Insoweit war die Ausweitung der Common Safety Methods auf die weiteren Domänen Straßenfahrzeuge und –infrastruktur naheliegend, folgerichtig und wurde auch methodisch nachvollziehbar abgebildet.

Auch wenn es sich, der Neuartigkeit des Systems geschuldet, um einen bisher nirgendwo vorher angewendeten Kompromiss handelt, sind alle angewendeten Grundsätze der Risikoakzeptanz, Risikoevaluierung und Ableitung der Sicherheitsanforderungen vernünftig unter Einsatz einer Expertengruppe miteinander kombiniert und systematisch dokumentiert worden.

Die unabhängige Bewertungsstelle hält das Verfahren für plausibel und weitgehend anwendbar. Zukünftig ist die Anwendbarkeit dann mit den noch zu benennenden Zulassungsstellen abzustimmen und ggf. von ihnen zu genehmigen.

## 3.2 Themenschwerpunkt Stromabnehmerentwicklung - PAN

### 3.2.1 Aufgabenstellung / Hintergründe

In den vorhergehenden Forschungsprojekten ENUBA und ENUBA 2 wurden seit 2010 zwei verschiedene Generationen von Stromabnehmern für das eHighway-System aufgebaut, womit Test-Lkw mit einem Stromabnehmer an Oberleitungen elektrisch angetrieben werden konnten., vgl. Abschnitt 2.2.1 sowie [2] und [3].

#### 3.2.1.1 1. Generation (ENUBA)

Die Entwicklung der ersten Generation der eHighway-Pantographen war im Wesentlichen auf die Machbarkeit des eHighway-Systems fokussiert. Weiter waren erste Annahmen zu Oberleitungsspannungen, zu den zu übertragenden Strömen, zu erforderlichen Andruckkräften an die Oberleitungen, zum Bauraum auf dem Fahrzeug und zu Umgebungsbedingungen gegeben. Der Pantograph wurde auf ein starres Traggestell hinter der Fahrzeugkabine integriert (vgl. Abbildung 26 und zuvor Abbildung 2).

Für die vertikale Verstellung zum Andrahten an die Oberleitung wurde ein zweistufiges Aktorsystem verwendet, mit dem zwei Arme aus einer Ruhestellung zunächst mittels pneumatischer Zylinder in eine Grundhöhe gehoben wurden. Anschließend hoben sogenannte pneumatische Muskeln den Pantographen vertikal bis zum Kontakt mit der Oberleitung an. Die pneumatischen Muskeln sorgten für die Kontaktkraft und glichen größere, vertikale Schwankungen, hervorgerufen durch das Fahrzeug und die Fahrbahnbeschaffenheit aus. Ein zentral angeordneter, elektrischer Getriebemotor wurde an einem dritten, mittleren Arm platziert, um eine horizontale Bewegung der Wippen zu ermöglichen. Mittels dieser ließen sich die lateralen Schwankungen der Lkw-Spurführung ausgleichen und das Verschleißverhalten der Kohlekontakte auf den Schleifleisten verbessern. Am Ende der drei Arme wurden zwei Wippen mittels einer geeigneten Lagerung angeordnet, die den Freiheitsgraden der Aktorik wie auch den erwarteten Schwankungen des Oberleitungsgefälles genügten. Als Wippen wurden modifizierte Baugruppen aus dem Bahnumfeld verwendet.

Eine separate Regelung der Kontaktkräfte für beide Arme ermöglichte in dieser Generation eine stets annähernd gleiche Kontaktkraft an beiden elektrischen Polen, unabhängig von der Oberleitungshöhe und der lateralen Position der Fahrzeuge. Eine wichtige Quelle wesentlicher Eingangsparameter für die Positionierung der Wippen war ein 2D-LiDAR-Sensor, mit dem sich die Lage der Oberleitung über dem Fahrzeug ermitteln ließ. Im Rahmen von umfangreichen Labor- wie auch Feldtests auf der Teststrecke in Groß Dölln konnte die Funktionsfähigkeit des Pantographen und auch des Gesamtsystems erfolgreich nachgewiesen werden [[2]; [51]]. Das gewählte Aktorikkonzept des Pantographen und der große horizontale und vertikale Arbeitsbereich führten zu einer guten Verfügbarkeit, gleichzeitig ließ sich der Verschleiß an den Schleifleisten aktiv reduzieren. Verschiedene Nachteile der gewählten Architektur wurden in den Erprobungen ermittelt und bei den Weiterentwicklungen berücksichtigt. Allem voran war der erforderliche Bauraum in Fahrtrichtung aufgrund der langen Arme zu groß und hätte bei einem serienmäßigen Betriebseinsatz zu einer empfindlichen Verringerung des zur Verfügung stehenden Ladevolumens führen können. Die langen Arme und die hohen, lateralen Beschleunigungen machten außerdem zusätzliche Maßnahmen zur Schwingungstilgung in der Wippe erforderlich.

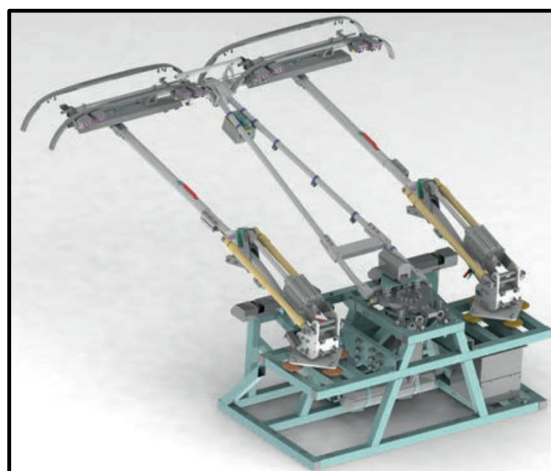


Abbildung 26: PAN 1. Generation (ENUBA)



### 3.2.1.2 2. Generation (ENUBA 2)

Für die zweite Generation der Pantographen wurden zunächst die Anforderungen deutlich weiter detailliert und anschließend die Architektur des Pantographen diesen Anforderungen angepasst. Der zur Verfügung stehende Bauraum in Fahrtrichtung wurde durch den geplanten Einsatz in Sattelzugmaschinen wesentlich verkürzt. Anpassungen waren für den Einsatz im automobilen Umfeld erforderlich, zum Beispiel die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Vibrationen und der Witterung. In der zweiten Generation wurde der Pantograph auf einer in Fahrtrichtung deutlich schlankeren Tragkonstruktion hinter der Fahrzeugkabine integriert (vgl. Abbildung 27 und zuvor Abbildung 3). Aufgrund der nach vorne verschobenen Drehachsen der Pantographenarme mussten diese gekürzt werden, um nicht vorn über die Kabine hinauszuragen. Der damit einhergehende Verlust an Arbeitshöhe wurde ausgeglichen, indem in die Tragkonstruktion unter dem Pantographen ein Lift integriert wurde, der den Pantographen zunächst aus der Ruhelage auf eine Grundhöhe anhebt. Anschließend werden zwei verkürzte Arme durch pneumatische Muskeln an die Oberleitung gehoben. Im Unterschied zur ersten Generation werden zwei separate Getriebemotoren für beide Arme verwendet, um die laterale Bewegung zum Ausgleich von Fahrzeugbewegungen in der Fahrspur zu ermöglichen.



Abbildung 27: PAN 2. Generation (ENUBA 2)

Die Sensorik zur Ermittlung der Oberleitungsposition wie auch die Andruckkraftregelung und die generelle Ansteuerung des Pantographen orientierte sich an den Erfahrungen mit der ersten Generation und wurde umfangreich weiterentwickelt. Ein besonderer Schwerpunkt betraf dabei die Andruckkraftregelung s. dazu ausführlich [3].

Neben Prüfungen im Labor wurde die zweite Generation der Pantographen auf verschiedenen Fahrzeugen integriert und erfolgreich auf Prüfstrecken in Groß Dölln, Schweden und den USA erprobt ([52][53][54]). Für diese Prüfungen wurden gezielt unterschiedliche Hybridfahrzeuge unterschiedlicher Hersteller und mit unterschiedlichen Antriebssystemen gewählt, um die universelle Anwendbarkeit des Pantographen nachzuweisen. Im Rahmen von erstmals durchgeführten, intensiven Klima-, EMV- und Vibrationsprüfungen mit vollständigen Pantographen wurden Schwachstellen für den geplanten Einsatz ermittelt, denen bei der Weiterentwicklung Rechnung getragen werden sollte.

### 3.2.1.3 Zielstellung 3. Generation (ELANO)

Bei der Weiterentwicklung des Stromabnehmers im Rahmen des ELANO-Projektes fokussierte sich die Zielstellung und die daraus abgeleiteten Anforderungen auf den geplanten Einsatz der Stromabnehmer bei Feldtests in größerer Anzahl und in einer seriennahen Ausführung. Neben der Berücksichtigung entsprechender Qualitätsvorgaben und Maßnahmen zur Produktsicherheit wurden auch Anforderungen an Produktions- und Fertigungsmethoden angepasst, um die Reproduzierbarkeit in einer Kleinserie zu ermöglichen.

Die Auswertungen der Untersuchungen aus den vorherigen Generationen zeigten zudem, dass die laterale (seitliche) Bewegung der Arme und Wippen durch andere Verfahren ersetzt werden sollte. Nur so ist ein wirtschaftlich vertretbarer Ansatz zum Bau der Stromabnehmer und damit des Gesamtsystems eHighway erreichbar.

Insgesamt wurden diese übergeordneten Ziele durch folgende Anforderungen abgebildet oder durch frühere Anforderungen angepasst:

- Minimierung des Bauraums über und hinter der Kabine

- Verringerung der Breite des Pantographen auf das zur StVZO [55] kompatible Maß 2,55 m
- Reduktion des seitlichen Arbeitsraums auf die zulässige Fahrzeugbreite zur Vermeidung von Kollisionen mit anderen Fahrzeugen und Infrastrukturelementen
- Verbesserung der Verfügbarkeit auch bei verringertem lateralen Arbeitsbereich
- vereinfachte mechanische, elektrische und signaltechnische Schnittstellen zu den Basisfahrzeugen
- Verkürzung der Dauer für An- und Abdrahtvorgänge
- Gewährleistung funktionaler Sicherheit
- Robustheit und Dauerfestigkeit
- Vereinfachung und Standardisierung von Fertigung und Montage für seriennahe Produktion

### 3.2.2 Vorgehensweise

Die Entwicklung eines seriennahen Stromabnehmers auf Basis des vorherigen Entwicklungsstands beinhaltete eine grundlegende Überarbeitung des Stromabnehmersystems. Die Architektur musste grundlegend angepasst werden, um die Anforderungen an Baugröße, Komplexitätsreduktion und Montierbarkeit zu erfüllen. Die Anforderungen der funktionalen Sicherheit erforderten den Wechsel zu einer neuen angepassten Steuerung und damit einer kompletten Überarbeitung der Softwarearchitektur. Hinzu kamen grundlegende Konzeptentwicklungen zum Verzicht auf die seitliche Bewegungsachse des Stromabnehmers.

Um solch weitreichende Änderungen seriennah umsetzen zu können, war ein iterativer Ansatz geplant, der ursprünglich vier Iterationszyklen beinhaltete und im Laufe des Projektes auf drei Zyklen (Entwicklungsschleifen) gekürzt wurde. Die Kürzung war aufgrund guter Testergebnisse an den Funktionsmustern möglich und für eine rechtzeitige Bereitstellung von Stromabnehmern für die anstehenden Feldversuche (ab September 2018) notwendig.

Die finale Entwicklung und Verifikation der einzelnen Maßnahmen erfolgte in den folgenden drei Entwicklungsschleifen:

1. Zyklus: Konzeptentwicklung, Grundlagenforschung und Labormuster von Subsystemen
2. Zyklus: Entwicklung und Aufbau von Funktionsmustern
3. Zyklus: Re-Design und Aufbau der abschließenden Prüfmuster

#### 3.2.2.1 1. Iterationszyklus - „Konzeptentwicklung, Grundlagenforschung und Labormuster“

Im Rahmen des ersten Iterationszyklus wurden die grundlegenden Machbarkeitsanalysen und Vorentwicklungen im Labor unternommen, um auf dieser Basis die Systemarchitektur festzulegen und die genauen Designvorgaben für die Entwicklung zu definieren.

Ein wichtiger Bestandteil war die Untersuchung von Alternativen zur Oberleitungserkennung und zum Verzicht der lateralen Bewegung sowie die Auswahl geeigneter Antriebskonzepte für die vertikale Bewegung.

Die Untersuchungen beinhalteten beispielsweise:

- den Aufbau einer Testinstallation eines Radar-Scanners zusammen mit der Firma Qamcom auf der Versuchsanlage in Groß Dölln als mögliche Alternative zu dem in Generation 2 eingesetzten Laser-Scanners,
- die Auswertung der Spurtreue und Toleranzen von Lastkraftwagen auf Autobahnen,
- die Untersuchung der Verfügbarkeit und zu erwartenden Genauigkeit von aktiven Spurhalteassistenten für Lkw und mögliche Optimierungsverfahren durch Spurinformatoren über RFID Tags,
- die Untersuchung und Bewertung von pneumatischen, hydraulischen und elektrischen Antriebskonzepten einschließlich deren Regelbarkeit, Ausfallsicherheit und möglichen Bauräume.

Im Rahmen der ersten Iterationsphase erfolgte noch keine umfassende Systemintegration zu einem vollständigen oder funktionsfähigen Stromabnehmer. Der Abschluss dieser ersten Iterationsphase wurde durch die abgestimmte Systemarchitektur [56] und durch das darauf aufbauende Lastenheft [57] für die nachfolgende Iteration markiert.

Die größte Änderung in der neuen Systemarchitektur ergab sich sicherlich durch die Verwendung neuer Technologien aus dem Automobilbereich. Die Betrachtung der Weiterentwicklung neuer Fahrerassistenzsysteme und insbesondere der aktiven Spurhalteassistenten ergab die Möglichkeit, die Aufgabe der seitlichen Führung des Stromabnehmers von diesem selbst an das Fahrzeug zu übertragen. Der damit verbundene Wegfall der seitlichen Bewegungsachse des Stromabnehmers erlaubte eine deutliche Reduktion an Komplexität, Gewicht, Kosten und Bauteilen, die in den früheren Generationen noch aus dem industriellen Bereich genommen werden mussten.

Darüber hinaus wurde ein neues Konzept für die vertikale Bewegung des Stromabnehmers erarbeitet. Anstelle des vertikalen Lifts mit nach oben schwenkenden Stromabnehmerarmen wurde das System auf eine sog. Halbschere umgestellt, wie sie auch vielfach in der Bahntechnologie verwendet wird. Auf diese Weise kann die gesamte vertikale Bewegung durch nur einen Antrieb realisiert werden und zudem sind mit dieser Bauart geringere Betriebshöhen (z.B. im Bereich von Fahrdrabsenkungen bei Brücken) als in der Generation 2 möglich.

### 3.2.2.2 2. Iterationszyklus - „Funktionsmuster, Prüflabore, Testaufbau“

Der 2. Iterationszyklus hatte das Ziel, ein komplettes Funktionsmuster zu entwickeln und zu fertigen, auf dessen Basis die Funktionsfähigkeit des neuen Konzeptes erprobt und nachgewiesen werden konnte. Im Rahmen der Entwicklungsphase lag aufgrund der Änderungen in der Systemarchitektur der Fokus vermehrt auf der Definition der Schnittstelle zwischen Stromabnehmer und Fahrzeug [58] und auch auf dem Aufbau eines geeigneten Fahrzeuges als Testplattform.

Hierzu wurde ein bestehendes Testfahrzeug (Actros #1, vgl. Kap. 3.4.3.1) umgebaut und mit einem angepassten Tragrahmen (Baseframe) ausgestattet. Zudem wurde ein Spurhalteassistent für das Fahrzeug zusammen mit der Firma IAV GmbH entwickelt, integriert und bewertet [59].

Im Rahmen des 2. Iterationszyklus wurden in Summe vier Funktionsmuster des Stromabnehmers im Rahmen eines Prototypenbaus montiert. Ein Stromabnehmer wurde auf das Testfahrzeug integriert und auf der Versuchsanlage in Groß Dölln unter realen Fahrbedingungen getestet.



**Abbildung 28: Funktionsmuster des Stromabnehmers auf dem Testfahrzeug "Actros #1"**

Ein weiteres Funktionsmuster wurde für die Erprobung auf einem eigens konstruierten Teststand in Berlin-Adlershof verwendet (vgl. Kap.3.5.4.1) und die übrigen zwei Funktionsmuster für Prüfungen in externen Prüflaboren (EMV, Klima und Vibration) genutzt, s. Abschnitt 3.5.4.2.

### 3.2.2.3 3. Iterationszyklus - „Aufbau abschließender Prüfmuster“

Während der 2. Iterationszyklus im Wesentlichen auf den Nachweis der Machbarkeit des neuartigen Systemkonzeptes abzielte, beinhaltete der 3. Iterationszyklus eine Vielzahl an Entwicklungen und Anpassungen, die zahlreiche Verbesserungen aber architektonisch weniger Systemrisiken beinhalteten.

Außerdem wurden die Erkenntnisse aus dem Bau und den Tests der Funktionsmuster aufgenommen und im Rahmen eines überarbeiteten Lastenheftes [60] als Inhalt für den 3. Iterationszyklus definiert.

Im Rahmen des 3. Iterationszyklus wurden z.B. die nachfolgenden Änderungen vorgenommen:

- Überarbeitung der Wippe und Schleifleisten zur Anpassung des Stromabnehmers an die maximale Breite von 2,55 m
- Überarbeitung und Anpassung der Schnittstelle zum Fahrzeug für den Aufbau der Stromabnehmer auf Fahrzeuge des Herstellers Scania unter Verwendung eines Tragrahmens von Scania
- Überarbeitung der Kopplung der beiden Wippen und der Erkennung des Fahrdrabtes auf und zwischen den Wippen
- Umstellung der Softwarearchitektur auf Verwendung eines Steuergerätes aus der Automobilindustrie (Automotiv-Controllers)
- Systemauslegung und -entwicklung entsprechend der Vorgaben zur funktionalen Sicherheit (ISO26262 [15] bzw. Maschinenrichtlinie [61])
- Vereinfachung der Montierbarkeit und Vorbereitung zur Fertigung in einer Kleinserie

Der 3. Iterationszyklus wurde mit dem Bau von drei Stromabnehmern abgeschlossen, welche für die Validierung in externen Prüflaboren (Klima, EMV, Vibration) [62][63][64][65]) und zum Test auf dem firmeneigenen Teststand in Berlin-Adlershof genutzt wurden.

Ein Aufbau auf einem Versuchsfahrzeug erfolgte nicht im Rahmen des ELANO-Projektes, da der Aufbau auf zwei Versuchsfahrzeuge der Fa. Scania im Rahmen des Projektes „OL-Lkw“ [66] durchgeführt wurde, vgl. dazu Abschnitt 4.1.

### 3.2.3 Ergebnisse

Die Vorstellung der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse erfolgt entlang der 15 Arbeitspakete PAN.1 – PAN.15 aus der Vorhabenbeschreibung, die in Abschnitt 2.3.2.2 aufgelistet sind.

#### 3.2.3.1 Positionierung in Arbeitshöhe und Vertikalbewegung im Arbeitsbereich (PAN.1 / PAN.2)

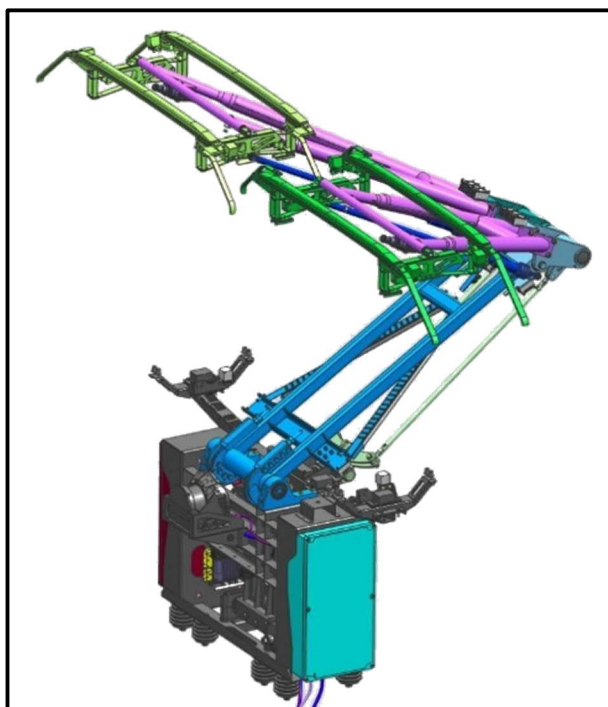
Um die definierte Arbeitshöhe zu erreichen, aber in Ruhelage die maximale Fahrzeughöhe von 4,0 m nicht zu überschreiten, muss der Stromabnehmer eine Höhendifferenz von bis zu 1,4 m überbrücken. Hierbei galt es, eine verbesserte Lösung gegenüber der vorherigen Kombination aus einer mechanischen Liftkonstruktion und einem pneumatischen Antrieb zu finden. Die Lösung musste robuster gegenüber verschiedenen Umweltbedingungen sein und zugleich kostengünstiger, leichter und langlebiger sein, eine gute Kontaktqualität der Schleifleiste zu den Fahrdrähten ermöglichen und robust gegenüber den wirkenden Kräften und Schwingungen sein.

Im ersten Schritt wurden verschiedene Konzepte verglichen und z.B. der Einsatz hydraulischer Antriebe, pneumatischer Muskel oder Elektromotoren verglichen und bewertet. Im Ergebnis wurde, ähnlich wie bei Bahnfahrzeugen, der Stromabnehmer und die untere Befestigung der Arme auf einem statischen Gerüst fest montiert. Durch dieses Design wurde die Liftkonstruktion aus der 2. Generation eliminiert, was drei wesentliche Nachteile vermied:

- Die Liftkonstruktion verlangsamte den An- und Abbügelvorgang deutlich. Durch das neue Design konnten die An- und Abbügelzeiten deutlich verkürzt werden und somit der Nutzungsgrad (die im elektrischen Betrieb ausnutzbare Länge unter der Oberleitung) erhöht werden.
- Die Liftkonstruktion zeigte eine geringe Zuverlässigkeit im Alltagsbetrieb und bei verschiedenen Umweltbedingungen.
- Die Liftkonstruktion war relativ träge und konnte nicht schnell abgesenkt werden, wenn z. B. im Bereich von Brücken die Fahrdrabthöhe deutlich gesenkt wurde.

Das Anheben der Arme in die Arbeitshöhe erfolgt nun neu über einen gemeinsamen Unterarm und einen gemeinsamen pneumatischen Balgantrieb. Der pneumatische Balgantrieb wird auch bei Stromabnehmern der Bahn verwendet, wobei diese Antriebsart es erlaubt, kurzfristige Druckveränderungen (z.B. durch Unebenheiten der Fahrbahn) flexibel abzufedern und auszugleichen.





**Abbildung 29: Funktionsmuster mit geändertem PAN-Konzept**

Diese Lösung ermöglicht den Ausgleich von Höhendifferenzen in den Fahrleitungen bei gleichzeitigem Einhalten von maximalen Toleranzen aus der Sicherheitsbetrachtung.

Mit Hilfe der aufgebauten Funktionsmuster mit dem neuen Ansatz zum Vertikaltrieb mussten insbesondere das dynamische Verhalten und die auftretenden Belastungen der mechanischen Konstruktion mit der nun vergrößerten Hubhöhe getestet werden. Die daraus resultierenden Ergebnisse und Änderungen für den Fahrzeugintegrator (z.B. Crashbedingungen, Anforderungen an den Grundrahmen inkl. mechanische Schnittstelle, Pneumatik-Anforderungen, Kommunikationsschnittstelle) wurden abgeglichen und in einem Schnittstellendokument festgehalten.

Die Definition der Toleranzketten und Arbeitshöhe zeigte sich als herausfordernd, da bereits die Grundrahmenhöhe des Fahrzeuges in Abhängigkeit von Beladung, Luftdruck und anderen Einflussgrößen z.T. variieren kann. Parallel zeigte sich in den Arbeitspaketen zur Fahrleitung im Themenfeld Traktionsstromversorgung (vgl. Kap. 3.3.2.1), dass die vorgegebene Fahrdraht-Maximalhöhe von 5,40 m über der Straße teilweise nur schwer einzuhalten ist.

Im Verlauf der Inbetriebsetzung und der Systemtests mussten die Arbeitshöhe und die Toleranzkette (Fahrzeughöhe, Betriebstoleranzen des PAN und Fahrleitungshöhe) mehrfach überprüft und neu abgestimmt werden.

Zukünftig sind hier größere Toleranzen sinnvoll, was gut mit den Ergebnissen der internationalen Abstimmungen einhergeht, dass die Arbeitshöhe zukünftig und langfristig nach oben hin auf eine maximale Höhe von 5,80 m erweitert werden sollte.

In Bezug auf die Andruckkraft zeigte das neue System sehr gute Testergebnisse, da bei kurzfristigen Stößen ein Druckausgleich durch den verwendeten Druckkessel möglich ist. Die Einstellung einer konstanten Andruckkraft über den gesamten Arbeitsbereich konnte erfolgreich umgesetzt werden. Lediglich im oberen Arbeitsbereich von 5,3 m bis 5,4 m ergab sich eine tolerierbare Abnahme der Andruckkraft, welche in Betrachtung des Gesamtsystems inklusive des Fahrdrahtanhubs jedoch eher positiv bewertet wurde.

### 3.2.3.2 Horizontalbewegung der Arme im Arbeitsbereich (PAN.3)

Im Rahmen des Arbeitspaketes SYS.5 (vgl. Kap.3.1.5) wurden Analysen zum Fahrverhalten und der Spurtreue von Lkw-Fahrern durchgeführt. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Stromabnehmerkonzept diskutiert, welches ohne die horizontale Bewegung der Arme auskommt.



Während Lastkraftwagen ohnehin die geforderte Spurtreue zu einem Großteil der Zeit einhalten, wurde zur Reduzierung von kurzen Ausreißern die Nutzung eines aktiven Spurhalteassistenten erörtert. Die Marktrecherche über geeignete Fahrerassistenz-Systeme zeigte zwar, dass solche Systeme für Lkw noch nicht standardmäßig genutzt werden, aber insbesondere im Rahmen der Entwicklungen zum autonomen Fahren schon in Kürze marktreif werden könnten.

Dies erlaubte die Eliminierung der seitlichen Bewegung der Arme. Neben einer Reduzierung der Komplexität des Stromabnehmers erforderte dies insbesondere die Übertragung der Verantwortung an das Fahrzeug, die seitliche Position des Fahrzeugs und damit auch der Schleifleisten zur Oberleitung zu bestimmen und zu steuern. Dadurch änderte sich der Fokus des Arbeitspaketes auf die Erstellung einer angepassten Schnittstellenspezifikation und die Entwicklung eines aktiven Spurhalteassistentensystems auf dem bestehenden Versuchsträger Actros #1 zusammen mit der Firma IAV GmbH.



**Abbildung 30: Control board des HAD (highly automated driving) systems von IAV und Bedienelemente im Versuchsträger Actros #1**

Der Aufbau des Lenkassistenten auf einem vergleichsweise älteren Fahrzeugmodell stellte sich als herausfordernd dar, da z.B. fahrzeugseitige Detektoren (z. B. Gierratensensoren) nicht vorhanden waren und nachträglich eingebracht und kalibriert werden mussten.

Die Tests im Normalbetrieb zeigten positive Ergebnisse, wobei Schwächen des Systems insbesondere in der Kurvenfahrt erkennbar waren. Auch prinzipielle Einschränkungen wirkten sich negativ auf die mögliche Systemverfügbarkeit aus. So war die Anwendung weiterhin auf gut sichtbare Fahrbahnmarkierungen angewiesen, welche z.B. bei einer geschlossenen Schneedecke nicht gegeben ist. Auch war die Nutzung des Systems bei Rückwärtsfahrten nicht möglich.

Die Entwicklungsergebnisse erlaubten im Rahmen des 2. Iterationszyklus die Bestätigung des generellen Konzepts der neuen Stromabnehmerarchitektur. Dieses konnte dementsprechend für den folgenden 3. Iterationszyklus beibehalten werden. Die Umsetzung der beschriebenen Funktionen wurde entsprechend auf die Serienimplementierung eines Spurhalteassistenten durch den Fahrzeugpartner und Lkw-Hersteller Scania übertragen.

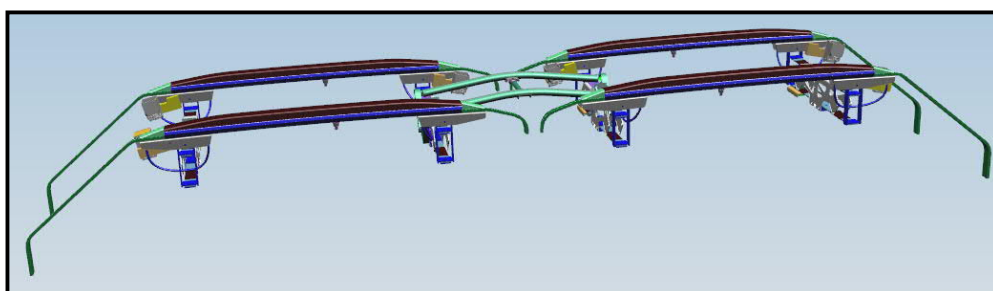
### 3.2.3.3 Kontaktsystem Wippen und Arme (PAN.4)

Eine wesentliche, systembestimmende Größe war die mechanische Andruckkraft, um auch für den Betrieb mit schweren Nutzfahrzeugen gemäß [67] sowohl einen dauerhaften, guten Kontakt als auch einen möglichst geringen mechanischen und elektrischen Verschleiß zu erreichen. Die Norm EN 50206-2 [68] gibt für schienengebundene Fahrzeuge Nominalkräfte mit zulässigen Abweichungen vor. Aufgrund des unterschiedlichen Fahrverhaltens, anderer Geschwindigkeitsprofile, der vertikalen Spurgenauigkeit durch Bodenwellen und Schlaglöcher, deutlich höherer seitlicher Spurtoleranzen und abweichender Fahrzeugdämpfung ist eine genaue Übertragung dieser Vorgaben jedoch nicht möglich.

Auf Basis der Untersuchungen bei den ersten beiden Generationen der eHighway-Pantographen [51] konnten aber Erkenntnisse für Stromabnehmer im eHighway-System gesammelt werden. Auf dieser Basis und entsprechend des überarbeiteten Gesamtkonzeptes des Stromabnehmers wurden die Wippen und die Armkonstruktion überarbeitet. Bei der Konstruktion der Funktionsmuster stand der Aufbau einer einfachen Pneumatikregelung und ein gewichtsreduzierter Wippenaufbau im Fokus. Dadurch konnten bereits Schwingungen reduziert, aerodynamische Einflüsse verringert und damit die Haltbarkeit der Schleifleisten verlängert werden. Abbildung 31 zeigt die überarbeitete Wippe.

Auf Basis der Erkenntnisse der Funktionsmustertests wurden in der nächsten Entwicklungsstufe weitere wesentliche Anforderungen umgesetzt. Hierzu zählten vor allem:

- Anpassung der seitlichen Auflaufhörner mit 40° Neigung aufgrund der sicherheitstechnischen Betrachtungen der PAN / OCL Schnittstelle [36]
- Reduzierung der gesamten Stromabnehmerbreite auf die maximal zulässige Fahrzeugbreite von 2,55 m inklusive Auflaufhörnern im angehobenen und abgesenkten Zustand
- Dämpfung des Anbügelverhaltens, um starke Schläge gegen die Oberleitung zu reduzieren und so Ausbrüche aus der Schleifleiste zu verhindern.
- Überarbeitung der Kopplung zwischen den Schleifleisten-Wippen, um ausreichend Freiheitsgrade für einen Höhenausgleich zu ermöglichen, aber dennoch die Vorgaben der Höhenbegrenzungen einzuhalten.
- Anpassung der Armkonstruktion entsprechend der Ergebnisse aus den Belastungsprüfungen der Funktionsmuster und den Vorgaben des Industriedesigns, um auch optisch den leichteren Aufbau zu übertragen.



**Abbildung 31: Überarbeitetes Wippendesign**

Die Untersuchungen der möglichen, elektrischen Übertragungsleistungen anhand der Testfahrten mit den Funktionsmustern und aus der Abstimmung der Leistungsanforderungen des Fahrzeugs zeigten, dass die Verwendung von je Pol zwei einzelnen Schleifleisten aus Kohle in jedem Wippenteil für die geplanten Einsatzfälle ausreichend ist. Für höhere Leistungsanforderungen besteht zukünftig beispielsweise die Möglichkeit, kupferimprägnierte Schleifstücke zu verwenden. Dies wurde auch für das Basisdesign erörtert, aber auch aufgrund des erwarteten, höheren Fahrdrabtverschleißes nicht weiterverfolgt.

Die Überarbeitung des Wippendesigns erfolgte immer in Abstimmung mit der Gesamtsystembetrachtung im Themenfeld SYS (vgl. Kap. 3.1) und hatte auch weitergehende Auswirkungen auf das Gesamtsystem, insbesondere bei der Optimierung der Schnittstellen zum Fahrleitungssystem.

In der Zusammenschau der Randbedingungen und Wechselwirkungen mit dem Fahrleitungssystem ergaben sich erhöhte Anforderungen an die seitlichen Auflaufhörner hinsichtlich deren Anstellwinkel und Länge. Die Kombination dieser Anforderungen mit der Breitenreduktion auf 2,55 m führte zu einer geringfügigen Reduzierung des Aktivbereichs des Stromabnehmers (Breite der Kohleschleifstücke) und weiterhin zu einer Verringerung des optimalen Fahrdrabtabstandes, vgl. Kap.3.1.5.

Ebenso wurden im Ergebnis der Sicherheitsbewertung erhöhte Anforderungen an den Lichtraum über und neben den beschliffenen Fahrdrähten abgeleitet (vgl. Abschnitt 3.3.23.3.2.3), die zu Anpassentwicklungen im Design der Fahrleitung und der damit direkt verbundenen Bauteile wie z. B. Klemmen führten, vgl. Abschnitt 3.3.2.3.

### 3.2.3.4 Sicherheitsorientiertes Sensorikkonzept (PAN.5)

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden alternative Technologien zur Fahrdrabtdetektion betrachtet. Als Alternative zu dem bis dahin verwendeten 2D-Lidar-Scannern wurde zusammen mit der Firma Qamcom ein Teststand für eine alternative Sensortechnologie aufgebaut. Der eingesetzte Festkörper-Puls-Doppler-Radardetektor konnte somit auf der Versuchsanlage in Groß Dölln im Hinblick auf verschiedene Witterungseinflüsse getestet werden. Hierbei zeigte sich allerdings, dass ähnlich wie bei dem Lidar-System noch einige Ergänzungen bzw. Datenfusionen notwendig wären, um insgesamt eine sichere Detektion zu ermöglichen.

Aufgrund der angepassten Systemarchitektur und der Verwendung des Spurhalteassistenten zur Bestimmung der lateralen Position ergab sich im Entwicklungsverlauf, dass eine sichere Fernbereichsdetektion des Fahrdrabtes aus Sicherheitsaspekten heraus nicht mehr notwendig ist. Der Fokus lag in der Folge damit auf der Nahbereichs-Sensorik und der richtigen Auslegung entsprechend der Anforderungen nach funktionaler Sicherheit.

Dies beinhaltete die Endlagensensoren an den Schleifleistenenden und die Überwachung der maximalen Arbeitshöhe und der maximalen Höhendifferenz zwischen den Wippen, die ein Absenken des Stromabnehmers veranlassen. Außerdem wurden eine innere Auflaufhorn-Detektion zur Erkennung eines Fahrdrabtes zwischen den Schleifleisten und eine Sensorik zur Erkennung der horizontalen Fahrdrablage auf der Schleifleiste neu entwickelt.

Weitere Sensoren zur Überwachung beschädigter Schleifleisten, gebrochener Auflaufhörner und der PAN-Ruhestellung wurden ebenfalls im elektrischen Design berücksichtigt und entsprechend der Sicherheitsanforderungen berechnet und ausgelegt.

Neben der funktionalen Auslegung und der Eignung auch für schwierige Umgebungsbedingungen (Temperatur, Vibration) wurden die Sensoren und die zugehörige Softwareansteuerung in das Sicherheitskonzept eingebunden und geprüft.

### 3.2.3.5 Steuerung und Safety-Controller für Sicherheitsanforderungen (PAN.6)

Wichtiger Bestandteil in der Weiterentwicklung des Stromabnehmers im Rahmen des Projektes ELANO war die Anpassung an die Anforderungen der Automobilindustrie und die Erhöhung der Zuverlässigkeit gegen Fehler oder Ausfälle. Zentrales Element war hierbei die Umstellung des Steuerungskonzeptes auf eine nach Automobilnorm zertifizierte Steuerungshardware (Controller).

Beim Aufbau der Funktionsmuster erfolgte zunächst eine Umstellung des Sensorikkonzeptes (s.o.). Bereits für Automotive-Anwendungen geeignete Sensoren wurden verwendet und an einen nach Automotive-Standards zertifizierten Controller (ECU) angeschlossen. Allerdings lief die eigentliche Steuerungssoftware in diesem 2. Iterationsschritt noch auf einem Industrierechner.

Um auch die Applikationssoftware des Pantographen in der nachfolgenden Iteration auf den Safety-Controller zu verlagern, mussten zunächst die HARA (Hazard Analysis and Risk Assessment) abgeschlossen und die daraus resultierenden „safety goals“ definiert werden. Entgegen der ursprünglichen Annahme mussten einige dieser „safety goals“ mit der Stufe ASIL-C anstelle ASIL-B bewertet werden. Daher war die bei den Funktionsmustern verwendete Steuerungseinheit ECU (electronic control unit) nach ASIL-B alleine nicht anwendbar.



Wichtiger Bestandteil des Arbeitspakets wurde somit die Suche, Auswahl und Anpassung eines geeigneten Safety-Controllers. Erst anschließend konnte die eigentliche Umstellung des Steuerungskonzeptes auf den neuen Controller erfolgen. Auf Basis einer intensiven Analyse wurden verschiedene Alternativen bewertet und gegenübergestellt. In mehreren Workshops wurden Einsatzbedingungen, FIT (Failure in Time)-Raten, Integrationsaufwände und zeitliche Verfügbarkeiten abgewogen. Die Entscheidung fiel auf die Verwendung des Typen TTC-580 der Firma TTTech.

**Abbildung 32: Automotive Safety-Controller TTC-580 der Firma TTTech**

Die Applikationssoftware des Pantographen wurde anschließend angelehnt an die Anforderungen der ISO26262 [15] erstellt. Hierzu gehörte auch die finale Einbindung der Sensorik inklusive Maßnahmen zur Ausfalloffenbarung (z.B. in Form regelmäßiger Selbsttests) oder z.B. die Auslegung der Abstraten entsprechend der Sicherheitsvorgaben.

Im Rahmen der Integration des Safety-Controllers von TTTech wurde die Abstimmung zur Verbesserung der FIT-Raten und der Pinbelegung vorangetrieben und ein gemeinsames Konzept umgesetzt. Die notwendigen Maßnahmen und Betrachtungen (z.B. eine separate Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)) zum Nachweis der ECU nach ASIL-C wurden zudem parallel durch TTTech durchgeführt. Die

Steuerungssoftware wurde in verschiedenen Releases entwickelt und entsprechend in Modul- und Gesamtsystemtests getestet, bevor sie zum Abschluss des Projektes als Version 7.5 bereitgestellt wurde.

### 3.2.3.6 Qualifizierung der Diagnosesysteme und der Servicekonzepte (PAN.7)

Bereits im vorherigen Projekt ENUBA 2 war es möglich, die anfallenden Betriebsdaten zwischenspeichern, um diese später per WLAN-Verbindung auf einen Server zu übertragen. Im Verlauf der verschiedenen Projekte und des damit einhergehenden weltweiten Einsatzes der Fahrzeuge wurde die Verfügbarkeit der Betriebsdaten immer wichtiger; sowohl Art und Menge der Daten als auch die Mittel zur Auswertung wurden stets weiterentwickelt.

Im Rahmen der Weiterentwicklung des PAN der dritten Generation wurden Datenerhebung, Zwischenspeicherung, Übermittlung und Auswertung umfangreich überarbeitet. Neben den Daten aller Sensoren und Aktoren wurden nun verschiedene Betriebsdaten des Fahrzeugs wie auch Lokalisierungsmerkmale kontinuierlich über Mobilfunk übermittelt. Die Übertragung über Mobilfunk erlaubte dabei eine direkte und standortunabhängige Bereitstellung der Daten, wobei Vorkehrungen für diverse Sonderfälle (z.B. plötzliche Abschaltung der Zündung, Funklöcher, Beschränkung des Datenvolumens) geschaffen werden mussten.

Die Bereitstellung der neu entwickelten Cloud-Plattform und die dortige Auswertung der Daten erfolgte entsprechend im Arbeitspaket TEB.5.2 (vgl. Kap. 3.5.3.1). Die übermittelten Daten waren zunächst vorrangig für die Nutzung durch die Entwickler vorgesehen. Die Analyse des Betriebsverhaltens ließ sich so deutlich vereinfachen und die Qualität und Geschwindigkeit der Aussagen erheblich verbessern. Auf Basis spezifischer Auswertungen (z.B. Darstellung der Isolationsüberwachung oder Absenkezeiten) können nun wichtige Informationen zum Betriebszustand und zu notwendigen Service-Maßnahmen abgeleitet werden.

Darüber hinaus wurden anhand des Stromabnehmer-Designs und anhand erster Überlegungen zur mittleren Betriebsdauer Vorgaben für Inspektions- und Wartungstätigkeiten und deren Intervalle erarbeitet sowie zu bevorratende Ersatzteile definiert und verfügbar gemacht wurden.

### 3.2.3.7 Einsatzumfeldangepasste Integration für Komponenten (PAN.8)

Im 3. Iterationszyklus wurde besonderer Wert daraufgelegt, alle elektronischen Komponenten des Pantographen in der Top-Box unter nur zwei getrennten Abdeckungen zu platzieren. Dies erhöht die Flexibilität zum Einbau des Pantographen auf verschiedenen Fahrzeugtypen, verlangte aber eine Überarbeitung der Hochvolt- und Niedervoltschränke zu einer platzsparenderen Anordnung.

Die Aufteilung und der Bauraum erlaubt die Nutzung der Stromabnehmer auf verschiedenen Fahrzeugtypen. Im Rahmen des Projektes ELANO erfolgte der praktische Aufbau zuerst auf einem Lkw mit feststehendem Ladeaufbau (Funktionsmuster am Actros #1). Das Design des Stromabnehmers richtete sich zudem an den Vorgaben für den Aufbau auf einer Sattelzugmaschine mit kippbarer Kabine, welches im Anschlussprojekt OL-Lkw (vgl. Abschnitt 4.1) anhand zweier Fahrzeuge realisiert wurde.

Als Teil der Integrationsplanung hat TruxaDesign nach Vorgaben von Siemens ein industrielles Design erstellt, welches Anforderungen wie Zugänglichkeit und Wartungsfreundlichkeit der Komponenten berücksichtigt.



**Abbildung 33: Stromabnehmer mit linker und rechter Elektronikbox und GFK Verkleidung**

Die Realisierung erfolgte durch eine am Hauptrahmen integrierte Metallkonstruktion, die die notwendige Stabilität sicherstellte, in Kombination mit Abdeckungen und Schwenktüren aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) zum Schutz gegen äußere Einflüsse, s. Abbildung 33. Die GFK-Abdeckung zeigte sich



im Kostenvergleich als beste Alternative gegenüber anderen Verfahren, wie z. B. Gießharzformen (Resin Transfer Moulding (RTM)) oder Aluminium-Stanzverfahren [69].

Das Bauraumkonzept für die Komponenten des Stromabnehmers wurde im Rahmen der Fertigung der Prüfmuster umgesetzt. Rückmeldungen aus der Fertigung zur Montagefreundlichkeit wurden in enger Abstimmung mit der Montage und den Lieferanten ins Design eingebracht und dieses anschließend durch verschiedene Tests (EMV, Vibration, Klima, Teststand) verifiziert.

### 3.2.3.8 Stromabnehmer für andere Nutzfahrzeugplattformen (PAN.9)

Parallel zur Entwicklung des neuen Stromabnehmer-Designs sind detaillierte Untersuchungen vorgenommen worden, für welche weiteren Anwendungsfälle und Fahrzeugtypen das Konzept außerdem genutzt werden kann.

Für die Anwendung auf Reise- und Stadtbussen sind die zu berücksichtigenden Anforderungen in einem separaten Lastenheft [70] zusammengestellt. Neben den geänderten Bauraum- und Gewichtsanforderungen für eine dachseitige Installation sind hier vor allem auch die zusätzlichen Leistungsanforderungen zu nennen, die sich aus Analysen verschiedener Busanwendungen und Abstimmungen mit führenden Herstellern für Busse ergaben.



**Abbildung 34: Visualisierung eines Stadtbusses mit eHighway-Stromabnehmer ©Truxa Design**

Für zwei beispielhafte Buslinien in Berlin und München wurden zudem erste system- und betriebstechnische Analysen erstellt, wie ein ausreichender Elektrifizierungsgrad erreicht werden kann, damit ein rein elektrischer Betrieb der Stadtbusse ermöglicht werden kann und welche Herausforderungen bei einer Umsetzung zu beachten sind ([71], [72]).

Auf Basis der erstellten Untersuchungen wurden insbesondere für die Anwendung der Technologie auf Bussen (Reisebussen) weitergehende Analysen zur Machbarkeit und Kombination mit anderen Technologien (z.B. Stillstandsladen) betrachtet, vgl. dazu auch Abschnitt 3.1.6.1.

### 3.2.3.9 Gewährleistung funktionaler Sicherheit nach ISO 26262 (PAN.10)

Entsprechend der Vorgaben der ISO 26262 [15] ist zunächst ein „Hazard Analysis and Risk Assessment“ (HARA) durchgeführt worden. Da eine solche Analyse nicht nur aus Komponentensicht, sondern unter Betrachtung des kompletten Fahrzeuges durchgeführt werden muss, wurde eine zusätzliche unabhängige Betrachtung vom Entwicklungspartner und Fahrzeughersteller Scania durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden HARA wurden anschließend mit Scania abgeglichen und auf Konsistenz geprüft.

Im Zuge der Entwicklungsarbeiten stellte sich heraus, dass die ursprüngliche Einstufung in ASIL-B, die zusammen mit externen Sachverständigen erarbeitet wurde, mit Blick auf das Gesamtfahrzeug nicht haltbar war. Vielmehr musste für eine Reihe von Funktionen ein höherer und in der Umsetzung und Nachweisführung anspruchsvollerer Level von ASIL-C Level zugeordnet werden.

Dies führte zu deutlich umfangreicheren Anforderungen und erforderlichen Maßnahmen im Rahmen des Re-Designs der Funktionsmuster. Auf dieser Basis wurde z. B. ein gesondertes Requirement-Engineering-Tool eingeführt (Polarion), welches die Vorgaben und die Anforderungen der ISO26262 erfüllt.



Auch die Bewertung und Auswahl des Safety Controllers mit ASIL-C Level war zentraler Bestandteil für die Erreichung der Vorgaben nach ISO 26262.

Pantographen für eHighways stellen in ihrer Anwendung eine technische Neuheit dar. Dementsprechend gibt es noch keine produktspezifische Normung. Die angekündigte Erweiterung des Anwendungsbereichs der ISO 26262 auf Nutzfahrzeuge verzögerte sich während der Projektlaufzeit mehrfach. Darüber hinaus ist die ISO 26262 formal nur für serienproduzierte Fahrzeuge anzuwenden. Dennoch wurde, soweit dies möglich und sinnvoll war, diesem zukünftigen Serienstandard in der Entwicklung entsprochen.

Im Rahmen des Projekts wurde daher ein spezifisches Konzept zur Gewährleistung der funktionalen Sicherheit erstellt und intern wie extern abgestimmt.

### 3.2.3.10 Elektrische Sicherheit und Schutzkonzept (PAN.11)

Zu Beginn der Entwicklungsarbeiten wurde ein elektrotechnisches Schutzkonzept auf Basis der Erkenntnisse vorheriger Forschungsprojekte erstellt, aus dem wichtige Anforderungen an den Stromabnehmer und das Fahrzeug abgeleitet wurden.

Das Schutzkonzept, s. dazu auch 3.4.2.3, beinhaltet z.B. die Definition von zwei Isolationsebenen mit getrennter Isolationsüberwachung. Durch die zwei Isolationsebenen werden drei verschiedene Spannungsebenen voneinander getrennt:

- Fahrzeugpotential
- Zwischenpotential
- Oberleitungspotential

Neben der Überwachung der Isolationsebenen war auch die Definition, welche Komponenten auf welchem Potential zu positionieren sind, ein wesentlicher Bestandteil des durchgängigen Schutzkonzeptes. Des Weiteren ist die Konstruktion des Stromabnehmers nach einem Fail-Safe-Design und der Vorgabe, dass ein Systemausfall in jedem Fall zu einem automatischen Abbügeln des Stromabnehmers von der Oberleitung führt, eine wichtige Schutzmaßnahme im Störfalle des Fahrzeugs.

Im Laufe der Entwicklung wurde das Schutzkonzept zusammen mit dem Fahrzeughersteller kontinuierlich detailliert und verbessert. Im Rahmen des Arbeitspaketes EFZ 2.1 (vgl. Kap. 3.4.2.1) wurden die elektrischen Wechselwirkungen zwischen Fahrzeugen und Oberleitung genauer betrachtet, welche in der detaillierten Auslegung berücksichtigt werden mussten. Zudem sind im Rahmen der Schnittstellenabstimmung zwischen Fahrzeug und Stromabnehmer die betrieblichen Situationen betrachtet worden, die ebenfalls im Schutzkonzept zu berücksichtigen waren.

Zu diesen betrieblich möglichen Situationen und Fahrzuständen gehören:

- Normale Fahrt
- Notabschaltung der Oberleitung während der Fahrt an der Oberleitung
- Anbügeln an eine geerdete Oberleitung
- Ausweichmanöver (Kontaktverlust einer Schleifleiste und Berührung der anderen mit dem falschen elektrischen Pol)
- Anbügeln an eine Oberleitung mit falscher Polarität
- Angebügelte Einfahrt aus einem unter Spannung stehenden in einen geerdeten OL-Abschnitt
- Kurzfristiger Kontaktverlust zwischen PAN und Oberleitung z.B. durch Schlaglöcher

Diese Vorgaben wurden in das elektrische Schutzkonzept eingearbeitet und es wurden entsprechende Vorkehrungen getroffen. Dadurch wurde z.B. eine Detaillierung des Überspannungsschutzes vorgenommen oder die Steuerung der Hauptschütze definiert. Zudem wurde die optionale Funktionseinheit als sogenannte „Grid Input Box“ (Übergabebox) definiert, die in der aktuellen Architektur funktionaler Teil des Stromabnehmers ist, aber zukünftig auch als Baugruppe des Hybridantriebs vom Fahrzeug vorgesehen werden kann. Die Grid Input Box übernimmt dabei die Funktionen der Einschaltstrombegrenzung, der Polaritätsmessung und einen Steuerungsteil zur Schaltung der Schütze.

