

# ENUBA

-

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



### **Schlussbericht der Siemens AG**

Version vom 31.08.2012

**Projektlaufzeit: 01.05.2010 - 30.09.2011**

**FKZ: 16EM0077**

Gefördert mit Mitteln des



**Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit**

## Kurzdarstellung der Projektziele und -ergebnisse

Knappe und sich verteuernde Rohstoffe, ungebremst wachsende Transportaufkommen und ehrgeizige Klimaschutzziele erfordern auch im Straßengüterverkehr innovative und effiziente Elektromobilitätslösungen. Gegenstand des Förderprojekts ENUBA (Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen) und des vorliegenden Abschlussberichts sind die Entwicklung und Beschreibung einer Vorzugslösung für den Einsatz elektrischer Energie für Energieversorgung und Antrieb schwerer Nutzfahrzeuge sowie der Nachweis der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit dieser Lösung. Dabei wird schwerpunktmäßig auf drei Hauptfelder eingegangen:

1. Die Entwicklung einer technischen Vorzugslösung zum Einsatz elektrischer Energie im Wirtschaftsverkehr mit schweren Nutzfahrzeugen in und zwischen Ballungsräumen.
2. Die Erprobung der Vorzugslösung auf einer Teststrecke zum Nachweis der technischen Machbarkeit, einschließlich Entwicklung eines intelligenten, neuartigen Stromabnehmers und Umrüstung zweier Versuchsfahrzeuge auf dieselektrischen Hybridantrieb.
3. Die ökonomische und ökologische Bewertung der Vorzugslösung unter Berücksichtigung kurz- und langfristiger Umsetzungsszenarien.

Ausgehend von der Einordnung des Forschungsvorhabens in den förderpolitischen Kontext sowie vom Stand der Technik der zu berücksichtigenden Verkehrssysteme und Komponenten wird in dieser Abschlussdokumentation im Detail beschrieben, wie im Projekt folgende Lösungen entwickelt und erprobt sowie folgende Themen in Studien untersucht wurden:

- Entwicklung eines innovativen Konzepts zum Einsatz elektrischer Energie im Straßengüterverkehr mit hohen Lasten und über große Entfernungen durch Ausrüstung dieselektrischer Hybridfahrzeuge mit einem neu zu entwickelnden Stromabnehmer, über den auch während der Fahrt elektrische Traktionsenergie von einer Fahrleitung bezogen werden kann.
- Nachweis der grundsätzlichen Eignung des entwickelten Konzepts durch intensive Erprobung der Kernkomponenten einschließlich ihrer Integration in ein Gesamtsystem unter alltagsnahen Verkehrs- und Umgebungsbedingungen.
- Praktische Umsetzung des Querschnittsthemas Kraftfahrzeugtechnik und elektrische Versorgung einschließlich Rückspeisung ins Netz des Energieversorgers.
- Durchführung einer ökonomischen und ökologischen Gesamtbewertung im Rahmen einer Szenarioanalyse unter Berücksichtigung verschiedener Betreibermodelle und zeitlicher Horizonte beim Wandel des Energieversorgungssystems hin zu mehr regenerativer Erzeugung.
- Beschreibung der verkehrs- und kommunikationstechnischen Grundlagen zur Erstellung eines Kommunikations-, Signalisierungs- und Berechtigungskonzepts sowie Erprobung zentraler Elemente wie Inspektion und Kontrolle der Teilnehmer (Fahrzeuge) mit Aufbau bidirektionaler Kommunikation Infrastruktur – Leitstelle bzw. Fahrzeug – Infrastruktur.
- Erstellung eines externen Rechtsgutachtens u. a. zur Einordnung der Oberleitungsinfrastruktur als Teil einer Bundesfernstraße sowie zur Notwendigkeit bestimmter Planungsverfahren für eine Pilotstrecke im öffentlichen Raum sowie zur Erreichung einer Dauerzulassung der umgerüsteten, dieselektrischen Hybridfahrzeuge mit dem Betriebsmodus „rein elektrischer Betrieb“ unter Einbeziehung externer Gutachter (TÜV).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Machbarkeit des gewählten Vorzugssystems zur Elektrifizierung des schweren Straßengüterverkehrs erfolgreich nachgewiesen wurde. Damit hat Siemens den Grundstein für ein neuartiges Güterverkehrskonzept gelegt und beabsichtigt, die Entwicklungsarbeiten in einem Folgeprojekt fortzusetzen, um die wirtschaftlichen und technischen sowie die energie- und klimapolitischen Potenziale der Elektromobilität auch für den Wirtschaftsverkehr weiter zu erschließen. Das Konzept trägt dazu bei, auch im Straßengüterverkehr die Abhängigkeit vom Erdöl zu