### 3.2.3.11 Musterbau / Aufbau von Funktionsmustern (PAN.12)

In der ersten Entwicklungsphase wurden Versuchsaufbauten auf Komponenten- und Subsystemebene montiert und erprobt.

Eine vollständige Integration im Rahmen des kompletten Aufbaus von Stromabnehmern erfolgte erst beim Bau der Funktionsmuster. Im Sommer 2017 wurden hierzu vier Funktionsmuster im Prototypenbau in Berlin aufgebaut, s. Abbildung 35.

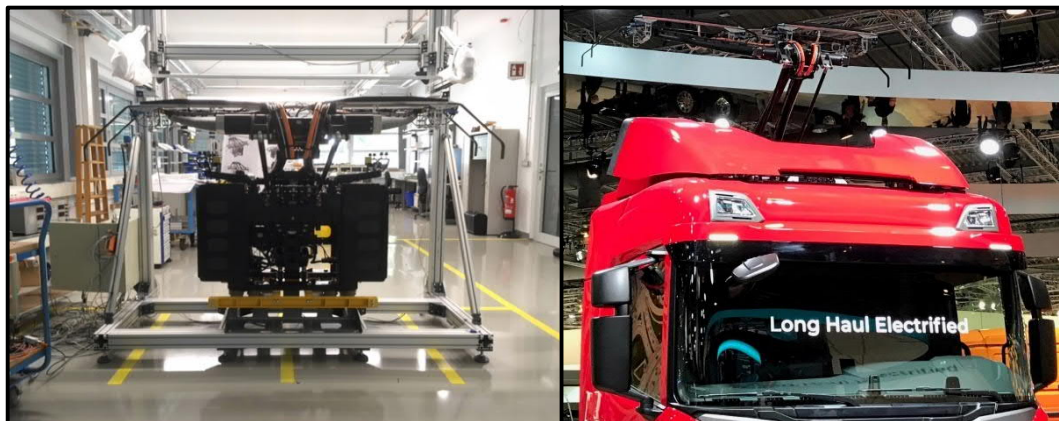
Die Komponentenbeschaffung, Anpassungen und Montage der Funktionsmuster erfolgte unter starker Einbindung der Entwicklung und noch ohne den Anspruch einer nachfolgenden Montage in Kleinserie. Neben dem Aufbau der eigentlichen Funktionsmuster wurden so Montierbarkeit und Abläufe geprüft und verbessert. Durch die enge Kooperation zwischen Entwicklung und den Monteuren in der Fertigung wurde sichergestellt, dass die Erkenntnisse aus der Montage direkt in das Re-Design des folgenden Entwicklungszyklus eingeflossen sind.



**Abbildung 35: Montage eines Funktionsmusters im Prototypenbau**

An Test und Re-Design der Funktionsmuster schloss sich der Fertigungshochlauf für die Prüfmuster und die Piloten im Rahmen nachfolgender Projekte zwischen April 2018 und August 2018 an. Im Rahmen dieses Hochlaufes erfolgte entsprechend auch die Verlagerung vom Prototypenbau zur Montage in Kleinserie, die zwar noch in Werkstatteinzelfertigung durchgeführt werden sollte, aber komplett durch die Fertigungs- und Qualitätsprozesse abgedeckt war. Hierzu gehörten zum Beispiel:

- Dokumentation des Stromabnehmerdesigns im Rahmen eines Technical Data Package inkl. Montage- und Prüfanweisungen
- Schaffung einer Montagefläche, Planung und Ausstattung der Arbeitsplätze für Vor- und Endmontage
- Aufbau der Material- und Komponentenlisten im Fertigungssteuerungs- / Data Warehouse System (SAP) für ca. 1500 Einzelpositionen (Komponenten und Arbeitsschritte)
- Einrichtung geeigneter Lagerplätze und -prozesse
- Lieferantensuche und -qualifikation, Angebotsanfragen und Bestellprozess der Einzelkomponenten (etwa 500 Bestellpositionen)
- Kontrolle und Nachführung der Liefertermine und Umsetzung einer Wareneingangskontrolle
- Aufbau eines Prüfstandes für die Fertigungsabschlussprüfung
- Design und Beschaffung geeigneter Montagerahmen und Transportgestelle
- Klärung der Transportverpackung und Vorgaben zum Transporthandling
- Schulung aller erforderlichen Mitarbeiter



**Abbildung 36: Endabnahmetest des ersten Piloten und Vorstellung auf der IAA Nutzfahrzeuge**

Der Fertigungsanlauf wurde am 24.8.2018 mit der Fertigstellung des ersten Stromabnehmers der Version 3 abgeschlossen. Dieser wurde an den Projektpartner Scania (Projekt OL-Lkw) ausgeliefert und im September 2018 auf der IAA Nutzfahrzeuge (vgl. Abbildung 36) ausgestellt. Bis November wurden im Rahmen des Projektes ELANO drei (3) Stromabnehmer gefertigt, die für diverse Tests (Teststand, Klima, Vibration, EMV) verwendet worden sind (vgl. Kap. 3.2.3.13).

Im weiteren Verlauf wurden weitere gewonnene Erkenntnisse aus der Fertigung und von Komponentenlieferanten in die technischen Unterlagen eingepflegt und so ein Stand geschaffen, der den Bau mehrerer Piloten im Rahmen der geplanten und in anderen Projekten realisierten eHighway-Feldversuche erlaubte.

### 3.2.3.12 Erprobung und Bewertung von Funktionsmustern (PAN.13)

Bereits in der Vorentwicklung zur Definition der Systemarchitektur waren physische und virtuelle Komponenten- und Teilsystemtests integraler Bestandteil des Entwicklungsprozesses.

Die im Frühjahr und Sommer 2017 gefertigten vier Funktionsmuster wurden dann im Wesentlichen durch erfahrungsbasierte Tests auf unterschiedliche Weise validiert.

Neben den Tests in externen Prüflaboren (Vibration, EMV, Klima), wie sie im Arbeitspaket PAN.14 (vgl. Kap. 3.2.3.13) beschrieben sind, stand in diesem Arbeitspaket der Systemtest auf dem Erprobungsträger Actros #1 in Groß Dölln im Vordergrund. Im Rahmen der Systemtests wurde bereits das Verhalten des Stromabnehmers auf dem Fahrzeug und die Einhaltung der Systemanforderungen soweit möglich geprüft.

Systematische Tests auf unterschiedlichen Verifikationsebenen, die sich an den Vorgaben der ISO 26262 orientierten, wurden dann im abschließenden 3. Entwicklungszyklus und nach Umsetzung der finalen Software- und Hardwarearchitektur durchgeführt.

Die Validierung und die Verifizierung gemäß V-Modell für den Pantographen erfolgten auf den entsprechenden vertikalen Ebenen:

1. Systemtests (u.a. auch Klimakammer-, EMV-, Vibrationstest)
2. Hardware in the loop (HiL)-Tests
3. Software in the loop (SiL)-Tests
4. Datenflussanalyse
5. Code Review
6. Model in the loop (MiL)-Tests

Um eine ausreichende Verifikation sicherzustellen, aber auch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Anwendung im Rahmen von Pilotfahrzeugen in Feldversuchen geplant war, wurde die Durchführung wie folgt umgesetzt.



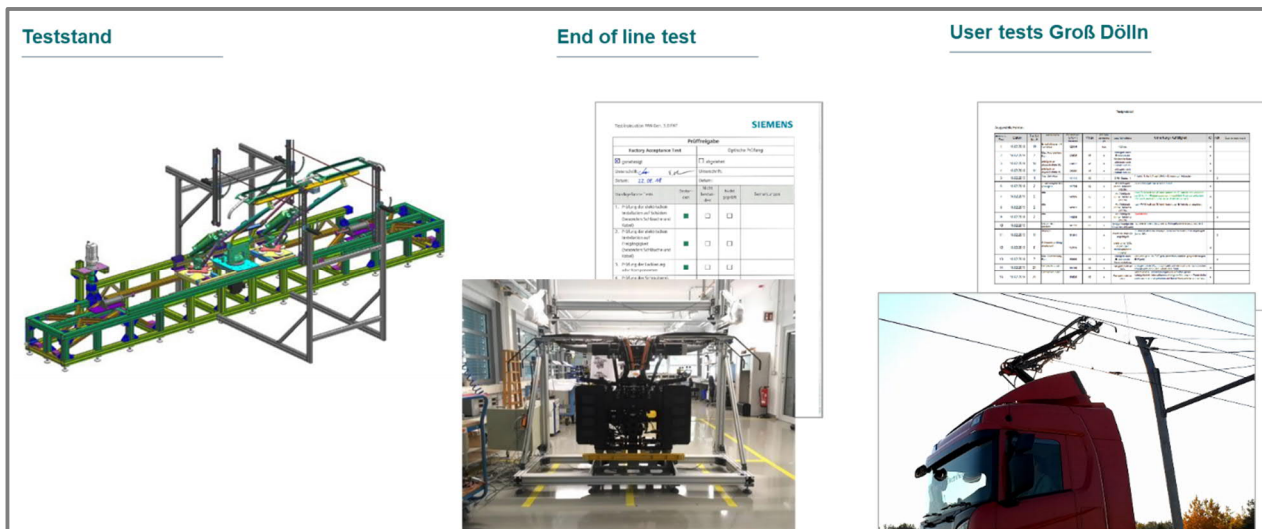
- Auf den Ebenen 1 und 2 (Systemtest und HiL Tests) erfolgte eine vollständige, erfahrungs- und teilweise anforderungsbasierte Verifizierung. Systemanforderungen (system requirements) wurden durch Tests verifiziert.
- Abhilfemaßnahmen zu den in Systemtests festgestellten technischen Mängeln der Hardware wurden umgesetzt und in das Technical Data Package (TDP) eingearbeitet. Die erneute Validierung der Mängelbehebung erfolgte durch Simulation.
- Auf der Ebene 3 wurden keine separaten SiL Tests durchgeführt. Die Korrektheit des aus dem Modell erzeugten Codes wurde durch den zertifizierten Codegenerator von Matlab abgesichert. Die Korrektheit des Compilats stützte sich auf die Verbreitung des Compilers für den TI Safety Controller und den sensitiven Safety-Kontext (Sicherheitsfunktionen) ab, in dem der Compiler im Regelfall bereits angewendet wird.
- Die beiden Verifikationen für Ebene 4 und 5 (Datenflussanalyse und Code Review) wurden vollständig durchgeführt. Beim Code-Review des Simulink-Modells wurde explizit auf die erfolgreiche Realisierung der System Requirements geachtet.
- Auf der Ebene 6 (MiL) wurde eine Reihe von Testfällen erstellt, welche anforderungsorientiert abgeleitet wurden. Diese Tests wurden für alle relevanten Testfälle der Softwarereleases durchgeführt. In Summe sind für alle Versionen 644 Testfälle durchgeführt wurden, wobei davon allein 341 auf die finale Software-Version entfielen.

**Testplattformen / Erprobungsträger für Funktions- und Systemtests**

Zur Durchführung der Funktions- und Systemtests wurden vor allem ein neu konstruierter Prüf-/Teststand in Berlin genutzt (vgl. Kap. 3.5.4.1) sowie die Möglichkeit praktischer Tests mit dem Erprobungsträger Actros #1 bzw. einem weiteren Versuchsfahrzeug El Camino, welches im Rahmen des Projektes OL-Lkw (vgl. Abschnitt 4.1) aufgebaut wurde.

Der stationäre Prüfstand für eHighway-Pantographen wurde verwendet, um das Verhalten des Pantographen mit seinem Interfacepartner, der Fahrleitung, zu untersuchen und diente der Validierung und Verifizierung. Der Prüfstand ermöglichte es, sowohl den Pantographen als auch die beiden Fahrdrähte jeweils unabhängig voneinander in verschiedenen Achsen zu bewegen. Das federnde Verhalten der Fahrdrähte wurde entsprechend nachgebildet. Die Antriebe aller Achsen ließen sich getrennt steuern und überwachen. Die Signale der Sensoren an der Schnittstelle zum Pantographen ließen sich aufzeichnen. Die wirkenden Kontaktkräfte und die Positionen der einzelnen Aktoren wurden erfasst und weitere Sensoren maßen dabei die Parameter der Druckluftversorgung [73].

Der Prüfstand erlaubte die Nachbildung des normalen Fahrens an Oberleitungen und des Verhaltens auf einer Spur neben dem eHighway. Damit waren auch Spurwechsel, wie sie bei Lkws üblich sind, sowie wiederholtes An- und Abdrachten untersuchbar. Abbildung 37 zeigt ein CAD-Modell des Prüfstands mit einem Pantographen.



**Abbildung 37: Übersicht über die verschiedenen Tests**

Auf Basis der Erkenntnisse des Prüfstandes wurde ein kleinerer Testaufbau definiert, der für die Einstellung und Abschlussprüfung (End of line Test) eines jeden Stromabnehmers nach erfolgter Montage genutzt wird. Hier konnte die Messung der Andruckkraft über den Arbeitsbereich des Pantographen erfolgen, aber auch in gewissem Umfang dynamische Prüfungen wie z.B. zu An- und Abbügelzeiten durchgeführt werden.

Die auf der eHighway Versuchsanlage in Groß Dölln absolvierten Probefahrten dienten als Anhaltspunkte zur Validierung der theoretischen, simulierten oder im Versuchsstand ermittelten Kennwerte.

Das Fahrverhalten eines eHighway-Fahrzeugs wird durch Trägheit und Wanken des Fahrzeuges, die Lenkpräzision des Fahrers (gegebenenfalls ergänzt durch Assistenzsysteme), Umweltsituationen und Fahrbahneigenschaften sowie auch durch Ausführung und Anordnung der Pantographen beeinflusst. So lässt sich auf einer Prüfstrecke praktisch testen, inwieweit die im Prüfstand nachgebildeten lateralen Fahrbewegungen inkl. der Übertragung auf den Pantographen den realistischen Gegebenheiten entsprechen.

### 3.2.3.13 Normative Vorgaben, Zulassung und Homologation (PAN.14)

Um die Entwicklung des Stromabnehmers zu beschleunigen, diese innerhalb von drei Entwicklungszyklen abschließen zu können und eventuelle Zulassungsprobleme zu minimieren, wurden bereits mit den Funktionsmustern erste Prüfungen durch externe Prüfstellen vorgenommen, s. dazu auch Abschnitt 3.5.4.

Die mechanische Festigkeit, die zuvor anhand von entsprechenden Mehrkörpersimulationen ausgelegt worden war, wurde in einem Vibrationstest in allen Achsen geprüft und so eine Lebensdauerbeanspruchung simuliert. Messungen sowohl zur elektromagnetischen Verträglichkeit und als auch zur Ausstrahlung wurden ebenfalls vorgenommen, um hier frühzeitig Anpassungen vornehmen zu können. In der Klimakammer wurde im Temperaturbereich von -40°C bis +80°C die Funktion getestet und es konnten Rückschlüsse auf Bauteile wie Lager, Antriebsseil, Drosseln und Dämpfer gezogen werden.

Vor der Freigabe des Stromabnehmerdesigns für die Verwendung in Feldversuchen wurden die finalen Prüfmuster erneut den Prüfungen unterzogen. Diese beinhalteten vor allem:

- Vibration nach DIN EN 60068-2-64 [74]
- Resonanzverhalten nach DIN EN 60068-2-6 [75]
- EMC nach ISO 10605:2008 [76]
- EMV nach UN – R10 [77]
- Klimatests von -25°C bis +40°C



**Abbildung 38: Prüfung der normativen Vorgaben bei Klimafestigkeit, EMV und Festigkeit**

Der Nachweis des Schutzes gegen Eindringen von Wasser und Schmutz erfolgte zudem auf Basis der Datenlage und der Konstruktionsunterlagen. Dies gilt ebenfalls für den Nachweis der Umweltverträglichkeit und -sicherheit (RoHS Richtlinie).

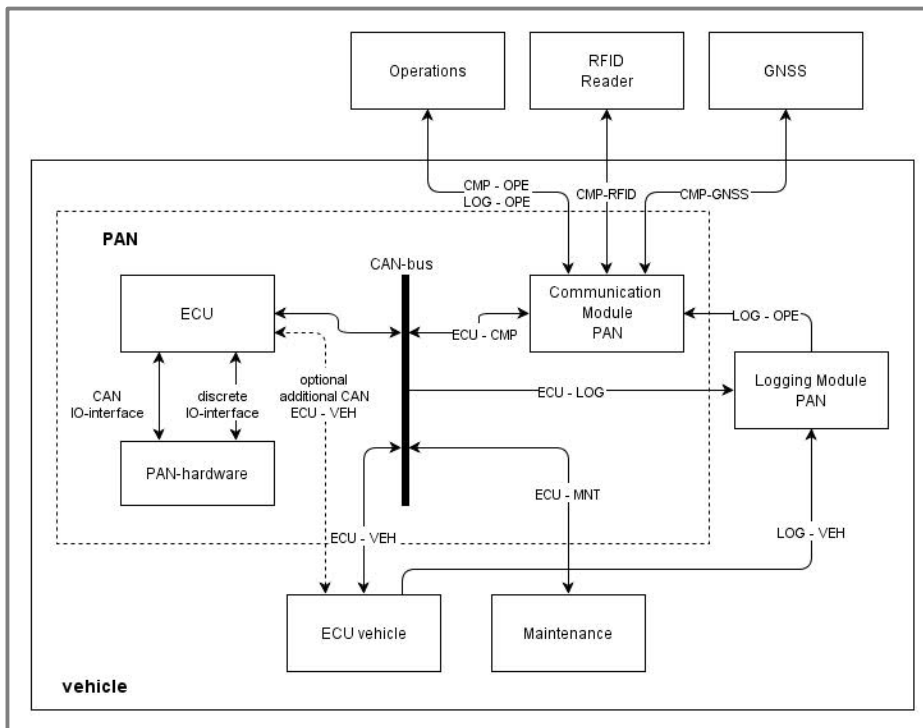


Durch die Anwendung der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG [61] wurden die angewandten Normen und Prüfungsnachweise im Zuge der Erstellung der EG-Einbauerklärung für unvollständige Maschinen [78] entsprechend nachgewiesen und dokumentiert.

### 3.2.3.14 Software-Sicherheit (PAN.15)

Im Rahmen der Entwicklungstätigkeiten wurde eine Risiko-Klassifizierung des eHighway-Systems und des Stromabnehmers nach den Siemens-Richtlinien für „Product and Solution Security (PSS)“ vorgenommen und eine darauf basierende Threat & Risk-Analysis (Bedrohungsanalyse) durchgeführt.

Das eHighway-System ist als neues Infrastruktur- und Verkehrssystem sehr gründlich zu betrachten, während der Stromabnehmer an den Standards und Sicherheitsvorkehrungen angelehnt werden kann, die im Automobilbereich gelten. Dies gilt insbesondere für die fahrzeugseitige Schnittstelle über den vorhandenen CAN-Bus, s. Abbildung 39.



**Abbildung 39: System- und Schnittstellenübersicht zur Betrachtung der Software-Sicherheit des Pantographen**

Zur Sicherstellung einer ausreichenden Software- und Datensicherheit wurden auf Basis der Bedrohungs- und Risikoanalyse (Threat & Risk analysis) geeignete Maßnahmen definiert und entwicklungsbegleitend umgesetzt.

Darüber hinaus wurden die entwickelten Software-Komponenten einem separaten Scan nach Open Source Software unterzogen und das Ergebnis mit dem Fahrzeughersteller abgeglichen, so dass auch lizenzrechtlich kein Zugriff, keine Verwendung oder Änderung der Software erfolgen kann.

## 3.2.4 Fazit

Im Rahmen des Projekts ELANO wurde für die dritte Generation der Pantographen die Verfügbarkeit eines Spurhaltesystems in den Fahrzeugen berücksichtigt. Spurhalteassistenten sind bereits in vielen Fahrzeugen vorhanden und entsprechende Verfahren werden im Hinblick auf eine erwartete, zunehmende Automatisierung der Fahrzeuge von den europäischen Herstellern stetig weiterentwickelt.



**Abbildung 40: Pantograph Generation 3**

Durch die Kombination dieser Funktion mit einer angepassten Wippengeometrie und einer geänderten Schnittstelle zur Oberleitung ließ sich die horizontale Bewegungsachse der Pantographen ersetzen und so der laterale Arbeitsraum auf die Fahrzeugbreite einschränken. Dadurch wurde es möglich, eine an die Bahnanwendung angelehnte Bauform für den Pantographen mit verschiedenen, ergänzenden Modifikationen zu nutzen.

Die wesentliche Abweichung gegenüber Konstruktionen, wie sie für Fern- und Straßenbahnanwendungen genutzt werden ist die zweipolige Ausführung. Diese erfordert einen Mechanismus zum Ausgleich der Kontaktkraft auf beiden Polen, sodass diese im gesamten horizontalen und vertikalen Arbeitsbereich des PAN annähernd konstant bleibt. Die Arme ließen sich kürzen, so dass der erforderliche Bauraum über der Fahrerkabine nochmals verkleinert werden konnte. Neben den mechanischen Änderungen wurden verschiedene Sensoren in den Pantographen integriert, die diverse Mess- und Sicherheitsfunktionen erfüllen.

Es kommt so unter Berücksichtigung der Armkinematik im gesamten vertikalen Arbeitsbereich des Pantographen zu einer annähernd gleichbleibenden Andruckkraft mit geringer Hysterese. Zum ersten Mal wird eine automobiltaugliche Steuerung anstelle der bisher verwendeten Industrie-PCs genutzt, um die Robustheit der Komponenten dem Einsatzzweck anzupassen und auch grundlegenden Anforderungen der funktionalen Sicherheit zu genügen.

Im Rahmen der Entwicklung erfolgten umfangreiche Analysen bezüglich der funktionalen Sicherheit. Daraus abgeleitet wurden zunächst die System- und die Softwarearchitektur und schließlich Baugruppen wie auch einzelne Komponenten angepasst. Auf der funktionalen Sicherheit des Systems lag ein besonderer Schwerpunkt der Entwicklung, da die eHighway-Fahrzeuge praktisch nie eine nur für sie geschaffene Umgebung befahren, sondern immer im Mischbetrieb im öffentlichen Straßenverkehr. Insbesondere die Kollisionsgefahr mit Teilen der Infrastruktur bei potenziellen Fehlfunktionen des Pantographen stand hierbei im Vordergrund. Die dritte Generation der Pantographen wurde in Anlehnung an die für Lkw inzwischen gültige ISO 26262 [15] entwickelt.

Alle Schnittstellen zum Fahrzeug wurden überarbeitet und im Zuge der Entwicklung vereinfacht, die Steuerungsschnittstelle basiert beispielsweise inzwischen ausschließlich auf dem für Straßenfahrzeuge typischen CAN-Bussystem.

Die aktuelle Generation der Pantographen wurde als Prototyp erneut in einer Klimakammer, auf Vibrationsprüfanlagen und in einem EMV-Labor untersucht sowie erstmalig umfangreicheren Model-in-the-loop, Hardware-in-the-loop und Systemprüfungen unterzogen. Zusätzlich wurden zahlreiche Untersuchungen auf der Prüfstrecke in Groß Dölln durchgeführt.

### 3.2.5 Ausblick und weitere Entwicklungen

Mit Abschluss des Projekts ist ein Stromabnehmer mit einer deutlich vereinfachten Architektur entstanden, der erfolgreich im eHighway-System erprobt und eingesetzt werden kann. Die Prozesse mit den zugehörigen Quality Gates und das erreichte Maß an Dokumentation, Qualität und funktionaler Sicherheit genügen den Anforderungen für erweiterte Feldversuche im Automobilumfeld.

Dies beinhaltet die Auswahl der Komponenten, die Möglichkeit zur Montage in Kleinserie und auch die nachgelagerten Wartungs- und Serviceprozesse.

Durch die geänderte Architektur wurden erste wesentliche Schritte bei Kosten- und Gewichtsoptimierung vorgenommen.

Dennoch basieren Lieferantenauswahl, Integrationstiefe und Prozessketten aufgrund der sehr geringen Stückzahlen immer noch eher auf Industrie- und Bahnstandards. Insbesondere eine Fertigung des Stromabnehmers in großer Stückzahl würde noch einmal Anpassungen zur Folge haben und auch erhebliches Optimierungs- und Synergiepotenzial mit sich bringen.

Zudem haben sich während der Projektumsetzung im Rahmen der internationalen Abstimmungen und Vorbereitungen zur Standardisierung und durch die vertiefenden Systemtests einige zusätzliche Erkenntnisse ergeben. Diese führten zu notwendigen Adaptionen am System, die in weiteren Entwicklungsstufen zu analysieren und berücksichtigen sind. Diese sind z.B.:

- Erweiterung des Arbeitsbereiches auf eine maximale Höhe von 5,80 m zur Sicherstellung der langfristigen Interoperabilität im internationalen Kontext
- Abschließende Definition der Zulassungsbedingungen und Definition der notwendigen Tests und Nachweise
- Kompatibilität des Stromabnehmers mit langfristig möglichen höheren Systemspannungen
- Erhöhung der Zuverlässigkeit für einen kontinuierlichen Einsatz in Großserie
- Automatisierung, Integration und weitere Kostenreduktion für die Fertigung in Großserie
- Alternative Oberleitungs- / Positionserkennung neben dem Spurhalteassistenten zur Vermeidung der Verfügbarkeitseinschränkungen z. B. bei schneebedeckten Straßen ohne sichtbare Fahrspuren oder Ausfall der Positionserkennung an den Schleifleisten

### 3.3 Innovationen bei Stromversorgung und Fahrleitung- TSV

#### 3.3.1 Systemoptimierung Stromversorgung und Fahrleitung (TSV.1)

##### Aufgabenstellung und Untersuchungsmethode

Die Untersuchungen im Teilsystem Traktionsstromversorgung (TSV) griffen im ersten Arbeitspaket zuerst die integrierte Systemauslegung und -optimierung hinsichtlich verschiedener Elektrifizierungsanteile (auch als Elektrifizierungsgrade bezeichnet) und speziell deren Auswirkung auf Anlagen der Bahnstromversorgung auf. Ausgangspunkt waren die Untersuchungen zu unterschiedlichen Speichergößen und deren Aufladbarkeit auf unterschiedlich langen elektrifizierten Netzabschnitten (vgl. Unterkapitel 3.1.1.1 und 3.4.1). Deren Auswirkung auf die Traktionsstromversorgung waren nun nicht mehr auf der Betrachtungsebene eines Einzelfahrzeugs, sondern im Kontext von elektrifizierten Lkw-Verkehren mit verschiedenen Fahrzeugfolgen (Verkehrsstärken) zu untersuchen.

Dazu wurde das Programm Sitras<sup>®</sup> Sidytrac zur Zugfahrtsimulation, Lastflussberechnung und elektrischen Systemauslegung für den Anwendungsfall elektrifizierte Autobahn angepasst und in diesem zwei verschiedene Streckenprofile stellvertretend für Mittelgebirge (190 km A3) und Flachland (95 km A1) hinterlegt. Die Fahrzeugmodelle mussten so angepasst werden, dass sie neben den Traktionsströmen auch das Nachladen der Traktionsbatterien abbilden, um entsprechend der drei Elektrifizierungsgrade 95 % (Vollelektrifizierung mit kurzen Unterbrechungen), 66 % (abwechselnd 14 km elektrifiziert und 6 km Lücke) und 50 % (abwechselnd 10 km elektrifiziert und 10 km Lücke) die nicht elektrifizierten Abschnitte und auch Anteile im Vor- und Nachlauf elektrisch angetrieben, aber ohne Oberleitungsverorgung fahren zu können [79].

In einer separaten Teilstudie wurde zusätzlich untersucht, welche Topologien grundsätzlich in Frage kommen, um vorteilhaft stationäre Ladeeinrichtungen für verschiedene Fahrzeugklassen in die zu errichtenden Unterwerke zu integrieren.

##### Ergebnisse und Bewertung der Systemauslegung

Die Systemanalyse und Lastflussberechnung führt zu zahlreichen Teilergebnissen in Form von Strom- und Spannungsverläufen über den Streckenverlauf oder die Simulationszeit. Diese Daten müssen in der Systemauslegung berücksichtigt werden, um die Komponenten nicht zu überlasten und den Nachweis der Funktionserfüllung der Gesamtanlage zu führen [79]. Die wichtigsten Informationen zur Beantwortung der Forschungsfrage stellt Tabelle 9 zusammen.

**Tabelle 9: Anzahl Unterwerke und installierte Gesamtleistung bei 10 s Fahrzeugfolge und unterschiedlichen Streckenprofilen und Elektrifizierungsgraden**

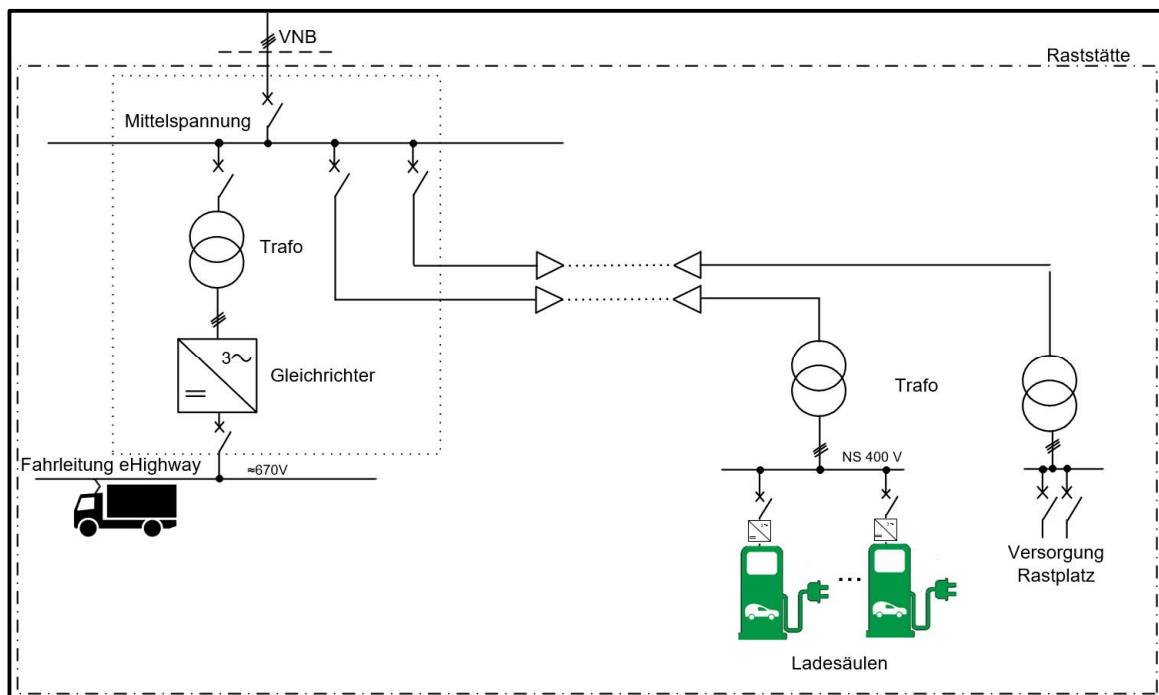
Strecke, Elektrifizierungsgrad	System DC-Nennspannung	Abstand UW in km	Anzahl UW (je 100 km)	Installierte Leistung in MVA (je 100 km)
BAB A1, 95 %	600 V	0,95	76	128,5
BAB A1, 66 %	600 V	0,95	65	137,6
BAB A1, 50 %	600 V	0,95	50	116,8
BAB A3, 95 %	600 V	0,95	77	129,7
BAB A3, 66 %	600 V	0,95	72	139,6
BAB A3, 50 %	600 V	0,95	52	125,6
BAB A1, 95 %	750 V	2,00	39	118,2
BAB A1, 66 %	750 V	1,50	43	130,7
BAB A1, 50 %	750 V	1,50	33	119,1
BAB A3, 95 %	750 V	2,00	43	128,5
BAB A3, 66 %	750 V	1,50	45	132,5
BAB A3, 50 %	750 V	1,50	37	115,2
BAB A1, 95 %	1 500 V	4,0	20	117,9
BAB A1, 66 %	1 500 V	3,0	24	127,6
BAB A1, 50 %	1 500 V	3,0	18	117,4
BAB A3, 95 %	1 500 V	4,0	22	126,8
BAB A3, 66 %	1 500 V	3,0	27	131,0
BAB A3, 50 %	1 500 V	3,0	19	113,8

Mit Blick auf Tabelle 9 und [79] lassen sich folgende Trends erkennen und Ableitungen treffen:

- Abgesehen von den prototypischen Anwendungen auf der Versuchsanlage und den Feldversuchsstrecken mit wenigen Fahrzeugen ist die Nennspannungsebene DC 600 V nur eingeschränkt empfehlenswert, da bei dichten Fahrzeugfolgen sehr viele Unterwerke benötigt werden.
- Für leistungsfähige Strecken mit Fahrzeugfolgen von 5 s oder 10 s bietet sich – ähnlich wie bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen die Spannungsebene DC 750 V oder ggf. eine noch höhere Spannung an (s. dazu ausführlich Unterkapitel 3.1.6.2).
- Hinsichtlich der insgesamt zu installierenden Leistung hat das Streckenprofil kaum Einfluss, da die elektrischen Lkw auch im Gebirge vorteilhaft Leistungsüberschüsse durch Rekuperation im Energiespeicher zwischenspeichern können und darüber hinaus auch ein Lastausgleich zwischen den Fahrrichtungen, also zwischen Gefälle und Steigung, stattfindet. Die insgesamt zu installierende Leistung liegt im 10-s-Takt unabhängig von der Nennspannung bei etwa 120 MW für 100 km (teil)elektrifizierte Strecke.
- Eine Halbierung der Fahrzeugfolgezeit auf 5 s führt zu etwa doppeltem Leistungsbedarf von 240 MW für 100 km Strecke.
- Bei Teilelektrifizierungen (66 % und 50 %) verdoppeln sich in den elektrifizierten Abschnitten die Ströme und Leistungen, die insgesamt zu installierende Leistung bleibt nahezu gleich.

### Vorzugslösung für gemeinsame Versorgung mit weiteren Ladesystemen

Die Errichtung von Unterwerken entlang von Autobahnen erfolgt u. a. auch an Raststätten und Parkplätzen mit WC-Anlagen. Daher wurde untersucht, inwieweit sich daraus Synergiepotenziale zur Nutzung der Netzanschlüsse und ggf. weiterer Unterwerkskomponenten ergeben. Abbildung 41 zeigt dazu die bevorzugte Konfiguration, in der lediglich der Netzanschluss auf Mittelspannungsebene gemeinsam von eHighway, Raststätte und weiteren Ladesäulen genutzt wird.



**Abbildung 41: Gemeinsamer Netzanschluss von Unterwerk und Rasthof [80]**

Die gemeinsame Nutzung des Unterwerkstransformators ist überwiegend nicht möglich, da die Leitungslängen zwischen Transformator und den Ladesäulen bzw. den weiteren Verbrauchern des Rasthofes sehr kurz sein müssen. Dies steht der wahrscheinlichen Anordnung der Unterwerke am Rand der Raststätten mit dann unzumutbar langen Laufwegen zwischen den Pkw-Ladesäulen und dem Rasthaus in vielen Fällen entgegen. Auch die Leistungen der auf viele ePkw auszulegenden Nachladestationen an Raststätten werden die typischen eHighway-Unterwerksleistungen von 2 - 4 MW deutlich über-



steigen, sodass die Synergiepotenziale in gemeinsamer Planung und Projektierung, nicht jedoch in gemeinsamer Komponentennutzung zu suchen sind.

### 3.3.2 Systemoptimierung Fahrleitungskonstruktionen (TSV.2)

#### 3.3.2.1 Optimierung des horizontalen und vertikalen Arbeitsbereichs der Fahrleitung (TSV.2.1 / TSV.2.2)

##### Aufgabenstellung

Bereits in vorhergehenden Forschungsprojekten wurde für den eHighway ein Oberleitungssystem verwendet mit einer Anordnung der Fahrdrähte ohne Zick-Zack symmetrisch zur Fahrbahnmitte. In Kurven wurde über eine windschiefe Abspannung ein bogenförmiger Verlauf des Fahrdrahtes ermöglicht, s. Abbildung 8.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollte die Ausgestaltung des eHighway-Oberleitungssystems im Zusammenspiel mit dem neuen Stromabnehmer der dritten Generation analysiert und verbessert werden. Dabei teilte sich die Aufgabenstellung in:

- Optimierung des horizontalen Arbeitsbereichs durch Entwicklung von Spezialbauteilen und Sonderkonstruktionen für windschiefe Fahrleitungen, um auch in Kurven ohne konstruktive Zwangspunkte optimierte Projektierungen zu ermöglichen. (TSV.2.1).
- Optimierung des vertikalen Arbeitsbereichs durch Variation von Systemparametern, wie z. B. Systemhöhe, Zugkräften, Mastabständen und Leitermaterialien. (TSV.2.2).

##### Vorgehensweise / Ergebnisse

Im Rahmen des Arbeitspaketes „Optimierung der Schnittstelle Fahrleitung – Stromabnehmer (SYS.5)“ (vgl. Kap.3.1.5) wurde zunächst die Schnittstelle zwischen Stromabnehmer und Fahrleitung analysiert und insbesondere im Hinblick auf funktionsrelevante sowie sicherheitskritische Vorgänge und Parameter die einzuhaltenden Rahmenbedingungen für den Stromabnehmer und auch für das Oberleitungssystem definiert [36].

Diese Rahmenbedingungen definierten die einzuhaltenden Parameter, auf deren Basis eine Umsetzung und Optimierung der Oberleitungsanlage erfolgte. Die Rahmenbedingungen beinhalteten bereits aus vorherigen Projekten bekannte, allgemeine Parameter, wie z.B.:

- 2-poliges Kettenwerk mit windschiefer Abspannung in Kurven
- Auslegungsgeschwindigkeit von 100 km/h

Durch die Detailabstimmung und Optimierung auf Gesamtsystemebene ergaben sich jedoch geänderte oder neue Anforderungen, die im Schienenverkehr z. T. keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielen. Hier sind beispielhaft zu nennen:

- Nomineller Fahrdrahtabstand von 1,15 m
- Maximaler Fahrdrahtanhub von 100 mm im Normalbetrieb und 150 mm im Störungsbetrieb (einseitiger Fahrdrahtanhub mit bis zu 250 N)
- Maximale horizontale Fahrdrahttoleranz von 250 mm (Bau- und Betriebstoleranz) und max. 156 mm zueinander
- Einzuhaltender Lichtraum von 250 mm über dem Fahrdraht bei einem Anstellwinkel von  $\geq 49^\circ$
- Minimale Fahrdrathöhe von 4,7 m und maximale Höhe (inkl. Anhub) von 5,40 m

Eine ausführliche Definition der Anforderungen an die Oberleitung, abgeleitet aus der Schnittstellenabstimmung erfolgte in [37].

Zur Einhaltung der Anforderungen und der Optimierung des Oberleitungssystems in Richtung einer kosteneffizienten Bauweise mit möglichst großen Längsspannweiten, d. h. Mastabständen, wurde ein Optimum aus den verschiedenen Parametern gesucht, welche die Fahrdrathöhe in einem solchen System bestimmen.

Die zu berücksichtigenden Parameter sind:

- a. Zugkräfte im Fahrdraht und Tragseil
- b. Vertikale und horizontale Abstände zwischen Fahrdraht und Tragseil
- c. Spannweite (zu *optimierende Größe*)
- d. Systemhöhe
- e. Anhub des Fahrdrahtes durch den Pantographen
- f. Fahrdrahtabnutzung
- g. Wind als Verformung der Tragkonstruktionen und als Leiterabtrieb
- h. Eisbelag / Eisbehang
- i. Fahrbahnquerneigung
- j. Fahrbahnlängsneigung
- k. Ruhelagetoleranz in Fahrbahnübergangsbögen
- l. Montagetoleranz
- m. Messtoleranz
- n. Temperaturänderung als Auslegerdrehung
- o. Zugkraftänderung durch Wirkungsgrade der Nachspanneinrichtungen, Rückstellkräfte der Ausleger und Reibungskräfte der Ausleger
- p. Fahrdrahtbewegung nach unten aus der statischen Ruhelage durch die Schwingungsanregung bei einer Durchfahrt des Pantographen

In verschiedenen Berechnungsreihen [81] wurden die Parameter zunächst für Standardfelder auf gerader Strecke angepasst und anschließend für verschiedene Kurvenradien variiert.

Parallel wurden einige Parameter und Berechnungsergebnisse durch praktische Versuche verifiziert (z.B. Windabtrieb – vgl. Abbildung 42 und Abschnitt 3.5.3.3, Schneeansammlung, Reibungskräfte).



**Abbildung 42: Windabtriebsmessung - Messprisma (links) / Tachymeter (rechts)**

Da die Einhaltung der Vorgaben insbesondere in Kurven und speziell in Kurvenübergängen zu kürzeren Mastabständen führte, wurde auf Basis der ermittelten Systemparameter ein Grenzkurvenradius berechnet, der ohne weitreichende Systemanpassungen realisiert werden kann.

### **Ergebnisse**

Das aktuelle Oberleitungssystem kann durch optimierte Parameteranpassungen auf gerader Strecke mit Mastabständen von über 55 m projektiert werden und ist bei Mastabständen von ca. 40 m für Kurvenradien bis 1300 m gut geeignet.

Für engere Radien, die aber auf den von Lkw stark befahrenen und damit für Elektrifizierung prädestinierten Autobahnen nur selten vorkommen, sind je nach Radius unterschiedlich aufwendige, teilweise neu zu entwickelnde und projektierende Kettenwerke erforderlich.

Für sehr kurvenreiche Streckenabschnitte sind zudem windschiefe Parallelfelder notwendig. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass dies weitere Änderungen erfordert. Nach aktuellem Stand sind dafür

Änderungen in der Leiterführung, zusätzliche Bauteile (bogenförmige Hänger und Hängerklemme) und der Einsatz von 3-feldrigen statt 5-feldrigen Überlappungen für das mastnahe Kettenwerk erforderlich.

Auch aus Sicht der Oberleitungsprojektierung empfiehlt sich die Elektrifizierung stark befahrener, leistungsfähiger Autobahnen der Entwurfsklassen EKA 1 A und EKA 1 B, die in Deutschland regelmäßig mit Radien über 1000 m projektiert werden [3].

### 3.3.2.2 Streckentrenner für hohe Fahrzeugdichten (TSV.2.3 / TSV.2.4)

#### Aufgabenstellung

Streckentrenner dienen der Unterteilung der Oberleitung in einzelne elektrische Schaltabschnitte und sind befahrbare Isolatoren. Bei der Befahrung eines Streckentrenners kommt es häufig zu Lichtbogenbildung und zu Kontaktkraftspitzen und somit zu erhöhtem Verschleiß an dieser Komponente. Dieser ist proportional zur Anzahl der Stromabnehmerdurchgänge, sodass bei den langfristig im eHighway zu erwartenden Fahrzeugdichten bisher verfügbare Streckentrenner eine zu geringe Lebensdauer für den eHighway-Anwendungsfall aufweisen würden.

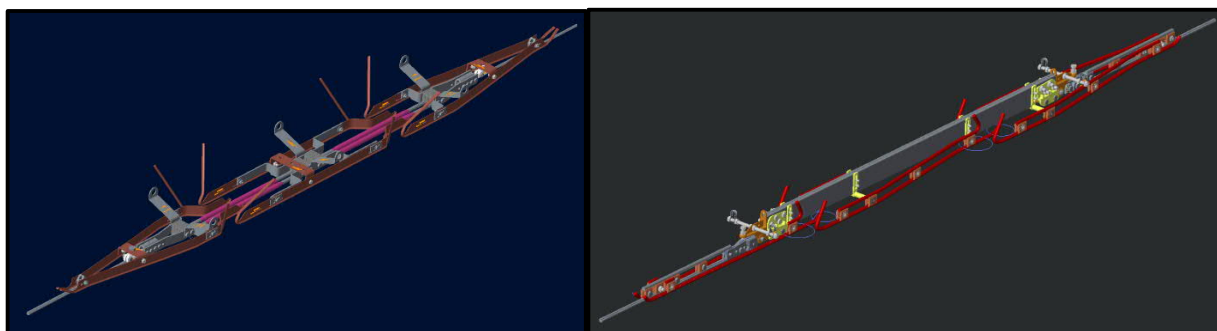
Folglich sollte ein Streckentrenner entwickelt werden, der für sehr hohe Fahrzeugdichten ausgelegt ist und dabei die besonderen Anforderungen des eHighway-Systems, wie etwa den freizuhaltenden Lichtraum des Stromabnehmers (vgl. Kap. 3.1.5) oder das Schutzkonzept berücksichtigt. Im eHighway-Schutzkonzept sind Streckentrennungen mit zwei Trennstellen und einer dazwischen befindlichen, neutral schaltbaren Schutzstrecke vorgesehen. Da hierfür bisher zwei Streckentrenner im Abstand einiger Meter hintereinander eingebaut sind, war zu prüfen, ob dies zukünftig in einem Bauteil realisierbar ist.

#### Vorgehensweise / Ergebnisse

Ausgangspunkt stellte eine detaillierte Analyse der Anforderungen unter Berücksichtigung folgender eHighway-Systemspezifika dar:

- hohe Fahrzeugfolgezahlen, z.B. die in Abschnitt 3.3.1 untersuchten Fahrzeugfolgen von minimal 10 s bzw. 5 s
- mögliche Integration des neutralen Abschnitts in eine Komponente mit zwei Trennstellen
- Aufhängung im Tragseil bei nicht lotrechtem Kettenwerk
- erhöhte Umweltaforderungen durch Salznebel
- Spezifika des Stromabnehmers der Generation 3 hinsichtlich geringerer Baubreite und seitlicher Befahrbarkeit (vgl. Kap. 3.2)

Die Entwicklungsanforderungen wurden in einem Lasten-/Pflichtenheft gebündelt.

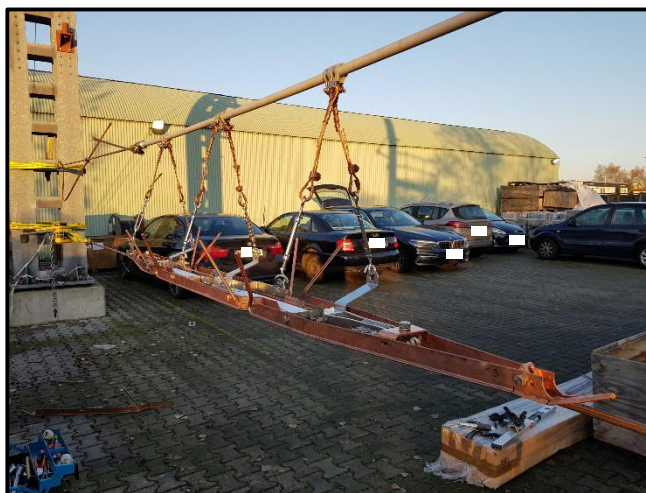


**Abbildung 43: Biegsame Isolatoren in Fahrdrabenebene (links) und biegesteife Isolatoren oberhalb der Fahrdrabenebene (rechts)**

Die Analyse der elektrischen Vorgänge bei der Befahrung bisheriger Streckentrenner ergab, dass die Integration des neutralen Abschnitts in den Streckentrenner unter Einhaltung der maximalen Baulänge von 3,00 m möglich ist. In der folgenden Konzeptfindungsphase wurden dafür mögliche Designansätze

skizziert und bewertet. Sie unterscheiden sich durch die Art der Isolatoren, die geometrische Gestaltung der Kufen und den Kufenwerkstoff zur Verschleißminimierung.

Im Vergleich erwiesen sich dünne, biegsame Isolatoren in der Fahrdrabtebene vorteilhaft gegenüber biegesteifen Isolatoren, die oberhalb der Fahrdrabtebene angeordnet sind. Zur Minimierung des mechanischen Kufenverschleißes wurde auf einen gleichmäßigen Übergang zwischen den Kufen und dem Fahrdraht besonderer Wert gelegt. Durch Lichtbogenversuche an unterschiedlichen Kufenwerkstoffen in einem elektrischen Prüfinstitut konnte nachgewiesen werden, dass der Abbrand (elektrischer Verschleiß durch Lichtbögen) bei Verwendung eines speziellen Kupfer-Komposit-Werkstoffs gegenüber herkömmlichem Kupfer oder Kupferlegierungen signifikant verringert werden kann.



**Abbildung 44: Probeinstallation im Versuchsaufbau**

Da dieser Werkstoff deutlich härter als gewöhnliches Kupfer ist, wird auch der mechanische Verschleiß weiter minimiert. Für diese Vorzugslösung wurde die Detailkonstruktion unter Berücksichtigung besonderer Anforderungen an Montagefreundlichkeit, Instandhaltbarkeit und Herstellungskosten abgeschlossen und die Fertigung von Erstmustern angestoßen. Die mechanische Typprüfung sowie eine Probeinstallation in einem Versuchsaufbau verliefen erfolgreich.

Im Rahmen der elektrischen Typprüfung musste festgestellt werden, dass Lichtbögen in der Trennstrecke nicht immer zuverlässig gelöscht werden können. Die Kufengeometrie führte nicht in allen Fällen dazu, dass der Lichtbogen in die Lichtbogenhörner wandert, wo er gelöscht werden kann. Da dies eine Hauptanforderung der Typprüfung darstellt und für eine sichere Anwendung mit langer Lebensdauer zwingend erforderlich ist, muss eine Überarbeitung und erneute Prüfung der Kufengeometrie erfolgen. Aufgrund restriktiver Anforderungen an Baubreite- und -länge sowie seitliche Befahrbarkeit kann dies Rückwirkungen auf das gesamte Design haben. Die unmittelbar nach der elektrischen Typprüfung geplante Installation und Pilotierung auf dem Versuchsgelände Groß Dölln wurde daher zurückgestellt.

### **Fazit**

Streckentrenner sind als befahrbare Isolatoren erhöhtem Verschleiß ausgesetzt. Um auch bei hohen Fahrzeugfolgezahlen eine akzeptable Lebensdauer zu erreichen, wurde ein Streckentrenner mit optimierter Befahrgüte und verschleißresistenten Werkstoffen entwickelt. Die Integration von zwei Trennstellen mit schaltbarer neutraler Sektion in einen statt wie bisher zwei Streckentrenner senkt darüber hinaus die Materialkosten und den Instandhaltungsbedarf. Während die an den Erstmustern durchgeführte mechanische Typprüfung und eine Probeinstallation in einem Versuchsaufbau positiv verliefen, offenbarte die elektrische Typprüfung Schwachstellen in der Geometrie der Kufen, die Änderungen erfordern.

Siemens Mobility wird die Entwicklung des Streckentrenners fortsetzen und die zum erfolgreichen Abschluss der Entwicklung notwendigen Wiederholungs- und Restarbeiten nach Projektende erbringen.

### **3.3.2.3 Neuentwicklung von Fahrleitungsklemmen (TSV.2.5)**

#### **Aufgabenstellung**

Als integrierter Bestandteil der Weiterentwicklung des Stromabnehmersystems (vgl. Kap. 3.2) erfolgte eine detaillierte Untersuchung der Schnittstelle zum Fahrleitungssystem hinsichtlich möglicher Fehlfunktionen und Risiken, und zwar im Rahmen einer FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse.

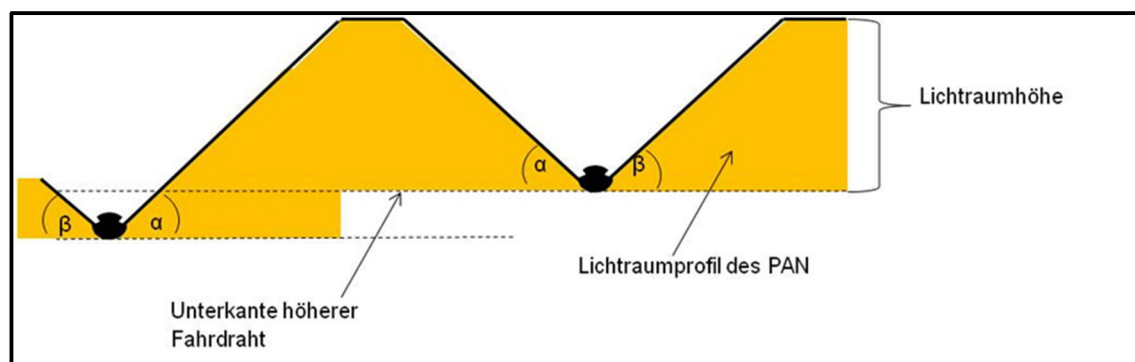
Dabei war insbesondere zu berücksichtigen, dass die Spurführung des weiterentwickelten Stromabnehmers der 3. Generation (kurz PAN 3rdGen) über den integrierten, aktiven Spurhalteassistenten des Lkw



erfolgt. Liegen Fahrdrabt und Schleifleisten des Stromabnehmers trotz aller Regeleinriffe des Spurhalteassistenten (z. B. durch Übersteuern des Fahrers) nicht mehr in einem zulässigen, gemeinsamen Arbeitsbereich, erkennen Sensoren in der Randzone des Stromabnehmers (NBS – Nahbereichssensorik) ein Abgleiten des Fahrdrabtes. Der Stromabnehmer wird dann durch einen Absenkbefehl gesenkt. Aufgrund der dynamischen Eigenschaften des Oberleitungssystems in Verbindung mit verschiedenen Verarbeitungsprozess- und Reaktionszeiten des PAN-Systems ist es dabei möglich, dass der Fahrdrabt noch während des Absenkvorganges bei gleichzeitiger seitlicher Bewegung des Fahrzeugs die Schleifleisten nur seitlich abgleitend verlässt. Dabei kann sich die nun entlastete Wippe kurzzeitig geringfügig heben, während der ebenfalls entlastete Fahrdrabt absinkt. Erst nach einer Verzögerung beginnt die tatsächliche Absenkung des Stromabnehmers. Dieses Verhalten wurde in Laborversuchen mit einem ersten Funktionsmuster des PAN 3rdGen unter verschiedenen fahrdynamischen Grenzsituationen, einschließlich abrupten seitlichen Ausweichmanövern, nachgestellt, um sehr früh sicherheitsrelevantes Systemverhalten in Extremsituationen nachzustellen und Entwicklungsanforderungen abzuleiten [73].

Für diese extrem seltenen, aber nicht auszuschließenden Fälle verfügt der eHighway-Stromabnehmer, ähnlich den Bahnstromabnehmern, über Auflaufhörner links und rechts sowie unterschiedliche Polarität zwischen den beiden Wippen, auf denen der Fahrdrabt mechanisch geführt werden kann.

Jedes Auflaufhorn ist mit einem Winkel von  $40^\circ$  ausgebildet, damit der Fahrdrabt bei seitlichem Druck nach oben abgleitet und nicht horizontal geschoben wird. Zusammen mit möglichen Lagetoleranzen der Fahrbahn, seitlichen Neigungen des Lkw usw. ergibt sich ein möglicher Winkel des Horns gegenüber der Horizontalen von  $49^\circ$ . Dieser Winkel ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) muss bis zu einer definierten Lichtraumhöhe eingehalten werden (vgl. Abbildung 45), um eine mögliche Kollision zwischen Auflaufhörnern und Fahrleitungskomponenten (wie z. B. Klemmen, Seitenhalter) zu vermeiden.



**Abbildung 45: Schematische Darstellung des freizuhaltenen Lichtraums**

Die Aufgabenstellung war neuartig und von Bahnanwendungen in der Art nicht bekannt, da dort hinsichtlich dieser Konfliktstellen zwischen Auflaufhorn und Klemmen folgendes gilt:

- Ungeplante starke seitliche Fahrzeugbewegungen treten in Bahnanwendungen nicht auf.
- Kritische Stellen, z. B. an Weichen und Kreuzungen, sind bekannt und können durch zuvor definierte „klemmenfreie Räume“ von potenziellen Konfliktstellen freigehalten werden [82].
- In den verbleibenden, extrem seltenen Fällen, z. B. in Feldmitte zwischen zwei Fahrleitungsmasten bei extrem starkem und rechtwinklig angreifendem Wind, können einzelne Kollisionen zwischen Klemmen und Auflaufhörnern toleriert werden.

Aufbauend auf den Laborergebnissen zu Extremsituationen und zusammen mit den erhöhten Anforderungen an die Sicherheitsbewertung und Nachweisführung nach ISO 26262 [15] wurde in einem abteilungsübergreifenden Expertenworkshop die Definition des Lichtraumprofils um die Anforderung ergänzt, dass der seitliche Raum um den Kontaktpunkt Fahrdrabt-Schleifleiste im Winkel gemäß Abbildung 45 freizuhalten ist. Ähnliche bzw. sogar noch höhere Anforderungen an den Lichtraum um die Fahrdrabtklemmen sind nur von Oberleitungsbussen bekannt, bei denen der Stromabnehmerschuh den Fahrdrabt beidseitig und von unten umschließt.

Damit sind die bisher in der Bahntechnik überwiegend verwendeten Klemmen und Seitenhalter für diese Anforderung nicht ausgelegt und würden den Lichtraum verletzen. Folglich mussten für alle potenziellen



Konfliktstellen neue Lösungen gefunden werden, die diese erhöhten Lichtraumanforderungen erfüllen.

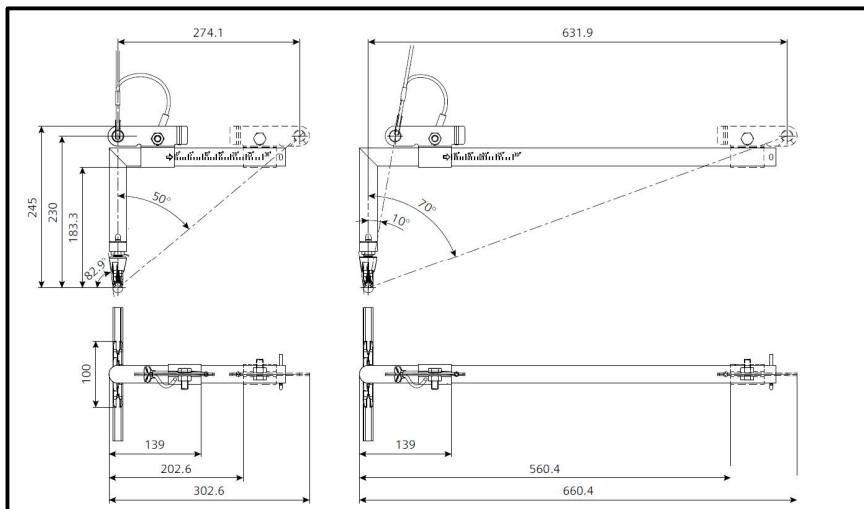
### Vorgehensweise / Ergebnisse

Zunächst mussten alle am Fahrdrabt befindlichen Bauteile der eHighway-Fahrleitung hinsichtlich Kollisionsfreiheit mit dem oben beschriebenen Lichtraum untersucht werden. Hierbei mussten zusätzlich die Toleranzen aus der Oberleitung (z.B. teilweise Verdrehung des Fahrdrabtes) berücksichtigt werden. Je nach Bauteil bzw. Fahrleitungsklemme ergab sich so ein freizuhaltender Winkel zwischen  $64^\circ$  und  $69^\circ$ . Anschließend erfolgte die Kategorisierung nichtlichtraumkonformer Bauteile hinsichtlich Anzahl je Streckenkilometer. Bei häufig auftretenden Bauteilen (Kategorie 1) wurde eine Neuentwicklung zur Einhaltung des Lichtraums angestoßen, für seltener auftretende Bauteile (Kategorie 2) eine Ergänzungsbaugruppe mit Abweiserfunktion konstruiert.

Bauteile der Kategorie 1 umfassen Seitenhalter, Hängerklemmen für lotrechtes und windschiefes Kettenwerk sowie Gleitklemmen bei geringem Abstand zwischen Fahrdrabt und Tragseil. Für alle Bauteile wurden geeignete Konstruktionen entworfen, die neben den mechanischen Anforderungen auch elektrische und Verschleißanforderungen im Kontext der eHighway-Systemlandschaft erfüllen und den besonderen Anforderungen des Korrosionsschutzes im Autobahnbereich entsprechen.

Für Bauteile der Kategorie 2 wurde simulationsbasiert eine geometrische Form bestimmt und umgesetzt, die Anprallvorgänge durch Stromabnehmer sowohl für Fahrleitung als auch für Stromabnehmer beschädigungsfrei ermöglicht. Dabei wurde ein besonderes Augenmerk auf die Unabhängigkeit der Abweiserbaugruppe vom zu schützenden Bauteil gelegt, um im Instandhaltungs- und Beschädigungsfall einen einfachen, modularen Austausch zu ermöglichen, ohne das zu schützende Bauteil demontieren zu müssen.

Alle Bauteile wurden bemustert, auf die mechanischen und elektrischen Belastungen geprüft und anschließend auf der Teststrecke in Groß Dölln für Praxistests installiert, s. Abbildung 8 und Abbildung 46.



**Abbildung 46: Neu entwickelte Hängerklemmen für das windschiefe Kettenwerk**

### Fazit

Die besonderen Bedingungen des eHighway und die nur mittelbare Spurführung der Fahrzeuge erfordern ein spezielles Lichtraumprofil, welches auch in der Höhe über den Fahrdrabt hinaus geht. Dadurch ergeben sich notwendige Änderungen und Anpassungen an Bauteilen von klassischen Oberleitungsanlagen der Bahntechnik.

Im Rahmen der Tätigkeiten dieses Arbeitspaketes konnten die komplexen Bewegungsabläufe analysiert, geeignete Lösungen entwickelt und die Wirksamkeit dieser Maßnahmen nachgewiesen werden.

Zusätzlich wurden Handlungsfelder identifiziert, in denen weitere Anpassungen notwendig werden, sofern bei der Projektierung von Oberleitungsstrecken gesonderte Anforderungen bestehen. Dies ergibt sich insbesondere bei der Projektierung von Oberleitungsstrecken mit engen Kurvenradien oder bei der Notwendigkeit von Parallelfeldern innerhalb von Kurven.

### 3.3.3 Fahrleitungsmonitoring und Diagnose (TSV.3)

#### Aufgabenstellung

Die kontinuierliche Zustandsüberwachung der Fahrleitung leistet einen Beitrag zur Reduzierung des Instandhaltungsaufwands und ermöglicht die Erkennung singulärer, systemkritischer Störereignisse. Das hierfür verwendete CMS (Contact Line Monitoring System) ermöglicht die Aufnahme physikalischer Messdaten, musste aber um Funktionen zum automatisierten Datenhandling und -auswertung ergänzt werden. Dabei sollten die physikalischen Messwerte in Systemzustandsgrößen umgerechnet werden können, deren kontinuierliche Überwachung langfristige Systemänderungen und -abnutzungen und kurzfristige, systemkritische Zustandsänderungen erkennen lassen.

#### Vorgehensweise / Ergebnisse

Im ersten Schritt wurden die bestehenden CMS-Anlagen der Versuchsanlage Groß Dölln auf eine fahrleitungsunabhängige Energieversorgung mit 230 V umgestellt, damit auch bei ausgeschalteter Fahrleitung kontinuierlich Messwerte erfasst werden. Dadurch konnte die Verfügbarkeit der Monitoring-Stationen deutlich gesteigert werden, sodass seit dem Umbau eine kontinuierliche Datenanbindung an den zentralen Server besteht. Auf die geplante Einbindung der CMS-Anlagen in ein übergeordnetes eHighway-TMS (Technical Monitoring System) wurde wegen des in diesem Einzelfall vergleichsweise geringen Mehrnutzens gegenüber dem hohen Aufwand für die hard- und softwaretechnische Einbindung verzichtet.

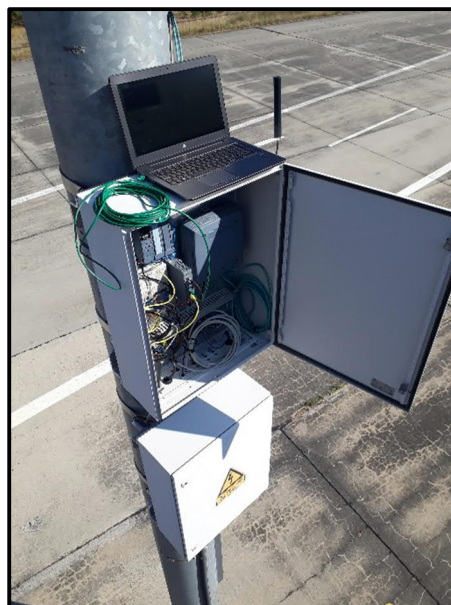
Die Erstellung von Datenhandling-Tools und von Auswertungs-Algorithmen in Zusammenarbeit mit der TU Dresden [83] erfolgte parallel zum laufenden Anlagenbetrieb, sodass eine ausreichend große Datenbasis geschaffen wurde. Das Datenhandling-Tool ermöglicht es, Abruf und Konvertierung der Rohdaten von der Messstation in eine Datenbank zu automatisieren. Diese vorgefilterten Rohdaten dienen dann als Input-Werte für die Auswertungs-Algorithmen.

Aus den Rohdaten können zusammen mit anlagenspezifischen Parametern nun Kenngrößen des Kettenwerks berechnet werden:

- Leiterzugkraft in Fahrdraht und Tragseil
- Wirkungsgrad der Radspanner
- Bestimmung der Leitertemperatur

Die erforderlichen Anlagenparameter sind aus der Planungs- und Errichtungsphase bekannt.

Abbildung 48 zeigt exemplarisch den Verlauf der Nachspannkraft beider Fahrdrähte über eine Woche und lässt den typischen Verlauf entsprechend der Tagestemperatur erkennen. Langfristige und größere Abweichungen von dieser Zugkraft wären ein Indiz für Alterungen der Nachspanneinrichtung und ein Grund für präventive Instandhaltungsmaßnahmen. Die aus den Rohdaten berechnete Fahrdrahtzugkraft schwankt in einem anwendungstypischen Bereich von etwa 700 N.



**Abbildung 47: CMS-Station nach Umrüstung**

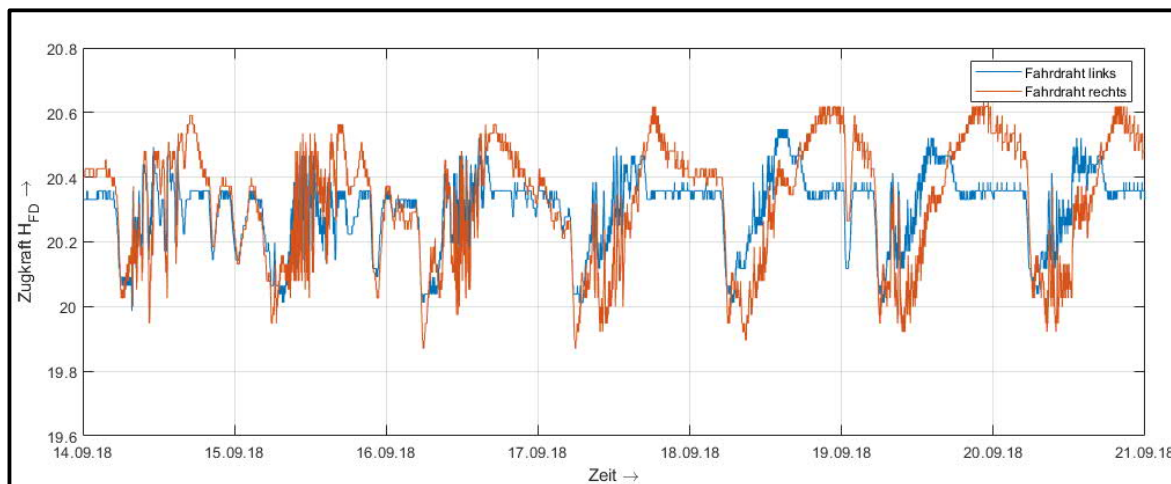


Abbildung 48: Verlauf der Fahrdrachtzugkraft über eine Woche

Den Einfluss eines singulären Störfalls auf die berechnete Fahrdrachtzugkraft zeigt Abbildung 49. Bei Versuchsfahrten kam es an einer falsch regulierten Hängerklemme zu einem Anstoß des Stromabnehmers. Die daraus resultierenden, sprunghaften Schwankungen der berechneten Zugkraft mit einer kurzzeitigen Amplitude von 100 N grenzen sich im Schwingungsmuster deutlich von den im Normalbetrieb auftretenden langsameren Zugkraftschwankungen ab.

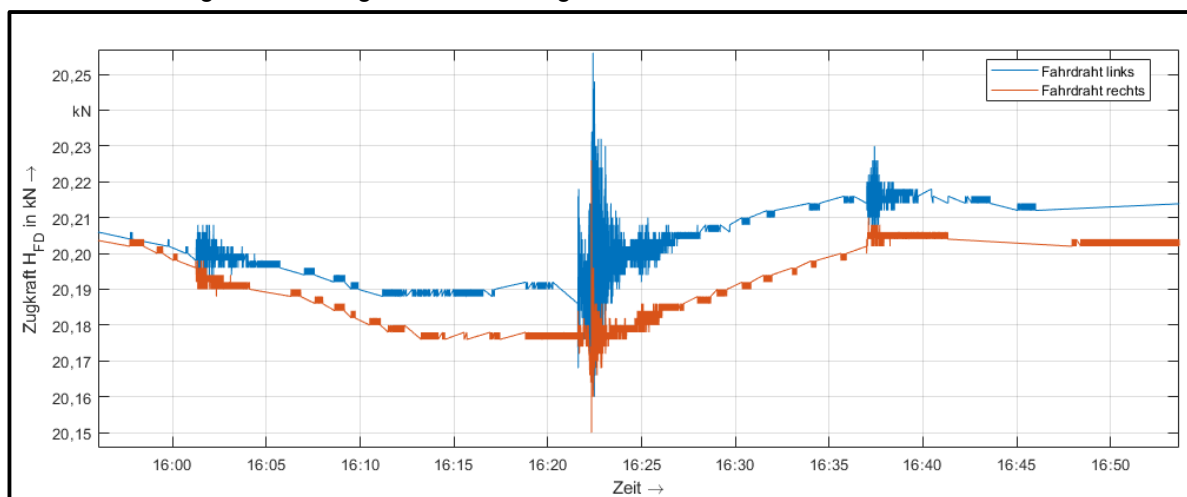


Abbildung 49: Spontane Zugkraftschwankungen infolge eines Anstoßes zwischen Fahrdrachtklemme und Stromabnehmer zwischen 16:20 und 16:25

## Fazit

Durch Umrüstung der Energieversorgung für die CMS-Stationen auf der Versuchsanlage Groß Dölln wurde die Stabilität der Datenerhebung deutlich verbessert. Datenhandling und -auswertung wurden in Zusammenarbeit mit der TU Dresden entwickelt und ermöglichen nun einen automatisierten Datentransfer von den Stationen zu einer Datenbank. Die nachgelagerten Auswertungsalgorithmen rechnen die physikalischen Messwerte in charakteristische Kenngrößen einer Fahrleitungsanlage um. Aus dem Langzeitverhalten der Messwerte können Ansätze für zustandsbasierte Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden, während kurzfristige, singuläre Ereignisse als Indikatoren für Störungen oder Schäden genutzt werden können.

### 3.3.4 Neuentwicklung modulares DC-Schutz- und Steuergerät (TSV.4)

Beim Betrieb leistungsfähiger Fahrleitungs- und Stromversorgungsnetze konkurrieren schutztechnische Anforderungen zur sicheren, schnellen und selektiven Abschaltung gestörter Netzabschnitte häufig mit dem Ziel, zur Verringerung der Übertragungsverluste und Erhöhung des Wirkungsgrads, möglichst große Netzabschnitte und Übertragungsquerschnitte zu bilden, z. B. durch zweiseitige Speisung oder Parallelschaltung der Fahrtrichtungen oder weitere Verstärkungsleitungen. Vermaschte Strukturen mit Längs- und Querkupplungen erfordern insbesondere beim eHighway-System mit den hohen Übertragungsleistungen die Dezentralisierung der Schutz- und Steuereinrichtungen, sodass neben Unterwerken auch vereinfachte lokale Schaltposten effizient in die Fernwirktechnik eingebunden werden können. Ermöglicht wird dies durch eine freie, flexible Konfigurierbarkeit.

In diesem Arbeitspaket wurde daher ein neues modulares DC-Schutz- und Steuergerät entwickelt. Damit kann der Schutz nicht nur in den Unterwerken sondern auch an dezentralen Standorten, wie sie im eHighway-System bei Trennschaltern an Masten entlang der Strecke vorkommen, realisiert werden. Sie ermöglichen es, fehlerhafte Streckenabschnitte selektiv abzuschalten. Durch neue Speisekonzepte werden neue Sicherheitsfunktionen nötig. So soll z.B. erstmals in einem DC-Schutzgerät eine Fehlerortung umgesetzt werden, was bisher nur bei Wechselstrombahnen mit AC-Schutzgeräten realisiert wird. Dazu ist eine leistungsfähige Hardware nach heutigem Technologiestand mit entsprechend schnellen Kommunikationsschnittstellen nötig. Wichtig ist hierbei, dass das neue Schutz- und Steuergerät einfach auf die jeweiligen Bedürfnisse angepasst werden kann, was eine hohe Modularität sowohl in der Hardware als auch in der Software erfordert.

#### Vorgehensweise / Ergebnisse

Für die Neuentwicklung des modularen DC-Schutz- und Steuergerätes Sitras® MDC wurde eine zukunftsträchtige Prozessorplattform ausgewählt. Ein Linux-Betriebssystem mit Echtzeiterweiterung findet Verwendung. Außerdem wurde die Verlagerung der schnellen Schutzfunktionen (<1 ms) in die FPGA-Logik beschlossen.

Die Hardware wurde gemäß modularen Ansatz gemäß in verschiedene Baugruppen aufgeteilt: Stromversorgungsbaugruppe, Kondensatorschnellauslösebaugruppe, CPU-Baugruppe mit Kommunikationsschnittstellen und Basis-Ein-/Ausgängen, sowie zusätzliche Ein-/Ausgabebaugruppe. Damit können je nach Einsatzart angepasste Kombinationen ausgewählt werden.



Abbildung 50: DC-Schutz- und Steuergerät Sitras® MDC

Für das Herzstück des Schutz- und Steuergerätes, die CPU-Baugruppe, wurde ein AM437x Sitara Prozessor von Texas Instruments ausgewählt. Dieser beinhaltet einen ARM Cortex A9 Kern und eine zusätzliche PRU-ICSS Einheit (Programmable Real-Time Unit Subsystem and Industrial Communication Subsystem) für Echtzeit- und Kommunikationsaufgaben. Zusätzlich gibt es einen FPGA-IC für die prozessnahe Anbindung der Messwerte und der Ein- und Ausgänge, um vor allem die schnelle Verarbeitung der Schutzmesswerte zu garantieren.

Nach der Erstellung des Hardwarelayouts und der Fertigung der Baugruppenprototypen sind diese zunächst in hardwarenahen Schnittstellentests und anschließend mit orientierenden Typtests überprüft worden.

Die Kommunikationsprotokolle Profinet und IEC 61850 [84] sind in die PRU-Einheit integriert worden. Für beide Protokolle wurden Zertifizierungstests durchgeführt und bestanden.

Für einen einfachen Zugriff zur Parametrierung des Gerätes und zur Auswertung von Fehlern auf der Oberleitung wurde ein Webserver implementiert. Die Weboberfläche kann über einen Browser aufgerufen werden. Cyber-Security-Aspekte wurden dabei selbstverständlich berücksichtigt.

Die Schutz- und Steuerungsfunktionen wurden erstellt und bereits frühzeitig auf einem Emulation-Board getestet. Die Softwaretests und Funktionstests wurden 2017 durchgeführt, im Oktober 2017 der Systemtest begonnen. Die dabei festgestellten Fehler konnten in enger Zusammenarbeit mit der Entwicklung rasch bereinigt werden. Als positiv hat sich ein erhöhter Aufwand bei der Erstellung der Systemtestumgebung bewährt. Es wurden für möglichst viele Funktionalitäten automatisierte Tests programmiert. Dadurch konnten Nachttests mit geringem Aufwand durchgeführt werden und auch die Protokollierung der Systemtests ließ sich damit vereinheitlichen.

Im Juli 2018 wurden die ersten Geräte auf der Versuchsanlage in Groß Dölln eingebaut, in Betrieb genommen und der Piloteinsatz gestartet. Die offizielle Lieferfreigabe wurde im Dezember 2018 erteilt.

### **Fazit**

Es wurden die Bausteine, Grund- und Schutzfunktionen eines neuartigen DC-Schutz- und Steuergeräts entwickelt und erprobt, welches sich sowohl bei der Hardware als auch bei der Software durch seine hohe Modularität auszeichnet. Von einfachen Trennschalterfeldern bis hin zu Leistungsschalterfeldern können damit viele Einsatzfälle insbesondere in eHighway-Schaltanlagen abgedeckt werden. Durch moderne und auf Ethernet-Technologie basierende Kommunikationsprotokolle können jederzeit die Anlagen von übergeordneten Leitstellen überwacht und gesteuert werden. Weiterhin gibt es die Möglichkeit einer Kommunikation nicht nur zur Stationsleittechnik sondern auch direkt von Gerät zu Gerät. Damit lassen sich auf einfache, effiziente und sichere Art und Weise, Verriegelungen und Schaltermitnahmen realisieren. So können selektive Abschaltungen automatisch durchgeführt werden, um im Fehlerfall die Länge der abgeschalteten, gestörten Streckenabschnitte zu minimieren.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde erstmals die Funktionalität der Fehlerortung implementiert. Diese Funktionalität hat es im DC-Traktionsstromversorgungsbereich bislang nicht gegeben und wurde zusätzlich patentiert. Es ist dadurch möglich, eine Angabe zum Kurzschlussort automatisiert und direkt nach der Abschaltung zu erhalten. Die Kurzschlussversuche auf der Testanlage in Groß-Dölln zeigten sehr gute Ergebnisse. Diese müssen im weiteren, längerfristigen Einsatz unter verschiedenen Streckenkonfigurationen verifiziert werden.

## **3.3.5 Intelligentes Energie-Management-System (iEMS) (TSV.5)**

### **Aufgabenstellung**

Zum Zwecke der Erschließung des Klima- und Umweltvorteils von Elektrofahrzeugen im Zusammenwirken mit Energieversorgungssystemen sind IT-basierte Energiemanagementsysteme vorteilhaft. Das Projektelement TSV.5 beinhaltet ein derartiges Energiemanagementsystem, welches aktiv (und in diesem Sinne regelbasiert = intelligent) auch die Möglichkeit zur Beeinflussung der Verbraucher und ggf. der Erzeuger gibt. Kernelemente dieses Themenfeldes waren daher die Entwicklung und der



Funktionsnachweis eines intelligenten Energie-Management-Systems (iEMS), das teilsystemübergreifend Möglichkeiten der Steigerung der Energieeffizienz erschließt.

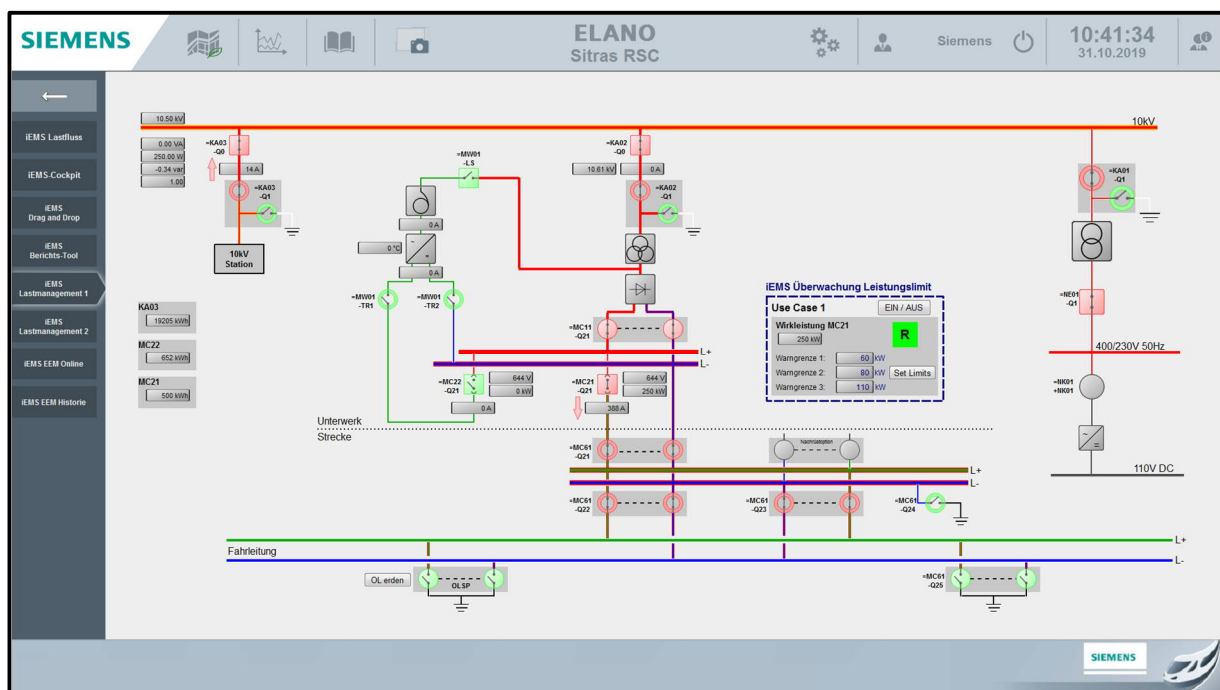
### Vorgehensweise / Ergebnisse

Das Projektelement wurde in sechs Arbeitspakete geteilt und in dieser Systematik folgend agil bearbeitet, sodass die Bearbeitung einzelner Themen schrittweise erfolgte und sich teilweise zeitlich überlappte.

Die zu bearbeitenden Arbeitspakete waren:

- TSV.5.1 Anforderungen und Umsetzungskonzept
- TSV.5.2 Entwicklung und Engineering
- TSV.5.3 Konzept zum Einsatz eines Echtzeitsystems
- TSV.5.4 Engineering und Systemintegration in die Versuchsanlage
- TSV.5.5 Betriebsbegleitung, Optimierung und Plausibilisierung
- TSV.5.6 Dokumentation

Als Ergebnis des Projektelements TSV.5 liegt nun ein softwarebasiertes, intelligentes Energiemanagementsystem vor, welches für weitere projektspezifische Anwendungen im Bereich der Elektromobilität (Fernbahn, Metro, eHighway, eBus) aber auch im Bereich allgemeiner Stromversorgung eingesetzt werden kann. Wesentliche Funktionen zu Transparenz, Berichterstattung, Lastmanagement und Konnektivität konnten umgesetzt werden.



**Abbildung 51: iEMS-Lastmanagement; Ausleuchtung und Leistungsüberwachung, eHighway Versuchsanlage Groß Dölln**

Als Nachweis des Erreichten wurde die TÜV-Zertifizierung für ein Energiemanagementsystem nach ISO 50001 [85] erfolgreich bestanden.

Darüber hinaus bestehen bereits weitere Ideen für Optimierungen und Verbesserungen, allerdings sollten diese aus wirtschaftlichen Gründen erst nach einem wiederholten Einsatz des realisierten Konzeptes und der Software umgesetzt werden. Die bei diesen Einsätzen gemachten „Lessons Learned“ sollten Grundlage für Priorisierung und Realisierung sein.

Das entwickelte System wurde im Jahr 2019 in die bestehende Energieversorgung der Versuchsanlage Groß Dölln implementiert und seitdem dort im Einsatz. Der Aufbau und Betrieb der Versuchsanlage erlaubte, abgesehen vom Nachweis der Grundfunktionen, nur eine eingeschränkt praxisnahe

Erprobung aller Vorteile eines intelligenten Energiemanagementsystems, die sich erst aus dem Zusammenwirken mehrerer Unterwerke, unterschiedlich belasteter Netzabschnitte und zahlreicher Fahrzeuge mit individuellen Leistungsanforderungen und Fahrspielen ergeben.

### **Fazit**

Der Einsatz eines intelligenten Energiemanagementsystems im Bereich der Elektromobilität ist generell vorteilhaft. Für eine effektive Anwendung, speziell im Bereich des eHighways mit eTrucks, ist eine gewisse minimale Netzgröße der Einspeisungen, eine hohe Verkehrsdichte sowie ein Dauerbetrieb mit vielen Fahrzeugen notwendig.

Aus technischer Sicht empfiehlt es sich, z. B. die Unterwerke mit steuerbaren Gleichrichtern und Wechselrichtern auszustatten, um die Lastverteilung im System aktiv beeinflussen zu können.

Des Weiteren wird eine Verbrauchsvorhersage - und somit eine aktive Beeinflussung des Energiebezugs - im Vergleich zur Bahnanwendung dadurch erschwert, dass es in eHighway-Systemen keinen Fahrplan als Referenz gibt. Spezielle Konzepte, wie z.B. Verknüpfungen mit Einfahrkontrollen, Echtzeitmodellen, Verkehrsprognosen und Verkehrsmanagementsystemen würden den Wirkungsbereich des iEMS erweitern, erfordern jedoch zusätzliche Entwicklungen und Erprobungen zur Integration dieser Anwendungen.

Auf Basis des vorliegenden intelligenten Energiemanagementsystem ist es nun möglich, mit entsprechender technischer Ausrüstung der Strecke sowie der Einspeisung, den Fahrbetrieb energetisch vorteilhaft über Fahrerinformationen zu steuern und kritische Situationen in der Stromversorgung zu vermeiden.

### **3.3.6 Federnachspannung für zweipolige Kettenwerksfahrleitungen (TSV.6)**

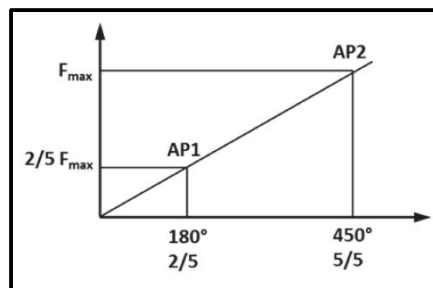
#### **Aufgabenstellung**

Fahrdraht und Tragseil der Fahrleitung werden mit einer definierten Leiterzugkraft nachgespannt, um einen gleichmäßigen Höhenverlauf des Fahrdrahtes und damit eine gleichbleibende Kontaktkraft zu gewährleisten. Dies ist die Grundvoraussetzung für eine unterbrechungsfreie und verschleißarme Energieübertragung vom Fahrdraht in das Fahrzeug.

Wechselnde Leitertemperaturen und Fahrdrahtverschleiß führen zu Längenänderungen, die eine Nachspanneinrichtung unter Beibehaltung der konstanten Zugkraft ausgleichen muss. Hierfür wurden bislang Radspanner verwendet, die die Masse eines Gewichtssatzes über ein drehbares Rad in eine Zugkraft umsetzen, um dabei die Zugkraft zu mindestens  $\pm 3\%$  des Sollwertes einzuhalten. Damit können heute Längenänderungen bis typischerweise 1,5 m kompensiert werden, was Nachspannlängen von 1500 m ermöglicht.

Bei den besonderen Anforderungen des eHighway-Systems wäre der Einsatz von Radspannern mit Gewichtsführungen im Mast vorteilhaft, die jedoch in erhöhtem Montage- und Instandhaltungsaufwand resultieren. Aus diesem Grund sollte eine neue Nachspanneinrichtung auf Basis von Federn entwickelt, erprobt und pilotiert werden, die ohne Gewichte auskommt. Sie sollte die hohen Anforderungen hinsichtlich konstanter Zugkraft und Regulierlänge von Radspannern erreichen oder übertreffen und damit die Nachteile bisher auf dem Markt verfügbarer, gewichtsloser Nachspanneinrichtungen ausgleichen.

Die besondere Herausforderung lag dabei in der Erzeugung einer, über die gesamte Kompensationslänge konstanten Zugkraft durch eine Feder, da die Federkraft linear mit dem Federweg ansteigt. Somit musste die ansteigende Federkraft über ein entsprechendes Ausgleichselement in eine konstante Zugkraft umgesetzt werden.



**Abbildung 52: Kraft-Weg-Kennlinie einer Flachspiralfeder**

## **Vorgehensweise / Ergebnisse**

Im ersten Schritt wurden die aus der Bahntechnik bekannten Anforderungen an Nachspanneinrichtungen analysiert und um die Besonderheiten des eHighway-Systems ergänzt. Hier ist insbesondere die nochmals gesteigerte Anforderung an eine konstante Zugkraft über die gesamte Lebensdauer zu nennen. Diese Anforderung resultiert aus den Betrachtungen zu horizontaler und vertikaler Fahrdrachtlage (vgl. Kap. 3.3.2.1) und den Randbedingungen für den Einsatz der neu entwickelten Klemmen (vgl. Kap.3.3.2.3) in windschiefer Fahrleitung. Diese Anforderungen wurden in einem Lastenheft gebündelt und dienten als Arbeitsgrundlage für die Erstellung eines Grobkonzepts. Diese Konzeptstudie wurde durch Mitarbeiter des Lehrstuhls für Federtechnik der TU Ilmenau durchgeführt und die Ergebnisse in einem Bericht dokumentiert [86]. Hierzu sollten verschiedene Lösungsvarianten erarbeitet und mit dem bereits existierenden Konzept für eine Federnachspannung verglichen werden.

Ausgehend vom Lastenheft wurden spezifische Anforderungen an die Feder (u.a. Kräfte, Momente, Verdrehwinkel, Dauerfestigkeit) für sechs technisch denkbare Realisierungsvarianten abgeleitet und diese weiter untersucht:

- Variante 1: Drehfeder mit Kurvenscheibe
- Variante 2: Drehstabfedern in Reihe geschaltet und Abtriebselement als Kurvenscheibe
- Variante 3: Schraubendruckfeder mit Zahnrad/Zahnstange Kombination und Kurvenscheibe
- Variante 4: Schraubendruckfedern mit loser Rolle und Kurvenscheibe
- Variante 5: Flachspiralfeder und Verzicht auf eine Kurvenscheibe durch unrunde Stirnräder
- Variante 6: Flachspiralfeder und Kurvenscheibe auf unterschiedlichen Wellen

Die Bewertung aller Varianten hat ergeben, dass keine dieser Varianten geeignet ist, alle technischen und wirtschaftlichen Anforderungen zu erfüllen, selbst wenn die Anforderung an die Zugkrafttoleranz um einige Prozent abgeschwächt wird. Die Gründe dafür sind:

- Die erforderlichen Abmessungen überschreiten den in der Praxis zur Verfügung stehenden Bauraum.
- Die erforderliche Kompensationslänge kann nicht erreicht werden.
- Das auf dem Weltmarkt verfügbare Vormaterial zur Fertigung der Federn ist nicht in der erforderlichen Länge verfügbar.
- Deutlich höheres Gewicht als im Lastenheft beschrieben, resultierend in stark erhöhtem Montageaufwand.
- Die zu erwartenden Produktionskosten übersteigen den Zielwert um ein Vielfaches.

Die weitere Entwicklung wurde deshalb eingestellt, zumal auch übliche Gewichtsnachspannungen den Anforderungen genügen.

## **Fazit**

Das Systemumfeld eHighway stellt Anforderungen an Nachspanneinrichtungen, die über die aus der Bahntechnik bekannten teilweise hinaus gehen und den Einsatz federbasierter Nachspanneinrichtungen nahelegen. Ziel war es, eine federbasierte Nachspanneinrichtung zu entwickeln, welche die Nachteile bisher verfügbarer Lösungen umgeht und damit die hohen Anforderungen an konstante Zugkraft, Kompensationslänge und Bauraum erfüllt. Im Rahmen der Konzeptfindungsphase wurden sechs Varianten untersucht und im Ergebnis festgesellt, dass keine Variante geeignet ist, die Anforderungen zu erfüllen.

Zum Einsatz kommen damit weiterhin die im Bahnbetrieb unter allen Umgebungsbedingungen bewährten Nachspanneinrichtungen mit Radspannern und Gewichtssätzen, die situationsbezogen entweder außerhalb oder innerhalb der Maste geführt werden.

### 3.3.7 RFID-Technologie zur Last- und Stromabnehmersteuerung (TSV.7)

#### Aufgabenstellung

Der Stromabnehmer des eHighway-Systems greift auf standardisierte und bewährte Kohleschleifleisten aus der Bahntechnik zurück. Wichtiges Ziel im laufenden Betrieb ist dabei die Minimierung des Verschleißes der Kohleschicht und die Maximierung der Lebensdauer. Neben dem mechanischen Verschleiß der Schleifleisten aufgrund rein mechanischer Ursachen (Abrieb oder Beschädigungen z. B. beim Anbügeln) ist auch der elektrische Verschleiß (z.B. durch Lichtbögen) zu berücksichtigen, vgl. auch Abschnitt 3.3.2.2.

Der elektrische Verschleiß hängt wesentlich von der Höhe des aktuellen Stromes und der damit entstehenden Wärmeentwicklung ab. Besonders hoch ist der Verschleiß an Unstetigkeiten im Fahrdravtverlauf, wie zum Beispiel an Trennstellen, wo es häufig zur Entstehung von Lichtbögen kommt.

Ziel des ELANO-Arbeitspaketes TSV.7 war es, den stromabhängigen Anteil des Verschleißes an solchen Stellen zu minimieren, und zwar für die Stromabnehmerschleifleisten gleichermaßen wie für die an diesen Stellen installierten Bauteile des Fahrleitungssystems. Dazu sollten RFID-Tags erprobt werden, welche Informationen über die Position der entsprechenden Stellen und die einzuleitenden Maßnahmen des Fahrzeugs bzw. des Stromabnehmers beinhalten. Im Zielzustand sollte die Kommunikation zwischen RFID-Reader auf dem Fahrzeug und RFID-Tag in der Nähe der Unstetigkeitsstelle im Fahrdravt automatisiert die kurzzeitige Reduktion bzw. Unterbrechung des vom Fahrzeug bezogenen Stroms bewirken.

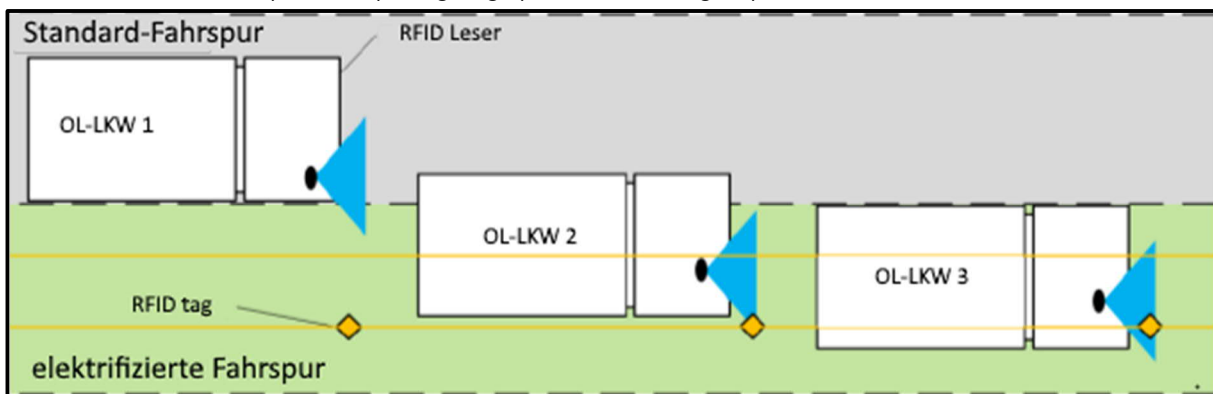
#### Vorgehensweise / Ergebnisse

Die Umsetzung des Gesamtarbeitspaketes erfolgte in der praktischen Umsetzung der Lösung und einer parallelen, theoretischen Zuverlässigkeits- /Verfügbarkeits-Betrachtung (RAM für Realibility, Availability, Maintainability) für den eHighway-Streckentrenner, als eine sehr signifikante Unstetigkeit im Fahrdravtverlauf.

Die praktische Umsetzung bestand aus ersten Voruntersuchungen, inwieweit RFID-Tags an der Oberleitung von einem fahrenden Fahrzeug erkannt werden können und welche Tags und Leser (Reader) hierzu geeignet sind. Diese Machbarkeitstests erfolgten mit dem Versuchsfahrzeug „Actros #2“.

Auf den Erkenntnissen [87] aufbauend, wurde eine praxistaugliche Lösung zur Nutzung für die neuen Stromabnehmer der dritten Generation (PAN 3rd Gen) entwickelt.

Hierzu wurden Fragen der Systemarchitektur und Auslegung definiert und Anforderungen an die korrekte Befestigung und Lage der RFID-Tags an der Oberleitung auf Basis der kegelförmigen Detektionsbereiches des Lesers (Readers) festgelegt (siehe Abbildung 53).



**Abbildung 53: Erkennung des RFID-Tags bei unterschiedlicher Lkw-Spurlage**

Die notwendige Hardware wurde definiert und die optimale Lage / Befestigung sowohl für den Leser [88] auf dem Fahrzeug als auch für die Tags [89] an der Oberleitung festgelegt.

Zudem wurde eine geeignete Datenstruktur für die RFID-Tags definiert, die neben der Erreichung der im Forschungsprojekt angestrebten Ziele auch genügend Flexibilität für zukünftige Anwendungen aufweist.

Die Software wurde so implementiert, dass eine entsprechende Signalübertragung zur Leistungsreduktion an das Fahrzeug übermittelt wird. Diese Funktionalität wurde sowohl auf dem Pantographen-Teststand in Berlin-Adlershof als auch auf der Versuchsanlage Groß Dölln erfolgreich getestet.

In der parallelen RAM (Reliability, Availability, Maintainability)-Betrachtung [90] für den Streckentrenner wurde die Verschleißrate eines Streckentrenners im Betrieb als Einzelaspekt betrachtet. Unter Berücksichtigung der Überlegungen in [91] und [92] wurden Abschätzungen über die Verschleißrate und Lebensdauer aktueller Streckentrenner getroffen. Hier kann für einen durchschnittlichen Betrieb mit 500 Stromabnehmerdurchgängen pro Tag eine Lebensdauer von 10 Jahren angesetzt werden.

Auf Basis der vorliegenden Informationen aus dem Fernbahnbereich [93] bzw. von Straßenbahnen sowie der Betrachtung des konstruktiven Aufbaus eines Streckentrenners wird angenommen, dass der Einfluss von inhärenten mechanischen Ursachen (z.B. durch bewegliche Bauteile) auf die Verschleißrate zu vernachlässigen ist.

Hauptinflussfaktoren und Ursachen für den Verschleiß sind viel eher, neben externen Ursachen (Schäden durch Dritte), vor allem die Stromstärke bei Befahrung des Streckentrenners. Dieser Einfluss wird auf ca. 40 % der Verschleißfälle geschätzt, welcher vor den externen Ursachen (ca. 20 %) und der Anzahl der Stromabnehmerdurchgänge (ebenfalls ca. 20 %) somit den größten Einflussfaktor darstellt.

### **Fazit**

Die Machbarkeit der fahrzeugseitigen Strombegrenzung an Streckentrennern auf Basis von RFID-Tags, die an der Oberleitung installiert werden, konnte nachgewiesen und erprobt werden. Wichtige Elemente für die korrekte Umsetzung ist die Positionierung/Anordnung des RFID-Lesers und der RFID-Tags, so dass eine korrekte Erkennung der Tags sichergestellt ist und eine ungewollte Detektion z. B. von der Nachbarspur vermieden wird.

Darüber hinaus ist die Auswertung der auf dem Tag hinterlegten Informationen und der örtliche Versatz zwischen Tag und Streckentrenner zu berücksichtigen. Dieser Versatz sollte ebenfalls als Information im Tag vorhanden sein, so dass das Fahrzeug auf Basis der zurückgelegten Fahrtstrecke die Leistungsreduktion (und damit die Stromreduzierung) an der korrekten Stelle vornehmen kann.

Die theoretische RAM-Betrachtung zeigt zudem, dass sich für aktuelle Standard-Streckentrenner im eHighway-System ohne Einsatz der entwickelten RFID-Technologie eine Verschleißrate von 1,45 /a errechnen lässt, wenn man von 8000 Stromabnehmer-Durchgängen pro Tag ausgeht. Dies bedeutet, dass pro Jahr 1,45 Streckentrenner verschlissen wären bzw. alle 8,3 Monate getauscht werden müssten.

Diese Anzahl an Stromabnehmer-Durchgängen bedeutet eine über 24 h kontinuierliche Fahrzeugfolge von Oberleitungs-Lkw im 10-s-Takt, also ein Anteil von 50 %, wenn man auf den am stärksten belasteten Netzabschnitten von einem kontinuierlichen 5-s-Takt ausgeht.

Die oben erwähnte Verschleißrate entspräche einer Lebensdauer von nur ca. 8 Monaten. Allein durch den Einsatz der RFID-Technologie lässt sich der Einfluss durch die Stromstärke auf die Verschleißrate deutlich verringern, was zu einer Verbesserung der Verschleißrate unter den getroffenen Annahmen auf 0,75 /a bzw. einer durchschnittlichen Lebensdauer von 1,33 Jahren führt.

Somit kann davon ausgegangen werden, dass die in ELANO entwickelte und erprobte RFID-Technologie die Lebensdauer eines Streckentrenners nahezu verdoppeln kann.

Eine praktische Erprobung der Ergebnisse und ein Vergleich mit den Forschungsergebnissen kann nur über zukünftige, längerfristige Analysen und Evaluationen im Betrieb erfolgen. Die langfristige RAM-Betrachtung für hohe Verkehrsaufkommen zeigt aber auch, dass nicht nur die Verringerung des Verschleißes durch die RFID-gestützte Stromreduktion notwendig ist. Darüber hinaus müssen den höheren Befahrungszahlen angepasste, verschleißresistentere Streckentrenner entwickelt werden, wie dies bereits in Abschnitt 3.3.2.2 erläutert wurde.



## 3.4 Elektrische Fahrzeugtechnik - EFZ

### 3.4.1 Systemauslegung für mehrfach-hybride Antriebssysteme (EFZ.1)

#### Aufgabenstellung

Im Projekt ELANO wurden sehr unterschiedliche Aspekte zum eHighway-Gesamtsystem untersucht. In den Arbeitspaketen „Simulation von Referenzszenarien (reale Strecken- und Fahrzeugdaten) – SYS.1.3“ und „Ergebnisanalyse zur Ableitung von Basisparametern für Teilsysteme – SYS.1.4“ (vgl. Kap. 3.1.1.1) wurden Simulationsmodelle verifiziert und ein Vergleichsszenario gerechnet. Die für aussagekräftige und belastbare Simulationen zur Auslegung und Dimensionierung der Infrastruktur benötigten fahrzeugseitigen Einführungsmodelle und Referenzszenarien wurden dazu in dem Projektelement „Systemauslegung für mehrfach-hybride Antriebssysteme“ (EFZ.1)“ definiert.

#### Vorgehensweise / Ergebnisse

Die Parameter der Fahrzeuge und Strecken wurden in einer Excel-Liste erfasst und zusammen mit den entsprechenden Fachabteilungen abgestimmt und freigegeben. Anhand des eHighway-Versuchsfahrzeuges „EMMA“ (Sattelzugmaschine aus dem Vorgängerprojekt ENUBA 2 [3]) konnten eine Vielzahl von Parametern definiert und diesen realitätsnahen Werten zugeordnet werden. Dazu gehören u.a. Angaben zur Antriebsleistung am Rad, Traktionskräfte, Fahrzeugmassen oder cw-Werte in verschiedenen Fahrsituationen. Weitere relevante Eingangsparameter für eine umfängliche Simulation waren Umweltbedingungen und klimatische Größen, wie z.B. Luftdruck, Umgebungstemperatur oder Luftfeuchtigkeit. Am Beispiel des Luftdrucks wurde in einer Sensitivitätsanalyse untersucht, welchen Einfluss auch verhältnismäßig kleine, aber nicht beeinflussbare Änderungen der Umgebungsbedingungen auf die interessierenden fahrdynamischen Kennwerte und Energiebilanzen haben.

Eine weitere wichtige Variable der Simulationsmodelle sind die im System auftretenden Verluste. Die meisten Verluste sind systemimmanent, wie z.B. Wirkungsgrade von Umrichtern oder elektrischen Antrieben. Diese können durch eine fortschreitende technische Entwicklung zu Gunsten des Gesamtwirkungsgrades verbessert werden. Die Verluste werden auch durch die Form und Lage des Stromabnehmers beeinflusst, der im angehobenen bzw. im eingefahrenen Zustand den cw-Wert des Fahrzeuges mitbestimmt. Darüber hinaus hat der Grad der Elektrifizierung der Gesamtstrecke einen Einfluss auf die Energiebilanz.

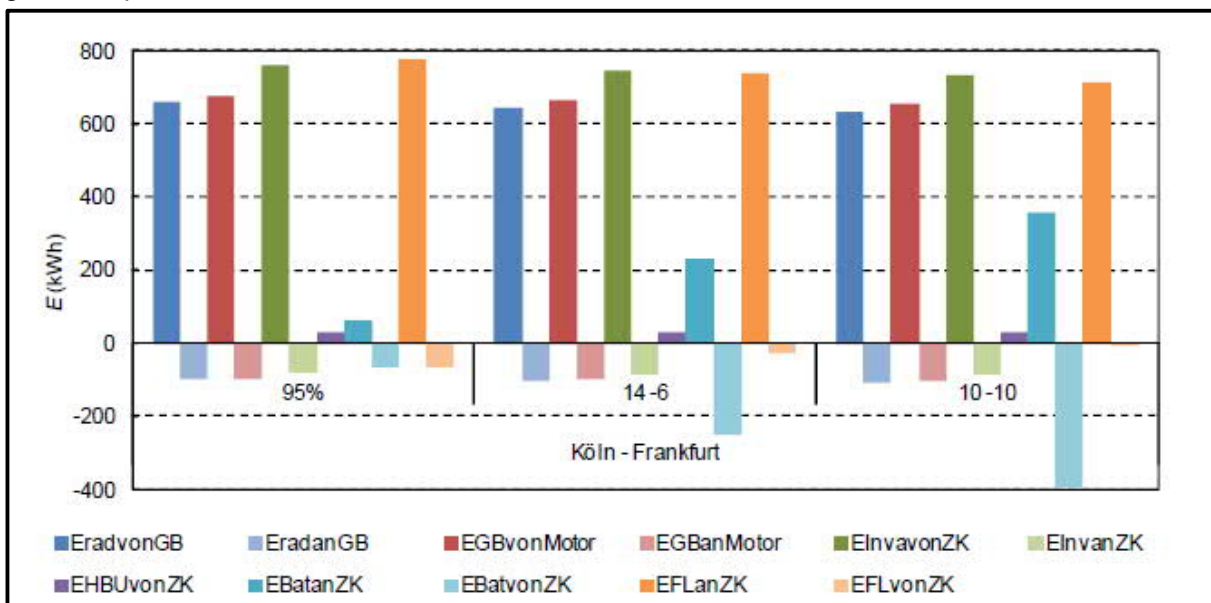
Detailliert verglichen wurden drei Elektrifizierungsvarianten [94], s. auch Abschnitt 3.1.1.1 und Abschnitt 3.3.1:

- 95 % Elektrifizierungsgrad - 95 % der Strecke elektrifiziert
- 14 km zu 6 km (70 % Elektrifizierungsgrad)  
Wechsel zwischen 14 km mit Oberleitung und 6 km ohne Oberleitung
- 10 km zu 10 km (50 % Elektrifizierungsgrad)  
Wechsel zwischen 10 elektrifizierten Kilometern und 10 nichtelektrifizierten Kilometern

Simuliert wurde die im folgenden dargestellte Energieflusskette. Die dem Zwischenkreis von der Fahrleitung zugeführte Energie ( $E_{FLanZK}$ ) wird teilweise verwendet, um die Batterie nachzuladen, da die rekuperierte Energie allein nicht reicht, um einen ausgeglichenen Ladezustand zu erreichen. Ein weiterer Teil der Energie wird den Hilfsbetrieben zugeführt, die aber auch teilweise in Rekuperationsphasen aus der zurückgewonnenen Energie versorgt werden. Die verbleibende Energie, zuzüglich der von der Batterie in den Zwischenkreis zurückgespeisten Energie, wird zur Versorgung der Traktionsumrichter verwendet ( $E_{InvvonZK}$ ). Nach Abzug der Umrichter- und Motorverluste ergibt sich die dem Differential zugeführte Energie ( $E_{GBvonMotor}$ ) und durch die Verluste im Differential die am Rad bereitgestellte Energie ( $E_{RadvonGB}$ ). Beim Bremsen wird Energie vom Rad an das Differential geleitet ( $E_{RadanGB}$ ). Durch die elektrische eingeschränkte Bremsfähigkeit kann es sein, dass nicht die gesamte Energie elektrisch umgewandelt werden kann, sodass ein Teil der Energie in einer mechanischen Bremse umgewandelt werden muss. Die verbleibende Energie ( $E_{GBanMotor}$ ) ist die unter Beachtung der maximalen elektrischen Leistungsfähigkeit dem Motor/ Generator zugeführte Energie. Nach Abzug der Verluste im Generator und Umrichter verbleibt die rekuperativ an den Zwischenkreis abgegebene Energie ( $E_{InvanZK}$ ). Ein Teil dieser rekuperierten Energie wird für Hilfsbetriebe genutzt. Ergänzt um

die durch die Fahrleitung zugeführte Energie zur Nachladung der Batterie ergibt sich die dem Batterieumrichter zugeführte Energie (EBatvonZK). Nach Abzug der internen Verluste im Umrichter und der Batterie ergibt sich die Energie, die dem Zwischenkreis aus der Batterie zugeführt werden kann (EBatanZK).

Wie in Abbildung 54 zu sehen ist, müssen bei abnehmendem Elektrifizierungsgrad immer größere Energiemengen entsprechend der nicht elektrifizierten Streckenanteile erst vom Zwischenkreis in der Batterie zwischengespeichert werden (EBatvonZK), um anschließend als EBatanZK die direkte FL-Versorgung in den nicht elektrifizierten Abschnitten zu ersetzen. Das heißt, damit Fahrzeuge bei geringerem Elektrifizierungsgrad rein elektrisch fahren können, benötigen sie dafür eine Batterie mit ausreichend großer Kapazität.



**Abbildung 54: Energiebilanz im Antriebsstrang auf der Strecke Köln-Frankfurt für verschiedene Elektrifizierungsgrade**

In einer weiteren Betrachtung wurde der Energiebezug aus der Oberleitung pro km innerhalb verschiedener Referenzstrecken gegenübergestellt. Dem Verlauf der Referenzstrecke von Köln nach Frankfurt lag ein moderat bergiger Verlauf zu Grunde, bei der Strecke Hamburg-Lübeck konnte von einem Flachlandprofil ausgegangen werden.

Tabelle 10 zeigt, dass für die verschiedenen Elektrifizierungsgrade im Vergleich zur Geländetopologie leicht unterschiedliche Werte berechnet wurden. Sie variierten für den spezifischen Energiebezug zwischen 1,92 kWh/km (moderat bergige Strecke bei 95 % Elektrifizierungsgrad) und 1,59 kWh/km (Flachland bei 50 % Elektrifizierungsgrad) und entsprechen beim Energiebedarf recht gut dem für elektrisch angetriebene Lkw zu erwartenden Flottenmittelwert bei mittlerer Zuladung (vgl. [3]), der bei etwa 50 % des spezifischen Energiebedarfs eines vergleichbaren Dieselantriebs liegt. Bei der Variante mit 95 % Elektrifizierungsgrad gibt es entsprechend Abbildung 54 einen relevanten Anteil vom Zwischenkreis an die Fahrleitung zurückgespeicherter Energie (EFLvonZK). Diese ist in Tabelle 11 im Energiebezug aber nicht im Energiebedarf enthalten. Bei geringeren Elektrifizierungsgraden verschwindet dieser Beitrag, da die Batterien durch die stärkere Nutzung immer aufnahmefähig sind und keine Energie ins Fahrleitungsnetz zurückgespeist wird. Bei einem Batteriemangement, das die Streckentopografie berücksichtigt, kann auch bei hohen Elektrifizierungsgraden die gesamte oder zumindest nahezu die gesamte rekuperierte Energie in der Batterie gespeichert werden.

**Tabelle 10: Energiebezug und -bedarf in Relation zum Elektrifizierungsgrad für beide Referenzszenarien**

Strecke	Köln - Frankfurt			Hamburg - Lübeck		
	95%	14 - 6	10 - 10	95 %	14 - 6	10 - 10
Elektrifizierungsgrad der Autobahn (%)	95%	14 - 6	10 - 10	95 %	14 - 6	10 - 10
Elektrifizierungsgrad der Gesamtstrecke (%)	93%	69%	52%	79%	65%	50%
Spezifischer Energiebezug (kWh/km)	1,92	1,80	1,72	1,69	1,64	1,59
Spezifischer Energiebedarf (kWh/km)	1,70	1,68	1,68	1,60	1,59	1,57

In der Tabelle und im Text werden die Begriffe Energiebezug und -bedarf genutzt. Unter Energiebezug wird die am Stromabnehmer aufgenommene Energie verstanden, wohingegen unter Energiebedarf die Summe aus aufgenommener und zurückgespeister Energie verstanden wird. Ein vergleichbarer Rückspeisegrad von 7% ergibt sich im Güterverkehr der Deutschen Bahn [95].

### **Fazit**

Die durchgeführten Simulationen und Analysen ermöglichen genaue Aussagen über das Verhalten von OH-Lkw unter verschiedenen Betriebsbedingungen. Sie bilden die Basis für weitere Überlegungen zur technischen, ökologischen und ökonomischen Optimierung des Gesamtsystems. Da die Simulationen auf Basis konkret ermittelter Kennwerte für realisierte Einzelfahrzeuge mit Stromabnehmer der 2. Generation durchgeführt wurden, sind in der weiteren Entwicklung bereits umgesetzte aerodynamische Maßnahmen am Fahrzeug wie z. B. der Einsatz eines optimierten Windshields oder die aerodynamisch deutliche günstigere Gestaltung des Stromabnehmers der dritten Generation nicht berücksichtigt, vgl. Abschnitt 3.5.4.2. Auch haben die Energieinhalte und Kühlsysteme der anzunehmenden Traktionsbatterien und leistungselektronischen Komponenten jeweils Einfluss auf die Verluste und die Energiebilanz, sodass auch Optimierungen im elektrischen Antriebssystem die Energiebilanz positiv beeinflussen.

## **3.4.2 Fahrzeugschnittstellen und Stromabnehmerintegration (EFZ.2)**

### **3.4.2.1 Vereinheitlichte Schnittstellendefinition für alle Medien (EFZ.2.1)**

#### **Aufgabenstellung**

Im Zuge der eHighway-Pantographenentwicklung wurden die Stromabnehmer an verschiedenen Fahrzeugkonzepten in Forschungs- und Demonstrationsprojekten getestet. Daraus resultierend wurde die Notwendigkeit erkannt, die technischen Schnittstellen zu definieren und zu vereinheitlichen. Dies betrifft sowohl das gesamte Interface (Hardware- und Software-Schnittstellen) zum Fahrzeug als auch die Verknüpfung der verschiedenen Teilsysteme auf dem Nutzfahrzeug selbst. Dabei standen die mechanischen, pneumatischen, elektrischen und steuerungstechnischen Schnittstellen im Mittelpunkt sowie eine Analyse der benötigten Hilfsbetriebe, um diese für OH-Lkw zu optimieren.

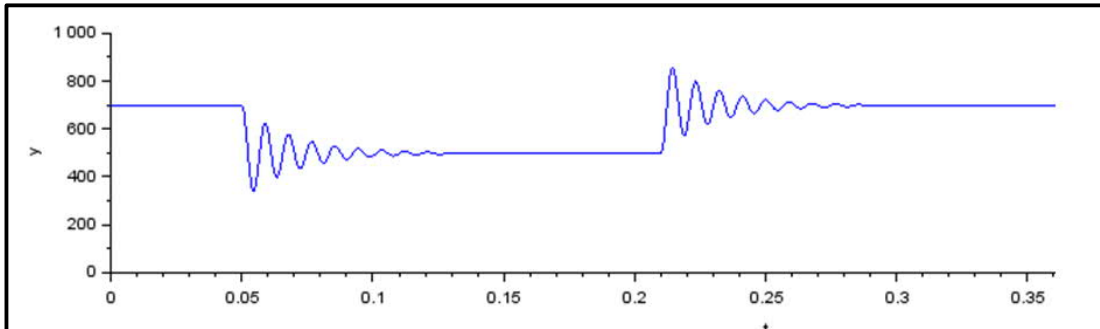
Weiterhin galt es zu untersuchen, welche betrieblichen Wechselwirkungen zwischen der Infrastruktur und dem Fahrzeug sowie zwischen verschiedenen Fahrzeugen im Bereich eines Einspeiseabschnitts und an Übergängen zu benachbarten Abschnitten entstehen können.

#### **Vorstudie: Wechselwirkungen zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur**

##### **Vorgehensweise / Ergebnisse**

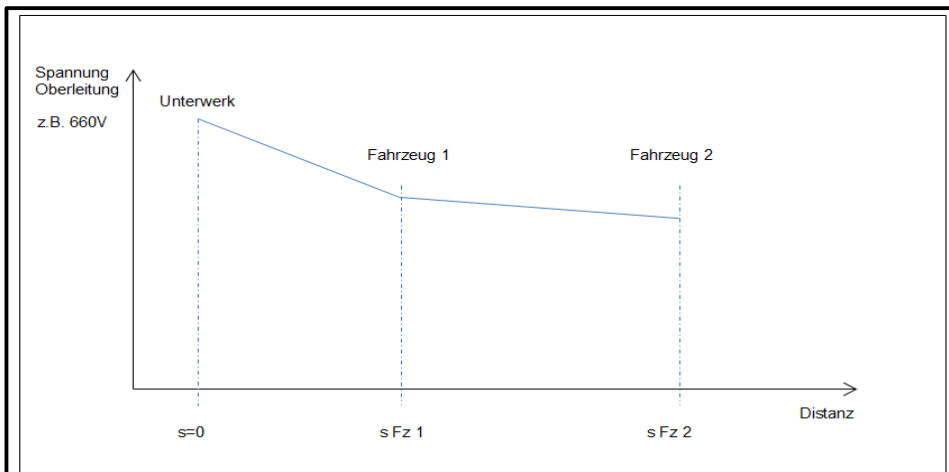
Bei den untersuchten externen Beeinflussungen handelt es sich um Schaltvorgänge, die zu einer sprunghaften Stromänderung im System führen können, wie z.B. beabsichtigte Schaltvorgänge oder Schutzabschaltungen im Unterwerk, Schwingungen des Stromabnehmers durch Fahrbahnunebenheiten, Streckentrennungen in der Fahrleitung oder Kurzschlussabschaltungen auf Fahrzeugen. Zur Vermeidung von unzulässig erhöhten Spannungen müssen Überspannungsableiter auf dem Fahrzeug installiert werden, um diese wirksam zu begrenzen. Solche Überspannungsableiter sowie eine Sicherung in der Fahrzeugzuleitung sind auch zum Schutz vor Blitzeinwirkungen unabdingbar. Aber auch durch freigeschaltete oder kurzgeschlossene Oberleitungen kann es wie bei Eisenbahnen zu Wechselwirkungen kommen, die ohne Schutzmaßnahmen u. a. zu Schädigungen an der fahrzeugeitigen Antriebsausrüstung führen würden.

Eine typische gegenseitige Beeinflussung von Oberleitung und Fahrzeug stellt der kurzzeitige Kontaktverlust zwischen Schleifleiste und Fahrdrabt, z.B. durch Toleranzen in der Beschaffenheit der Fahrbahn, dar. Der beim Kontaktverlust entstehende Lichtbogen lässt zwar die Fahrzeugspannung absinken, kann aber als unproblematisch gesehen werden. Zum Zeitpunkt des erneuten Kontaktes von Stromabnehmer und Fahrdrabt entsteht allerdings eine Überspannung von bis zu 800 V, was zu einer Abschaltung des Antriebssystems führen kann. Abbildung 55 zeigt den Spannungsverlauf während eines Kontaktverlustes und erneuten Kontaktierens. Gegenmaßnahmen sind daher der Einsatz passiver Elemente wie Drosseln oder schnelle, leistungselektronische Schalter und Filter sowie entsprechende Kombinationen.



**Abbildung 55: Simulierter Spannungsverlauf bei erneutem Stromabnehmerkontakt**

Bei Betrachtung der gegenseitigen Beeinflussung von Fahrzeugen an der Oberleitung wurde zwischen dem Energiebezug und dem Energieeintrag (Rückspeisung) unterschieden. Dabei galt es, die entstehenden Impedanzen zwischen Einspeisepunkt der Oberleitung und der Entnahmestelle durch den Pantographen zu beachten. Entlang der Oberleitung entstehen Spannungsabfälle durch veränderbare Wegstrecken und entnommene Leistungen, welche sich bei mehreren Fahrzeugen in einem Einspeiseabschnitt weiter erhöhen, s. Abbildung 56. Der umgekehrte Effekt entsteht, wenn mehrere Fahrzeuge innerhalb eines Unterwerksbereichs zurückspeisen, was zu einer Erhöhung der Fahrdradtspannung führen kann. Beide Szenarien müssen durch fahrzeugseitige Regelmechanismen kompensiert werden.



**Abbildung 56: Entfernungsabhängige Spannung im Versorgungsabschnitt**

### Fazit

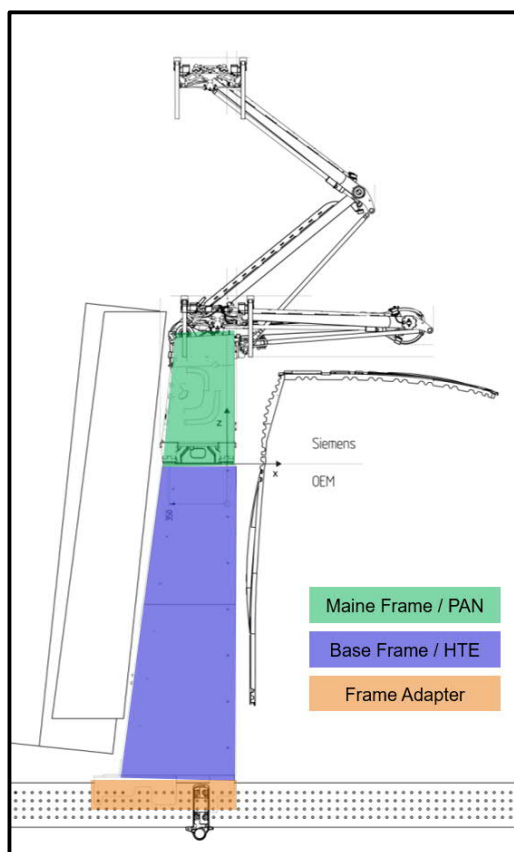
Die durchgeführten Untersuchungen [96] haben die Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Oberleitungsspannungsversorgung aufgezeigt. Über definierte Szenarien können im Vorfeld entsprechende Designmaßnahmen und Regelungsmechanismen eingesetzt werden, die sich auf die Auslegung der Hauptkomponenten des eHighway-Systems positiv auswirken und die Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit des Systems erhöhen.

### Hauptstudie: Schnittstellen vom Pantographen zum Fahrzeug

Für den Betrieb an einer Oberleitung hat der Pantograph mechanische, elektrische, pneumatische und steuerungsrelevante Schnittstellen zum Fahrzeug, die definiert und vereinheitlicht wurden. In Zusammenarbeit mit Scania und in enger Abstimmung zu der laufenden PAN-Entwicklung wurde ein Schnittstellendokument erstellt, das alle Schnittstellen zum Fahrzeug mit ihren Anforderungen beschreibt.

Die Gesamtarchitektur wurde hierzu in drei Hauptelemente gegliedert (s. Abbildung 57)

- grün: Hauptrahmen / Main Frame (PAN)
- blau: Grundrahmen / Base Frame mit HTE-Hybrid Truck Equipment
- orange: Rahmenadapter / Frame Adapter



**Abbildung 57: PAN 3rd Gen (Hauptelemente)**

In der Aufgabenteilung mit den Lkw-Herstellern ist der Stromabnehmerhersteller (Siemens Mobility) für den Hauptrahmen und alle darauf/daran/darin befindlichen Konstruktionen verantwortlich. Die Verantwortung für den Grundrahmen und den Rahmenadapter liegt beim Lkw-Hersteller (Scania). Die Verantwortung für die Integration des Grundrahmens auf dem Lkw sowie für die Integration des Pantographen auf dem Grundrahmen lag im ELANO-Projektverlauf ebenfalls bei Scania.

Das Schnittstelledokument wurde intern und mit dem Fahrzeugpartner Scania abgestimmt und zu einer herstellerunabhängigen Version weiterentwickelt.

Das Schnittstelledokument [58] definiert:

- Mechanische Themen wie Bauraum, Montage, Gewicht und Schwerpunkt
- Elektrische Themen wie Anschlussklemmen, Stromversorgung, Spannungen und Ströme
- Pneumatische Themen wie Anschlussblock, Stromversorgung, Luftdruck und -qualität
- Steuerungsrelevante Themen wie Signale, CAN-Nachrichten, ADAS

### **Fazit**

Das zunächst zusammen mit dem Fahrzeugpartner Scania erarbeitete und im weiteren Projektverlauf in eine herstellerunabhängige Version weiterentwickelte Schnittstelledokument bildet die Basis für sämtliche Klärungsgespräche mit Nutzfahrzeugherstellern, wenn es darum geht, die Fahrzeugarchitektur eines OH-Lkw in Bezug auf die Stromabnehmerintegration zu definieren bzw. weiterzuentwickeln. Somit dient dieses Dokument auch dazu, mögliche technische Vorbehalte bei interessierten OEM zu relativieren, technische Hürden und Hindernisse zu reduzieren und folglich Markteintrittsbarrieren abzubauen.

### **3.4.2.2 Optimiertes Hilfsbetriebkonzept für mehrfach hybride Lkw (EFZ.2.2)**

#### **Aufgabenstellung**

Im Hinblick auf ein möglichst breites Einsatzspektrum von oberleitungsgespeisten Lkw sollte in diesem Arbeitspaket ein optimiertes Hilfsbetriebkonzept für mehrfach hybride Lkw mit Stromabnehmern unter Berücksichtigung von unterschiedlichen projektspezifischen Rahmenbedingungen erarbeitet werden.



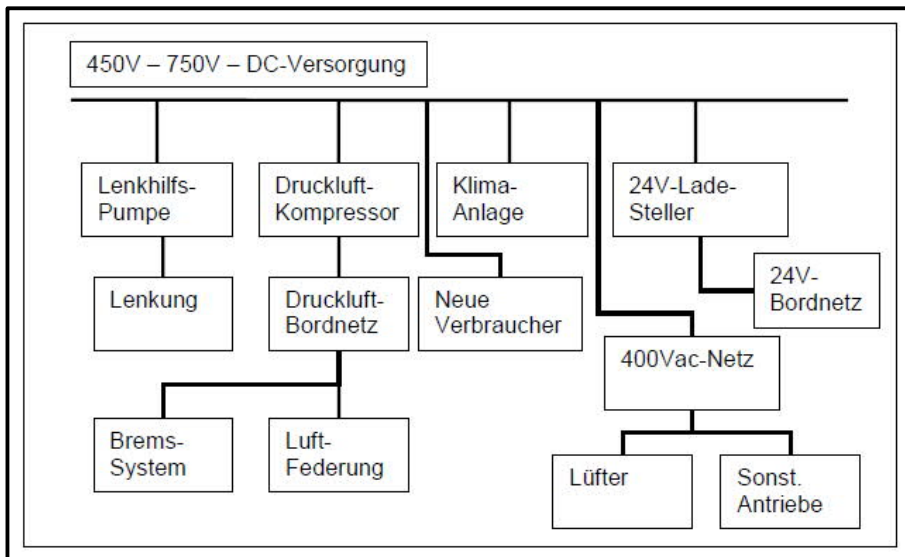
Die Arbeiten umfassten eine Anforderungsanalyse für alle Medien und Spannungsebenen und werteten bisherige Beispiele aus der Hybrid-Straßen- und Bahnfahrzeugtechnik aus. Auf Basis der Anforderungs- und Umsetzungsanalyse wurden Best-Practice-Ansätze identifiziert und ein optimiertes Hilfsbetriebe-konzept für hybridisierte Nutzfahrzeuge vorgeschlagen.

### Vorgehensweise / Ergebnisse

Es wurde zunächst eine Analyse der aktuell in Lkw verbauten Hilfsbetriebe durchgeführt. Im Wesentlichen bestehen die Hilfsbetriebe aus den Komponenten Lichtmaschine, Luftkompressor, Lenkhilfspumpe, Kühlwasserpumpe und Klimaanlage. Für einen Oberleitungsbetrieb wird Druckluft benötigt, um den Pantographen anzuheben/anzubügeln und im angebügelteten Betrieb dem Pantographen die notwendige Luft zu liefern, um über den Hubantrieb den Andruck der Schleifleisten an die Fahrdrähte zu gewährleisten. Die Druckluftversorgung erfolgt durch den fahrzeugseitigen Kompressor.

Die benötigten Komponenten werden bei herkömmlichen Lkw-Traktionsantrieben direkt vom Verbrennungsaggregat mechanisch angetrieben.

Durch die Integration von leistungsfähigen Traktionsbatterien können die benötigten Hilfsbetriebe zunehmend auch aus dieser Energiequelle gespeist werden. Dies bedingt jedoch entsprechende Spannungswandler und Hilfsbetriebe, die elektrisch betrieben werden können. Abbildung 58 verdeutlicht diesen Sachverhalt [97].



**Abbildung 58: Elektrisch versorgte Hilfsbetriebe**

Aus Gründen der Effizienz und unabhängigen Steuerbarkeit ist es vorteilhafter, dass sich jedes Hilfssystem unabhängig und direkt aus der Quelle versorgt, die auch dem Hauptantrieb als Leistungsquelle dient. Dadurch können Drehzahl und Leistung der jeweiligen Hilfsbetriebe individuell geregelt und dem jeweiligen momentanen Leistungsbedarf optimal angepasst und somit die Effizienz verbessert werden. Der Vorteil von unabhängig einsetzbaren und elektrisch versorgten Hilfsbetrieben liegt auch darin, dass die Hilfsaggregate völlig losgelöst vom Dieselmotor im Fahrzeug platzierbar sind und somit den ohnehin engen und ungeeigneten Bauraum um den Dieselmotor herum nicht noch weiter einengen.

Diese Vorteile haben auch die bisher ausgeführten Lkw-Umrüstungen in den ENUBA-Projekten sowie die Hybrid-Fahrzeuge aus den Feldversuchen in Schweden und Deutschland bestätigt.

Das Spektrum von geeigneten Hilfsbetrieben mit eigenem elektrischem Antrieb, die geeignet sind, mit dezentralen Energieversorgungen zu operieren, wird auf der Seite der Zulieferer ständig erweitert.



**Abbildung 59: Luftkompressor e-comp™ der Fa. WABCO**

## **Fazit**

Beim Betrieb von Fahrzeugen an einer Oberleitung bzw. aus einer Traktionsbatterie steht der Verbrennungsmotor nicht als Antrieb für die Hilfsaggregate zur Verfügung, was einen alternativen, vom Verbrennungsmotor unabhängigen, und damit elektrischen Betrieb der Hilfsaggregate notwendig macht.

Die vom Verbrennungsmotor direkt angetriebenen Hilfsaggregate sind bautechnisch relativ einfach zu realisieren, bringen aber betrieblich deutliche Nachteile mit sich, die sich z.B. in einem hohen Energieverbrauch niederschlagen. Ein optimaler Einsatz der Hilfsaggregate bedingt einen sowohl voneinander als auch vom verbrennungsmotorischen Fahrtrieb unabhängigen Betrieb. Aus energetischen Betrachtungen heraus ist es sinnvoll, die Hilfsaggregate nur dann zu betreiben, wenn deren Betrieb tatsächlich notwendig ist und jeweils nur mit der Drehzahl und Leistung zu beaufschlagen, die für die Bereitstellung des Hilfsmediums erforderlich ist.

### **3.4.2.3 Optimierte Varianten zur Umsetzung des Fahrzeugschutzkonzepts (EFZ.2.3)**

#### **Aufgabenstellung**

Im Zuge der ENUBA Projekte (vgl. [2] und [3]) wurden ausgehend von einer Normenanalyse, Anforderungen an den Personen- und Anlagenschutz gegenüber Betriebs- und Überspannungen beschrieben. Dabei wurden neben normalen Betriebsbedingungen auch elektrische und mechanische Fehlerbedingungen berücksichtigt. Diese Aspekte werden in der folgenden Untersuchung weiter vertieft und konkretisiert und Lösungen zur Optimierung des Gesamtsystems unter Aufrechterhaltung des hohen Schutzniveaus beschrieben.

#### **Vorgehensweise / Ergebnisse**

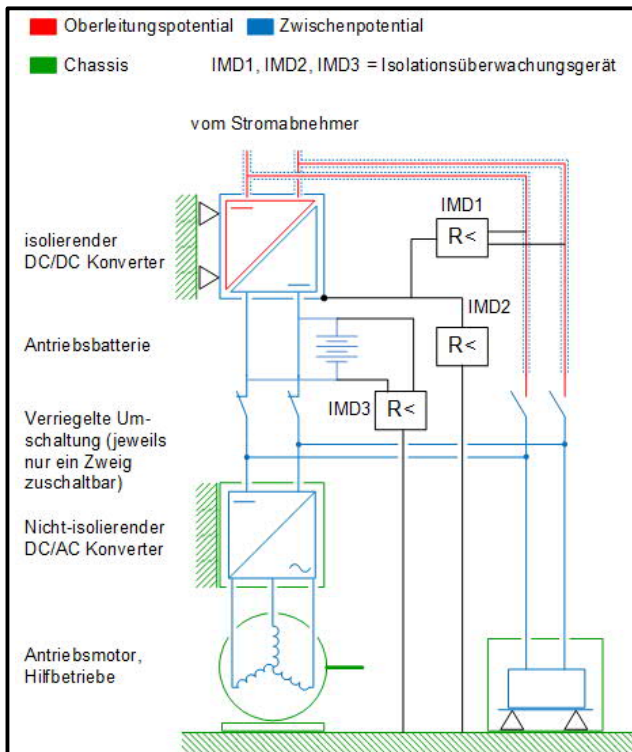
Im Mittelpunkt standen ursachenbezogene Begriffe wie Überspannungsschutz, Kurzschlusschutz oder Blitzschutz. Jede der genannten Ursachen kann wiederum Auswirkungen auf den Personen- und den Anlagenschutz haben.

Einer der Untersuchungsschwerpunkte war der Personenschutz gegen Berührungsspannungen am Fahrzeug. Es wurden insgesamt drei verschiedene Lösungen bewertet [98]. Neben dem bekannten und genutzten Verfahren der doppelten Fahrzeug-Isolation wurde eine einfache Isolierung mit zusätzlicher Schutztrennung mittels eines isolierten DC-DC-Stellers diskutiert. Als weitere Lösung zur Vermeidung von Nachteilen der zusätzlichen Schutzisolierung wurde durch das schwedische Safety Competence Center eine Lösung vorgeschlagen, bei der geschwindigkeitsabhängig zwischen einfacher Isolierung und Isolierung mit zusätzlicher Schutztrennung umgeschaltet wird.

Alle Lösungen erfüllen die Schutzziele und basieren auf den Schutzvorkehrungen der Fachgrundnormen, sind aber in der Kombination aus Basis- und Fehlerschutz nicht in Produktnormen beschrieben, da das eHighway-System in diesen Normen noch nicht berücksichtigt ist.

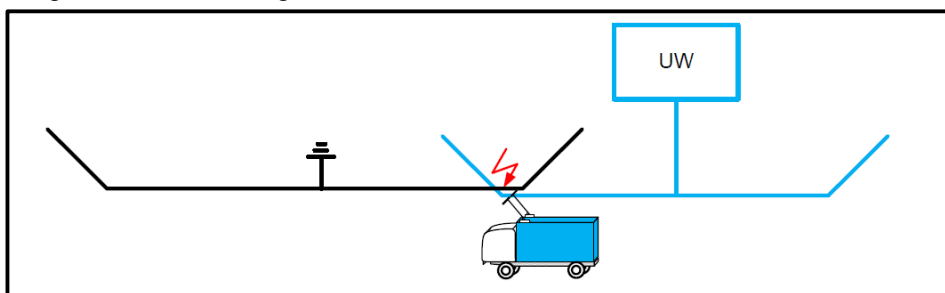
Jede Lösung verfügt über spezifische Vor- bzw. Nachteile, die es galt, weiter im Detail zu evaluieren.

Ergebnis der Evaluation war, dass die geschwindigkeitsabhängige Umschaltung zwischen einfacher Isolation (bei  $v > 30$  km/h) und Isolation mit zusätzlicher Schutztrennung ( $v \leq 30$  km/h) beibehalten wird. Die Schutztrennung wird mittels galvanisch trennendem DC-DC-Steller erreicht, s. Abbildung 60. Dieses Prinzip kann jedoch in Zukunft in Abstimmung mit den Lkw-Herstellern überdacht und ggf. geändert werden.



**Abbildung 60: Zeitweilige doppelte Isolierung durch Umschaltung auf einfache Isolierung bei hoher Fahrzeuggeschwindigkeit**

Moderne Oberleitungs-Infrastruktursysteme sind in verschiedene Speiseabschnitte aufgeteilt, um einerseits in Gefahrensituationen oder im Wartungsfall definierte Abschaltungen zu ermöglichen, aber auch um andererseits die Spannungsverhältnisse entlang der Fahrstrecke zu optimieren, vgl. dazu Abschnitte 3.3.2.2, 3.3.3 und 3.3.4). Die Übergänge der einzelnen Abschnitte können durch Parallelfelder oder Streckentrenner ausgeführt werden. Beim Überfahren dieser Abschnittswechsel in der Oberleitungsanlage kann es jedoch zu Spannungsverschleppungen oder Lichtbögen kommen, die zu Gefährdungen und/oder einem erhöhten Verschleiß an den Kontaktpartnern führen, siehe illustriert in Abbildung 61. Diese Problematik wurde in einem speziellen Kapitel des Evaluationsberichtes [98] beleuchtet, um Lösungsansätze aufzuzeigen und zu erörtern.



**Abbildung 61: Kurzschluss vom versorgten in geerdeten Abschnitt durch Schleifleiste im Parallelfeld**

Um einen Berührungsspannungsschutz bei einem Fahrleitungsschaden zu gewährleisten, wurde eine Reihe von Maßnahmen definiert, die es ermöglichen, ein potentielles Risiko auf dem eHighway zu minimieren. Dazu wurden Best-Practice Beispiele aus verschiedenen elektrischen Verkehrssystemen herangezogen und tabellarisch nach dem Ursache-Wirkungsprinzip beschrieben.

Die folgenden Maßnahmen erhöhen beispielhaft die Sicherheit für die Oberleitungsinfrastruktur:

- ein passives Fahrzeugrückhaltesystem zwischen Fahrbahn und den Masten der Oberleitung
- Überwachung der mechanischen Fahrdrabtspannung an den Nachspanneinrichtungen
- elektrische Notabschalteinrichtung an strategischen Punkten

- verminderter Abstand zwischen den Hängern, über die der Fahrdraht am Tragseil befestigt ist
- regelmäßige Inspektion und Wartung der Oberleitungsinfrastruktur
- Vermeidung von Großraumtransporten in der elektrifizierten Spur, insbesondere in Abschnitten mit reduzierter Fahrleitungshöhe
- niedriges Spannungsniveau (< 1500 V DC)
- Einbindung der Schutzplanken in die Erdungsanlage
- nur ein elektrischer Pol mit Spannung, der andere geerdet, damit wird das Risikopotenzial halbiert
- Anordnung des spannungsführenden Pols auf der dem Fahrzeugrückhaltesystem zugewandten Seite

Aus der Beobachtung von Vorkommnissen in anderen Oberleitungssystemen (Unfälle und Beinahe-Unfälle) wurde analysiert, ob es in vergleichbaren Situationen zu einer Gefährdung im eHighway-System kommen könnte. Während die vor fast 200 Jahren eingeführten Bahnsysteme ihre fahrzeugseitigen und infrastrukturellen Sicherheitseinrichtungen oft erst aus Erfahrungen mit aufgetretenen Unfällen schrittweise verbessert haben, soll und muss das eHighway-System von vornherein mit einem sehr hohen Sicherheitsniveau auf dem aktuellen Stand der Schutztechnik elektrischer Verkehrssysteme errichtet und betrieben werden.

#### 3.4.2.4 EMV-Management von fahrleitungsgespeisten Hybrid-Lkw (EFZ.2.4)

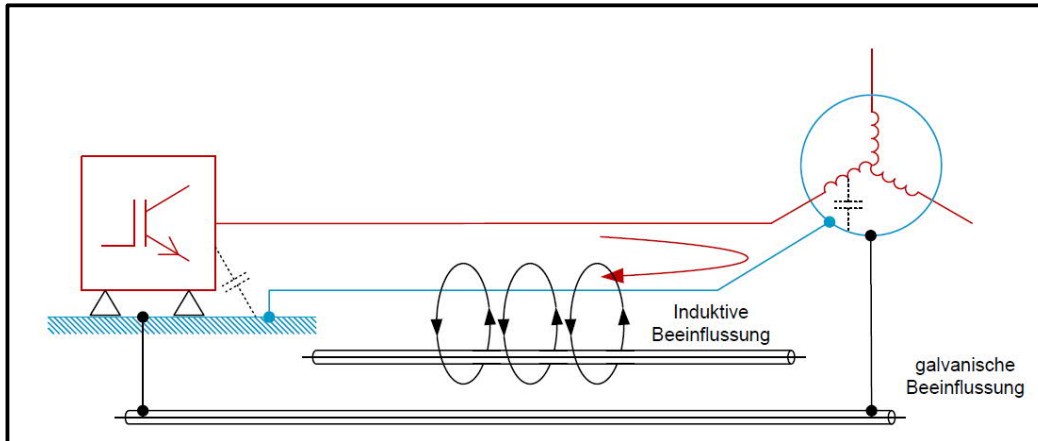
##### **Aufgabenstellung**

Im Arbeitspaket „EFZ.2 - Fahrzeugschnittstellen und Stromabnehmerintegration“ wurden mehrere Studien als Grundlage für die Öffnung des eHighway-Systems für verschiedene Fahrzeughersteller durchgeführt. Dazu bedurfte es auch einer Analyse und Umsetzung der EMV-Richtlinien (insbes. Verbindungstechnik, Schirmung, Kontrollmessungen und Verifikation) sowie der Optimierung der Netzfilter für den Oberleitungsbetrieb einschließlich eines technologischen Konzepts mit anschließender Erprobung. Als Quelle der EMV-Störungen konnten die Antriebs- und Hilfsbetriebeumrichter des Lkw identifiziert werden, die über die Verkabelung und die Oberleitung in die Umgebung abstrahlen können. Da eine Schirmung der Oberleitung nicht möglich ist und zudem eine Überlagerung der Störungen aller Fahrzeuge in einem Abschnitt stattfindet, müssen die Störungen bereits an der Quelle vermindert werden.

##### **Vorgehensweise / Ergebnisse**

Ausgehend von den Betrachtungen im Zuge der ENUBA-Projekte und der erstellten technischen Beurteilungen wird zwischen einem Betrieb an der Oberleitung und abseits der Oberleitung unterschieden. Für beide Betriebsfälle ergeben sich unterschiedliche technische Randbedingungen, unterschiedliche Normung mit verschiedenen Grenzwerten und verschiedenen Nachweismethoden. Im Oberleitungsbetrieb kommt es zu den aus dem elektrischen Bahnbetrieb bekannten EMV-Emissionen. Diese resultieren neben den durch Antriebs- und Hilfsbetriebeumrichter erzeugten Oberschwingungen durch Emissionen in Folge der Schwankungen der Kontaktgüte zwischen Stromabnehmer und Fahrleitung sowie durch Resonanzen in der Fahrleitungsinfrastruktur.

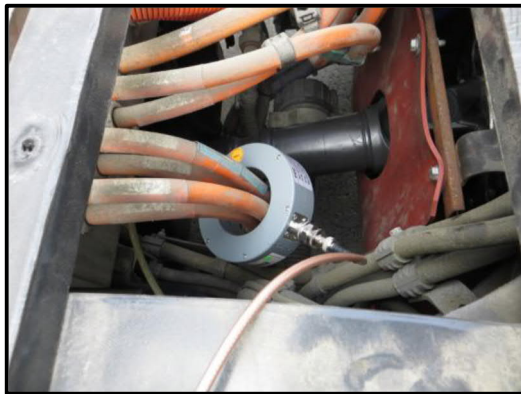
Um EMV-Störschutzmaßnahmen zu definieren, wurden zunächst die verschiedenen leistungselektronischen Komponenten untersucht und mögliche Phänomene theoretisch aufgezeigt. In einem zweiten Schritt wurden die möglichen Koppelpfade zur Ausbreitung der Störungen jeweils für den AC- und den DC-Kreis ermittelt. Abbildung 62 zeigt ein Beispiel für die ermittelten Koppelpfade im AC-Kreis des Antriebsumrichters.



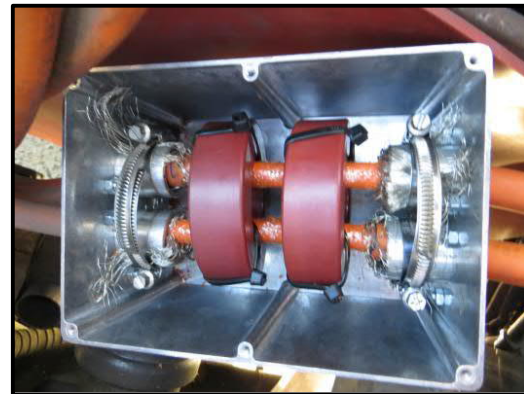
**Abbildung 62: Beispiel für induktive und galvanische Störeinkopplung durch Streukapazitäten**

Im nächsten Schritt wurden die verschiedenen EMV-Entstörungsmaßnahmen auf ihre Anwendbarkeit in der eHighway-Technologie untersucht, vgl. Abbildung 64. Dabei zeigte sich, dass eine Reihe bewährter Maßnahmen im DC-Kreis infolge des doppelten Isolationskonzeptes sowie durch die Verbindung mit einer Oberleitung nicht anwendbar sind. Dagegen ist im AC-Bereich ein geschlossenes Schirmungskonzept in Verbindung mit einer kompakten Equipotentialfläche als effiziente und wirksame Maßnahme anwendbar.

Im DC-Bereich wurde als mögliche Maßnahme die Installation von EMV-Filtern, bestehend aus Induktivitäten, Kapazitäten oder einer Kombination daraus, definiert. Um eine Induktivität einzufügen, wurde ein aktiver Leiter durch einen Ringkern aus Ferritmaterial geführt, um hochfrequente Impulse zu dämpfen. Für einen Testaufbau war erschwerend, dass der Kabelschirm unterbrochen und um die Induktivitäten herumgeführt werden musste. Abbildung 64 zeigt, wie die Schirme über ein Aluminiumgehäuse um die Ferritkerne herum durchverbunden wurden. Dies verdeutlicht gleichzeitig, warum aus praktischen Gründen keine vergleichende Untersuchung mehrerer Filtervarianten durchführbar war. So war es u. a. nicht möglich, in dem Versuchsaufbau zusätzlich Kondensatoren zwischen die aktiven Leiter und den Schirm einzufügen.



**Abbildung 63: Störstrommessung an den Generatorkabeln**



**Abbildung 64: Provisorischer Einbau von Ringkernen**

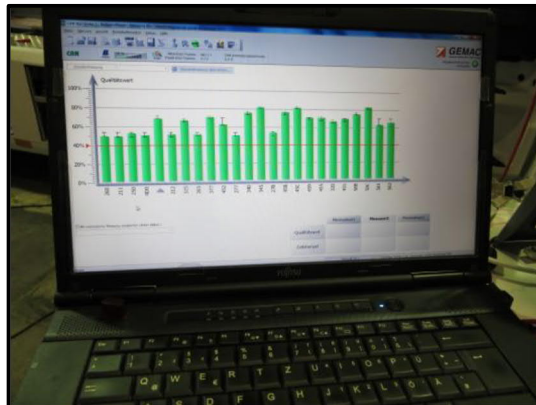
Als kritischste Störquellen bei Hybrid-Lkw wurden die verschiedenen CAN-Busse identifiziert. Durch ihre große räumliche Ausdehnung auf dem Fahrzeug und ihre direkte Nachbarschaft zu den Störquellen zeigten sie eine besonders starke Störeinkopplung und spürbare Einflüsse auf die Signalqualität. Dies war basierend auf Erfahrungen mit Elektro-Pkw und Elektro-Bussen zu erwarten. Die eingesetzten Filtermaßnahmen im DC-Kreis wurden neben ihrer Wirkung auf die Störpegel in den DC-Kabeln selbst insbesondere auch hinsichtlich der verbesserten CAN-Signalqualität bewertet. Aus den theoretischen Vorbetrachtungen wurde bezüglich der CAN-Topologie abgeleitet, dass eine konsequente galvanische Trennung der CAN-Kommunikation zwischen den beiden Isolationslayern mittels optischer CAN-Bus-



Umsetzer erforderlich ist. Andernfalls ermöglichen die CAN-Leitungen die Umgehung der installierten Filtermaßnahmen durch die Störsignale und führen zu einem erneuten Anstieg der Störpegel. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen konnte ebenfalls messtechnisch bestätigt werden, s. Abbildung 65 und Abbildung 66.



**Abbildung 65: Störstrommessung einer CAN-Leitung in der Fahrerkabine**



**Abbildung 66: Prüfung der Übertragungsqualität mit einem CANalyzer**

### Fazit

Die in der Bahntechnik bewährten Filtermaßnahmen haben sich auch für den eHighway-Truck als geeignet und effektiv erwiesen [99]. Die eingesetzten Bahnkomponenten sind für den Betrieb an einer Zugsammelschiene ausgelegt. Dennoch lässt sich diese bewährte Technik unverändert auf Oberleitungs-Lkw anwenden.

Für Lkw-Hersteller ist dieser Problemkreis teilweise Neuland, was bei diesen Phänomenen die Übertragung von Erfahrungen aus der Bahntechnik erforderlich macht. Dabei müssen Anpassungen an den Massenmarkt Lkw erfolgen. Bei Verwendung von Komponenten aus dem Industriebereich fehlen die erforderlichen Filtermaßnahmen und müssen nachgerüstet werden. Es ist jedoch mit fortschreitender Hybridisierung von Nutzfahrzeugen insgesamt davon auszugehen, dass dafür geeignete Komponenten am Markt verfügbar sein werden und ohne Modifikation eingesetzt werden können.

Nach dem erfolgreichen Probeaufbau wurden die Filtermaßnahmen in einen festen Einbau überführt und dabei auch die aus den theoretischen Betrachtungen als zweckmäßig erkannten Y-Kondensatoren realisiert, die beim Probeaufbau nicht integriert werden konnten. Die abschließenden Messungen wurden im Arbeitspaket TEB.6.4 (vgl. Kap 3.5.4.2) durchgeführt.

## **3.4.3 Umrüstung und Weiternutzung der ENUBA-Erprobungsträger (EFZ.3 / EFZ.4)**

### **3.4.3.1 ENUBA – Actros #1 als Stromabnehmer-Erprobungsträger (EFZ.3)**

#### **Aufgabenstellung**

Im Verlauf des Projekts ELANO sollte der in Iterationszyklen weiterentwickelten Pantograph als dritte Generation entstehen und auf Lkw integriert und getestet werden.

Da nicht für jeden Entwicklungszyklus ein eigenes Trägerfahrzeug bereitgestellt werden kann, war ein modularer Erprobungsträger mit definierten Schnittstellen erforderlich, mit dem die einzelnen Stromabnehmer-Entwicklungsschritte erprobt und mittels vereinfachter Diagnose-Schnittstellen effizient evaluiert werden konnten. Als Erprobungsträger bot sich einer der Versuchs-Lkw aus dem Projekt ENUBA an, der über ein leistungsfähiges serielles Hybrid-Antriebssystem verfügt.

Dieses Projektelement (EFZ.3) umfasste Anforderungsanalyse, Design, Umrüstung, Bereitstellung der Schnittstellen sowie Abnahme der Umrüstung und Qualifizierung des Actros #1 aus dem Projekt ENUBA [2]. Dazu gehörten folgende Entwicklungsarbeiten:

- Analyse des Ist-Zustands des Fahrzeugs sowie der Anforderungen aus der Stromabnehmerentwicklung zur Entwicklung eines Umrüstungskonzepts und Vorschlag eines elektrischen und mechanischen Designs (EFZ.3.1)
- Rückbau des Stromabnehmers aus der ersten Projektphase und Trennung der elektrischen und mechanischen Verbindungen zwischen Antriebssystem und Tragrahmen zur Erweiterung des Fahrzeugrahmens (EFZ.3.2)
- Design, Konstruktion und Bereitstellung des Einbauraums mit standardisierten Schnittstellen einschließlich mechanischer Verstärkung zur Erfüllung der Festigkeitsanforderungen (EFZ.3.3)
- Planung, Design und Bereitstellung elektrischer, steuerungstechnischer und pneumatischer Hilfsmedien und Datenverbindungen an standardisierten Schnittstellen (EFZ.3.4)
- Umbau und Inbetriebsetzung des Erprobungsträgers einschließlich Fahrproben, Umsetzung und Wirkungskontrolle der in EFZ.2.3 und EFZ.2.4 definierten Schutzmaßnahmen und Verbesserungen im EMV-Management (EFZ.3.5)
- Vorbereitung, Begleitung und Dokumentation der TÜV-Abnahmen mit dem Ziel einer Zulassung als Erprobungsfahrzeugs mit standardisierten Stromabnehmerschnittstellen und Vorgaben eines Schutzkonzepts, sodass die TÜV-Abnahme nur einmalig erfolgen kann und nicht in jedem Stromabnehmer-Zyklus wiederholt werden muss (EFZ.3.6)

### **Ergebnisse / Vorgehensweise**

Das Messfahrzeug Actros #1 vom Typ MB Actros 1841 wurde in zwei Phasen zum Stromabnehmer-Erprobungsträger umgerüstet.

- Phase 1 als Planungs-, Vorbereitungsphase und erste Umbauphase
- Phase 2 als abschließende Umbauphase der Fahrzeugsysteme einschließlich der Stromabnehmerintegration eines Funktionsmusters

Hierfür wurde ein technisches Umbaukonzept entwickelt, wodurch zukünftige Stromabnehmer ohne große Aufwände in das Fahrzeug integriert werden können.

Wesentliche Konzept-Bestandteile waren:

- Kurze Leitungswege vom Stromabnehmer zum Fahrzeug
- Aufnahme von zusätzlichen Messgrößen, welche für die Stromabnehmer-Weiterentwicklung besondere Relevanz haben, z.B.:
  - Strom- und Spannungssensoren im Hilfsbetriebkreis
  - Luftdruck- und Luftmengenverbrauchsmesser
  - Wind- und Niederschlagssensor
- Einbau einer Kamera samt Innendisplay und Rekorder, die die Bewegungsspiele des Stromabnehmers filmt
- Ermöglichung des elektrischen Fahrbetriebs bei umgepolter Oberleitung

Während der Vorbereitungen wurden mit den Firmen Paul Nutzfahrzeuge GmbH sowie CTM Fahrzeugbau GmbH zwei Partner gewonnen, welche die fahrzeugseitigen Umbaumaßnahmen erfolgreich umgesetzt haben.

### **Phase 1**

Bei der Fa. Paul Nutzfahrzeuge GmbH in Passau wurden folgende Umbauaktivitäten durchgeführt:

- Verlängerung des Fahrzeugrahmens für die Aufnahme eines Stromabnehmersystems zwischen Fahrerkabine und Kofferaufbau
- Verlängerung der Signal-, Energie- und Druckluftleitungen, damit die Funktionsfähigkeit des Fahrzeugs erhalten bleibt
- Konstruktion und Einbau einer Verteilerbox zum Anschluss der Energiekabel sowie der 24 V Spannungsversorgung des Stromabnehmers, Integration von Strom- und Spannungssensoren sowie benötigte Schütze zur Umschaltung der Polarität

- Einbau der Kamera auf dem Kofferaufbau sowie des Displays und Rekorders im Fahrerhaus
- Installation eines frei programmierbaren Leuchtmelderfeldes im Armaturenbrett zur zusätzlichen Anzeige von Stromabnehmerinformationen



Abbildung 67: Actros #1 nach Phase 1

## Phase 2

In der Phase 2 wurden des Weiteren durch die Fa. Paul folgende Umbauaktivitäten durchgeführt:

- Rückbau des alten Stromabnehmers aus dem Projekt ENUBA
- Einbau eines 40 l Druckluftbehälters inkl. Bypass
- Demontage eines Hilfsbetriebeumrichters
- Ersatz einer Lichtmaschine durch einen 640 V / 24 V -Steller
- Ersatz einer mechanischen Lenkhilfspumpe durch eine elektrisch betriebene Pumpe

Bei der Firma CTM wurde im Anschluss die Integration des neu entwickelten Stromabnehmer-Funktionsmusters auf das Fahrzeug durchgeführt. Des Weiteren wurden vorbereitende Tätigkeiten für die Integration eines spurgeführten Lenkassistenten (ADAS) abgeschlossen.

Nach Abschluss der Stromabnehmerintegration fand eine ausführliche Inbetriebnahme und Erprobung des neuen Funktionsmusters auf der eHighway Versuchsanlage in Groß Dölln (vgl. Kap. 3.5.1.1) statt. Im Anschluss folgte die Inbetriebnahme des von der Firma IAV entwickelten ADAS auf dem Fahrzeug.



Abbildung 68: Aufbau des Stromabnehmer-funktionsmusters

## Fazit

Der Entwicklungs- und Umbauzeitraum erstreckte sich mit fast zwei Jahren über ein langes Zeitfenster. Dies ermöglichte der Entwicklungsabteilung und den Projektpartnern die vielschichtigen Maßnahmen an diversen Systemkomponenten mit Struktur umzusetzen, wodurch ein erfolgreicher Abschluss dieses Arbeitspakets ermöglicht werden konnte. Der Lkw stand rechtzeitig der Stromabnehmerentwicklung als modularer und multifunktionaler Erprobungsträger zur Verfügung.

Die Stromabnehmerintegration ermöglichte es der Entwicklung, wichtige Erkenntnisse zur Weiterentwicklung des Stromabnehmers zu sammeln und in das nächste Entwicklungsincrement der Stromabnehmer einzubringen. Das Fahrzeug Actros #1 wurde damit zu einem Hauptbestandteil der erfolgreichen Stromabnehmerentwicklung im Projekt ELANO.

### 3.4.3.2 ENUBA-Actros #2 - Aufrüstung Stromabnehmer-Steuerung (EFZ.4)

#### Aufgabenstellung

Das bereits im Projekt ENUBA entwickelte und umgerüstete Erprobungsfahrzeug Actros #2 mit dem Stromabnehmer der 1. Generation sollte auch im Projekt ELANO für den weiteren Test- und Erprobungsbetrieb genutzt werden. Dazu war es sinnvoll und erforderlich, Teile der im Projekt ENUBA 2 entwickelten Steuerungsfunktionen und Hardware-Verbesserungen auf dieses Erprobungsfahrzeug des Projekts zu übertragen.

Hierfür wurden zahlreiche Ergänzungen und Modifikationen an diversen Teilsystemen des Pantographen durchgeführt, welche Sensorik, Soft- und Hardware des Pantographen betrafen. Aufgeteilt wurde dieses Thema in vier Teilbereiche:

- Anpassentwicklung und Überführung der Software-Versionen einschließlich der Sensorik-Auswertungen auf den damals aktuellen Entwicklungsstand unter Weiternutzung des ursprünglichen mechatronischen Konzepts. (EFZ.4.1)
- Re-Konfiguration zum Einsatz der aktuellen Steuerungs-Software des Stromabnehmers, einschließlich Hardware-Komponenten und Integrationsplanung. (EFZ.4.2)
- Re-Konfiguration zur Umsetzung des aktuellen Bedienungskonzepts (integriertes User-Interface und HW-Buttons) des Stromabnehmers, einschließlich Hardware-Komponenten und Integrationsplanung (EFZ.4.3)
- Integration der Windkraftmessung am Stromabnehmer und Einbeziehung der Windmessung in die Kraftregelung, d.h. stärke- und richtungsabhängige Nachregelung der Andruckkraft des Stromabnehmers (EFZ.4.4)

#### Ergebnisse / Vorgehensweise

Zahlreiche in ENUBA 2 entwickelte Systemteile wurden am Erprobungsfahrzeug Actros #2 durch sinnvolle Teilmaßnahmen überarbeitet und auf einen neuen Stand gebracht.

So wurde z.B. ein Schalterpanel in die Fahrzeugarmatur eingebaut, mit welcher sich der Pantograph aktivieren/deaktivieren lässt. Diese Funktionen waren zuvor rein über das PAN-Touchdisplay zu steuern, welches zukünftig aber vorrangig als PAN-Systemstatusanzeige genutzt werden sollte. Mit dem Schalterpanel war dann auch das Heben und Senken per Tastendruck möglich.

Des Weiteren wurde ein neuer Einbauort für das im Projekt ENUBA 2 vom Projektpartner DLR entwickelte Tablet definiert, welches sich nun rechts vom Handbremshebel befindet. Damit wurde die Bedienbarkeit des Tablets für den Fahrer verbessert (Softkeys für Heben und Senken des PAN sowie Darstellung der PAN-Position am Fahrdraht) und aus dem direkten Sichtfeld des Fahrers auf die Strecke entfernt.

Das PAN-Touchdisplay wurde aus der Mittelkonsole heraus auf eine freie Position über dem Kopf des Fahrersitzes eingebaut. Da es als Entwicklertool primär bei Optimierungs- und Entwicklungsaufgaben genutzt werden soll, wird es somit bei Test- und Erprobungsfahrten nicht aktiv benötigt und behindert damit nicht die Sicht des Fahrers.



**Abbildung 69: Bedienschalter in Fahrerkabine (links) / PAN-Touchdisplay über Kopf (rechts)**

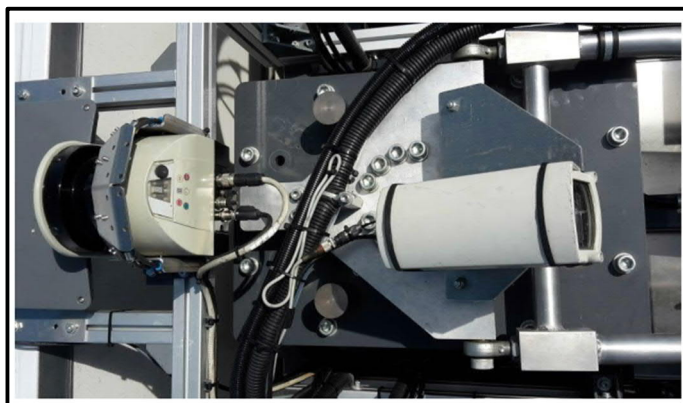


Der aus dem Projekt ENUBA übernommene Mittelkonsolen-PC wurde durch eine neue Variante einer Microbox 427D ersetzt und unter der Rückbank eingebaut. Der Touchscreen verblieb an seinem ursprünglichem Einbauort, wurde aber zu einem reinen Kameradisplay umfunktioniert. Eine bereits vorinstallierte Dachkamera mit Sicht auf die PAN-Schleifleisten wurde reaktiviert und diente ab dann der Beobachtung der Kontaktpunkte von Schleifleiste und Fahrdrabt.

Eine Erweiterung zur optimierten Nutzung des Pantographen war die Implementierung von Wind- und Temperatursensoren, welche anhand der aufgenommenen Daten über die PAN-Steuerbox die Kontaktkräfte der PAN-Schleifleisten hin zur Fahrleitung auf konstantem Niveau halten, s. Abbildung 70.



**Abbildung 70: Einbauposition von Wind- und Temperatursensoren**



Ein wesentlicher Teil der Optimierungsaufgaben bestand in der Umsetzung des Sick-Laserscanners vom Frontaufbau (vor der Fahrerkabine) auf eine Dachinstallation. Damit wurden Erkenntnisse aus dem optimierten Aufbau des Actros #1 umgesetzt, wonach ein geringerer Abstand zwischen Scannerposition und Fahrdrabt für die Fahrdrabterkennung vorteilhaft ist. Ein zweiter, ursprünglich für Vergleichszwecke im Lkw-Frontbereich installierter Laserscanner wurde demontiert.

**Abbildung 71: Neuer Dach-Einbauort des Laserscanners (links im Bild)**

### **Fazit**

Die geplanten Aktivitäten konnten vollständig umgesetzt werden und führten zu den erwarteten Verbesserungen im Systemverhalten des Pantographen. Ebenso erfolgte die planmäßige Umsetzung von Funktionserweiterungen und Optimierungen bei den Bedieneigenschaften für den Fahrer ebenso wie für das Test- und Entwicklungspersonal. Mit dem erreichten Stand der Technik konnten die geplanten Mess- und Erprobungsreihen solide und zuverlässig durch- bzw. weitergeführt werden.

## **3.4.4 Optimierte Antriebssteuerungen für den Oberleitungsbetrieb (EFZ.7)**

### **Aufgabenstellung**

Im Vorgängerprojekt ENUBA 2 wurde eine Sattelzugmaschine zu einem dieselelektrischen Lkw mit seriell Hybridantrieb umgebaut und mit einem Stromabnehmer ausgerüstet (vgl. ENUBA 2 Abschlussbericht [3] Abschnitt 3.5). Die in ENUBA 2 durchgeführten Systemtests beinhalteten sowohl die Tests zur Verifikation der Anforderungen aus der Spezifikation als auch die Überprüfung wichtiger Überwachungs- und Schutzfunktionen der Komponenten.

Die Einbindung verschiedener interner Energiespeichertypen sowie lastrichtungsabhängiger, sowohl externer als auch interner Energiequellen und- senken stellte komplett neuartige und komplexe



Anforderungen an die Steuerungskomponenten elektrischer Nutzfahrzeugantriebe, die Ansatzpunkte für Optimierungen im Folgeprojekt ELANO boten.

Insofern bestand ein hoher Entwicklungs- und Anpassungsbedarf im Hinblick auf eine robuste und auf andere Fahrzeugtypen und -hersteller übertragbare Antriebssteuerung. Zielstellung in diesem Arbeitspaket war folglich die Optimierung der Steuerungslandschaft durch Einsatz neuartiger Hardware- und verbesserter Software- und Kommunikationsstrukturen mit anschließender Evaluation durch Erprobung.

**Vorgehensweise / Ergebnisse**

Während der Projektlaufzeit offenbarten sich gelegentlich Probleme in der Antriebssteuerung auf der Sattelzugmaschine EMMA und dem Batterieaufleger. Diese Probleme wirkten sich wiederholt auf die Verfügbarkeit des Sattelzuges aus.

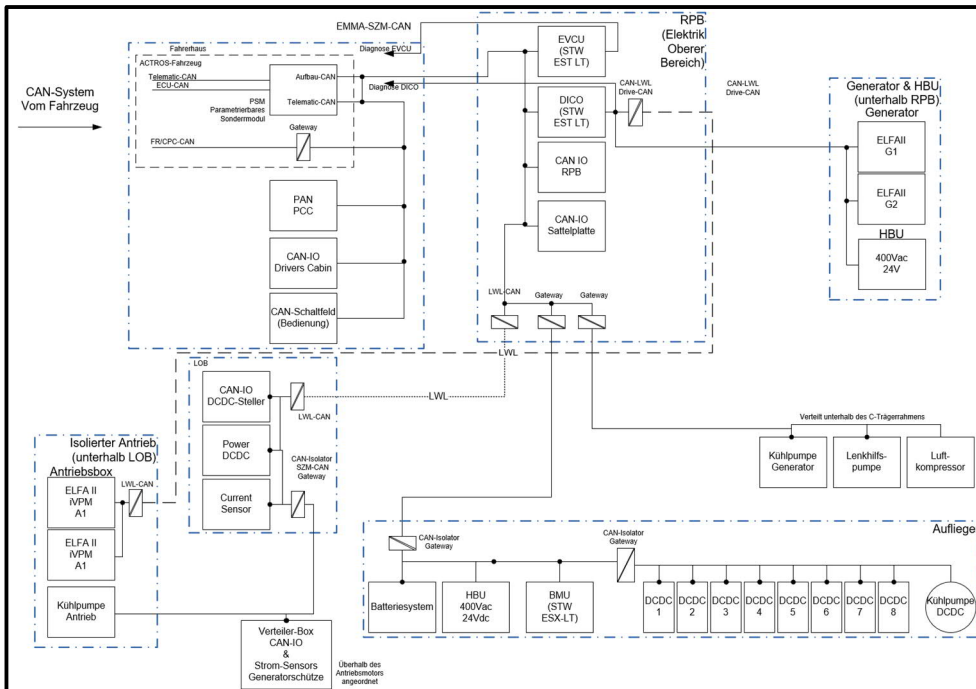


Untersuchungen zeigten, dass die Hauptursache für die geringe Zuverlässigkeit des Sattelzuges Kommunikationsstörungen auf den neu hinzugefügten Steuerbussystemen, den CAN-Bussen, waren, die insbesondere durch das 3-stufige Isolationskonzept des eTrucks erheblich begünstigt wurden.

In iterativen EMV-Messkampagnen wurden diverse Störquellen und Störseenen innerhalb der neu hinzugefügten Fahrzeugsteuerkomponenten und Fahrzeugtechnologien identifiziert, siehe dazu Abschnitt 3.4.2.4.

**Abbildung 72: Sattelzugmaschine EMMA**

Durch den versuchsweisen und zunächst provisorischen Einbau von geeigneten induktiven und kapazitiven Filtern konnten die Störquellen deutlich entschärft und die Störseenen erheblich abgeschirmt und geschützt werden. Damit wurde Grundlagenarbeit auf dem Gebiet oberleitungsgespeister Lkw geleistet.



**Abbildung 73: SZM EMMA, neue CAN-Topologie**

Um die Einstrahlung von elektromagnetischen Störungen in die neuen Steuerbussysteme wesentlich zu minimieren, wurde außerdem das komplette Steuerbussystem dahingehend geändert, dass kleinere und in sich abgeschlossene Bussegmente entstanden. Diese wurden vor allem beim Übergang von einer Isolationsschicht auf eine andere Isolationsschicht durch eine EMV-technisch unempfindliche Lichtwellenleitertechnologie ausgeführt bzw. durch mehrere, besser geeignete Entkopplungskomponenten ersetzt.

Die Abbildung 73 zeigt die neu hinzugefügte, erweiterte Steuerstruktur des Sattelzuges.

Parallel zu den oben dargestellten Untersuchungen und Messungen wurde damit begonnen, gemeinsam mit einer Siemens-internen Schaltschrankfertigung und der Firma Paul Nutzfahrzeuge GmbH eine anforderungsgerechte und alltagstaugliche Einbaulösung für die zusätzlichen Filterelemente zu definieren. Diese konnte während der Projektlaufzeit realisiert und in den Lkw integriert werden.

### **Nachrüstung, Inbetriebnahme und Funktionsnachweis eines Überspannungsableitwiderstandes an der Sattelzugmaschine EMMA**

Bei den anschließenden Mess-, Test und Erprobungsfahrten des elektrischen Sattelzuges an der Oberleitung wurden immer wieder Abschaltungen des Antriebssystems registriert, die gehäuft bei der Überfahrt des Streckentrenners auftraten. Die Analyse ergab, dass diese Abschaltung durch Überspannungen im Zwischenkreis ausgelöst wurde, s. Abschnitt 3.4.2.1.

Durch weiterführende messtechnische Untersuchungen und Simulationen konnte das Auftreten der Überspannungen auf Kontaktverlust der Schleifleisten des Pantographen zur Oberleitung zurückgeführt werden.

Das zugrunde liegende Phänomen ist ein Stromstoß aus der Oberleitung in das Antriebssystem des Fahrzeugs bei wiederkehrendem Kontakt der Schleifleiste an die Oberleitung nach dem Kontaktverlust. Dieser Stromstoß führt im Antriebssystem zu einer ungewollten Spannungsüberhöhung, die je nach den Randbedingungen die maximale Spannungstoleranz des Umrichters überschreitet und somit ein Abschalten des Antriebsumrichters zur Folge hat.

Zur Begrenzung der auftretenden Überspannungen auf vom Antriebssystem tolerierte, niedrigere Werte wurde ein Überspannungsableitwiderstand in die Sattelzugmaschine integriert, dessen Ansteuerung durch einen der beiden Antriebsumrichter erfolgt.

Auch dieses Beispiel zeigt, wie im Projekt ELANO Erkenntnisse aus dem Erprobungsbetrieb der verschiedenen Fahrzeuge auf der Versuchsanlage in umfassende Systemstudien überführt wurden und dann rückwirkend Ergebnisse dieser Studien zu Änderungen und Optimierungen des Fahrzeugaufbaus führten. Diese Erkenntnisse können bei zukünftigen Fahrzeuggenerationen berücksichtigt werden und erhöhen die Robustheit und Zuverlässigkeit des Systems.

### **Fazit**

Im Rahmen von umfangreichen Systemtests konnte die Wirksamkeit der Maßnahmen „Erweiterte CAN Topologie“ und „Nachrüstung Überspannungsableitwiderstand“ und damit die Funktionsstabilisierung der Sattelzugmaschine nachgewiesen werden. Damit erfolgte die Sicherstellung eines zuverlässigen Betriebs des gesamten Sattelzuges in allen Betriebsmodi.

### 3.5 Test-/Erprobungsbetrieb und Laborprüfungen – TEB

#### 3.5.1 Erprobungsbetrieb auf der eHighway Versuchsanlage in Groß Dölln

##### 3.5.1.1 Betrieb der Versuchsanlage Groß Dölln (TEB.1)

Im Vorgängerprojekt ENUBA 2 [3] wurde die eHighway-Versuchsanlage Groß Dölln an ihrem heutigen Standort auf einem ehemaligen Militärflugplatz [100] errichtet. Die Versuchsanlage wurde auch im Projekt ELANO während der gesamten Projektlaufzeit für die intensive Erprobung der vorhandenen Erprobungsträger sowie der Neu- und Weiterentwicklungen genutzt. Ein zuverlässiger und sicherer Anlagenbetrieb ist für die Erreichung der Projektziele von gleicher Bedeutung wie die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Projekt.

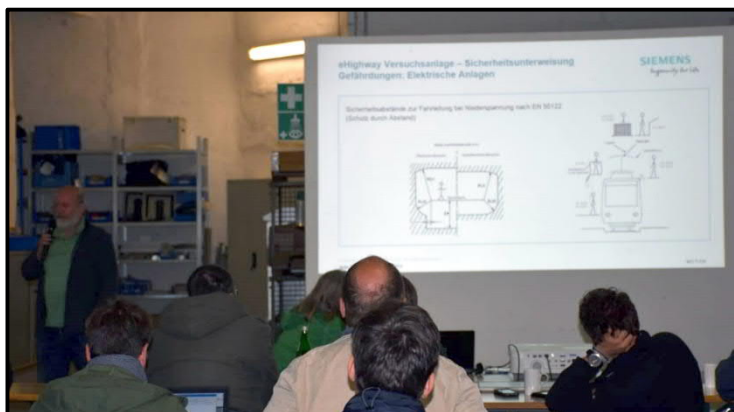
Alle Arbeiten in diesem Projektelement und dem Projektelement „Betrieb der Erprobungsträger“ (vgl. Kap. 3.5.1.2) dienen vor allem der Bereitstellung eines sicheren Arbeitsumfeldes und waren damit Voraussetzung für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den anderen Arbeitspaketen. Alle gesetzlichen Regelungen und Verordnungen, wie z.B. das Arbeitsschutzgesetz [101] und DIN-Normen wie DIN VDE 105-100 [16] wurden umgesetzt und ihre Umsetzung regelmäßig kontrolliert. Teil der Sicherheitsarchitektur sind turnusmäßige Schulungen der für den Anlagenbetrieb obligatorischen Rolleninhaber, wie z.B. Anlagenkoordinatoren, Schaltberechtigte und Lkw-Fahrer. Tabelle 11 gibt einen Überblick über das Schulungs-/Unterweisungskonzept der Versuchsanlage.

**Tabelle 11: Schulungs-/Unterweisungskonzept eHighway Versuchsanlage**

Personengruppe / Rolleninhaber auf der Versuchsanlage	Bezeichnung der Schulung / Unterweisung	Intervall	Anbieter (Schulungsort)
Alle am Testbetrieb Beteiligte	Sicherheitsunterweisung	jährlich	intern (Groß Dölln)
Ersthelfer	Erste-Hilfe-Lehrgang	2-jährig	extern
Brandschutzhelfer	Lehrgang „Betrieblicher Brandschutz“	3-jährig	Siemens Werksfeuerwehr (Siemens Standort)
Anlagenkoordinator	Schulung	jährlich	intern (Groß Dölln)
vEFK	Schulung	3-jährig	extern
vEFK-HV	Schulung	3-jährig	extern
EFK (Elektrofachkraft) / Schaltberechtigte	Unterweisung (theoretisch und praktisch)	jährlich	intern (Groß Dölln)
EFK-HV (Elektrofachkraft-Hochvolt, für Hybridfahrzeuge)	Unterweisung (theoretisch und praktisch)	jährlich	intern (Groß Dölln)
Lkw-Fahrer	Fahrerunterweisung (theoretisch und praktisch)	jährlich	intern (Groß Dölln)

Alle intern durchgeführten Schulungsmodulare werden jährlich komprimiert an zwei Tagen im Mai / Juni auf der Versuchsanlage durchgeführt. Dafür wird der Shelter entsprechend zu einem großen Schulungsraum umfunktioniert.

Praktische Demonstrationen der Schutzeinrichtungen und Schutzausrüstungen an den Anlagen und Fahrzeugen sind weitere zentrale Bestandteile.



**Abbildung 74: Unterweisung durch vEFK bzgl. Gefährdungen "Elektrische Anlagen"**

Während der Projektlaufzeit wurde die umfangreiche Arbeitsschutz-Dokumentation erweitert und aktualisiert. Sie umfasst u.a.:

- Anlagenhandbuch als übergeordnete Arbeitsanweisung für den Anlagenbetrieb
- Gefährdungsbeurteilungen, Betriebsanweisungen, Arbeitsanweisungen
- Gefahrstoffkataster
- Arbeitsmittel-Kataster mit Wartungsintervallen und Prüffristen
- Notfallplan

Das Anlagenhandbuch adressiert sowohl Aspekte des Arbeits- und Gesundheitsschutzes als auch Themen der Arbeitsorganisation und ist für alle auf der Versuchsanlage durchgeführten Tätigkeiten verbindlich.

Inhaltsverzeichnis (Anlagenhandbuch)	
1. Einführung	
2. Verfahrensgrundsätze	Anlagen zum Anlagenhandbuch sind
3. Abkürzungen, Definitionen und Verweise	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ alle Gefährdungsbeurteilungen (Arbeitssicherheit)</li> <li>▪ alle Betriebsanweisungen (Arbeitssicherheit)</li> <li>▪ Liste der Gefährdungsbeurteilungen (Gefahrstoffe)</li> <li>▪ Liste der Betriebsanweisungen (Gefahrstoffe)</li> </ul>
4. Lage und Einrichtungen der Versuchsanlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Arbeitsanweisung „Ausführen von Schalthandlungen“</li> <li>▪ Arbeitsanweisung „Führen eines Hybrid-LKW“</li> </ul>
5. Vorbeugender Arbeits- und Gesundheitsschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Arbeitsanweisung „EHS Anlagenkoordinator“</li> <li>▪ EHS-Organisation / EHS-Rollen</li> </ul>
6. Personen und Personengruppen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ eMail „Tragen von Sicherheitsschuhen“</li> </ul>
7. Abläufe und Testbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lageplan Notfallausrüstung</li> <li>▪ Instandhaltungsplan</li> </ul>
8. Stör- und Notfallmanagement	
9. Routinekontrollen und Inspektionen	
10. Anlagenverzeichnis	
11. Abbildungsverzeichnis	
12. Tabellenverzeichnis	

Abbildung 75: Anlagenhandbuch „Inhaltsverzeichnis und Anlagen“

Bei regelmäßigen EHS-Begehungen (EHS engl. für Environmental, Health, Safety) mit der für den Standort zuständigen Sicherheitsfachkraft und den EHS-Verantwortlichen wurde die Wirksamkeit der getroffenen Regelungen überprüft und Verbesserungspotentiale aufgedeckt. Empfehlungen und mögliche Maßnahmen wurden aufgenommen und deren Abarbeitung im vierteljährlichen ASA-Meeting (Arbeitsschutzausschuss) verfolgt.

Bei allen Umbau- und Neubaumaßnahmen fand immer auch parallel eine Bewertung in Bezug auf die Arbeitssicherheit und evtl. neu zu erstellende bzw. zu aktualisierende Dokumente statt.

Hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang:

- Installation des Pantolinspect Scanner Systems an der Schilderbrücke (vgl. Abschnitt 3.5.3.2)
- Einbau der neu entwickelten Fahrleitungsklemmen (vgl. Abschnitt 3.3.2.3)
- Installation einer Deckenstromschiene im Shelter (vgl. Abschnitt 3.5.1.3)
- Anpassung des Fahrdrahtabstandes auf 1,15 m (vgl. Abschnitt 3.5.1.3)

Der Betriebsleiter war verantwortlich für die betriebliche, organisatorische und personelle Organisation des Versuchsbetriebes auf der eHighway Versuchsanlage. Dies schloss auch alle Inspektions-, Wartungs- und Reparaturmaßnahmen mit ein. Desweiteren gehörte dazu die Koordination mit den Verantwortlichen der benachbarten eBus-Referenzanlage hinsichtlich der Vermeidung von Gefährdungen bei gleichzeitig stattfindenden Testaktivitäten.

Für die IT-Infrastruktur der Versuchsanlage wurde eine Bestandsaufnahme durchgeführt. Ergebnis ist eine Liste aller IT-Assets mit Gefährdungspotenzial und Sicherheitsstatus bzgl. Cyber Security. Für jedes IT-Asset wurde ein Verantwortlicher hinterlegt und die Umsetzung der identifizierten Maßnahmen zur Gewährleistung der IT- Sicherheit in einer Liste verfolgt.

Der Fern-Zugriff auf die Teilsysteme der Versuchsanlage ist über einen als cRSP [102] bezeichneten VPN-Tunnel realisiert.



### 3.5.1.2 Betrieb der Erprobungsträger (TEB.2)

Im Projekt ELANO sollten die Erprobungsträger aus den Projekten ENUBA [2] und ENUBA 2 [3] weitergenutzt und weiterentwickelt werden. Dies sind:

- Actros #1
- Actros #2
- Sattelzugmaschine EMMA
- Batteriesattelaufleger der Zugmaschine EMMA

Alle vier Erprobungsträger waren über die gesamte Projektlaufzeit über in Betrieb. Die Weiterentwicklung von Actros #1 als Stromabnehmer-Erprobungsträger ist in Abschnitt 3.4.3.1 und die Aufrüstung der Actros #2 Stromabnehmer-Steuerung in Abschnitt 3.4.3.2 beschrieben. Weiterführende Informationen bzgl. der Erweiterung der Steuerstruktur für die Sattelzugmaschine EMMA können dem Abschnitt 3.4.4 entnommen werden.

Dieses Projektelement umfasste alle mit dem Einsatz der Lkw als Erprobungsträger und Messfahrzeuge verbundenen Aufwendungen, also auch die Dienstleistungen, die für die grundsätzliche Betriebserlaubnis / Betriebsfähigkeit der Fahrzeuge und somit für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb erforderlich waren.

Nach Abschluss des Projektes ELANO ist es geplant, den Actros #2 außer Betrieb zu nehmen und dem „Eisenbahn & Technik Museum“ [103] in Prora/Rügen zur Verfügung zu stellen.

### 3.5.1.3 Erprobung vor Ort (TEB.3)

Dieses Projektelement umfasste einerseits alle Personalaufwendungen für den Test-/ Erprobungsbetrieb sowie für Vorführungen und Präsentationen und andererseits alle Werkzeuge, Hilfsmittel und Installationen, die entweder für den sicheren und zuverlässigen Betrieb der Versuchsanlage oder für Tests/Messungen/Untersuchungen erforderlich sind.

Schwerpunkte im Erprobungsbetrieb bildeten:

- Entwicklungsbegleitende Messkampagnen rund um das neue Pantographensystem PAN 3rd Gen (vgl. Kap. 3.2)
- Tests in Verbindung mit Umbauten zur Stabilisierung der Fahrzeugantriebssysteme gegenüber kurzzeitigen Schwankungen der speisenden OL-Spannung (vgl. Kap.3.4.4)
- Test mit RFID-Sensoren zur ortsabhängigen Traktionssteuerung der Lkw (vgl. Kap.0)
- Erprobung einer prototypischen Erstanwendung zur streckenbasierten Erfassung von Nutzungsentgelten in unterschiedlichen eHighway-Netzabschnitten (vgl. Kap.3.1.3.2)
- Testreihen zur automatisierten Erfassung, Übertragung, Visualisierung von Fahrzeugdaten mittels eines Cloud-basierten Datenerfassungssystems (vgl. Kap.3.5.3.1)
- Tests im Zusammenhang mit den neu entwickelten Klemmen und Abweisern des FL-Systems



**Abbildung 76: Fahrleitung im Shelter / Umbau der Fahrleitung auf der Teststrecke**



Für wetterunabhängige Tests, Messungen und Kontrollen am Stromabnehmer, die u. a. das An- und Abbügelverhalten, die Kontaktkraft und die vertikalen Arbeitsbereiche betrafen, erfolgte die Montage und Inbetriebnahme einer Testfahrleitung im Shelter 16. Diese besteht aus einer ca. 10 m langen Kombination aus Deckenstromschiene und Fahrleitung, ist nicht unter elektrische Spannung setzbar und dient ausschließlich mechanischen Tests und Messungen, Abbildung 76.

Zudem erfolgte während des Projekts auf der ca. 2 km langen Teststrecke die Anpassung des Fahrdrababstandes auf die im Rahmen des Förderprojektes optimierte Schnittstelle zwischen Pantographen und Fahrleitung. Nach dem Umbau beträgt der Nennabstand der Fahrdrähte 1,15 m zueinander. Im Zuge des Umbaus wurde der in einem Teilabschnitt zu Testzwecken (Tests im Projekt ENUBA 2) installierte Zick-Zack des Fahrdrahtes wieder zurückgebaut.

Ebenso erfolgte die Installation des Schleifleisten-Monitoring-Systems der Firma PantolInspect, an dem zahlreiche Lkw-Testfahrten mit den unterschiedlichen Pantographen Generationen zur Kalibrierung und Verbesserung der Auswertegenauigkeit durchgeführt wurden (vgl. Kap.3.5.3.3).

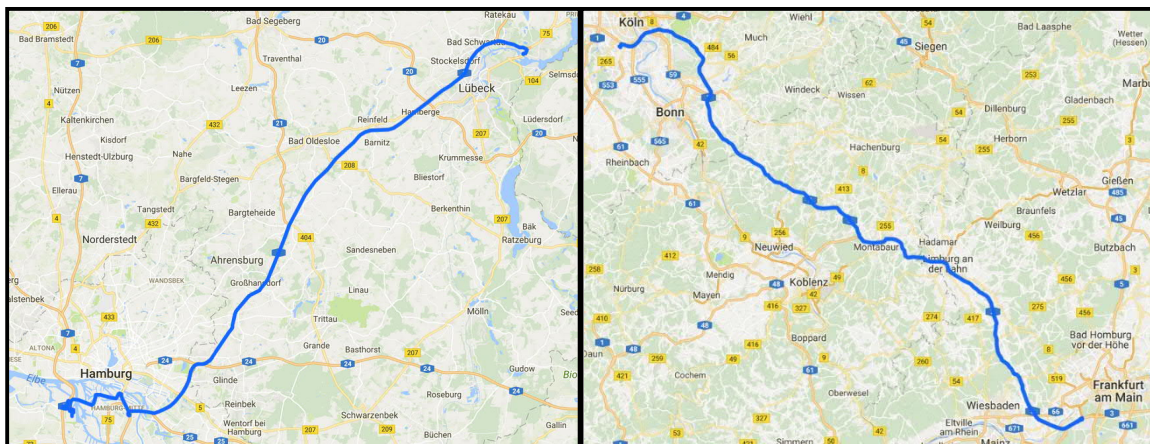
### 3.5.2 Alltagserprobung – Klimafaktoren (TEB.4)

#### Aufgabenstellung

Im Hinblick auf ein breites Einsatzspektrum von oberleitungsgespeisten Lkw unter Berücksichtigung von unterschiedlichen projektspezifischen Rahmenbedingungen sollte die Alltagsauglichkeit unter möglichst vielen Umwelt- und Klimafaktoren untersucht werden. Hierfür sollten typische Messfahrten vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet werden.

#### Vorgehensweise

Im Arbeitspaket SYS 1.3 „Simulation von Referenzszenarien (reale Strecken- u. Fahrzeugdaten)“ wurden für Deutschland typische und für die Installation einer Oberleitung beispielhafte Strecken in Simulationsrechnungen untersucht (vgl. Kap.3.1.1.1). Aus diesen simulierten Strecken wurden die Abschnitte auf der A1 zwischen dem Hafen von Hamburg und dem Hafen von Lübeck und auf der A3 zwischen dem Verladeterminale in Köln und dem Flughafen in Frankfurt ausgewählt, um diese mit einem geeigneten Fahrzeug unter realen Bedingungen nach den Maßgaben aus der Simulation zu befahren.



**Abbildung 77: A1 - Strecke Hamburg nach Lübeck (links) / A3 Strecke vom Flughafen Frankfurt zum Verladezentrum Köln (rechts)**

Die Simulation aus SYS.1.3 beinhaltete das Befahren der ausgewählten Strecken mittels Oberleitungssystemen zur Verifikation der Annahmen unterschiedlicher Elektrifizierungsgrade:

- 95 % - Elektrifizierung der Strecken mit 95 % elektrifiziertem Anteil und 5 % nicht elektrifiziertem Anteil
- 70 % - Elektrifizierung der Strecken mit Wechseln von 14 km elektrifiziertem Anteil und 6 km langen nicht elektrifizierten Abschnitten
- 50 % - Elektrifizierung der Strecken mit abwechselnd 10 km langen Abschnitten, jeweils elektrifiziert und danach nicht elektrifiziert

Für die Fahrten wurde der elektrische Sattelzug EMMA mit einem 120 kWh Batteriesystem und einem 300 kW Diesel-Generator-Set gewählt. Elektrische Fahrten außerhalb der angenommenen Oberleitungsinfrastruktur sollten über das Batteriesystem abgebildet werden.

Die Fahrsimulation von elektrifizierten Streckenanteilen wurde durch die Verwendung des Diesel-Generator-Sets bewerkstelligt. In diesem Fall simulierte das Generator-Set die Oberleitungseinspeisung.

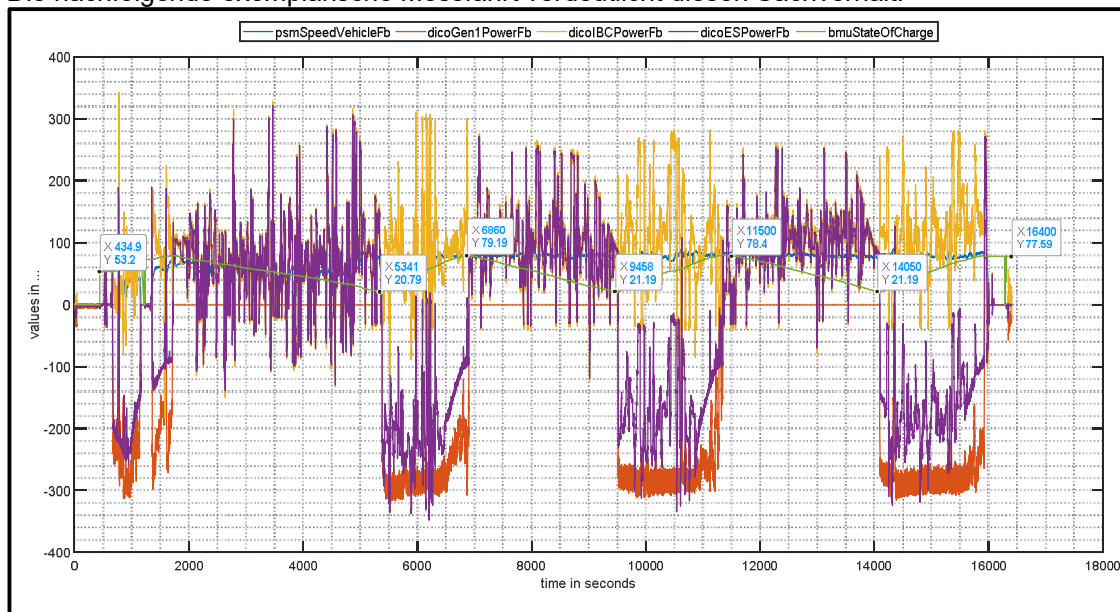
## Ergebnisse

Trotz wiederholter Versuche, die im Arbeitspaket SYS.1.3 simulierten Strecken auf der A1 und der A3 mit dem oben beschriebenen Fahrzeug mittels Mess- und Testfahrten zu befahren, konnten die geplanten Messaufzeichnungen auf diesen Strecken nicht in dem erwünschten Umfang mehrfach wiederholt und bei verschiedenen Beladungszuständen erfolgen. Es wurden aber alle im Rahmen dieser Mess- und Testfahrten erfassten Daten herangezogen und ausgewertet, die letztendlich grundsätzliche Systembewertungen erlaubten.

Damit ein Batteriesystem von dem Fahrzeug optimal verwendet werden kann, muss dieses an der Oberleitung wieder vollständig geladen werden. Für die vollständige Ladung des Batteriesystems ist nicht nur die Ladeleistung, die vom vorgeschalteten DC-DC-Steller bereitgestellt wird, wichtig, sondern auch die Zeit, mit der diese Ladeleistung auf das Batteriesystem einwirkt. Hohe Ladeströme, aus heutiger Sicht mit einem Ladefaktor größer als 3C (dreifache Kapazität der Batterie), sind für die Lebensdauer von Batteriesystemen als negativ zu betrachten und deshalb nicht ratsam. Hieraus ergibt sich eine Mindestaufenthaltsdauer eines Oberleitungsfahrzeuges mit Traktionsbatterie zwischen 20 und 30 Minuten, was wiederum ein durchgehendes Oberleitungssegment von 30 km bis 40 km ergibt.

Ausgehend von Oberleitungssegmenten von ca. 30 km bis 40 km Länge ist eine Traktionsbatterie soweit wieder aufgeladen, dass danach Strecken ohne Oberleitung deutlich oberhalb der 30 km bis 40 km aus der geladenen Traktionsbatterie gefahren werden können, ein optimal ausgelegtes und ausreichend dimensioniertes Batteriesystem vorausgesetzt. Anhand der aufgezeichneten Messdaten konnten vereinzelt sogar Strecken bis zu dem doppelten der elektrifizierten Strecke gefahren werden, was aber nur unter idealen Rahmenbedingungen möglich war.

Die nachfolgende exemplarische Messfahrt verdeutlicht diesen Sachverhalt:



**Abbildung 78: Exemplarische Messfahrt mit einem State-Of-Charge (SOC) zw. 20% und 80%**

Hingegen hatten kürzere Strecken, die z. B. abwechselnd mit nur 10 km langen Abschnitten bei einer 50%-Elektrifizierung nachgestellt wurden, insgesamt eine Entladung der Traktionsbatterie über die gefahrene Gesamtstrecke zur Folge (nicht ausgeglichene Energiebilanz).

Die Mess- und Testfahrten im Zusammenhang mit den Feldversuchsstrecken auf der A1 bei Reinfeld und auf der A5 bei Weiterstadt und die Auswertung der Speditionsumläufe der Spedition Schanz (A5) und der Spedition Bode (A1) haben allerdings nachgewiesen, dass die aktuellen eHighway-

Feldversuche für die beteiligten Speditionen keine rein elektrischen Umläufe ermöglichen. Hierfür sind in beiden Fällen die Ausdehnungen der elektrifizierten Streckenanteile bzw. die Batteriekapazitäten und elektrischen Antriebsleistungen der eingesetzten OH-Lkw zu gering.

## Fazit

Auch wenn die aus dem Arbeitspaket SYS 1.3 hergeleiteten Strecken, insbesondere die Strecken auf der A1 und der A5 nicht in dem geplanten Maße durch Mess- und Testfahrten abgedeckt werden konnten, kann man dennoch aus den Messergebnissen schlussfolgern, dass eine Segmentierung in Teilstrecken mit Oberleitungssystem und Teilstrecken ohne Oberleitungssystem für Fahrten mit einem Batterieenergiespeicher ein geeignetes Szenario darstellt, wenn die Teilstrecken mit Oberleitung eine Ausdehnung von > 30 km aufweisen [104]. Mit einem geeigneten Batterie- und Ladesystem auf den Fahrzeugen ist damit auch, je nach topografischer Lage, eine batterie-elektrische Reichweite von mehr als 30 km möglich.

## 3.5.3 Automatisierte eHighway-Messsysteme (TEB.5)

### 3.5.3.1 Datenanalysesystem (TEB.5.1 / TEB.5.2)

#### Aufgabenstellung

Das Arbeitspaket TEB.5.1 umfasste eine Anforderungsanalyse, ein Realisierungskonzept sowie die Entwicklung und Erprobung eines Datenanalyse-Systems zur synchronisierten Erhebung, Auswertung und Archivierung von Fahrzeug-, Umgebungs- und Klimadaten.

Im Arbeitspaket TEB.5.2 sollte das unter TEB.5.1 entwickelte Datenanalyse-System für die Versuchsanlage eingesetzt und weiterentwickelt werden. Die geplanten Tätigkeiten umfassten die Anpassung und Ausrüstung der jeweiligen Datenquellen, die Auswahl der Kenngrößen sowie die Generierung und projektbegleitende, regelmäßige Erstellung von automatisierten Datenanalysen und Statusberichten zu Schlüsselgrößen und Performance-Indikatoren.

#### Vorgehensweise / Ergebnisse

Eine Analyse ergab, dass eine Zusammenführung der Daten aus den verschiedenen Teilsystemen zu Analyse Zwecken einen erheblichen Mehrwert zur Ursachenklärung bei Auffälligkeiten bieten würde. Zu diesem Zweck wurde ein cloudbasiertes Data Mining System aufgebaut, unter Einbeziehung und Aufzeichnung von Informationen aus den folgenden Teilsystemen:

- Fahrzeugdaten von den Siemens-eigenen Versuchsfahrzeugen
- Pantographen-Daten
- Umweltdaten (Wetterstation)

Die Daten wurden auf der Versuchsanlage Groß Dölln sowie auf den Teststrecken in Gävle (Schweden) und Los Angeles (USA) aufgezeichnet, separat gesammelt und automatisiert, entsprechend Abbildung 79, dem Cloudspeicher zugeführt.

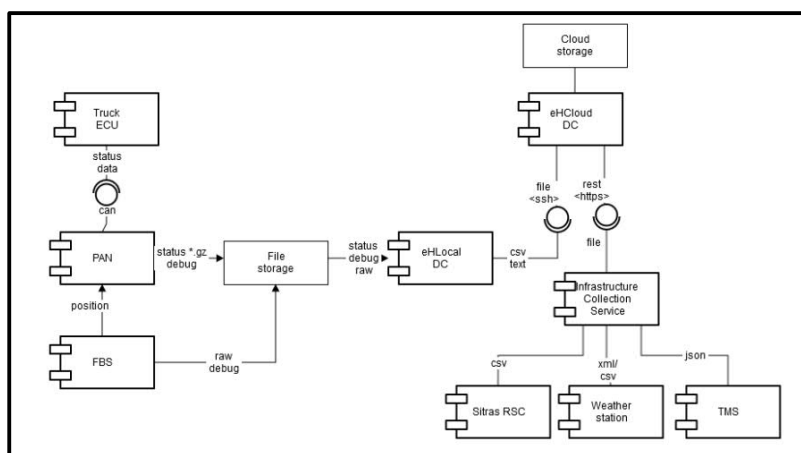
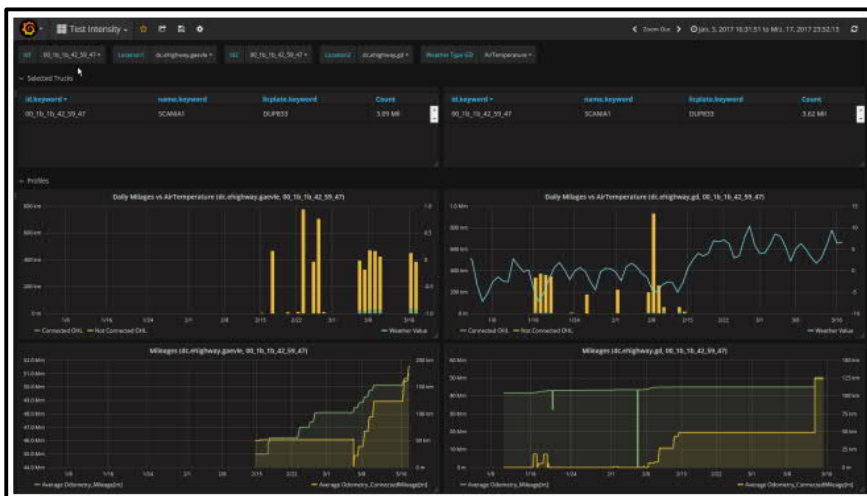


Abbildung 79: Hauptkomponenten Data Mining (erste Realisierung)

Dieses Data-Mining-System wurde basierend auf einer Microservice Architecture [105] aufgebaut. Die Microservices wurden als Docker Container [106] zur Verfügung gestellt und die Laufzeitumgebung wurde mittels Kubernetes [107] als Management System verwaltet.

Durch die verwendete Architektur war das System ausgelegt auf zukünftige Erweiterungen, um auch mit sehr großen Datenmengen jederzeit umgehen zu können.

Für Darstellung und Analyse der Aufzeichnungen kam das Tool Grafana zum Einsatz, da dieses lizenzfrei zur Verfügung stand und für eine einfache Darstellung von zeitbezogenen Ereignissen als geeignet erschien.



Einfache Auswertungen zu den Lkw-Fahrten, wie z.B. Strecke und Leistungsbezug oder auch Wetterdaten konnten kombiniert dargestellt werden.

**Abbildung 80: Grafana-Oberfläche zur Visualisierung von Testergebnissen**

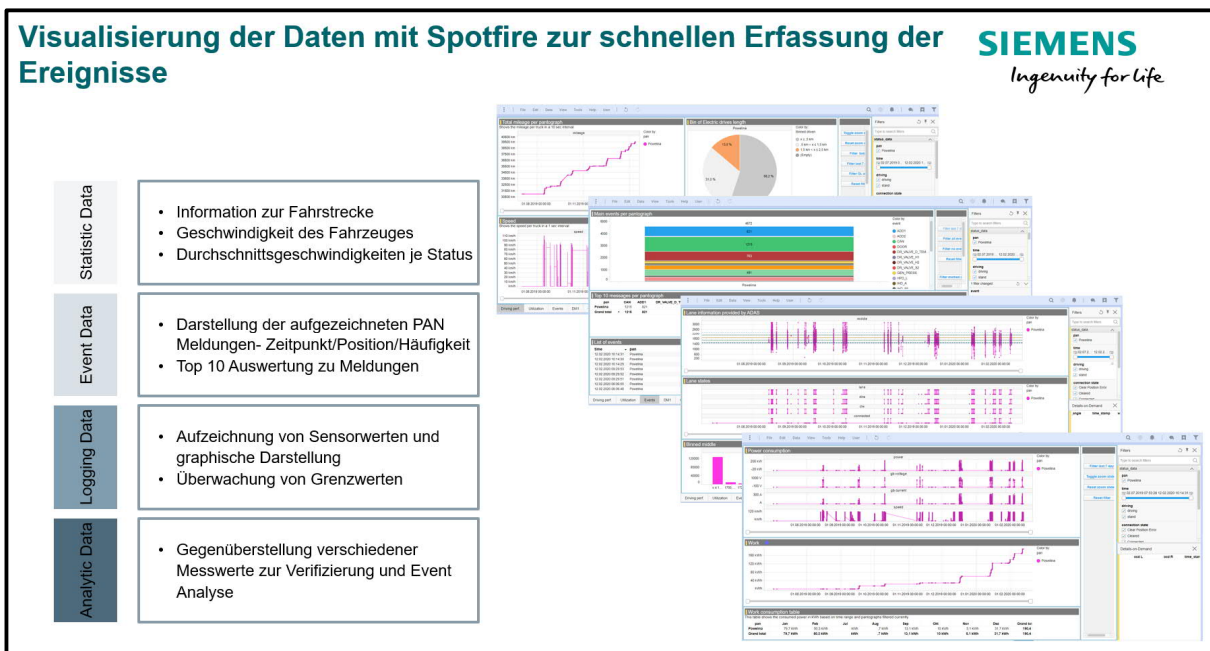
Mit Hilfe dieser ersten Realisierung eines Data-Mining-Systems (Proof of Concept) konnte die Analyse der Fahrzeug- und PAN- Daten erfolgreich umgesetzt werden, um Auffälligkeiten zu erkennen bzw. nachträgliche Betrachtungen durchführen zu können. Es zeigten sich aber auch Systemschwächen, die einen hohen Aufwand an manueller Pflege und Anpassung zwischen dem Teilsystem PAN und der Datenerfassung verursachten. Auch die eingeschränkten Auswertemöglichkeiten des Tools Grafana machten die Umsetzung einiger technischer Veränderungen am Data Mining System innerhalb des Arbeitspakets TEB.5.2 erforderlich.

Folglich wurde das Konzept der Datenerfassung und der Datenaufbereitung überarbeitet. Im Vordergrund stand dabei, eine etablierte Cloud Lösung zu verwenden, die alle Anforderungen hinsichtlich Daten-Sicherheit und kontinuierlicher Daten-Services erfüllt. Zusätzlich sollten die Auswertemöglichkeiten dahingehend erweitert werden, dass auch statistische Daten erhoben und visualisiert werden können.

Um Synergien zu nutzen, sollte eine der bei Siemens bestehenden Plattformen genutzt werden. Damit standen die beiden Anwendungen MindSphere® bzw. Railigent® zur Auswahl. Da Railigent® bereits im Bahnwesen für die Erfassung von Zugdaten genutzt wurde und „out of the Box“- Auswertetools zur Verfügung standen, fiel die Entscheidung für eine Realisierung mit der Plattform Railigent® [108]. Eine weitere entscheidende Rolle bei der Auswahl spielte die Möglichkeit, dass sich mittels Railigent® sowohl historische Daten als auch statistische Daten einfach darstellen lassen und, dass das dafür in Railigent® integrierte Programm Spoffire vielfältige Möglichkeiten zur Datenanalyse bietet.

Um anstehende weitere Forschungsprojekte, wie z.B. OL-Lkw und ELISA II optimal mit Daten versorgen zu können, wurde im neuen Data Mining Tool basierend auf der Railigent®-Plattform der Datenanalyse-Fokus auf Parameter und Kenngrößen rund das Fahrzeug bzw. den Pantographen gelegt. Reine Infrastrukturdaten werden im neuen Tool bisher nicht aufgezeichnet.





**Abbildung 81: Beispiele aus der Railigent-Anwendung**

### Fazit

Mit der Umsetzung des neuen Data-Mining-Tools wurde die Basis geschaffen, relevante Kenngrößen der Teilsysteme Fahrzeug und Pantograph zuverlässig aufzuzeichnen und die Daten automatisiert zu visualisieren. Dabei sind verschiedene Analysecluster entstanden, die jeweils unterschiedliche Datenfelder adressieren.

Mit Hilfe der Analysen ist es möglich, schnell Abweichungen von Ausgangs- und Sollzuständen zu erkennen und diese zu bewerten. Ebenfalls können durch die Aufzeichnungen und deren örtlichen Bezüge auftretende Auffälligkeiten des Pantographen im Zusammenwirken mit der elektrischen Infrastruktur und anderen Umgebungsbedingungen im relevanten Streckenabschnitt erfasst und bewertet werden. Diese betreffen insbesondere ungewollte Abbügelvorgänge entlang der Teststrecken. Durch die Aufnahme von zusätzlichen Infrastrukturdaten wie z.B. Mastpositionen in die Railigent®-Karten ist es möglich, einzelne Ereignisse konkreten Positionen der Infrastruktur zuzuordnen. Durch die diversen Railigent®-Reportingfunktionen können sowohl fahrzeug- als auch streckenbezogene Berichte abgeleitet werden.

### 3.5.3.2 Monitoringsysteme für Stromabnehmer und Fahrleitung (TEB.5.3 / TEB.5.4)

#### Aufgabenstellung

Im Vorgängerprojekt ENUBA 2 wurden Monitoring-Systeme für die technische Überwachung von Stromabnehmern (TMS für Technical Monitoring System) und von Fahrleitungen (CMS für Contact Line Monitoring System) entwickelt (vgl. ENUBA 2 Abschlussbericht [3] Abschnitt 3.2.3). Diese Monitoringsysteme sollten im Arbeitspaket TEB.5.3 „Weiterentwicklung und Einbindung infrastrukturbasierter Monitoringsysteme für Stromabnehmer und Fahrleitung“ hinsichtlich einer automatisierten Bewertung der Kenngrößen zur Interaktion von Stromabnehmern und Fahrleitung bzw. zur Zustandsdiagnose der Fahrleitung selbst weiterentwickelt werden.

Gegenstand des Arbeitspaketes TEB.5.4 „Alternativsysteme für Schleifleistenmonitoring“ war die Anpassung und Erprobung des laserbasierten Systems eines externen Leistungserbringers, welches in bahntypischer Ausprägung bereits in zahlreichen Anlagen für genaue Inspektionen von Schleifleisten angebügelter Triebfahrzeuge erfolgreich eingesetzt wird. Dieses System musste zunächst in einer Anpassungsentwicklung für ein zweipoliges Kettenwerk mit horizontal variierenden Schleifleistenpositionen und Montage an der Wechselverkehrszeichenbrücke adaptiert werden.

Im Zuge des Projektes kam es zu der Erkenntnis, dass eine Überprüfung der Oberleitung hinsichtlich des Verhaltens bei Sturm und starken Winden von großem Nutzen sein kann. Aus diesem Grunde



wurde das Thema infrastrukturbasierter Monitoringsysteme um das Monitoringsystem „Windabtriebsmessung“ erweitert.

### Vorgehensweise / Ergebnisse

#### **Weiterentwicklung der Schleifleistenüberwachung (TMS)**

Das in ENUBA 2 entwickelte System zur Schleifleistenüberwachung (TMS) mit seinen zwei Funktionskomponenten optische Schleifleistenerkennung und Fahrdrahtanhubmessung zeigte bereits in der ersten Ausführung gute Ergebnisse. Bezogen auf die Schleifleistenerkennung gab es dennoch Optimierungsbedarf. So musste die Abstimmung zur Auslösung der Kameras noch einmal neu überarbeitet werden, um die Menge der zu verarbeitenden Bilder zu optimieren und auch Fehlauswertungen durch „leere“ Bilder zu reduzieren.

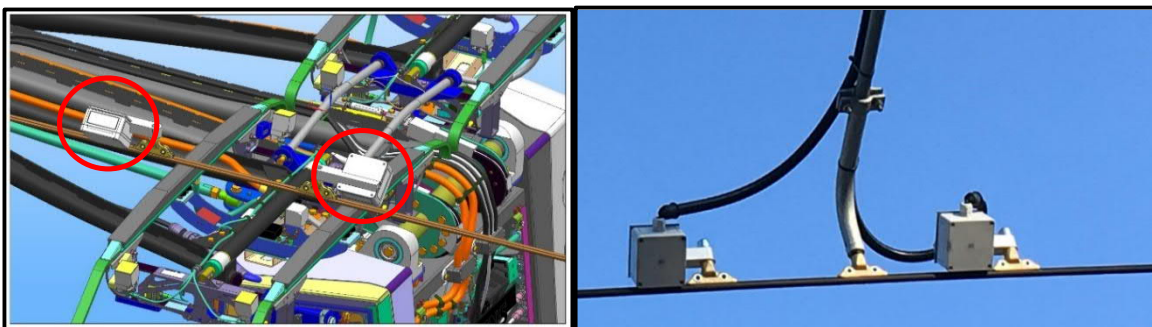
In diesem Zusammenhang wurden unterschiedliche Methoden zum Auslösen der Kameras untersucht. Hierbei konnte festgestellt werden, dass ein Auslösen der Bildsequenzen direkt durch die Schleifleiste das wohl erfolversprechendste Vorgehen darstellt. Als Auslöser kamen sowohl elektromechanische als auch rein elektronische Sensoren zum Einsatz.



Ein erster elektromechanischer Triggersensor aus dem Bereich der Straßenbahntechnik wurde an der Teststrecke in Groß Dölln verbaut und mittels mehrerer Durchfahrten mit dem eHighway-Lkw bei angebügeltem Pantographen erprobt (siehe Abbildung 82). Leider musste dabei festgestellt werden, dass der ursprünglich bis zu 100 km/h spezifizierte Bügelsensoren mechanischen Belastungen bei der Durchfahrt offensichtlich nicht gewachsen war.

**Abbildung 82: Installierter mechanischer Kontaktbügel**

Aus diesem Grund fiel die Entscheidung, auf eine berührungslose Detektionsart umzusteigen. Ausgewählt wurde ein Induktionssensor der Firma Turk, dessen Installation an der Oberleitung mittels einem Schutzgehäuse erfolgte (siehe Abbildung 83).



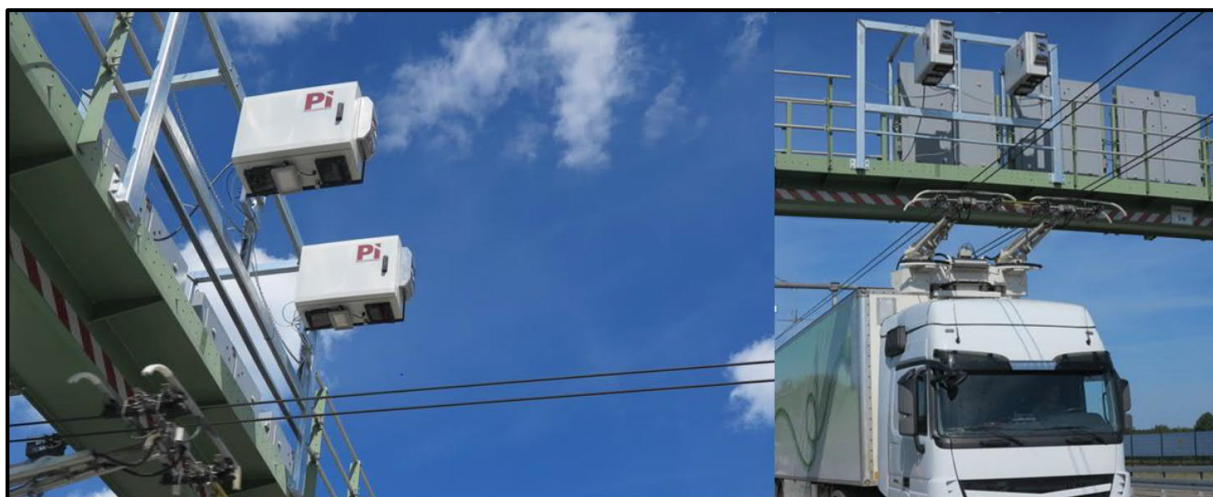
**Abbildung 83: Triggersensoren am Fahrdrabt zur Schleifleistendetektion (rot eingekreist)**

Die Ergebnisse bei den Durchfahrten zeigten eine sehr hohe Detektionsrate von 99,5 % [109]. Durch die Verwendung von zwei Sensoren konnte zusätzlich die Geschwindigkeit des Fahrzeuges ermittelt werden. Mittels der Information zum Detektionszeitpunkt und der Fahrzeuggeschwindigkeit war es möglich, das Zeitfenster der Einzelbildaufnahmen wesentlich genauer zu bestimmen. Durch die Eingrenzung der zu betrachtenden Bildsequenzen (Frames) wurde sichergestellt, dass das zu beurteilende Bild stets die Schleifleisten des Pantographen beinhaltet. Mit dieser Maßnahme konnte die Menge an Daten, die zu verarbeiten sind, erheblich reduziert werden. In Summe sind nur noch 5 Bilder notwendig, um eine verlässliche Betrachtung durchführen zu können.

### Lasermesssystem der Firma Pantolinspect

Ein bereits in der Bahntechnik eingesetztes System zur laserbasierten Schleifleistenüberwachung des dänischen Herstellers Pantolinspect [110] wurde als mögliche Alternative erprobt. Das Standardsystem PantoScanner Mark V ist in der Lage, bis zu einer Geschwindigkeit von 180 km/h angebügelt Schleifleisten optisch zu erfassen und durch automatische Bildauswertung beispielsweise Schäden an den Hörnern, zu starke Andruckkräfte oder übermäßig hohen Verschleiß zu erkennen und in diesen Fällen direkt eine Alarmmeldung an eine Betriebsleitstelle abzusetzen. Hardwareseitig sind zwei sogenannte *Ranger* und ein *Line Laser* verbaut, wobei erstere permanent den Fahrdrabt von oben überwachen und der Line Laser erst bei Annäherung einer Schleifleiste zugeschaltet wird. Die Bildaufnahmen mitsamt den daraus ermittelten Daten u. a. zu Fahrdrabtanhub, Andruckkräften, Schleifleistenwinkeln und Kohleabrieb werden in einer Daten-Cloud gespeichert. Nach Erwerb eines passwortgeschützten Zugangs zum Benutzersystem *PantoClient* ist es damit sowohl Fahrzeug- als auch Infrastrukturbetreibern von jedem beliebigen Ort aus möglich, Beschädigungen sofort zu detektieren und eventuelle Folgeschäden durch eine rechtzeitige Information der Fahrer zu vermeiden.

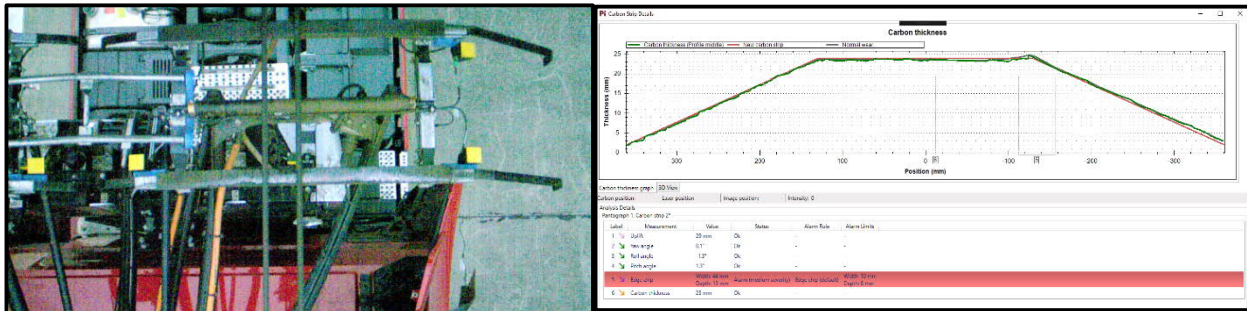
Aufbauend auf diesem bahntechnischen Stand wurde das System für den Einsatz im eHighway weiterentwickelt. Dazu wurden zwei PantoScanner erfolgreich auf der Testanlage in Groß Dölln an der bereits vorhandenen Schilderbrücke installiert. Im Zuge des Projektes wurden dazu spezielle Halterungen entworfen, die eine Befestigung an der Schilderbrücke ermöglichten. Neben der Hardwareinstallation wurde auch ein Server in Betrieb genommen, der die erfassten Aufnahmen speichern und auswerten kann. Begleitend fanden umfangreiche Bewertungen aus Sicht des Laserschutzes und des Datenschutzes statt, deren Vorgaben im technischen Aufbau und für die Datenanalyse berücksichtigt wurden.



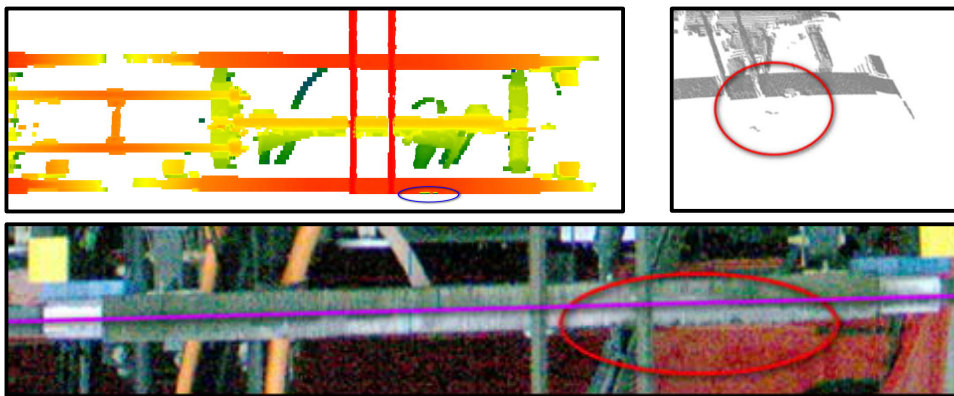
**Abbildung 84: Pantolinspect Scanner System auf Schilderbrücke**

Die ersten Tests hatten ergeben, dass die Standardalgorithmen aus dem Bahnbereich nicht geeignet waren, den baulich unterschiedlichen eHighway-Pantographen zuverlässig zu erkennen. Auch stellte hier erneut das exakte Triggern der Fahrzeuge eine größere Herausforderung dar, da die im Bahnbereich ergänzend zum Einsatz kommenden Sensoren (Achssensoren) im eHighway-Umfeld nicht zur Verfügung stehen. So musste die Triggerfunktionalität neu konzipiert werden, um die Bilderfassung deutlich zu verbessern.

Nach erfolgreicher Optimierung des Triggersignals konnten zuverlässig Aufnahmen der Pantographen durchgeführt werden. Es wurde beschlossen, sich auf die Auswertung des weiterentwickelten Stromabnehmers der 3. Generation (kurz PAN 3rd Gen) zu fokussieren. Mehrere Optimierungszyklen mussten durchlaufen werden, bis das Pantolinspect-System eine automatisierte Interpretation des Schleifleistenzustandes durchführen konnte, s. Abbildung 85 und Abbildung 86.



**Abbildung 85: Aufnahme PAN 3rd Gen bei Durchfahrt unter Schilderbrücke und Messergebnisse**



**Abbildung 86: Automatische Erkennung von Verschleiß an der Schleifleiste**

Trotz fortlaufender Optimierungen der Erkennungs- und Auswertelgorithmen konnten jedoch bis zum Projektende die aus der Bahnanwendung ermittelten Qualitätswerte zur Detektionsgüte und -zuverlässigkeit nicht erzielt werden [111]. Es wurde deshalb beschlossen, den Beobachtungszeitraum über die Projektlaufzeit hinaus zu verlängern.

### Windabtriebsmessung

Für die Sicherstellung der Verfügbarkeit des Pantographen bei der Fahrt an einer eHighway Oberleitung spielt unter anderem die Größe des seitlichen Windabtriebes eine entscheidende Rolle. Ein seitliches Abdriften der Oberleitung durch Seitenwind sollte eine maximale Abweichung von 250 mm (links / rechts) und ein Schwingen zueinander von 156 mm nicht überschreiten. Abhängig von den Abständen der Masten des Kettenwerks kann laut konservativen Berechnungen mit den Standardwerkzeugen für Eisenbahnoberleitungen diese Grenze ab 15 bis 20 m/s Geschwindigkeit eines rechtwinklig auftreffenden Seitenwinds erreicht werden. Da sich das Kettenwerk in seinem Aufbau von einem Standardkettenwerk, wie es im Bahnumfeld zum Einsatz kommt, in mehreren Merkmalen wesentlich unterscheidet, können die tatsächlichen Auswirkungen von Seitenwinden nur empirisch ermittelt werden.

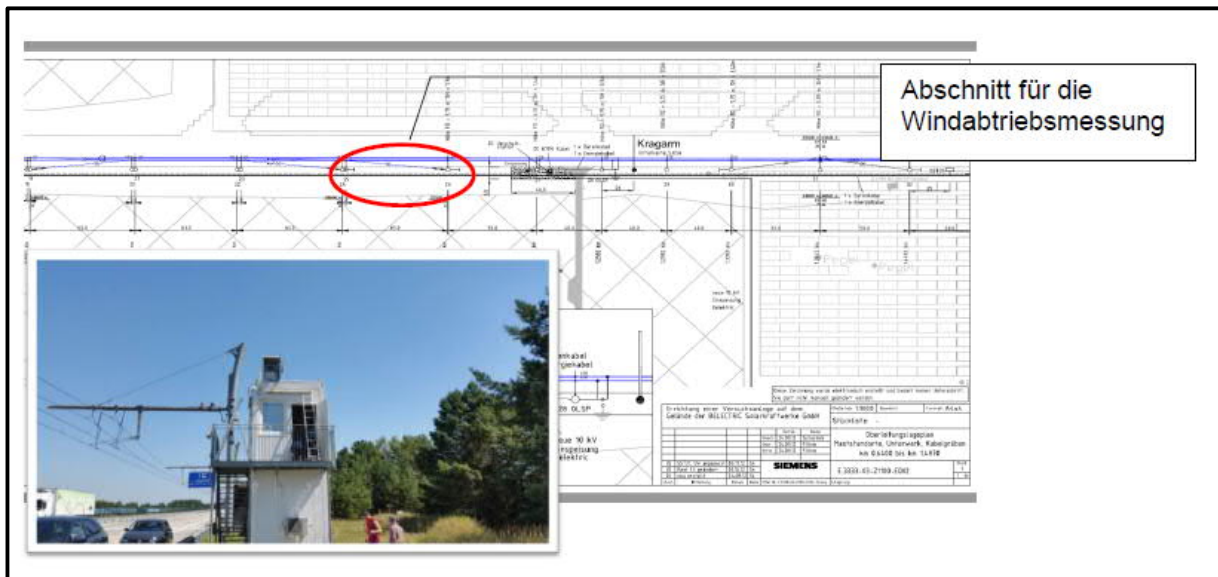
Abweichungen in einer Größenordnung wie oben beschrieben könnten dazu führen, dass die Ideallinie der Oberleitung in Bezug auf die Mittelposition des Pantographen verlassen wird. Die Auswirkung hierbei wäre, dass die Endlagensensoren am Pantograph ansprechen und einen Abbügelvorgang einleiten. Bei regelmäßigem Auftreten müsste dies bei Planung und Auslegung der Oberleitungsanlage berücksichtigt werden, weshalb die Häufigkeit extremer Windverhältnisse sowie das Windverhalten der Kettenwerke relevante Untersuchungsgegenstände sind..

Aus diesem Grund wurde ein Messsystem an der Teststrecke in Groß Dölln errichtet, um die Fahrdrahtbewegung über einen Zeitraum von mehreren Monaten zu beobachten.

Als Komponenten wurden ein Tachymeter zur Messung des Windabtriebes und eine Wetterstation zur Bestimmung der Windrichtung und der Windstärke aufgebaut.

Als Montageort für das Tachymeter wurde der Container für die Leitstelle ausgewählt. In diesem Bereich betragen die Mastabstände 65 m und der Abschnitt ist nicht durch ein Waldstück abgeschottet. Spannungsversorgung sowie Datenanbindung sind mit kurzen Leistungslängen vorhanden.





**Abbildung 87: Standort Tachymeter auf der Teststrecke Groß Dölln**

Ziel des Systems war die Korrelation von Windstärke zu Windantrieb (Auslenkung Fahrdrabt in Y- und Z- Richtung) unter Berücksichtigung der Windrichtung festzustellen und automatisiert dokumentieren zu können. Die ermittelten Daten wurden in einer anschließenden manuellen Analyse mit Excel ausgewertet.

Die Messergebnisse haben gezeigt, dass ein Schwingen der Oberleitung selbst bei starkem Wind kaum auftritt [112]. Vielmehr ergibt sich ein kurzer Impuls, wenn die Nachspannvorrichtung der Anlage durch den Winddruck wirksam wird. Im Betrachtungszeitraum von 12 Monaten konnte zu keinem Zeitpunkt ein starkes seitliches Ausschlagen in der Oberleitung gemessen werden. Bei den ausgeführten Messungen in Groß Dölln war der Fall „Einfallwinkel von 90 Grad auf den Fahrdrabt“ bisher nicht gegeben. Trotzdem ist davon auszugehen, dass die Oberleitung sich in diesem Fall nicht wesentlich mehr bewegen wird als bei den aufgezeichneten Messungen.

#### **Fazit:**

Die Optimierung des Auslösezeitpunkts für das Inspektionssystem TMS konnte erfolgreich umgesetzt werden. Die Stabilität der Bilderfassung konnte derart optimiert werden, dass für zukünftige Inspektionssysteme eine zuverlässige technische Lösung zur Verfügung steht. Dies hat bezüglich der notwendigen hardwareseitigen Auslegung des Gesamtsystems sehr positive Auswirkungen, da mit weniger Rechnerleistung und Datenvolumen gearbeitet werden kann.

Inspektionssysteme wie die erprobten Beispiele bilden eine solide Ausgangsplattform für ein zukünftiges Inspektionssystem. Allerdings sind noch Anstrengungen zu unternehmen, das System für den Anwendungsfall eHighway zu optimieren. Es besteht aber berechtigter Grund zu der Annahme, dass dies bei einem ersten Piloteinsatz umgesetzt werden könnte. Eine noch offene Frage ist die Verwendung der Laserscanner im öffentlichen Raum. Zwar werden in der Straßenverkehrstechnik Laserscanner auch in anderen Anwendungen verwendet (Beispiel: Höhenkontrolle vor Tunneln für Lkw), jedoch ist deren Anwendung nicht in Fahrbahnrichtung wirksam. Ein weiterer Nachteil des Systems sind die aktuell noch hohen Anschaffungskosten, die über den in der Straßenverkehrstechnik üblichen Rahmen für Sensortechnik hinausgehen. Der Systempreis sollte aber mit steigender Stückzahl sinken. Daher ist im Ergebnis der Feldversuche und im Dialog mit den Infrastrukturbetreibern und Verkehrsbehörden ein wirtschaftliches Überwachungs- und Diagnosekonzept zu entwickeln, das Systemverfügbarkeit und Sicherheit ausbalanciert.

Die Windantriebsmessung hat gezeigt, dass ein Schwingen der Oberleitung im größeren Maße ( $> 100$  mm) durch seitlichen Wind nicht zu erwarten ist.

### 3.5.3.3 Potenzialanalyse und Erprobung teilautomatisierter Infrastrukturinspektionen (TEB.5.5)

#### **Aufgabenstellung**

In dem Arbeitspaket TEB.5.5 sollten Möglichkeiten für eine optimierte Wartung von Straßen- und Fahrleitungs-Infrastrukturen untersucht werden. Aufgrund positiver Ergebnisse in der Verwendung von Drohnen [113] sollte hierbei insbesondere die Inspektionen mittels autonom fliegender Drohnen untersucht werden.

Hierbei waren Bedarf und Nutzen solcher Systeme zu klären und die generelle Machbarkeit zu prüfen. Wichtige Anforderungen an ein solches System sollten entsprechend in Form einer Anforderungsbeschreibung definiert werden.

#### **Vorgehensweise / Ergebnisse**

Im ersten Schritt wurde ein Machbarkeitstest in Groß Dölln durchgeführt. Hier wurden mit bereits vorhandener und manuell gesteuerter Hardware (twinHEX v4.0) Testbilder aufgenommen und ausgewertet. Ziel war die Prüfung, ob Strukturen erkennbar und die genaue Position und Ausrichtung ableitbar sind. Zudem wurden Beispielbilder erfasst zur Darstellung der zu wartenden Infrastrukturelemente (vgl. Abbildung 88).



**Abbildung 88: Bildaufnahme einer Drohne zur Sichtkontrolle von Infrastrukturkomponenten**

Entsprechend [114] ergaben die Tests, dass eine Bestimmung der Mastpositionen und Ausrichtung mittels entsprechender Algorithmen möglich und das Verfahren damit prinzipiell geeignet ist. Die Bestimmung z.B. von Fahrdrahtlage und -durchhang würde aber weitere Systeminformationen, Messungen und Analysen erfordern.

Auf Basis der zu erwartenden technischen Möglichkeiten wurde eine Bedarfsanalyse für die Anwendung „eHighway“ [115] und für ähnliche Anwendungen [116] eruiert.

Mögliche Partner wurden identifiziert, die im Bereich autonome Drohnenanwendungen bereits Erfahrungen gesammelt haben und auch für die Inspektion und Wartung von Fahrleitungsanlagen geeignete Lösungen anbieten könnten.

Mit den Firmen Copting [117], Dronegrid [118] und Percepto [119] wurden Gespräche über aktuelle Lösungen und mögliche Umsetzungsszenarien geführt, auf deren Basis ein Anforderungsdokument erstellt und ein Angebot zur Umsetzung von allen Firmen eingeholt wurde.

#### **Fazit**

Generell konnten der Bedarf, die technische Machbarkeit und auch mögliche Umsetzungswege zur optimierten Inspektion von eHighway-Fahrleitungsanlagen durch autonom fliegende Drohnen aufgezeigt werden. Orientierende Erprobungen in Groß Dölln verliefen positiv und vielversprechend. Wichtige Elemente und Herausforderungen für eine zukünftige einsatzreife Umsetzung konnten identifiziert und wie folgt zusammengefasst werden:

- Genehmigungsprozess für den autonomen Betrieb im Autobahnumfeld ohne direkten Sichtkontakt zur Drohne



- Flugzeiten und Reichweite der Drohne
- Ausstattung mit geeigneter Sensorik (Bildaufnahme, Infrarot, Laser)
- Wetterbeständigkeit und Einsatz bei Regen, Wind und Schnee
- Schutz gegen Vandalismus und Diebstahl
- Automatisierte Auswertelgorithmen

Die Realisierung der erweiterten Systemanforderungen sowie die praxisnahe Anwendung einer solcher Lösung in einem Pilotprojekt sollte in einem gesonderten Forschungs- und Entwicklungsprojekt erarbeitet bzw. vorbereitet werden.

### **3.5.4 Externe Prüfungen und Messsysteme - Systemprüfstand (TEB.6)**

Im Rahmen der Fahrzeugentwicklung und speziell der Weiterentwicklung des Stromabnehmers wurden umfangreiche Tests und Messungen in mehreren spezialisierten Labors und Testumgebungen (s. Unterkapitel 3.5.4.2 - 3.5.4.2) sowie auf einem eigens dafür konzipierten dynamischen Versuchsstand durchgeführt (3.5.4.1).

#### **3.5.4.1 Typprüfungen (TEB.6.1 – TEB.6.3)**

##### **Aufgabenstellung und Untersuchungsmethode**

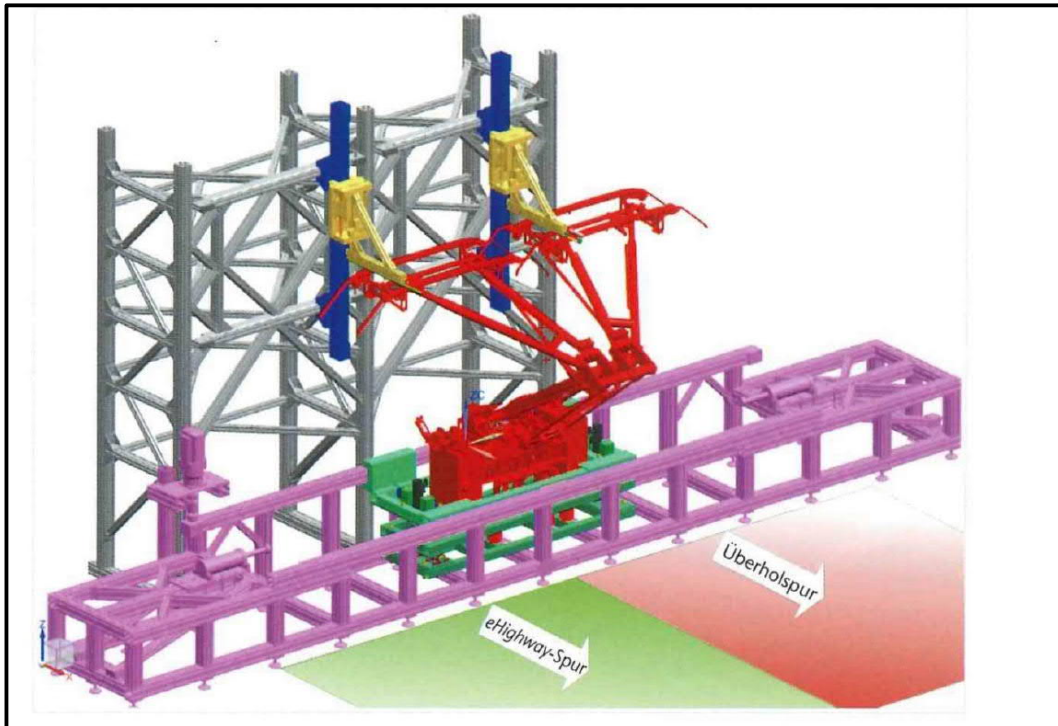
Die Entwicklung von Komponenten für elektrische Verkehrssysteme wie Bahnanwendungen oder den eHighway ist durch zahlreiche Mess- und Prüfaufgaben gekennzeichnet. Dazu gehören beispielsweise:

- Analyse von Wechselwirkungen zwischen Komponenten und Teilsystemen
- Ermittlung von Annahmen zur Ableitung von Anforderungen für die Entwicklung
- Nachweis der korrekten Erfüllung der (Teil-)Anforderungen durch das (Teil-)Produkt - Verifikation
- Nachweis der Eignung des Produkts zur Lösung der übergeordneten Problemstellung - Validierung

Während die Mess- und Prüfaufgaben auf Gesamtsystemebene (z. B. Ansprechen von Schutzfunktionen, Bedienbarkeit, Zuverlässigkeit und Alltagstauglichkeit) auf der Versuchsanlage durchgeführt werden, war für die eng mit der Entwicklung gekoppelte Ermittlung von Annahmen und Verifikation der Erfüllung ein Teststand zu entwickeln. Dieser sollte die größeren, v. a. lateralen Freiheitsgrade von Straßenfahrzeugen abbilden und die reproduzierbare Analyse der Wechselwirkungen von Stromabnehmer und Fahrleitung auch in Extremsituationen ermöglichen. Dies ist auf einem Fahrzeug bei Fahrt mit Entwurfsgeschwindigkeit nur mit sehr hohem Aufwand sicher realisierbar und erfordert deshalb einen besser beherrschbaren, auf die Fragestellung zugeschnittenen Testaufbau in einer Laborumgebung.

##### **Ergebnisse und Nutzung für die Systemauslegung**

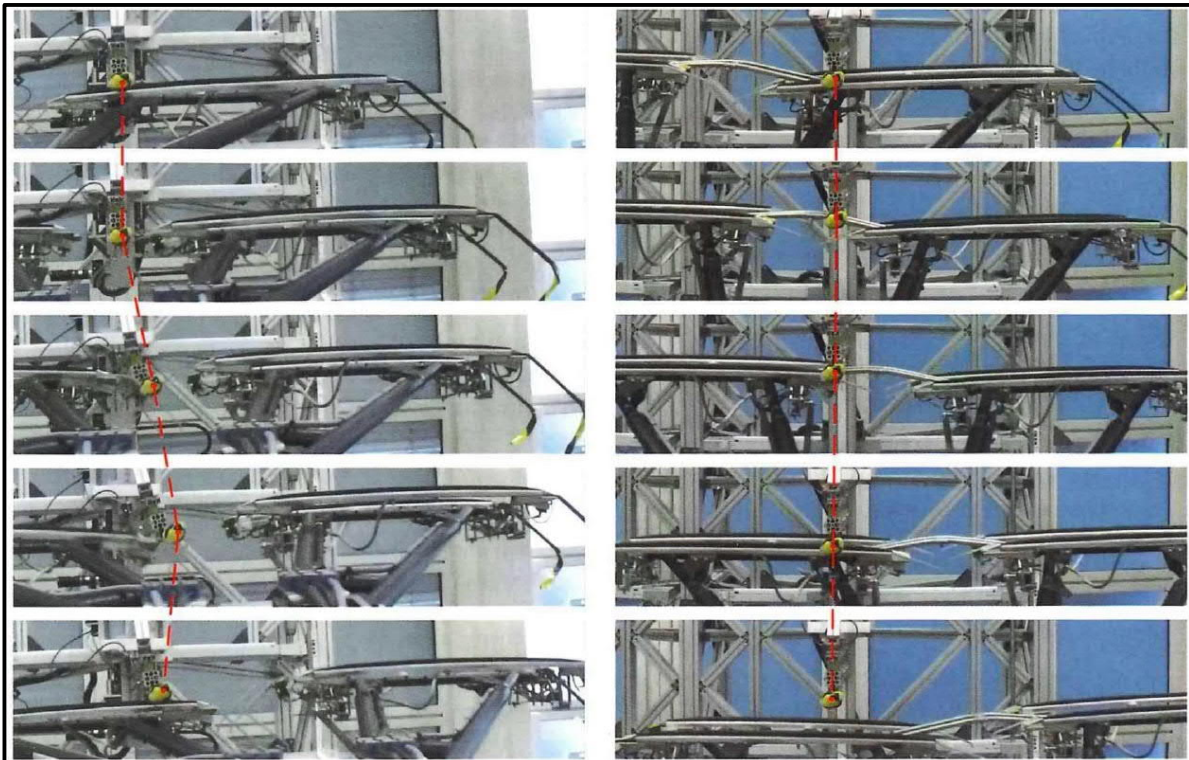
Abbildung 89 zeigt den für die Untersuchung der Pantographen (rot) entwickelten und genutzten Versuchsstand. Hauptbaugruppen sind die Querführung (grün, rosa) zur Abbildung fahrtypischer Querbewegungen und die Mechanik (vertikal (blau/gelb) und seitlich (dahinter weiß)) für die von Fahrbewegungen unabhängigen, für jeden Fahrleitungspol einzeln steuerbare Bewegung der Fahrdrähte. [73]



**Abbildung 89: Teststand für eHighway-Pantograph mit variabler Oberleitungslage [73]**

Mit dem in Abbildung 89 vorgestellten Teststand wurden entwicklungsbegleitend zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, die eng mit den Entwicklungsschritten „Ermittlung von Anforderungen“ und „Nachweis der Funktionserfüllung (Verifikation)“ in den verschiedenen Entwicklungszyklen verknüpft waren, s. dazu ausführlich Unterkapitel 2.3.2.2 und Abschnitt 3.2.

Die Wichtigkeit und den hohen Nutzen des Teststands veranschaulicht Abbildung 90. Lkw und Stromabnehmer weichen schnell seitlich aus und der Stromabnehmer beginnt unverzüglich die Schnellabsenkung (Zeitverlauf der Teilbilder von oben nach unten).



**Abbildung 90: Verhalten des Pantographen bei seitlichem Ausweichen (links: ursprüngliche Ausführung der Wippe, rechts: geänderte Konstruktion) [73]**

Mit dem Teststand konnte nachgewiesen werden, dass der rechts eingesetzte Übergleitbügel zwischen den Wippen keine seitlichen Kräfte in den Fahrdrabt (rot gestrichelte Linie) einleitet und besser als die links gezeigte, ursprüngliche Konstruktion mit auch mittigen Auflaufhörnern das Abgleiten und Einfädeln des Fahrdrabts verhindert. [73]

### **Ausblick Standardisierung und Typprüfungen**

Zu dem Teilarbeitspaket gehörten auch die Identifikation von elektrischen, mechanischen, pneumatischen Größen und Steuerungssignalen sowie die Zuordnung geeigneter Werte zu diesen Größen und Signalen. Ziel der Identifikation und Beschreibung dieser Größen ist, dass mit diesen Schlüsselgrößen die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen gleichbedeutend mit der Erfüllung der Sicherheitsfunktionen nachgewiesen werden kann. Beispielhaft könnte dies eine mindestens nachzuweisende Schnellablenkzeit des Stromabnehmers beim seitlichen Verlassen der Fahrleitung sein.

Diese Größen sind ein zentraler Anknüpfungspunkt für die bereits begonnenen technischen Standardisierungsarbeiten, vgl. dazu Unterkapitel 4.1 und [120]. Diese werden im Rahmen des FuE-Projekts AMELIE [31] durchgeführt und umfassen neben anderen Projektzielen die Erarbeitung einer technischen Spezifikation für das Zusammenwirken von Stromabnehmern und Oberleitungen auf elektrifizierten Fernstraßen. Gegenstand solcher technischen Spezifikationen sind typischerweise auch messbare Größen, deren Einhaltung Bestandteil von Abnahmeprüfungen und Typzulassungen von Stromabnehmern sein kann, sodass grundsätzlich verschiedene Fabrikate einen Marktzugang haben können.

#### 3.5.4.2 Externe Tests (EMV, Klima, Windkanal) (TEB.6.4)

##### **Aufgabenstellung**

Die Stromversorgung von Straßenfahrzeugen aus einer Oberleitung bringt Störphänomene mit sich, die bisher bei diesen Fahrzeugen und auch bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen mit Batteriespeisung, nicht bekannt sind. Deswegen werden diese Fahrzeuge hinsichtlich ihres EMV-Störverhaltens wie oberleitungsgespeiste Bahnfahrzeuge betrachtet, vgl. dazu auch Abschnitt 3.4.2.4.

In den für die Oberleitungseinspeisung relevanten Frequenzbereichen treten bei den üblichen Straßenfahrzeugen mit Elektrotraktion nur sehr geringe Emissionen auf, daher sind in den dafür relevanten Normen in diesen Frequenzbereichen keine Grenzwerte definiert und es werden bei der Zulassung von solchen Fahrzeugen in diesen Frequenzbereichen auch keine Messungen durchgeführt.

Da die technischen Randbedingungen bei OH-Lkw am ehesten mit denen elektrisch angetriebener Bahnen vergleichbar sind, bestand die Aufgabe darin zu untersuchen, ob die Normen für elektrische Bahnen im Bereich der EMV auch auf OH-Lkw übertragbar sind und welche zusätzlichen Maßnahmen zu treffen sind, um OH-Lkw in Konformität mit diesen Normen zu bringen.

##### **Vorgehensweise**

Um hinsichtlich der vorgenannten Aufgabenstellung die Ausgangssituation zu bestimmen, wurden 2014 erste orientierende Messungen durchgeführt. Die beiden im Rahmen dieser Messung untersuchten Fahrzeuge erfüllen die Normen für elektrische Bahnfahrzeuge nicht, liegen aber auch nicht wesentlich über den Grenzwerten, siehe Messberichte [121] und [122].

Im Rahmen des Projektes ENUBA 2 wurde ein weiteres Fahrzeug zum OH-Lkw modifiziert. Dieses Fahrzeug (Sattelzug Emma) zeigte bei seiner Inbetriebsetzung starke Störbeeinflussungen auf der CAN-Verkabelung, die wiederholt zu Funktionsstörungen führten.

Auf diesem Fahrzeug wurden daher an den wesentlichen Störquellen EMV-Filter nachgerüstet, zunächst als Testaufbau mit Filterdrosseln und anschließend als Festeinbau mit LC-Filtern. Die Wirkung der Filterdrosseln bezüglich der leitungsgebundenen Störungen auf dem Fahrzeug wurde messtechnisch bewertet. Ein Probeaufbau mit LC-Filtern war nicht realisierbar. Zu den ermittelten Störphänomenen, der Analyse ihrer Wirkmechanismen und den daraufhin gewählten Gegenmaßnahmen siehe Kap. 3.4.2.4 „EMV-Management von fahrleitungsgespeisten Hybrid-Lkw“.

Zwischenzeitlich stehen seitens Scania die ersten Feldtestfahrzeuge der neuen OH-Lkw-Generation zur Verfügung.

Aus der technischen Weiterentwicklung der vorgenannten Fahrzeuge resultierten die folgenden Fragen:



- Sind die beim ENUBA 2 - Fahrzeug implementierten EMV-Filter geeignet, neben der Verminderung der leitungsgebundenen Störungen auch die Störstrahlung in die Umgebung so zu vermindern, dass die Grenzwerte der Bahnnorm eingehalten werden?
- Wie ist der neue OH-Lkw von Scania hinsichtlich seines Störverhaltens einzuordnen? Kann das Fahrzeug mit angemessenen Mitteln die Norm für Bahnfahrzeuge erfüllen oder ist es erforderlich, eigene Grenzwerte für OH-Lkw festzulegen, die den besonderen Einsatzbedingungen dieser Fahrzeuge gerecht werden?
- Welche Nachteile können sich aus der Verwendung von LC-Filtern hinsichtlich anderer Störfrequenzen sowie hinsichtlich der elektrischen Sicherheit ergeben, und kann der Einsatz von LC-Filtern uneingeschränkt empfohlen werden?

Zur Beantwortung der ersten beiden Fragen wurden erneut Störstrahlungsmessungen durchgeführt, und zwar an dem modifizierten Sattelzug Emma sowie an einem neuartigen Scania-Lkw, siehe [123] und [124]. Für die dritte Fragestellung wurde eine Simulationsstudie durchgeführt, deren Ergebnis in [125] dokumentiert ist.

### **Ergebnisse/Fazit**

Die umfangreichen Studien und Einzelmessungen [99],[121],[122],[123], [124] , [126] zeigen das systematische Vorgehen ausgehend von einem Konzept, das technische Randbedingungen und die normative Einordnung des OH-Lkw analysiert und bewertet, über Messungen, die Implementierung von Maßnahmen bis schließlich zur Bewertung ihrer Wirksamkeit und abgeleiteten Handlungsempfehlungen.

Die Ergebnisse der Messungen und der Simulation lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Beide vermessenen Fahrzeuge erfüllen die Bahnnorm nicht. Die Grenzwertüberschreitung tritt jedoch nur in wenigen Frequenzbereichen oder Einzelfrequenzen auf und beträgt nur wenige dB. Die Filtermaßnahmen beim ENUBA 2-Fahrzeug führen auch zu einer Verminderung der Störaustrahlung, reichen aber allein noch nicht aus.
- Es ist mit akzeptablem Aufwand möglich, OH-Lkw bezüglich ihrer Störaussendung kompatibel mit den Grenzwerten elektrischer Bahnfahrzeuge auszulegen. Gesonderte Normengrenzwerte für OH-Lkw sind nicht erforderlich.
- Störungen im Bereich magnetisch dominierter Frequenzen unter 30 MHz, wie sie für elektrisch angetriebene Fahrzeuge typisch sind, und die bei OH-Lkw durch die technisch bedingt lückenhafte Schirmung sowohl auf benachbarte Leitungen koppeln als auch in die Umgebung abgestrahlt werden, können durch L-C-L-Filter hinsichtlich beider Phänomene wirksam bedämpft werden.

### 3.5.4.3 Fahren auf Belastungs-Strecken von Lkw-Herstellern (TEB.6.5)

#### **Aufgabenstellung**

Als gute Möglichkeit zur Abbildung von Lastkollektiven, die typischen Fahrzeug-Lebensdauern entsprechen, sind bei Lkw-Herstellern Schlechtwege- und Rüttel-Strecken etabliert. Aufgaben des Arbeitspaketes waren die Spezifikation von Testbedingungen, die Testvorbereitung sowie die Testbegleitung von hybridisierten, mit Stromabnehmern ausgerüsteten Erprobungsträgern auf einer Schlechtwege-Strecke eines Kooperationspartners. Ziel des Arbeitspaketes war die Überprüfung von Belastungsanforderungen und -profilen sowie die Verifikation von Lebensdauerbewertungen für den neuen Stromabnehmer der dritten Generation.

#### **Vorgehensweise / Ergebnisse**

Die Testreihe fand in Kooperation mit Scania auf dem hauseigenen Testgelände in Södertälje, Schweden statt. Die Belastungsfahrten wurden mit der neuen Scania Fahrzeug-Generation mit aufgebautem Pantographen durchgeführt. Während aller Testfahrten war der PAN in Parkposition. Das Gesamtgewicht des Lkw mit Sattelaufleger betrug 39 t. Aus diversen „Duty Cycles“ wurde ein Testprogramm skaliert und kombiniert, welches einem „Duty Cycle for Middle- and North-Europe Roads“ entspricht.



Damit bestand das intensive Testprogramm aus 10 Einzeltests in sechsfacher Wiederholung, um den Einfluss von Geschwindigkeitsfehlern, Messgenauigkeit und Fahrerverhalten zu minimieren.

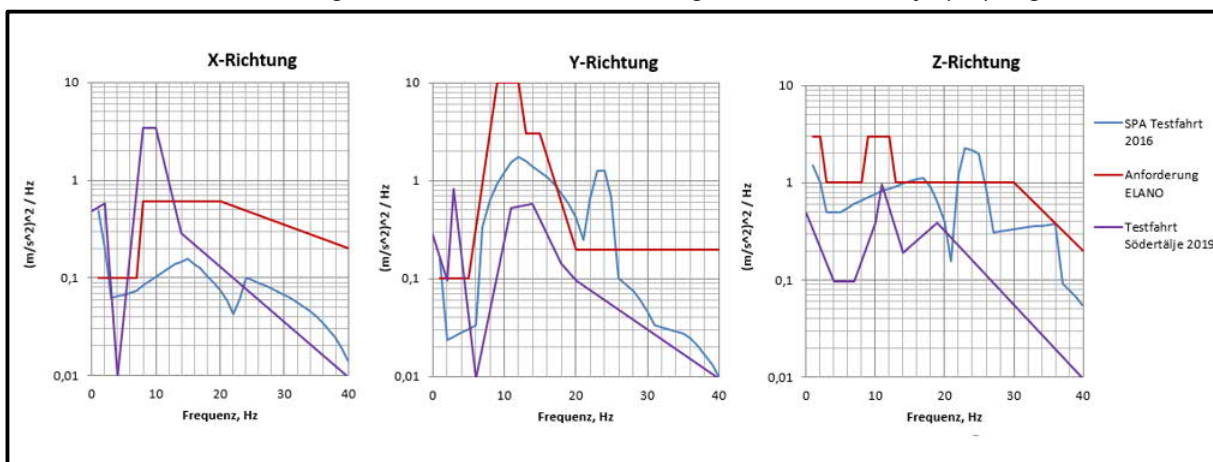
Das Einzeltests umfassten u.a.:

- Fahrten auf einer Vibrationsstrecke, auf Platten mit unterschiedlichen Höhen und Längen je Lkw-Seite
- Fahrten bei unterschiedlichen Steigungen mit Start / Stopp in beiden Richtungen
- Fahrten über große „Wellen“, die einen „weichen“ ersten Schlag gegen Lkw-Achse, „Lkw-Flug“ und anschließend „Landung“ verursachen
- Notbremsung bei Fahrt nach vorne sowie nach hinten, beides bei 10 km/h
- Kurvenfahrten mit definierten Geschwindigkeiten

Der Test-Lkw wurde für die Messungen mit 35 Beschleunigungssensoren, 4 Distanzsensoren, 20 DMS (Dehnungsmessstreifen), GPS und zwei Videokameras ausgestattet. Für die Entwicklung der Pantographengeneration 3 wurden zu Beginn von ELANO neue Anforderungen in Form von PSD (Power Spectral Density) -Kurven vorgegeben (rote Kennlinie). Diese beschreiben die Vibrationslevel, denen der Pantograph 100 Stunden lang standhalten sollte.

Im Jahr 2016 wurden von Siemens eigene Beschleunigungstests durchgeführt (blaue Kennlinie).

Die folgende Abbildung 91 zeigt den Vergleich der damals erzeugten PSDs (blau und rot) mit den neuen PSDs, die aus den Belastungsfahrten auf dem Scania-Testgelände in Södertälje (lila) abgeleitet wurden.



**Abbildung 91: Vergleich der PSDs**

In den Diagrammen ist zu sehen, dass die neuen „Södertälje 2019“ PSD-Werte in allen Richtungen und in beinahe allen Frequenzbereichen ggü. den früheren Vorgaben kleiner geworden sind, mit zwei Ausnahmen im Bereich - 6...12 Hz in X-Richtung und im Bereich 2...4 Hz in Y-Richtung.

Die neuen „Södertälje 2019“ PSD-Werte sind sogar in mehreren Frequenzbereichen kleiner als die eigenständig ermittelten Siemens-Vibrationslevel in „SPA Testfahrt 2016“.

### **Fazit**

Die neuen Anforderungen von Scania verursachten keine zusätzlichen oder höheren Schädigungen an den PAN-Komponenten bzw. führten zu keiner reduzierten PAN-Lebensdauer im Vergleich mit den Ergebnissen aus bisherigen Anforderungen, damit muss die aktuelle PAN-Struktur nicht geändert werden [127].

Für zukünftige PAN-Entwicklungen ist eine Ausweitung (Dauer und Belastungsfälle) der Messfahrten empfehlenswert. Die so gewonnenen Informationen können im Rahmen der Weiterentwicklung genutzt werden, um die PAN-Festigkeit und -Lebensdauer zu erhöhen. Im Laborteststand sollte bei Tests von zukünftigen PAN-Generationen eine Vermessung mittels DMS erfolgen, um die Qualität der Simulationen und der Verifikation zu verbessern.

### 3.5.4.4 Schallemissionsmessungen mit Mikrofon-Arrays verschiedener Hybrid-Modi (TEB.6.7)

#### **Aufgabenstellung**

Verkehrslärm ist ein wesentlicher Umweltfaktor. Daher sollten die Untersuchungen zu veränderter Schallentstehung und -ausbreitung anhand modifizierter Fahrzeugkonzepte mittels erneuter Schallemissionsmessungen auf der Versuchsanlage in Groß Dölln fortgesetzt werden. Als Aufgabenschwerpunkte waren Untersuchungen der verschiedenen Hybrid-Modi von außen sowie erstmals Schallemissionsmessungen in der Fahrerkabine zur indikativen Bewertung der Arbeitsplatzbelastung im Vergleich zum konventionellen Schwerlastverkehr geplant.

#### **Vorgehensweise / Ergebnisse**

Aufgrund der ständigen Weiterentwicklung der Fahrzeuge sollten, basierend auf den Ergebnissen in den ENUBA-Projekten, Schallpegelmessungen während der Testfahrten erneut durchgeführt werden.

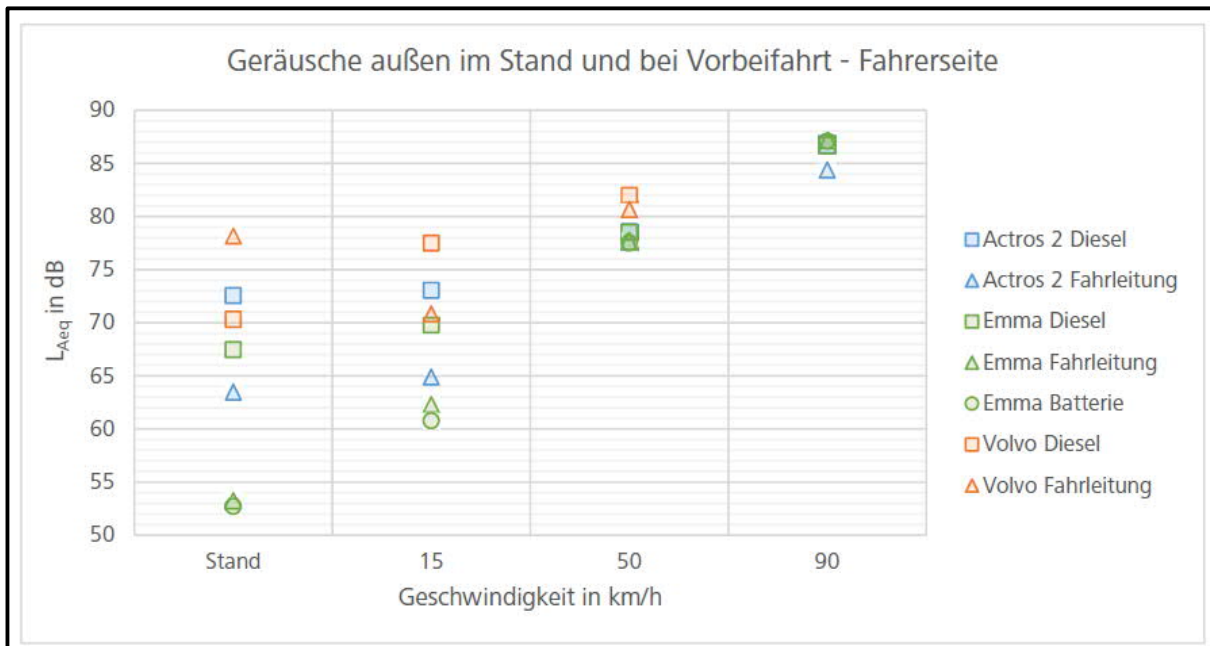
Die Messungen wurden mit verschiedenen Betriebsarten und Geschwindigkeiten durchgeführt bei der Lkw-Vorbeifahrt rechts und links der Fahrbahn von außen sowie innen in den Lkw-Fahrerkabinen. Ergänzend zu dem Fahrzeug Actros #2 standen für die durchgeführten Messreihen noch ein Class-8-Truck der Fa. Volvo sowie ein umgerüsteter Daimler-Lkw der Fa. Paul (Fahrzeugname: EMMA) zu Verfügung. Beide waren mit Pantographen der 2. Generation ausgerüstet.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, wurden die Anordnungen der Messeinrichtungen, die Betriebsarten und Geschwindigkeiten analog zu den früheren Versuchsreihen in Groß Dölln gewählt.



**Abbildung 92: Messung des Standgeräusches (Diesel) des Lkw „Actros #2 (links) / des Vorbeifahrtgeräusches angebügelt des Volvo-Lkw „Mack“ rechts)**

Bei den Auswertungen der Messungen [128] wurde zwischen der Darstellung des Dauerschalldruckpegels und der Terzspektren unterschieden. Der Dauerschalldruckpegel gemessen an der Fahrerseite der Lkw ist in der Abbildung 93 dargestellt.



**Abbildung 93: Äquivalenter Dauerschalldruckpegel der Geräusche im Stand und bei Vorbeifahrt auf der Fahrerseite**

Daraus lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt der gemessene Schalldruckpegel einer Vorbeifahrt und sinkt der Einfluss der Antriebstechnologie, das Rollgeräusch ist dominierend. Dennoch liegen die Pegel für den elektrischen Betrieb im Mittel unter den Pegeln des Dieselmotors. Bei 90 km/h liegt der Unterschied zwischen Fahrleitung und Diesel im Mittel unter 1 dB, bei 50 km/h liegt er bei 1,5 dB. Bei 15 km/h liegt der gemessene Pegel mit Fahrleitung im Mittel 7,6 dB unter dem Pegel im Dieselmotor.

Im Stand führt der elektrische Betrieb bis auf wenige Ausnahmen zu geringeren Pegeln im Vergleich zum Dieselmotor. Der Pegel mit Fahrleitung liegt durchschnittlich 0,5 dB über dem Pegel im Dieselmotor, aufgrund eines laufenden und nicht abschaltbaren Zusatzaggregates beim Lkw „Volvo“. Unter Vernachlässigung des Lkw „Volvo“ liegt der Pegel im Stand mit Fahrleitung im Mittel 8,2 dB unter dem Pegel im Dieselmotor.

Der Unterschied zwischen Batteriebetrieb und Fahrleitung kann am Lkw „Emma“ betrachtet werden und liegt im Stand, bei 50 km/h und bei 90 km/h unter 1 dB. Bei 15 km/h kann aus den Mittelwerten für den Betrieb mit Fahrleitung ein um 1,1 dB höherer Pegel gegenüber dem Batteriebetrieb berechnet werden. Der Unterschied ist somit praktisch vernachlässigbar.

## 4 Weiterentwicklungen durch Dritte - Einordnung der Projektergebnisse






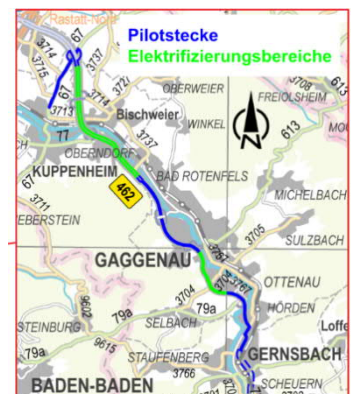
### 4.1 Wesentliche Projektergebnisse aus anderen eHighway Projekten

Während der Projektlaufzeit des Forschungs- und Entwicklungsprojekts ELANO erlebte das gesamte Forschungsfeld **eHighway** bzw. die Elektrifizierung des schweren Lkw-Verkehrs auf Autobahnen mittels Oberleitungen eine rasante weit verzweigte Entwicklung. Meilensteine sind die deutschen Feldversuche auf Autobahnen und Fernstraßen, die verschiedenen betriebstechnisch-ökonomisch orientierten Forschungsprojekte sowie die Aktivitäten im Bereich Regulierung, Standardisierung, Finanzierung und Abrechnung, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

#### Überblick über die eHighway-Feldversuche und Forschungsprojekte

Im Rahmen des Förderprogramms **erneuerbar mobil** des Bundesumweltministeriums wurden 2017 und 2018 insgesamt drei Projekte auf Fernstraßen des Bundes (A1, A5 und B462) ausgewählt, in denen die Errichtung der Oberleitungsinfrastruktur und ein mehrjähriger Erprobungsbetrieb gefördert wird. Tabelle 12 gibt einen Überblick über Lage und Kerndaten der Projekte.

**Tabelle 12: eHighway-Feldversuche auf Autobahnen und Fernstraßen in Deutschland**

Hessen (s. [129], [130])	Schleswig-Holstein (s. [131], [132])	Baden-Württemberg (s. [133])
 <ul style="list-style-type: none"> <li>Projekt: <b>ELISA</b></li> <li>A5</li> <li>Zeppelinheim-Weiterstadt</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>Projekt: <b>FESH</b></li> <li>A1</li> <li>Reinfeld-Lübeck</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>Projekt: <b>eWayBW</b></li> <li>B462</li> <li>Kuppenheim-Gaggenau</li> </ul>
 <p>Für Feldversuch ausgewählter Streckenabschnitt (ca. 15 km)</p> <p>Geplante Teststrecke (6 km) Genauere Position wird im Planungsverfahren festgelegt</p>	 <p>LKW-Pendelstrecke (25 km)</p> <p>Geplante Teststrecke (6 km)</p>	 <p>Pilotstrecke Elektrifizierungsbereiche</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Anlagenlänge: 5 km</li> <li>Anzahl Hybrid-Lkw: 5</li> <li>Betriebsaufnahme: 7.5.2019</li> <li>Kooperation mit mehreren Speditionen in vers. Relationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anlagenlänge: 5 km</li> <li>Anzahl Hybrid-Lkw: 5</li> <li>Betriebsaufnahme: 30.3.2020</li> <li>Kooperation mit Spedition Bode im Pendelverkehr zum Hafen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anlagenlänge: ca. 3,5 km</li> <li>Anzahl Hybrid-Lkw: 5</li> <li>Baubeginn: 06/2020</li> <li>Kooperation mit Speditionen in der Papierlogistik</li> </ul>

Neben der Errichtung der Oberleitungs- und Energieversorgungsinfrastruktur sowie begleitender Maßnahmen an den damit ausgerüsteten Verkehrswegen umfassen die Feldversuche umfangreiche wissenschaftliche Begleitforschungen. Diese beinhalten sowohl gleichartige Fragestellungen zu Schlüsselinformationen wie Energiebedarf, CO<sub>2</sub>-Einsparungen sowie Verfügbarkeit der Fahrzeuge und Anlagen als auch je individuelle Fragestellungen. So bildet in Hessen die Integration in Verkehrsmanagementsysteme einen besonderen Schwerpunkt [130], während in Schleswig-Holstein die elektrische Netzintegration und Versorgung durch Erneuerbare Energien [132] und in Baden-Württemberg ein auf Kurzstrecken bezogener Technologievergleich die Schwerpunkte bilden [133].

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die bisherigen und laufenden Grundlagenforschungs- und Technologieprojekte im Forschungsfeld eHighway mit Stichworten zu ihren Schwerpunkten.



**Tabelle 13: Inhalte und Ergebnisse der Förderprojekte zum elektrifizierten Straßengüterverkehr mit Oberleitungen**

Kategorie	Projekte, Laufzeit, Quellen	Fördermittelgeber (FuEG) und Projektpartner (PP)	Inhalte und Ergebnisse (Auswahl)
<b>Grundlagenforschung</b>	• ENUBA [2] 05/2010 - 09/201	• Fördermittelgeber (FuEG): BMU Projektpartner (PP): Siemens AG	• Erstmuster aktiver Stromabnehmer (PAN) (1,5 m Bautiefe) • 2 E-Lkw für Basisfunktionstests auf Versuchsanlage (VA) (1 km)
	• ENUBA 2 [3] 05/2012 - 12/2015	• FuEG: BMU PP: Siemens AG, DLR, TU Dresden	• Optimierung PAN (0,5 m Bautiefe) für Sattelzugmaschine • neue VA (2 km); Umfassende Techn., Ökol.-Ökonomische Studien
	• OL-Lkw [66] 01/2018 – 12/2020	• FuEG: BMU PP: Volkswagen AG, Siemens AG	• Optimierung von Antriebssteuerung und -komponenten • Fahrzeug- und PAN-Erprobung, Felddaten für Optimierung
<b>Öffentliche Erprobung</b>	• Schweden E 16 [134], [135] 01/2016 – 12/2019	• FuEG: Trafikverket Sweden PP: Siemens AG, Scania	• Integration auf Europastraße E16, Erprobung verschiedener eLkw • weltweit erster öffentlicher E-Highway (2 km)
	• Carson California [52] 07/2014 – 03/2018	• FuEG: SCAQMD // PP: Siemens AG, Volvo, Transpower	• Erprobung für Shuttle-Anwendung im Hafenhinterlandverkehr • Kombination Oberleitungsbetrieb mit 3 versch. Hybridantrieben
<b>Wirtschaftlichkeit und Marktpotenzial</b>	• MKS-Studie Potenziale [136] 2015-02/2017	• FuEG: BMVi PP: Fraunhofer ISI, PTV, Mfive, u.a.	• Technisch-wirtschaftliche Analyse des Oberleitungssystems • Ermittlung von Fahrleistungsanteilen und Umstellungsraten
	• StratON [29] - StratES [137] 07/2016-12/2018-10/2022	• FuEG: BMU // PP: Ökoinstitut, HS Heilbronn, Fraunhofer IAO	• Bewertung Technologiepotenziale im Güterverkehrsmarkt • Wirtschaftliche Bewertung möglicher Markteinführungsstrategien
	• Roadmap OH-Lkw [138], [139] 09/2016 – 02/2019	• FuEG: BMU // PP: Ifeu, PTV, Fraunhofer IWES	• Akteurs- und Hemnisanalyse • Identifizierung von Markteintrittspotenzialen in Modellregionen
	• My eRoads [140] 01/2019 – 12/2021	• FuEG: BMU // PP: Ifeu, PTV, Fraunhofer SCS, IKEM	• Teil 1: Elektrifizierungsberatung Logistik (eLkw und Busse), toolbasiert • Teil 2: Roadmap Infrastrukturentwicklung
<b>Feldversuche</b>	• ELISA, ELISA-IIb [129], [130] 01/2017 – 12/2022	• FuEG: BMU // PP: HessenMobil, TU Darmstadt, Siemens Mobility GmbH	• Feldvers. auf 5 km A4 im Großraum Frankfurt mit 5 Spediteuren • Wechselwirkung mit V.-Management, Betrieb, Instandhaltung
	• FESH, FESH-IIb [131], [132] 01/2017 – 12/2022	• FuEG: BMU // PP: FH Kiel FuE-Zentrum, TU Dresden, HS Heilbronn	• Feldvers. auf 5 km A1 bei Lübeck mit Spediteur im Pendelbetrieb • Wechselwirkung bei Versorgung durch erneuerbare Energien
	• eWayBW [133] 09/2017 – 09/2021	• FuEG: BMU // PP: Land BaWü, PTV, Fraunhofer ISI, u. a.	• Feldversuch auf 3 km Bundesstraße in der Papierlogistik Murgtal • Vergleich zu reinen Batterie-Lkw und regionalem Schienenverkehr
<b>Europäisierung und Regulierung</b>	• ColIERS [141] 01/2018 – 12/2019	• FuEG: BMU & Trafikverket PP: Ifeu, Ökoinstitut, RISE, KTH	• Vergleich verschiedener ERS-Technologien und Anwendungsfälle • Initiierung von Machbarkeitsanalyse im Korridor Deutschland-Schweden
	• AMELIE [142] 09/2018 – 09/2020	• FuEG: BMWi PP: Siemens Mobility GmbH, IKEM	• Identifizierung von Finanzierungs- und Abrechnungssystemen • Initiierung eines europäischen Dialogs zu ERS-Regulierungsfragen • Technische Harmonisierung im Rahmen von Cenelec-Arbeitsgruppen

## 4.2 Einordnung der Projektergebnisse des Forschungsvorhabens

### Standardisierung – Regulierung – Markthochlauf

Studien zu den Entwicklungsphasen großer technischer Systeme zeigen, dass neben der Entstehung und iterativen Verbesserung des technischen Kerns insbesondere für die Stabilisierung des Gesamtsystems und als Grundlage der späteren Durchsetzung und Verbreitung eine Ausweitung des Netzwerkes der industriellen, institutionellen und öffentlichen Akteure notwendig ist [143]. Teil dieser als Stabilisierung bezeichneten Phase sind Austausch und Kooperationen, um einerseits mittels technischer Standards den Lösungsraum einzugrenzen und Interoperabilität zwischen Herstellern verschiedener Komponenten und Teilsysteme herzustellen. Andererseits müssen mit weiteren Partnern aus dem Forschungsbereich und in der Legislative die Bedarfe und Vorgehensweisen zur Anpassung des regulativen Rahmens erarbeitet werden, wobei immer auch die konkrete technische Lösung abgebildet und erklärt werden muss. Die Interaktion zwischen Regulierung und Standardisierung zeigt Abbildung 94.

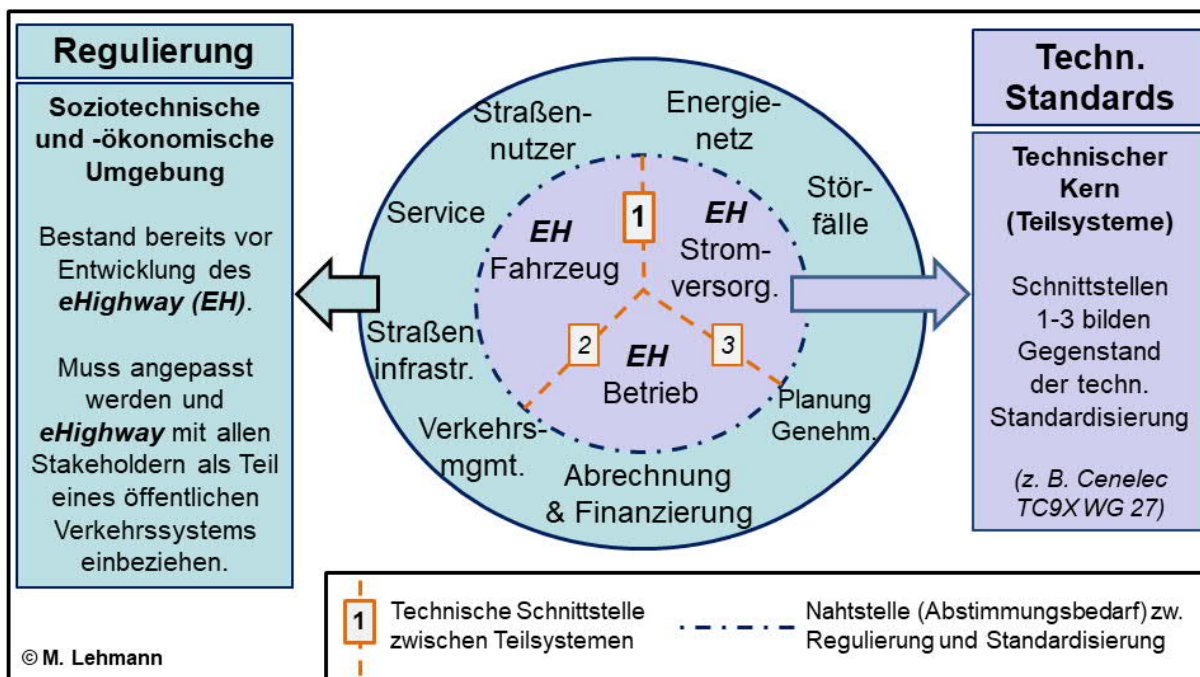


Abbildung 94: Interaktion von Regulierung und Standardisierung am Beispiel eHighway

In der Konzeption des Projekts ELANO war dazu im Projektantrag auch ein separates Themenfeld „Institutioneller Rahmen“ geplant. Aus der Ausdifferenzierung der Forschungsfragen und den zur Erarbeitung notwendigen Forschungspartnern wurde deutlich, dass der Themenkreis ein eigenständiges Projekt rechtfertigt, sodass die Regulierungs-, Finanzierungs- und Standardisierungsfragen seit September 2018 im Verbundprojekt AMELIE [142] zusammen durch die Siemens Mobility GmbH und das IKEM – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität bearbeitet werden.

Beispielhaft für die Grundlagenforschungen zum Marktpotenzial und -hochlauf sowie zur Einordnung der Oberleitungstechnologie in den technologischen und wirtschaftlichen Lösungsraum alternativer Antriebssysteme für schwere Nutzfahrzeuge sind folgende Arbeiten und Ergebnisse aus dem Verbundforschungsprojekt StratON unter Führung des Ökoinstitut:

- Der Endbericht stellt die technologischen und wirtschaftlichen Annahmen, Methoden und Ergebnisse der Markthochlaufanalysen vor und diskutiert außerdem Wechselwirkungen mit dem Energiesektor sowie die Wirkung verschiedener Förder- und Anreizmechanismen auf die Marktdurchdringung [29].
- Der zuvor veröffentlichte Zwischenbericht untersucht in verschiedenen Szenarien Fahrzeug- und Infrastrukturkombinationen des eHighway-Systems und stellt diese hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, technischer Machbarkeit und technologischer Reife in den Vergleich zu reinen Batterie-Lkw, Brennstoffzellensystemen und Lösungen mit synthetischen Kraftstoffen, sog. E-Fuels [144].

## 5 Ergebnisverwertung

### 5.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Umsetzung der Entwicklungsschwerpunkte des Projekts ELANO kann insgesamt als sehr erfolgreich bewertet werden. Wie im Projektantrag richtig eingeschätzt, standen die personellen Forschungs- und Entwicklungsleistungen bei der Zielerreichung im Vordergrund. Die Erweiterung der Versuchsanlage sowie das Weiterentwicklungsprogramm für den Stromabnehmer einschließlich der Umrüstung eines der ENUBA-Lkw zum Erprobungsträger führten jedoch auch zu erheblichen Material- und Fertigungskosten. Die zugehörigen Details sind dem kaufmännischen Projektabschluss zu entnehmen.

Alle entstandenen Kosten des Projekts ELANO sind ausschließlich zur Erreichung der Entwicklungs- und Umsetzungsziele angefallen und waren somit für die Zielerreichung des Vorhabens notwendig. Die Angemessenheit der geleisteten Arbeit sowie der dabei entstandenen Kosten erschließt sich außerdem unter Beachtung der folgenden geschaffenen materiellen und ideellen Werte, die eine zentrale Basis für die weiteren Forschungsprojekte und Feldversuche zur Elektrifizierung des schweren Straßengüterverkehrs bilden:

- Optimierung, Entwicklung, Verifizierung und Prüfung eines robusteren, mechatronisch einfacher aufgebauten Stromabnehmers als Automotive-Komponente mit standardisierten Schnittstellen zur Integration in verschiedene Basisfahrzeuge.
- Wirtschaftlich-technische Optimierung der Schnittstelle Stromabnehmer-Fahrleitung die einerseits Ausgangspunkt des Weiterentwicklungsprogramms für den Stromabnehmer war und die andererseits auch zur Entwicklung von für den eHighway optimierten Fahrleitungskomponenten führte.
- Wirtschaftlich-technische Optimierung von Stromversorgungs- und Fahrzeugkonzept mit klaren Aussagen zur möglichst durchgehenden Elektrifizierung des Kernnetzes mit nur kurzen Unterbrechungen an baulichen Zwangspunkten sowie zur optimalen Systemspannung. Diese sollte möglichst hoch, aber noch innerhalb der Grenzen der Niederspannungsrichtlinie liegen, um Trends in der Fahrzeugtechnik zu höheren Spannungen aufzugreifen und gleichzeitig die Vorteile höherer Spannungen auch in der Infrastruktur auszunutzen.
- Enger technisch-inhaltlicher und teilweise auch personeller Austausch und Kooperation mit den Feldversuchs- und weiteren Projekten im Forschungsfeld eHighway, um jeweils den aktuellen Stand der Technik in Planung, Konstruktion und Technologiebewertung zu berücksichtigen.
- Erweiterung der infrastrukturellen und technischen Möglichkeiten der Versuchsanlage in Groß Dölln und des Versuchsstands im Entwicklungszentrum der SMO *Technologie & Innovation* in Berlin-Adlershof, die einen unverzichtbaren Beitrag zum Gelingen des Projekts ELANO leisteten und im Anschluss sowie parallel für weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte aber auch für die Inbetriebnahme neuer Hybrid-Nutzfahrzeuge im Rahmen öffentlicher Erprobungen und Feldversuche bereitsteht.
- Durch die deutschlandweite Verteilung der beteiligten Siemens-Abteilungen waren die angefallenen Reisekosten unvermeidlich. Kostendämpfend erwies sich die Lage der Versuchsanlage für die Mitarbeiter der Berliner Standorte, da für sie kaum Reisekosten anfielen, sie aber durch den Einsatz als Bau- und Versuchsleiter und für die Arbeiten am Teilsystem Stromabnehmer zahlreiche Dienstreisen zur Versuchsanlage unternehmen mussten.

Die Angemessenheit der geleisteten Arbeit folgt aus der Erfüllung der im Projektantrag beschriebenen Aufgaben und Tätigkeiten sowie aus der Erreichung der definierten Projektziele einschließlich der projektbegleitenden, eng abgestimmten Änderungen im Ziel- und Arbeitsplan. Zusammenfassend ist festzustellen, dass das technisch-wirtschaftliche Vorzugssystem zur Elektrifizierung von Autobahnen für den Wirtschaftsverkehr umfassend weiterentwickelt und optimiert wurde. Die Projektergebnisse ermöglichen dem Fördermittelgeber sowie den verkehrspolitischen Entscheidungsträgern, die wirtschaftlichen, technischen sowie energie- und klimapolitischen Potenziale der Elektromobilität auch für den Wirtschaftsverkehr umfassend zu erschließen. Nur die enge Verzahnung aus Technologieentwicklung, Feldversuchen und Forschung ermöglichte die mit 9 Jahren extrem kurze Entwicklungszeit von der ersten Machbarkeitsstudie im Projekt ENUBA bis zur Betriebsaufnahme im Projekt ELISA.

## 5.2 Nutzen entsprechend Verwertungsplan

Beim Nutzen, das heißt den Verwertungsmöglichkeiten der Untersuchungsergebnisse, kann zwischen den zwei Kategorien „Wirtschaftliche Erfolgsaussichten und Anschlussfähigkeit“ sowie „Technische Erfolgsaussichten und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit“ unterschieden werden.

### Wirtschaftliche Erfolgsaussichten und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Gegenwärtig konkurrieren unterschiedliche Konzepte zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs. Zu erwähnen sind hier Antriebssysteme, die mit Einsatz von erneuerbaren Energien erzeugte kohlenstoffhaltige synthetische Kraftstoffe nutzen, rein elektrische Konzepte über Brennstoffzellen oder Batterien, wie sie zurzeit insbesondere im öffentlichen Personennahverkehr eingesetzt werden oder Hybridlösungen, die verschiedene Lösungsansätze miteinander kombinieren. Der oberleitungsgespeiste Lkw ergänzt diese Konzepte um eine Schlüssel-Variante, in dem die notwendige Antriebsenergie kontinuierlich zugeführt werden kann und damit die kostenintensive Speicherung der Gesamtenergie im Fahrzeug entfällt. Zudem ist die Oberleitungslösung kompatibel mit alternativen Antrieben und Kraftstoffen.

Der elektrische Betrieb von Fern-Lkw an einer Oberleitung bietet damit die Möglichkeit, sowohl die Betriebskosten als auch die Umweltbelastung zu reduzieren.

Dass ein solcher Betrieb im Vergleich zu anderen Konzepten auf Basis einer Gesamtkostenbetrachtung die langfristig wirtschaftlichste Lösung darstellt, wurde in den letzten 2 Jahren in einer Reihe von wissenschaftlichen Studien durch renommierte Experten und Institute bestätigt, s. dazu Abschnitt 4.1.

Trotz dieser offensichtlichen Vorteile zeigt sich, dass die Implementierung eines solchen Systems maßgeblich von den politischen Rahmenbedingungen (z. B. Finanzierungsmodellen, Genehmigungsverfahren, Implementierungszeitraum) und den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (z. B. Preisentwicklungen von Erdöl und Strom) abhängig ist.

Ganz wesentlich für eine wirtschaftliche Gestaltung von Einführung und Hochlauf des Systems wird jedoch weiterhin der technologische Fortschritt sein. Gemeint sind hier u. a. anforderungsgerechte Optimierungen auf Basis der Erkenntnisse aus den Feldversuchen, Effizienzsteigerungen, Produktionskostensenkungen. Und genau hier sehen die am Projekt beteiligten Experten der Siemens Mobility GmbH auf Basis der erzielten Projektergebnisse, der technologischen Fortschritte in korrespondierenden Forschungsprojekten, wie z.B. dem Projekt OL-Lkw unter der Leitung von Volkswagen oder dem Projekt ConverT der RWTH Aachen, weiteres Potenzial hinsichtlich einer Systemoptimierung und damit einer Steigerung sowohl der Wirtschaftlichkeit als auch der technischen Einsatzreife.

Darüber hinaus zeigen erste Analysen aus der Begleitforschung zum Feldversuch ELISA, dass das System einschließlich des aktuellen Pantographen (PAN) der dritten Generation, den betrieblichen Anforderungen der Speditionen im Wesentlichen gewachsen ist. Nichtsdestotrotz können auch hier weitere Potenziale identifiziert werden, um das System eHighway mit seinen Hauptelementen Infrastruktur, Pantograph, elektrische Antriebsausrüstung und Betriebsüberwachung/-steuerung weiter zu optimieren und zu normieren. Diese Optimierungen und Normierungen bilden die Grundlage für einen künftigen zügigen Ausbau und den interoperablen Betrieb des Systems über Ländergrenzen hinweg.

Die Siemens Mobility GmbH beabsichtigt daher, die in diesem Projekt weiterentwickelte Versuchsanlage Groß Dölln einschließlich der Erprobungsträger der neuen Generation auch für die nächsten Phasen der Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität zu nutzen und wird einen entsprechenden Antrag auf Förderung aus dem neuen Förderprogramm zur Entwicklung der Elektromobilität beim BMU einreichen.

Ziel dieses Anschlussprojektes wird es sein, die Erfahrungen und Erkenntnisse aus der mehrjährigen Betriebserprobung im Rahmen der drei Feldversuche hinsichtlich optimierter Systemauslegung, verfügbarer Betriebsmanagementsysteme und erweiterter Technologiereife derart umzusetzen, dass auf Basis dieses Anschlussprojektes eine sukzessive Implementierung der Technologie möglich ist und damit das eHighway-System für die Bundesregierung wie auch für Verantwortliche in anderen Ländern hinsichtlich der Dekarbonisierung des Verkehrssektors eine valide Handlungsoption darstellt.

Siemens Mobility wird sich als Errichter der Infrastrukturanlagen für die drei deutschen Feldversuche auch im Rahmen der mehrjährigen Phase der Betriebserprobung engagieren und dabei neben der



eigentlichen Betriebsführung auch die wissenschaftliche Evaluation bestmöglich begleiten und unterstützen.

### **Technische Erfolgsaussichten und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit**

Basis der zuvor beschriebenen wirtschaftlichen Erfolgsaussichten sind die bereits erzielten technischen Erfolge sowie die erwartbaren Ergebnisse der noch anstehenden Weiterentwicklungen.

Technisches Hauptergebnis des Projekts ELANO war die technisch-wirtschaftliche Optimierung des Gesamtsystems, d.h. die Weiterentwicklung von Teilsystemen und Komponenten, die Erweiterung der eHighway-Einsatzgebiete sowie die weitergehende Untersuchung von Wechselwirkungen mit der jeweiligen Anwendungsumgebung. Wesentliche Arbeitsbereiche dabei waren u.a. das umfassende Weiterentwicklungsprogramm zum Teilsystem Stromabnehmer, die Vervollständigung des Infrastruktur-Katalogs zur Elektrifizierung von Fernstraßen und die vertiefte Analyse der technischen Wechselwirkungen sowohl in Richtung der unterschiedlich gestalteten Antriebskonfigurationen von Hybrid-Lkw als auch in Richtung des Energiesektors mit Fokus auf die Integration in bestehende Versorgungsstrukturen.

Im Rahmen des Projekts ELANO konnte die Siemens Mobility GmbH die umfangreichen Kenntnisse und Erfahrungen in allen maßgeblichen Technologie- und Wissenschaftsfeldern des eHighway-Systems zielgerichtet zum Einsatz bringen und damit die Ergebnisqualität und Zielerreichung absichern. Im Zuge der praktischen Erprobung konnte die angestrebte Einsatzbereitschaft der weiterentwickelten Systeme und Lösungen selbst und im Zusammenwirken als Gesamtsystem nachgewiesen werden. Zusammen mit verschiedenen Anpassungen in der Durchführung- und Entwicklungsplanung dieses Projekts konnte somit u.a. die rechtzeitige Lieferung des weiterentwickelten Stromabnehmers an den Nutzfahrzeughersteller Scania zur Auslieferung der OH-Lkw an die am hessischen Feldversuch ELISA beteiligten Speditionen sichergestellt werden. Ebenso konnte auf diese Weise die Entwicklung der für die Errichtung der Fahrleitungsanlage in Hessen benötigten Bauteile rechtzeitig abgeschlossen werden.

Gleichzeitig leiten sich aus den projektbezogenen, mehrjährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu einem komplexen Verkehrssystem neue und erweiterte Fragestellungen ab bzw. ergeben sich aus der Analyse und Bewertung einzelner Themenfelder weitergehende Untersuchungs- und Entwicklungsbedarfe. Dabei lassen sich folgende wesentliche Aspekte benennen, mit denen sich zukünftige Systemweiterungen und -optimierungen beschäftigen sollten:

- Standardisierung von Anforderungen und Systemparametern für das Stromabnehmersystem zur Sicherstellung einer hersteller- und länderübergreifenden Systemkompatibilität bei unterschiedlichen eHighway-Anwendungen
- Umsetzung der Anforderungen hinsichtlich funktionaler Sicherheit im Stromabnehmersystem auf Basis von Betriebserfahrungen und adaptierten Rahmenbedingungen
- Entwicklung von Systemen der vorausschauenden Betriebsführung mit dem Ziel einer planbaren und bedarfsgerechten Bereitstellung von elektrischer Energie für alle Nutzer
- Entwicklung von Lösungen zur Ermittlung und Verrechnung von Nutzungsentgelten
- Weiterentwicklung von Systemen zur Überwachung und Steuerung des Anlagenzustands mit dem Ziel der Gewährleistung eines sicheren, zuverlässigen und planbaren Anlagenbetriebs
- Optimierte Systemauslegungen von Stromversorgung, Fahrleitung und Antriebssystem auf Basis definierter Einsatzszenarien

Darüber hinaus werfen parallellaufende wissenschaftliche Projekte spezifische Fragestellungen auf. So wirkten Fachleute von Siemens u. a. in den beiden Forschungsprojekten unter der Leitung von Öko-Institut und Ifeu bei der Untersuchung und Erörterung spezifischer Aspekte von eHighway-Implementierungsszenarien in Expertenworkshops oder als Mitglieder des Projektbeirats mit. Auch hier ergaben sich Fragestellungen z. B. im Hinblick auf die Bereitstellung von erneuerbaren Energien für den Transportsektor oder die Betriebskosten und -zyklen von OH-Lkw, die in weitergehenden Untersuchungen beantwortet werden sollten.

Siemens Mobility wird die interdisziplinären Forschungsaktivitäten rund um die Dekarbonisierung und Automatisierung des schweren Straßengüterverkehrs im Rahmen des etablierten eHighway-Forschungsnetzwerkes weiterhin aktiv unterstützen und dazu beitragen, dass durch diese Vernetzung die

zu entwickelnde und erprobende Vorzugslösung in ein nachhaltiges Gesamtbild des Straßengüterverkehrs der Zukunft eingebettet ist.

Ebenso hält Siemens Mobility an dem Vorhaben fest, Produkte für elektrifizierte Fernstraßen zu entwickeln und damit einen wesentlichen Beitrag zur möglichst zeitnahen und großflächigen Umsetzung dieses Verkehrssystems zu leisten und wird sich auch bei Projektanträgen Dritter engagieren, um eine bestmögliche Weiterverwendung und Vertiefung der gewonnenen Erkenntnisse zu gewährleisten.

### 5.3 Weitere Ergebnisverwertung

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts ELANO wurden in enger Abstimmung mit dem Fördermittelgeber sowohl in verschiedenen Aufsätzen in Fachzeitschriften veröffentlicht als auch in zahlreichen nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt. Dies dient einerseits der Wissensverbreitung zum eHighway-System. Andererseits ergeben sich häufig nur in der Diskussion mit der Fachöffentlichkeit die für die Etablierung des Systems entscheidenden Impulse.

Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang unter anderem folgende Veröffentlichungen und Vorträge:

- Fachartikel in „eb - Elektrische Bahnen“, Ausgabe 09/2018
  - Autoren: Dr. Michael Lehmann, Dominik Räder (Siemens Mobility GmbH)
- Fachartikel in „Der Eisenbahningenieur“, 11/2018
  - Autor: Dr. Michael Lehmann (Siemens Mobility GmbH)
- Vortrag beim Österreichischen Verband für Elektrotechnik (OVE), 01/2019
  - Referent: Dr. Michael Lehmann (Siemens Mobility GmbH)
- Vortrag im Rahmen der ERS-Konferenz in Frankfurt, 05/2019
  - Referent: Dr. Adam Slupinski (Siemens Mobility GmbH)
- Fachartikel in „eb - Elektrische Bahnen“, Ausgabe 09/2019
  - Autoren: Dr. Florian Bühs, Dr. Bastian Blase (Siemens Mobility GmbH)

Als weiterer Aspekt der Ergebnisverwertung sind die Erfindungen und Patentanmeldungen mit Bezug zum Forschungsprojekt ELANO zu nennen. Während der Projektlaufzeit vom 01.01.2016 bis 31.12.2019 sind insgesamt 42 einzelne Erfindungen gemeldet worden, von denen 33 zum Patent angemeldet wurden. Durch die lange Verfahrensdauer einschließlich z. T. mehrmonatiger Offenlegungs-, Einspruchs- und Prüfverfahren wurde aber bisher nur für 5 Anmeldungen ein Patent erteilt.

## 6 Förderziele und Zukunftsaussichten

Mit Blick auf die Ziele der Förderung (vgl. Abschnitt 1.2 und [5]) und den Zielbeitrag der Einzel- und Gesamtergebnisse des Projekts ELANO wird die besondere Stellung des Projekts in der eHighway-Forschungslandschaft deutlich. Im Vergleich zur Ausgangssituation in der Planungsphase 2015 wurden sowohl technologisch als auch durch die Etablierung und Erprobung im öffentlichen Raum im Rahmen der Feldversuche die Voraussetzungen geschaffen, damit die Oberleitungstechnologie Teil des verkehrspolitischen und -technischen Lösungsraum zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs wird. Das im Oktober von der Bundesregierung verabschiedete *Klimaschutzprogramm 2030 zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050* weist in einer Maßnahme folgende Einzelaktivitäten im Bezug zur Oberleitungstechnologie auf [145]:

- „Die Bundesregierung erstellt Konzepte für: Lademöglichkeiten für Batterie-Lkw, Oberleitungen für Lkw sowie für Wasserstoff-Tankstellen.
- Der Aufbau der Tank-, Lade und Oberleitungsinfrastruktur für alternative Antriebe muss sich an den beabsichtigten verkehrlichen bzw. logistischen Anwendungen orientieren. Dabei gilt es, einen gesamtsystemischen Ansatz von der Nutzung erneuerbarer Energien bis zu Kundenaspekten für eine emissionsfreie Logistik im Blick zu haben.“

Daran anknüpfend wurden neben den bereits in Tabelle 13 aufgelisteten noch laufenden Forschungs- und Feldversuchsprojekten weitere Projekte gestartet, die die verkehrs- und energiepolitischen Ziele aufgreifen, s. Tabelle 14.

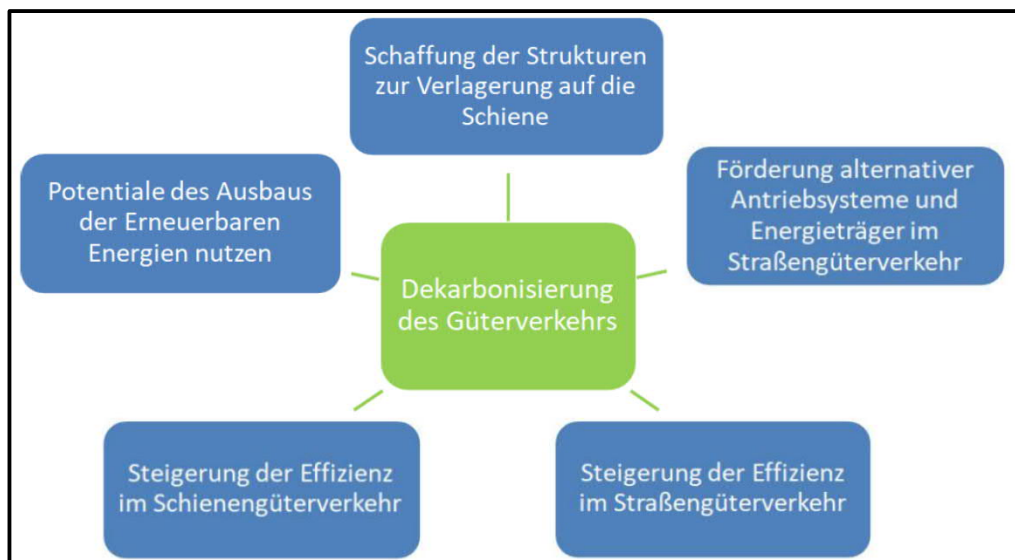
**Tabelle 14: Zusätzliche Projekte im Forschungsfeld eHighway**

Projekt und Laufzeit	Fördermittelgeber Projektpartner	Ziele und Arbeitsschwerpunkte
<b>StratES</b> 01.11.2019- 30.10.2022 Quelle: [146]	Fördermittel: <b>BMU</b> Projektpartner: • Öko-Institut e.V. • Hochschule Heilbronn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analysen zu Potenzialen von alternativen Antrieben im Straßengüterverkehr unter Berücksichtigung des Gesamtmarkts</li> <li>• Berücksichtigung des Fern-, Nah- und Regionalverkehrs</li> <li>• Fallstudien mit assoziierten Unternehmenspartnern</li> <li>• Verbesserung und Erweiterung der Markthochlaufmodellierung</li> </ul>
<b>BOLD</b> 01.10.2019- 31.03.2023 Quelle: [147]	Fördermittel: <b>BMU</b> Projektpartner: • Fraunhofer ISI • Ifeu • Öko-Institut e.V.	Ziel ist, Ergebnisse aus den Feldversuch-Projekten und weiteren Forschungsprojekten zum Gesamtsystem in Bezug zu setzen und projektübergreifend vergleichbar zu machen. Schwerpunkte sind: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesellschaftliche Akzeptanz</li> <li>• Akteurs- und Umfeldanalyse</li> <li>• Wirkungen auf Umwelt, Ressourcen und Energiesystem</li> <li>• Entwicklung politischer Szenarien und Strategien</li> </ul>

Die in [145] und den Projekten StratES und BOLD (s. Tabelle 14) identifizierten Forschungsfragen und geplanten Konzepte verdeutlichen, dass es nicht mehr nur um die Ausdifferenzierung der technischen Lösung, sondern vielmehr um die Etablierung und Akzeptanz im Verkehrsmarkt sowie die Vorbereitung und Begleitung des Markthochlaufs geht, um so auch im Straßengüterverkehr einen signifikanten und messbaren Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030 und 2050 zu leisten.

Die Berücksichtigung der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs mittels Oberleitungen als einem technologischen Eckpfeiler im Güterverkehrsmarkt bettet sich dabei nahtlos in die energie- und verkehrspolitischen Ziele der wichtigsten europäischen Güterverkehrsmärkte ein. Deren in [148] durchgeführte Analyse im Hinblick auf eine möglichst weitreichende Dekarbonisierung des gesamten Güterverkehrs führt zu fünf zentralen Handlungsfeldern und Leitplanken, die in Abbildung 95 (S. 129) dargestellt sind. Die absichtlich europäisch fokussierte Studie zeigt erhebliche Potenziale für eine koordinierte Gesamtstrategie, die sich wiederum in der Praxis durch die gezielte Förderung und Fortsetzung von international ausgerichteten Forschungsprojekten, wie z. B. dem Projekt AMELIE (vgl. Tabelle 14 und [142]) unterstützen und stärken lässt.

Beispielhaft für Erfolg und Chancen eines interoperablen, europäisch vernetzten Ansatzes ist die Aufnahme der Oberleitungstechnologie für den Straßengüterverkehr in das Regierungsprogramm Österreichs für die Legislaturperiode 2020-2024 [149].



**Abbildung 95: Haupthandlungsfelder zur Dekarbonisierung des Güterverkehrs [148]**

Das übergeordnete Ziel der Technologieförderung und -implementierung ist die Senkung der Treibhausgasemissionen im Güterverkehr, damit auch der Verkehrssektor als Ganzes einen relevanten Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten kann. Mit Blick auf die Haupthandlungsfelder in Abbildung 95, zu denen das eHighway-System in drei Feldern Lösungsansätze bietet, reagiert die Verkehrspolitik im Bereich Schienengüterverkehr bereits mit einem Bündel aus technischen, organisatorischen und auch regulativen Maßnahmen und Förderanreizen [150].

Gleichermaßen kann die Energiewende im (Straßengüter)-Verkehr nur gelingen, wenn zielgerichtet mit der Elektrifizierung eines Kernautobahnnetzes (vgl. [12]) eine energieeffiziente, mit erneuerbaren Energien sparsam umgehende und im Vergleich zu den Antriebsalternativen günstige Basistechnologie breit aufgebaut eingesetzt wird. Die für eine zügige Implementierung notwendigen Analysen, Studien und weiteren Entwicklungsarbeiten lassen sich ebenfalls in einerseits planerische, organisatorische und regulative Maßnahmen und andererseits in technologiezentrierte Arbeiten und Optimierungen gliedern.

Als übergeordnete, planerische und regulative Arbeiten sind folgende Themen von besonderer Wichtigkeit:

- Fortführung der Aktivitäten zu Regulierung und Standardisierung sowie deren systematische Ausweitung zur Anpassung der Planungs-, Regulierungs- und Finanzierungsinstrumente einschließlich der Einbettung der Fernstraßenelektrifizierung in den Bundesverkehrswegeplan
- Verknüpfung der kommerziellen und nutzerzentrierten Markthochlaufanalysen mit breit angelegten Studien zu den personellen, industriellen, planerischen, baulichen, betrieblichen Anforderungen und Kapazitäten für einen zielgerichteten Systemaufbau und -betrieb
- Themenbezogene Analysen zu Technologieutralität versus -spezifität zur Bestimmung der volkswirtschaftlichen Implikationen und Folgen im Falle der Parallelentwicklung unterschiedlich effizienter Lösungen ohne eine Richtlinienvorgabe und ohne eine infrastrukturelle Präferenzierung der geeignetsten Technologien

Im Bereich der Technologieentwicklung lassen vor dem Hintergrund des geplanten Ausbaus des eHighway-Systems folgende Themenfelder in Bezug auf notwendige Weiterentwicklungen und fortgesetzte Analysen identifizieren:

- Umsetzung der aus der technischen, verkehrlichen, rechtlichen und ökologischen Evaluierung in den deutschen Feldversuchen gewonnenen Erkenntnisse.
- Systemoptimierungen an der Kernkomponente PAN. Die Weiterentwicklungen orientieren sich dabei zum einen an den normativen Anforderungen für den interoperablen, erweiterten Arbeitsbereich des PAN, an der Implementierung von innovativen Technologien zur Lkw-Spurführung, an der Erweiterung von Testmöglichkeiten für Verifikation / Validierung geforderter



Systemeigenschaften und definierter Gütekriterien und an der Adaption des PAN für höhere Systemspannungen.

- Systemoptimierungen im Fahrleitungssystem. Die Weiterentwicklung der technischen Speziallösung windschiefes Parallelfeld, die Anpassung von Projektierungs- und Analysetools für z.B. eine (teil-)automatisierte Zustandsbewertung der elektr. Infrastruktur und des Pantographen, die Entwicklung von technischen Lösungen z.B. zur verbesserten Fahrdrachtrisserkennung schaffen die Voraussetzungen für einen zügigen Ausbau der eHighway-Infrastruktur.
- Systemoptimierungen im Bereich der Betriebsführung: Entwicklung intelligenter und vorausschauender Steuerungs- und Kommunikationssysteme unter Einbindung relevanter Daten aus Infrastruktur und Fahrzeug auf Basis etablierter V2X-Standards für das Energie- und Lastmanagement im eHighway-System mit dem Ziel einer ausbalancierten und kostenoptimierten Ausnutzung der elektrischen Infrastruktur, einer Befähigung/Ermöglichung der unterschiedlichen Transportaufgaben sowie einer hohen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit des Gesamtsystems.
- Schaffung der normativen und regulativen Rahmenbedingungen für die verschiedenartigen Teilsysteme und Schnittstellen im eHighway-System zur rechtzeitigen Definition und Etablierung von technologischen Standards zur Gewährleistung relevanter Interoperabilitätsanforderungen und damit zur Vermeidung von technischen Insellösungen.

## 7 Anhang

### 7.1 Abkürzungen

AC	en.: alternating current, dt.: Wechselstrom
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems, dt. Fahrerassistenzsystem
AG	Aktiengesellschaft
AMELIE	<u>A</u> brechnungssysteme und <u>-m</u> ethoden für <u>e</u> lektrisch betriebene <u>L</u> kw sowie deren in- teroperable <u>I</u> nfrastrukturen im <u>e</u> uropäischen Kontext
ARM	Advanced Risk Machines (Mikroprozessor-Design)
ASA	Arbeitsschutzausschuss
ASI	Avoid – Shift – Improve, dt. vermeiden-verlagern-verbessern
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
BAB	Bundesautobahn
BDC	Basic Design Criteria
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie
<i>BMUB</i>	<i>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2013- 2018)</i>
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (seit 2018)
<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 und Energie
BOLD	Begleitforschung Oberleitungs-Lkw-Forschung in Deutschland
CAN	en.: controller area network, dt.: gesteuertes Datennetz
CCS	Combined Charging System, dt.: kombiniertes Ladesystem
CMS	en.: contact line monitoring system, dt.: Fahrleitungsüberwachungssystem
CNG	Compressed Natural Gas
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CPU	Central Processing Unit
cRSP	en.: Common Remote Service Platform; dt.: gemeinsame Fernwartungsumgebung
CSM	Common Safety Method
cW	Strömungswiderstandskoeffizient
dB	Dezibel
DC	en.: direct current, dt.: Gleichstrom
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt
DMS	Dehnungsmessstreifen
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
EBatanZK	Energie, die dem Zwischenkreis aus der Batterie zugeführt werden kann
EBatvonZK	die dem Batterieumrichter vom Zwischenkreis zugeführte Energie

eBus	Schnellladesystem für Busse mit Top-Down Pantographen, die an Masten oder Haltestellen montiert sind. (Produkt der Siemens AG)
ECU	Electronic Vehicle Control Unit (Fahrzeugsteuergerät)
EE	Erneuerbare Energien
EFK	Elektrofachkraft
EFLanZK	Dem Zwischenkreis von der Fahrleitung zugeführte Energie
EFLvonZK	Energie, die in die Fahrleitung gespeist werden kann
EFZ	Themensäule / Teilprojekt „Elektrische Fahrzeugtechnik im Projekt ELANO“
EGBanMotor	dem Motor/ Generator vom Differential zugeführte Energie
EGBvonMotor	die dem Differential zugeführte Energie
EHBUnvonZK	Energie, die vom Zwischenkreis dem Hilfsbetriebeumrichter zugeführt wird
EHS	Environment, Health, Safety (dt. Umwelt, Gesundheit, Sicherheit)
EKA 1 A	Entwurfsklasse bei Autobahnen (Fernautobahn)
EKA 1 B	Entwurfsklasse bei Autobahnen (Autobahnähnliche Straße)
ELANO	Elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge an Oberleitungen
ELISA	Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen, Feldversuch auf der A5 in Hessen
eLkw	Elektrifizierter Lkw
EInvanZK	rekuperativ an den Zwischenkreis abgegebene Energie
EInvonZK	Energie vom Zwischenkreis zur Versorgung der Traktionsumrichter
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMMA	„Electrical Multi-Modal Actros“; Name der im Projekt ELANO weiterentwickelten Sattelzugmaschine
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Europäische Norm
ENUBA	Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen
EradanGB	Energie, die beim Bremsen vom Rad an das Differential geleitet wird
EradvonGB	die am Rad bereitgestellte Energie
ERS	en.: electric road systems, dt.: Elektrifizierte Straßenverkehrssysteme
ESS	Energy Storage System (dt. Energiespeichersystem)
ETBO	Electronic Tolling Back Office
EU	Europäische Union
eWayBW	eWay Baden-Württemberg - Feldversuch auf der B462 zwischen Kuppenheim und Gernsbach-Obertsrot
EZA	Energieerzeugungsanlagen
FCD	Floating Car Data
FD	Fahrdraht
FeSH	Feldversuch eHighway an der BAB A1 in Schleswig-Holstein

---

FIT	Failure in Time
FL	Fahrleitung
FMEA	en.: Failure Mode and Effects Analysis, dt.: Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse
FPGA	Field Programmable Gate Array
FuE	Forschung und Entwicklung
FuEG	Fördermittelgeber
GdR	Grundsatz der Risikoakzeptanz
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GND	Ground (0-Potenzial)
GPS	Global Positioning System
GuR	Gefährdungs- und Risikoanalysen
H <sub>2</sub>	Chemische Formel von molekularem Wasserstoff
HAD	highly automated driving
HARA	Hazard and Risk Analyse
HiL	Hardware in the loop
HLC	High Level Communication
ha	Hektar
HPC	High-Power-Charging, dt: Schnellladen von Akkumulatoren mit hohen Ladeleistungen
HS	Hochspannung
HTE	en.: hybrid truck equipment, dt.: Zusatzausrüstung für Hybrid-Lkw
HV	Hochvolt
HW	Hardware
IAA	Internationale Automobil-Ausstellung
IC	Integrated Circuit (Integrierter Schaltkreis)
iEMS	Intelligentes Energie Management System
IEC	International Electrotechnical Commission
IFB	Institut für Bahntechnik GmbH, <a href="http://www.bahntechnik.de">www.bahntechnik.de</a>
Ifeu	Institut für Energie und Umwelt
IGBT	en.: insulated-gate bipolar transistor, dt.: <i>ohne Übersetzung</i> (ein besonderes leistungselektronisches Halbleiterbauelement)
IKEM	Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. V.
I/O	Input/Output
IoT	Internet of Things
IP	International Protection (im Zusammenhang mit IP-Schutzklasse)
IR	Technische und interdisziplinäre Rahmenbedingungen
ISO	Internationale Organisation für Normung
IT	Informationstechnik
IWES	(Fraunhofer-) Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik



---

kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LC	Induktivität/Kapazität-Schaltkreis
LFP	Lithium-Eisenphosphat-Kathode
Li	Lithium
Lidar	light detection and ranging
LiVe	Lebenszykluskostenreduktion im elektrischen Verteilerverkehr durch individuell adaptierbaren Antriebsstrang, Förderprojekt der RWTH Aachen
Lkw	Lastkraftwagen
LKA	Lane Keeping Assist
LNG	Liquefied Natural Gas
MDC	Modular Digital Controller
MiL	Model in the loop
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung
MVA	Megavoltampere
MS	Mittelspannung
MSR	Maschinenrichtlinie
MW	Megawatt
NBS	Nahbereichssensorik
NCA	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxide
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid-Kathode
O-Bus	Oberleitungs-Bus
OBU	en.: on-board unit, dt.: fahrzeugseitiges Mauterfassungsgerät
OCL	Overhead Contact Line, dt. Fahrleitung
OEM	en.: original equipment manufacturer, dt. etwa: <i>Hersteller und Inverkehrbringer</i>
OH-Lkw	Oberleitungs-Hybrid-Lkw
OL	Oberleitung
OL-Lkw	Oberleitungs-Lkw
ONAF	Oil Natural Air Forced (Kühlungsvariante)
ONAN	Oil Natural Air Natural (Kühlungsvariante)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PAN	Pantograph (Stromabnehmer)
PAN 3rd Gen	Weiterentwickelter Stromabnehmer der 3. Generation
Pkw	Personenkraftwagen
PC	Personal Computer
PP	Projektpartner
PRU-ICSS	Programmable Real-Time Unit Subsystem and Industrial Communication Subsystem

---

PS	Themensäule / Teilprojekt „Projektsteuerung“ im Projekt ELANO
PSD	Power Spectral Density
PSS	Product and Solution Security
PtL	en.: Power-to-Liquid, dt.: Elektrische Energie zu Flüssigkeit
RAM	Reliability, Availability, Maintainability
RFID	radio-frequency identification
RFS	Road Feeder Service
RoHS	Restriction of Hazardous Substances, dt: Beschränkung [der Verwendung bestimmter] gefährlicher Stoffe
RTM	Resin Transfer Moulding
RWTH	Rheinisch Westfälisch Technische Hochschule
SiL	Software in the loop
Sitras®	en.: <b>Siemens Traction Power Supply</b> , (Produktfamilie der Siemens Mobility GmbH für Bahnenergieversorgungs-komponenten)
SMO	Siemens Mobility GmbH
SOC	State Of Charge
STVO	Straßenverkehrsordnung
STVZO	Straßenverkehrszulassungsordnung
SYS	Themensäule/Teilprojekt „Technologie Gesamtsystem“ im Projekt ELANO
SZM	Sattelzugmaschine
TDP	Technical Data Package
TEB	Themensäule / Teilprojekt „Test-/Erprobungsbetrieb und Laborprüfungen“ im Projekt ELANO
TMS	Technisches Monitoring System
TSV	Themensäule / Teilprojekt „Traktionsstromversorgung“ im Projekt ELANO
TU	Technische Universität
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UBA	Umweltbundesamt
UW	Unterwerk
V	Volt
VA	Versuchsanlage
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
vEFK	Verantwortliche Elektrofachkraft
VPN	Virtual Private Network
WC	Water Closet
WLAN	en.: Wireless Local Area Network, dt.: drahtloses Datennetzwerk
Y-Kondensator	Entstörkondensator

## 7.2 Quellen

- [1] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ): Sustainable Urban Transport: Avoid-Shift-Improve (A-S-I). Eschborn, ohne Jahresangabe.
- [2] Siemens AG, I MO CT IMS: ENUBA – Abschlussbericht der Siemens AG, FKZ: 16EM0077. Erlangen, 2011 (Abschlussbericht). Link: [http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-enuba\\_1.pdf](http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-enuba_1.pdf)
- [3] Siemens AG, Division Mobility - Gemeinsamer Abschlussbericht ENUBA 2 “Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen”, FKZ 16EM1010, 16EM1011, 16EM1104, Erlangen, 2016 (Abschlussbericht): Link: [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-09/ENUBA2\\_Abschlussbericht\\_V3\\_TIB\\_31-08-2016.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-09/ENUBA2_Abschlussbericht_V3_TIB_31-08-2016.pdf)
- [4] HA Hessen Agentur GmbH [Hrsg.]: Wasserstoff aus Windenergie - ein Speichermedium mit vielen Möglichkeiten, Band 3 - Schriftenreihe Wasserstoff und Brennstoffzellen. Wiesbaden, 2013
- [5] 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
- [6] BMVBS - Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [Hrsg.]: Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) - Energie auf neuen Wegen. Berlin, 2013.
- [7] BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [Hrsg.]: Aktionsprogramm Klimaschutz 2020. Berlin, 2014.
- [8] BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [Hrsg.]: Mehr aus Energie machen - Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz. Berlin, 2014.
- [9] UBA - Umweltbundesamt [Hrsg.]: Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung. Dessau-Roßlau, 2014.
- [10] Öko-Institut e. V. [Hrsg.]: eMobil 2050 - Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. Berlin, 2014.
- [11] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung [Hrsg.]: Neue Hightech-Strategie - Brummi am Draht. Erschienen am: 11.08.2015. Online unter: <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2015/08/2015-08-11-brummi.htm>
- [12] BDI – Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. [Hrsg.]: Klimapfade für Deutschland. Januar 2018. Online unter: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>
- [13] Gerstenberg, F.; Lehmann, M.; Zauner, F.: Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen. In: Elektrische Bahnen 110 (2012), H. 8-9, S. 452-460.
- [14] Lang, H.-P., „Hybrid-Antriebskonzepte für eHighway-Lkw“, Siemens Mobility GmbH, interner Bericht, 2019
- [15] ISO 26262-10: Road vehicles — Functional safety — Part 10: Guideline on ISO 26262. August 2012
- [16] DIN VDE 0105-100: „Betrieb von elektrischen Anlagen“ vom 01.10.2015
- [17] EU Kommission [Hrsg.]: VERORDNUNG (EG) Nr. 352/2009 Der Kommission über die Festlegung einer gemeinsamen Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken gemäß Richtlinie 2004/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. Brüssel, 24. April 2009.
- [18] Klemmer, T.: FCD-Auswertung Projekt ELANO. Bergische Universität Wuppertal, Fachzentrum Verkehr. Endbericht 02-2017. (unveröffentlichter, interner Bericht)
- [19] EN 50163-11 2004: Bahnanwendungen – Speisespannungen von Bahnnetzen
- [20] Lehmann, M., SYS.1 - Einführungsmodelle und Referenzszenarien, Rahmenbericht und Ergebnisseinordnung (SYS.1.1-4), Siemens AG, 2018 (interner Bericht)
- [21] Wolf, M., Studie Traktionsbatterie ELANO SYS.1.5, Siemens Mobility GmbH, 2019 (interner Bericht)
- [22] Takamitsu, T.: Development of Ultra-high Power and High Speed ERS - 450 kW charge at 150 km/h. Konferenzbeitrag bei: 2nd International Conference on Electric Road System. Arlanda, Schweden, 13.06.2018.
- [23] Hippeli R., Masterarbeit „Technische und verkehrswirtschaftliche Potenziale von Bussen in eHighway-Anwendungen“, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, 2018

- [24] Dörr, Heinz & Romstorfer, Andreas & Marsch, Viktoria & Toifl, Yvonne. (2018). Verkehrsgeographische Aspekte von Luftfrachttransportketten - Die Luftfrachttransportkette als verkehrslogistische Herausforderung.
- [25] Projekt LiVe der RWTH Aachen "<https://www.pem.rwth-aachen.de/cms/PEM/Forschung/Projekte/~pypv/LiVe/>"
- [26] Slupinski, A.: Abschlussbericht zu den Arbeitspaketen SYS.3.1 / SYS.3.2 im Teilprojekt SYS. Siemens AG, SI DG SW&C PTI, Mannheim, 2019. (interner Bericht)
- [27] Slupinski, A.; Lehmann, M.: Electric grid integration of a large scale overhead contact line ERS for truck applications. Konferenzbeitrag bei: 3rd International Conference on Electric Road System. Frankfurt/Main, 07.05.2019.
- [28] 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.
- [29] Hacker, F.; Blanck, R.; Görz, W.: Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge, Endebericht des Forschungsvorhabens StratON. Herausgeber: Öko-Institut e. V.. Berlin, Februar 2020, online unter <https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2020-03/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf>
- [30] Molthan, H.; Giebel, S., SYS 3 – Abrechnungssysteme für eHighway, Siemens AG, 2017 (interner Foliensatz)
- [31] AMELIE, Gemeinsame Vorhabenbeschreibung der Verbundforschungspartner (GVB), Siemens AG und IKEM, Erlangen und Berlin, den 29. Juni 2018
- [32] Mothan, H.: „eHighway – billing demonstrator, Erweiterung Report-Funktion, Siemens Mobility GmbH, München, 2018, interner Bericht
- [33] Dipl.-Ing. (Univ.) G. Santel; Prof. P. Spacek: Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen; ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), 2010
- [34] Friebel, T.: Bachelorarbeit „Generierung von Online-Spurkorrekturdaten für ein ADAS-System zur Optimierung der PAN-Verfügbarkeit speziell in Kurvenszenarien“, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW); 2016
- [35] Fischer, L.-H.: Dissertation „Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Behelfsverkehrsführungen an Autobahnarbeitsstellen unter Berücksichtigung der Querschnittsabmessungen“, Bauhaus-Universität Weimar; 2009
- [36] Molthan, H.: General Bulletin - OCL interface description, internes Dokument, Siemens Mobility GmbH, München, 2017
- [37] Molthan, H.: eHighway General Bulletin - Standard OCL requirements\_A006 internes Dokument, Siemens Mobility GmbH, München, 2018
- [38] Molthan, H.: General Bulletin - Standard PAN requirements\_A008 internes Dokument, Siemens Mobility GmbH, München, 2017
- [39] <https://www.e-stations.de/wissen/stecker> „Stecker in der Elektromobilität“
- [40] Siemens AG: Siemens Offboard High Power Charger: Die intelligente Ladetechnik für E-Busse. 2015
- [41] Weigel, W.: Schunk Smart Charging - Dachladesystem für Elektrobusse: 2. Fachkonferenz Elektromobilität im ÖPNV. 25.-26.11.2013 ICC Dresden. 22.11.2013
- [42] Senke, M.: Variantenvergleich und Bewertung für das stationäre Laden von Energiespeichern auf OH-Lkw zur Erhöhung der elektrischen Reichweite, Siemens Erlangen, 2018, interner Bericht
- [43] Lang, H.-P., eHighway – Bewertung unterschiedlicher DC – Traktionsspannungen, interner Bericht, Siemens Mobility GmbH, Erlangen, 2020
- [44] Straßenverkehrs-Ordnung (STVO) der Bundesrepublik Deutschland, Rechtsverordnung zur Teilnahme am Straßenverkehr, [https://www.gesetze-im-internet.de/stvo\\_2013/index.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/index.html)"
- [45] ISO 6469-3: Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Sicherheitsspezifikation - Teil 3: Elektrische Sicherheit, Oktober 2018
- [46] Förderprojekt ConverT, CONVertER for Trucks, Futavis GmbH, <https://www.futavis.de/forschung>



- [47] EU Kommission: VERORDNUNG (EG) Nr. 352/2009 DER KOMMISSION über die Festlegung einer gemeinsamen Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken gemäß Artikel 6 Absatz 3 Buchstabe a der Richtlinie 2004/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. Brüssel, 24. April 2009.
- [48] Lehmann, M.; Bühs, F.: eHighway Risikobewertung Gesamtsystem nach CSM, Siemens Mobility GmbH, interner Bericht, Version 1.0, Erlangen, 2019
- [49] eHighway System CSM (Excel-Risikoanalyse), Siemens Mobility GmbH, 17.12.2018
- [50] Dittrich, Sicherheitsbewertungsbericht eHighway, IFB-Bericht: 2019/205990/911, IFB Institut für Bahntechnik GmbH, Berlin
- [51] Bühs, F., Dietrich, K., u. a.: Untersuchung eines Stromabnehmers für schwere Nutzfahrzeuge. In: Elektrische Bahnen 111 (2013), H. 11, S. 644-657.
- [52] SCAQMD – South Coast Air Quality Management District [Hrsg.]: Construction of a 1 Mile Catenary System and Develop & Demonstrate Catenary Hybrid Electric Trucks, SCAQMD Contract 14062, Final Report. Siemens Industry INC Inc., Carson, CA and Erlangen, Germany. März 2018. Online unter: <http://www.cleanairactionplan.org/documents/siemens-scaqmd-catenary-port-truck-final-report-2018.pdf/>
- [53] Bühs, F., Keil, G., Lehmann, M.: Stromabnehmer für schwere Nutzfahrzeuge: In: Elektrische Bahnen 111 (2013), H. 4, S. 249-256.
- [54] Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw, BMVI 2017, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/hybrid-oberleitungslkw.html>
- [55] Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (STVZO) der Bundesrepublik Deutschland, Rechtsverordnung zur Zulassung von Fahrzeugen, [https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo\\_2012/](https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/)
- [56] Bühs, F.: System Architecture Pantograph, internes Dokument, Siemens Mobility GmbH, Berlin 2016
- [57] Engdahl, H.: Requirement Specification eHighway Pantograph Ver. 2.0, internes Dokument, Siemens Mobility GmbH, München, 2015
- [58] Bühs, F.: "Interface PAN – Vehicle", Siemens Mobility GmbH, internes Dokument, 2019
- [59] Taubenreuther, M.: Final Report eHighway V1.0; Abschlussbericht, IAV GmbH, 2017
- [60] Engdahl, H.: Requirement Specification eHighway Pantograph Ver. 2.2, internes Dokument, Siemens Mobility GmbH, München, 2017
- [61] Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex%3A32006L0042>
- [62] Blase, B.: Auswertung Daten Klimakammer, internes Dokument, Siemens Mobility GmbH, Berlin 2019
- [63] Schenk, A.: Test report No. 418.228.1 UN – R10, CEcert GmbH, 2018
- [64] Schenk, A.: Test report No. 418.228.2 EMC tests, CEcert GmbH, 2018
- [65] Busse, E.: Test report No. P50-18-0665\_1-en Environmental tests, RST Rail System Testing GmbH, 2019
- [66] Volkswagen AG [Hrsg.]: OL-Lkw – Technologieerprobung elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen und deren Energieversorgung per Oberleitung. Flyer zum Forschungsprojekt, Stand Januar 2018. Online unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/ol-lkw>
- [67] Pintscher, K.: Kontaktvorgänge und Verschleißverhalten des Systems Fahrdraht-Schleifleiste. TU Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“. Dissertation, 2003.
- [68] EN 50206-2: 2010: Bahnanwendungen – Schienenfahrzeuge – Merkmale und Prüfungen von Stromabnehmern – Teil 2: Dachstromabnehmer für Stadtbahnen und Straßenbahnen.
- [69] Fischer, L.: CVE@PAN 3.x Housing, internes Dokument, Siemens Mobility GmbH Erlangen, 2019
- [70] Engdahl, H.: Requirement Specification eHighway Pantograph for BRT Ver. 0.2, internes Dokument, Siemens Mobility GmbH, München 2017

- [71] Molthan, H.: Elektrifizierung der Buslinie M32 in Berlin-Spandau auf Basis des eHighway-Konzeptes, interne Voruntersuchung zur Machbarkeit, Siemens Mobility GmbH, München 2018
- [72] Molthan, H.: Elektrifizierung der „Westtangente“ München als Bussystem auf Basis der eHighway-Konzeptes, interne Voruntersuchung zur Machbarkeit, Siemens Mobility GmbH, München 2018
- [73] Blase, B.; Bühs, F.: Prüfumgebung für eHighway-Pantographen. In: Elektrische Bahnen 117 (2019), H. 7/8, S. 291-298
- [74] DIN EN 60068-2-64, Umgebungseinflüsse – Teil 2-64, Online unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-60068-2-64/116521613>
- [75] DIN EN 60068-2-6, Umgebungseinflüsse – Teil 2-6, Online unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-60068-2-6/110378928>
- [76] ISO 10605:2008 Straßenfahrzeuge - Prüfverfahren für elektrische Störungen durch elektrostatische Entladungen
- [77] UN-R10, UNECE-Regelung „Elektromagnetische Verträglichkeit (Funkentstörung)“
- [78] Grünjes, H.-G.; Voß, F.: Einbauerklärung für eine unvollständige Maschine, internes Dokument, Siemens Mobility GmbH, Erlangen, 2019
- [79] Biesold, S.: ELANO - Lastflussbericht für Systemvergleich (TSV1). Siemens Mobility GmbH, MO TPE RE EN&OP SE, Erlangen, 2018. (interner Bericht)
- [80] Schrötz, A. „ELANO TSV1.4 Integration von DC-Schnellladesystemen in eHighway-Unterwerke“, Siemens Mobility GmbH, interner Bericht, Erlangen, 2020
- [81] Hahn, G.: „ELANO TSV 2 – Systemoptimierung Fahrleitungsstrukturen“, Siemens Mobility GmbH, interner Bericht, Erlangen, 2019
- [82] Kießling, F. u. a.: Fahrleitungen elektrischer Bahnen - Planung, Berechnung, Ausführung. Publicis Verlag, Erlangen, 2014.
- [83] Hüttig, F.: CMS-Datenauswertung ELANO, TU Bericht 2019-EB-006, Technische Universität Dresden Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik Professur für Elektrische Bahnen, Dresden, 2019
- [84] IEC 61850, „Communication Networks and Systems in Substations“
- [85] ISO 50001:2018-12, Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung, Online unter <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-50001/289820323>
- [86] Reich, R.: Untersuchungsbericht STZF 10650/2018: Unterstützung bei der Entwicklung eines Drahtspanners, Steinbeis-Transferzentrum Federntechnik an der TU Ilmenau, Ilmenau, 2018
- [87] Molthan, H.: „ELANO TSV 7 – RFID-Technologie zur Last- und Stromabnehmersteuerung“, internes Dokument, Siemens Mobility GmbH, München, 2019
- [88] Product datasheet Confidex Survivor; 2015 Confidex [https://www.confidex.com/application/files/6714/5528/1037/Survivor\\_Datasheet.pdf](https://www.confidex.com/application/files/6714/5528/1037/Survivor_Datasheet.pdf)
- [89] RFID INTELLIGENT IDENTIFIZIEREN, 2017, Sick, S. 32, [https://cdn.sick.com/media/docs/6/46/646/Product\\_information\\_RFID\\_Intelligent\\_Identification\\_de\\_IM0052646.PDF](https://cdn.sick.com/media/docs/6/46/646/Product_information_RFID_Intelligent_Identification_de_IM0052646.PDF)
- [90] EN 50126:1999. Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (RAMS)
- [91] Terfloth, S.: Kundenbefragung, 2018
- [92] Schmidt, P., Energieversorgung elektrische Bahnanlagen, Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 1988
- [93] Biesenack e.a., Verfügbarkeit von Fahrleitungs- und Bahnenergieversorgungsanlagen, interner Abschlußbericht; 1998
- [94] Melzer, M.: Meilensteinbericht ELANO SYS.1.3, SYS.1.4, EFZ.1.1 und EFZ.1.2, Version 3.3, Siemens AG, interner Bericht, Erlangen, 2017
- [95] Deutsche Bahn; Integrierter Bericht 2016; S. 126
- [96] Lang, H.-P.: „Wechselwirkungen von oberleitungsgebundenen Fahrzeugen mit der Oberleitungseinspeisung, gegenseitigen Wechselwirkungen der Fahrzeuge sowie externe Einflüsse“, Siemens Mobility GmbH, interner Bericht, 2018

- [97] Lang, H.-P.: Optimiertes Hilfsbetriebekonzept für mehrfach hybride Lkw (EFZ 2.2), internes Dokument, Siemens Erlangen, 2017
- [98] Dietrich, K.: Meilenbericht ELANO EFZ.2.3, Siemens AG, interner Bericht, Erlangen, 2017
- [99] Dietrich, K.: EMV-Management von fahrleitungsgespeisten Hybrid-Lkw, Siemens AG, interner Bericht, Erlangen, 2017
- [100] Wikipedia: [https://de.wikipedia.org/wiki/Flugplatz\\_Templin/Gro%C3%9F\\_D%C3%B6lln](https://de.wikipedia.org/wiki/Flugplatz_Templin/Gro%C3%9F_D%C3%B6lln)
- [101] Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG) vom 07.08.1996 <https://www.gesetze-im-internet.de/arbSchG/>
- [102] Siemens AG "cRSP IT security concept", Article no. BT\_0123\_EN (Status 07/2019) <http://www.siemens.com/download?A6V11272775>
- [103] Internetauftritt „Eisenbahn & Technikmuseum Prora“ <http://oldtimer-museum-ruegen.de/>
- [104] Lang, H.-P.: Systemtestbericht ELANO TEB.4, interner Bericht Siemens Mobility GmbH, interner Bericht, Erlangen, 2020
- [105] Fowler, M.: Microservices – a definition of this new architectural term, <https://martinfowler.com/articles/microservices.html>
- [106] What is Docker, <https://www.docker.com/what-docker>
- [107] Kubernetes – Production-Grade Container Orchestration, <https://kubernetes.io/>
- [108] Railigent <https://new.siemens.com/global/de/produkte/mobilitaet/schienenverkehr/services/digital-services/railigent.html>
- [109] Schaarschmidt, L., Tölg, T.: ELANO: Monitoringsysteme für Stromabnehmer und Fahrleitung (TEB5.3), Siemens Mobility, GmbH, Berlin, 2020, interner Bericht
- [110] Fa. PantolInspect Internetauftritt: <http://www.pantolinspect.com/>
- [111] Pfliegl, W., Schulz, D.: Installation des Systems PantolInspect auf der eHighway Versuchsanlage Groß Dölln, Siemens Mobility GmbH, München, 2020, interner Bericht
- [112] Pfliegl, W.: Dokumentation zur Windabtriebsmessung, Interner Bericht, Siemens Mobility GmbH, München, 2019
- [113] Self-directed unmanned aerial vehicle for target geo-localization system, 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET)
- [114] eHighway: Ergebnisse Datenaufnahme Groß Dölln; interne Testdokumentation, Siemens AG, 2016
- [115] UAV OCL Inspection - Shark Tank Pitch V5, interne Ergebnispräsentation, Siemens AG
- [116] 20170725 Aerial-Data-Analytics\_EM, interne Ergebnispräsentation, Siemens AG, 2017
- [117] Fa. Copting, Internetauftritt: <http://www.copting.de>
- [118] Fa. Dronegrid, Internetauftritt: <https://www.sitemark.com/>
- [119] Fa. Percepto, Internetauftritt: <https://percepto.co/>
- [120] Lehmann, M.: Standardization and Regulation approaches towards an interoperable European overhead contact line ERS. Konferenzbeitrag bei: 1st International Conference on Electric Road System. Sandviken / Sweden, 14.06.2017
- [121] 14-E006241-BE-A01 eHighway Funkstöraussendung Actros, interner Messbericht, Siemens AG, 17.09.2014
- [122] 14-E006241-BE-B01 eHighway Funkstöraussendung Scania, interner Messbericht, Siemens AG, 17.09.2014

- [123] 19-E006241-BE-C01 eHighway Funkstöraussendung Actros, interner Messbericht, Siemens Mobility GmbH, 30.09.2019
- [124] 19-E006241-BE-D01 eHighway Funkstöraussendung Scania, interner Messbericht, Siemens Mobility GmbH, 30.09.2019
- [125] Vergleichsstudie – EMMA, interne Studie, Siemens Mobility GmbH, 24.09.2019
- [126] EMV-Messbericht EMMA, interner Messbericht, Siemens Mobility GmbH, 13.08.2018
- [127] Dronnik, A., Datenerhebung und Erstellung von PSDs aus Testfahrten mit Scania, Interner Bericht, Siemens Mobility GmbH, München, 2019
- [128] Ehrig, L.: Bericht Nr. 34596-1.002, interner Bericht, Schirmer GmbH - Beratende Ingenieure, Dresden, 2017
- [129] HessenMobil [Hrsg]: ELISA - Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen. Flyer zum Forschungsprojekt, Stand Januar 2017. Online unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/elisa>
- [130] VDI/VDE Innovation + Technik GmbH [Hrsg.]: ELISA II-B - Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen, Teilprojekt IIb - Evaluation eines realitätsnahen Probebetriebs. Stand 11/2018. Online unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/elisa-ii-b>
- [131] Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH [Hrsg.]: FESH – eHighway Feldversuch eHighway an der BAB 1 in Schleswig-Holstein. Flyer zum Forschungsprojekt, Stand Juni 2017. Online unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/fesh1>
- [132] VDI/VDE Innovation + Technik GmbH [Hrsg.]: FESH II-B Forschung im Rahmen des Feldversuchs eHighway in Schleswig-Holstein. Stand 11/2018. Online unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/fesh-ii-b>
- [133] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg [Hrsg.]: eWayBW - Feldversuch zu Erprobung elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen auf Bundesfernstraßen in Baden-Württemberg. Flyer zum Forschungsprojekt, Stand September 2017. Online unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/ewaybw>
- [134] Region Gävleborg [Hrsg.]: The World's first electric road on the E16. Borlänge /Schweden, April 2019. Online unter: <https://www.regiongavleborg.se/regional-utveckling/samhallsplanering-och-infrastruktur/elvag/the-electric-highway-in-english/>
- [135] Trafikverket [Hrsg.]: National roadmap for electric road systems. Swedish Transport Administration, Borlänge /Schweden, November 2017. Online unter: [https://www.trafikverket.se/contentassets/4c00abedf6794077a1e2a443cde60349/national\\_roadmap\\_for\\_electric\\_road\\_systems\\_20171129\\_eng.pdf](https://www.trafikverket.se/contentassets/4c00abedf6794077a1e2a443cde60349/national_roadmap_for_electric_road_systems_20171129_eng.pdf)
- [136] BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [Hrsg.]: Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, 2017. Online unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/studie-potentiale-hybridoberleitungs-lkw>
- [137] VDI/VDE Innovation + Technik GmbH [Hrsg.]: StratES - Forschungs- und Dialogvorhaben: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs, Stand 11/2019. Online unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/strates>
- [138] Ifeu GmbH [Hrsg.]: Roadmap OH-Lkw, Erforschung von Einführungspfaden elektrisch angetriebener schwerer Nutzfahrzeuge und deren Energieversorgung per Oberleitung. Flyer zum Forschungsprojekt, Stand September 2016. Online unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/roadmap-oh-lkw>
- [139] Jöhrens, J. et. al.: Roadmap OH Lkw – Hemmnisanalyse, Analyse technischer und logistischer Hemmnisse der OH-Lkw Technologie im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“. Herausgeber: Ifeu GmbH - Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg, 2018. Online unter: [https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw\\_Hemmnisanalyse.pdf](https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw_Hemmnisanalyse.pdf)
- [140] Jöhrens, J. et. al.: My eRoads - Entwicklung eines kombinierten Analyse- und Beratungstools für den Betrieb elektrischer Lkw und Busse sowie den benötigten Infrastrukturaufbau. Flyer zum Forschungsprojekt, Stand Januar 2019. Online unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/my-eroads>
- [141] Gustavsson, M.; Hacker, F.; Helms, H.: Overview of ERS concepts and complementary technologies. Herausgeber: COLLERS Project. Berlin, Stockholm, 2019. Online unter: <http://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1301679/FULLTEXT01.pdf>
- [142] IKEM – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. v. [Hrsg.]: AMELIE – Abrechnungssysteme und -methoden von elektrisch betriebenen Lkw sowie deren interoperable Infrastrukturen im europäischen Kontext. Stand 10/2018. Online unter: <https://www.ikem.de/portfolio/amelie/>
- [143] Rucker, J.; Lehmann, M.; Grünjes, H.-G.: eHighway - Technikgenese des elektrischen Straßengüterverkehrs. Konferenzbeitrag bei: 25. Verkehrswissenschaftliche Tage. Dresden, 16./17.03.2016.

- [144] Kühnel, S.; Hacker, F.; Görz, W.: Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich, Erster Teilbericht des Forschungsvorhabens StratON. Herausgeber: Öko-Institut e. V.. Berlin, September 2018. Online unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/straton>
- [145] BMU – Bundesministerium für Umwelt [Hrsg.]: Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Stand: 8. 10.2019. Online unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578>
- [146] VDI/VDE Innovation + Technik GmbH [Hrsg.]: StratES – Forschungs- und Dialogvorhaben: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Stand November 2018. Online unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/strates>
- [147] Fraunhofer ISI [Hrsg.]: BOLD - Begleitforschung Oberleitungs-Lkw-Forschung in Deutschland. Flyer zum Forschungsprojekt, Stand Oktober 2019. Online unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/bold>
- [148] Räder, D.; Lehmann, M.: Randbedingungen und Potentiale einer europäischen Gesamtstrategie zur Dekarbonisierung des Güterverkehrs im Straßen- und Schienenverkehr. Konferenzbeitrag bei: 26. Verkehrswissenschaftliche Tage. Dresden, 14./15.03.2016.
- [149] Die Grünen & Die neue Volkspartei [Hrsg.]: Regierungsprogramm Österreich 2020 -2024. Wien, 2020. Online unter: <https://www.dieneuevolkspartei.at/>
- [150] BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [Hrsg.]: Masterplan Schienengüterverkehr. Stand Juni 2017, Berlin. Online unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/masterplan-schienueterverkehr-af-TP.html>



### 7.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Weiterentwicklung des Stromabnehmers eingebettet in die Systemoptimierung .....	9
Abbildung 2:	Lkw-Stromabnehmer der ersten Generation im Projekt ENUBA [13] .....	11
Abbildung 3:	Lkw-Stromabnehmer der zweiten Generation im Projekt ENUBA 2 [3] .....	12
Abbildung 4:	Möglichkeiten zur Konfiguration eines eHighway Lkw .....	13
Abbildung 5:	ELANO Projektstruktur und Kernthemen von Forschung und Entwicklung .....	14
Abbildung 6:	Entwicklung einer integrierten Elektromobilitätslösung .....	15
Abbildung 7:	Iterativ-inkrementeller Entwicklungsprozess mit Feedback-Loop .....	16
Abbildung 8:	Probearbeit der neu entwickelten Klemmen und Seitenhalter auf der Versuchsanlage in Groß Dölln .....	17
Abbildung 9:	Hauptkomponenten eines mehrfach hybriden Antriebsstrangs mit Batterie, Dieselmotor, Oberleitungseinspeisung und serielltem Hybridantrieb .....	18
Abbildung 10:	Oberleitungsinspektion auf der Versuchsanlage in Groß Dölln mit Zweibegefahrzeug für Oberleitungsarbeiten .....	19
Abbildung 11:	Kontinuierlicher Lessons-Learned Prozess zur Qualitätssteigerung und Kostenreduzierung in Entwicklungsprojekten .....	20
Abbildung 12:	Vergleich der Batterie-SOC für unterschiedliche Elektrifizierungsgrade für einen Umlauf im Referenzszenario „Hamburg-Lübeck“ .....	25
Abbildung 13:	Verschiedene Preisprognosen für NMC-Zellen [21].....	27
Abbildung 14:	Vorteile der Elektrifizierung von Bussen.....	28
Abbildung 15:	Verkehrslogistische Prozesskette Luftfracht [24] .....	29
Abbildung 16:	Netzanschlüsse und -topologien für Voll- und Teilelektrifizierung [26].....	30
Abbildung 17:	Überlast bei Stau bei 5-s-Takt und 50 % Teilelektrifizierung [26] .....	31
Abbildung 18:	Sittraffic Sensus OnBoard Unit C3080 .....	33
Abbildung 19:	DC-Stromzähler in den Testfahrzeugen Actros #2 und Sattelzugmaschine .....	33
Abbildung 20:	Streckenmodell mit unterschiedlichen Abschnitten.....	34
Abbildung 21:	Beispiel für eine monatliche Rechnung je Fahrzeug.....	34
Abbildung 22:	Auswertung der Testfahrten mit Actros #1 .....	36
Abbildung 23:	Verschiedene Ladesysteme für OH-Lkw Plug-In, Induktiv, Pantograph .....	39
Abbildung 24:	Vergleich und Bewertung von Systemen zum Stillstandsladen .....	39
Abbildung 25:	Ablaufschema gemeinsame Sicherheitsmethode CSM nach [EG 352/2009] (angepasst) .....	45
Abbildung 26:	PAN 1. Generation (ENUBA).....	48
Abbildung 27:	PAN 2. Generation (ENUBA 2).....	49
Abbildung 28:	Funktionsmuster des Stromabnehmers auf dem Testfahrzeug "Actros #1".....	51
Abbildung 29:	Funktionsmuster mit geändertem PAN-Konzept.....	53
Abbildung 30:	Control board des HAD (highly automated driving) systems von IAV und Bedienelemente im Versuchsträger Actros #1.....	54
Abbildung 31:	Überarbeitetes Wippendesign.....	55
Abbildung 32:	Automotive Safety-Controller TTC-580 der Firma TTTech.....	56
Abbildung 33:	Stromabnehmer mit linker und rechter Elektronikbox und GFK Verkleidung .....	57
Abbildung 34:	Visualisierung eines Stadtbusses mit eHighway-Stromabnehmer ©Truxa Design .....	58
Abbildung 35:	Montage eines Funktionsmusters im Prototypenbau .....	60
Abbildung 36:	Endabnahmetest des ersten Piloten und Vorstellung auf der IAA Nutzfahrzeuge .....	61
Abbildung 37:	Übersicht über die verschiedenen Tests .....	62
Abbildung 38:	Prüfung der normativen Vorgaben bei Klimafestigkeit, EMV und Festigkeit .....	63

Abbildung 39:	System- und Schnittstellenübersicht zur Betrachtung der Software-Sicherheit des Pantographen.....	64
Abbildung 40:	Pantograph Generation 3 .....	65
Abbildung 41:	Gemeinsamer Netzanschluss von Unterwerk und Rasthof [80] .....	68
Abbildung 42:	Windabtriebsmessung - Messprisma (links) / Tachymeter (rechts).....	70
Abbildung 43:	Biegsame Isolatoren in Fahrdrabtebene (links) und biegesteife Isolatoren oberhalb der Fahrdrabtebene (rechts).....	71
Abbildung 44:	Probeinstallation im Versuchsaufbau .....	72
Abbildung 45:	Schematische Darstellung des freizuhaltenden Lichtraums.....	73
Abbildung 46:	Neu entwickelte Hängerklemmen für das windschiefe Kettenwerk .....	74
Abbildung 47:	CMS-Station nach Umrüstung .....	75
Abbildung 48:	Verlauf der Fahrdrabzugkraft über eine Woche.....	76
Abbildung 49:	Spontane Zugkraftschwankungen infolge eines Anstoßes zwischen Fahrdrabtklemme und Stromabnehmer zwischen 16:20 und 16:25 .....	76
Abbildung 50:	DC-Schutz- und Steuergerät Sitras® MDC .....	77
Abbildung 51:	iEMS-Lastmanagement; Ausleuchtung und Leistungsüberwachung, eHighway Versuchsanlage Groß Dölln.....	79
Abbildung 52:	Kraft-Weg-Kennlinie einer Flachspiralfeder .....	80
Abbildung 53:	Erkennung des RFID-Tags bei unterschiedlicher Lkw-Spurlage .....	82
Abbildung 54:	Energiebilanz im Antriebsstrang auf der Strecke Köln-Frankfurt für verschiedene Elektrifizierungsgrade .....	85
Abbildung 55:	Simulierter Spannungsverlauf bei erneutem Stromabnehmerkontakt.....	87
Abbildung 56:	Entfernungsabhängige Spannung im Versorgungsabschnitt .....	87
Abbildung 57:	PAN 3rd Gen (Hauptelemente).....	88
Abbildung 58:	Elektrisch versorgte Hilfsbetriebe.....	89
Abbildung 59:	Luftkompressor e-comp™ der Fa. WABCO .....	89
Abbildung 60:	Zeitweilige doppelte Isolierung durch Umschaltung auf einfache Isolierung bei hoher Fahrzeuggeschwindigkeit .....	91
Abbildung 61:	Kurzschluss vom versorgten in geerdeten Abschnitt durch Schleifleiste im Parallelfeld .....	91
Abbildung 62:	Beispiel für induktive und galvanische Störeinkopplung durch Streukapazitäten.....	93
Abbildung 63:	Störstrommessung an den Generatorkabeln.....	93
Abbildung 64:	Provisorischer Einbau von Ringkernen .....	93
Abbildung 65:	Störstrommessung einer CAN-Leitung in der Fahrerkabine.....	94
Abbildung 66:	Prüfung der Übertragungsqualität mit einem CANalyser .....	94
Abbildung 67:	Actros #1 nach Phase 1.....	96
Abbildung 68:	Aufbau des Stromabnehmerfunktionsmusters.....	96
Abbildung 69:	Bedienschalter in Fahrerkabine (links) / PAN-Touchdisplay über Kopf (rechts).....	97
Abbildung 70:	Einbauposition von Wind- und Temperatursensoren .....	98
Abbildung 71:	Neuer Dach-Einbauort des Laserscanners (links im Bild).....	98
Abbildung 72:	Sattelzugmaschine EMMA.....	99
Abbildung 73:	SZM EMMA, neue CAN-Topologie .....	99
Abbildung 74:	Unterweisung durch vEFK bzgl. Gefährdungen "Elektrische Anlagen" .....	101
Abbildung 75:	Anlagenhandbuch „Inhaltsverzeichnis und Anlagen“ .....	102
Abbildung 76:	Fahrleitung im Shelter / Umbau der Fahrleitung auf der Teststrecke .....	103
Abbildung 77:	A1 - Strecke Hamburg nach Lübeck (links) / A3 Strecke vom Flughafen Frankfurt zum Verladezentrum Köln (rechts).....	104

Abbildung 78:	Exemplarische Messfahrt mit einem State-Of-Charge (SOC) zw. 20% und 80% .....	105
Abbildung 79:	Hauptkomponenten Data Mining (erste Realisierung) .....	106
Abbildung 80:	Grafana-Oberfläche zur Visualisierung von Testergebnissen .....	107
Abbildung 81:	Beispiele aus der Railigent-Anwendung .....	108
Abbildung 82:	Installierter mechanischer Kontaktbügel.....	109
Abbildung 83:	Triggersensoren am Fahrdrabt zur Schleifleistendetektion (rot eingekreist).....	109
Abbildung 84:	Pantolnspect Scanner System auf Schilderbrücke .....	110
Abbildung 85:	Aufnahme PAN 3rd Gen bei Durchfahrt unter Schilderbrücke und Messergebnisse	111
Abbildung 86:	Automatische Erkennung von Verschleiß an der Schleifleiste .....	111
Abbildung 87:	Standort Tachymeter auf der Teststrecke Groß Dölln.....	112
Abbildung 88:	Bildaufnahme einer Drohne zur Sichtkontrolle von Infrastrukturkomponenten .....	113
Abbildung 89:	Teststand für eHighway-Pantograph mit variabler Oberleitungslage [73].....	115
Abbildung 90:	Verhalten des Pantographen bei seitlichem Ausweichen (links: ursprüngliche Ausführung der Wippe, rechts: geänderte Konstruktion) [73].....	115
Abbildung 91:	Vergleich der PSDs .....	118
Abbildung 92:	Messung des Standgeräusches (Diesel) des Lkw „Actros #2 (links) / des Vorbeifahrtgeräusches angebügelt des Volvo-Lkw „Mack“ rechts).....	119
Abbildung 93:	Äquivalenter Dauerschalldruckpegel der Geräusche im Stand und bei Vorbeifahrt auf der Fahrerseite .....	120
Abbildung 94:	Interaktion von Regulierung und Standardisierung am Beispiel eHighway .....	123
Abbildung 95:	Haupthandlungsfelder zur Dekarbonisierung des Güterverkehrs [148] .....	129

**7.4 Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Studien und Strategien zu alternativen Antrieben für schwere Nutzfahrzeuge ..... 10

Tabelle 2: Inhalte und Ergebnisse der Förderprojekte ENUBA [2] und ENUBA 2 [3] ..... 12

Tabelle 3: Fahrstrecken im Haupt- und sekundären Netz ..... 24

Tabelle 4: Untersuchte Fahrzeugfolgen (Takt) bei verschiedenen Systemspannungen ..... 25

Tabelle 5: Übersicht von Baureihen für eLKW mit Traktionsbatterie ..... 26

Tabelle 6: Übersicht aktueller Lithium-Ionen-Batterie-Technologien, Daten auf Zellebene ..... 26

Tabelle 7: Beispiel für eine Tariftabelle ..... 34

Tabelle 8: Prozessschritte, Inhalte und Dokumentation der angepassten Risikobewertung nach CSM ..... 46

Tabelle 9: Anzahl Unterwerke und installierte Gesamtleistung bei 10 s Fahrzeugfolge und unterschiedlichen Streckenprofilen und Elektrifizierungsgraden ..... 67

Tabelle 10: Energiebezug und -bedarf in Relation zum Elektrifizierungsgrad für beide Referenzszenarien ..... 85

Tabelle 11: Schulungs-/Unterweisungskonzept eHighway Versuchsanlage ..... 101

Tabelle 12: eHighway-Feldversuche auf Autobahnen und Fernstraßen in Deutschland ..... 121

Tabelle 13: Inhalte und Ergebnisse der Förderprojekte zum elektrifizierten Straßengüterverkehr mit Oberleitungen ..... 122

Tabelle 14: Zusätzliche Projekte im Forschungsfeld eHighway ..... 128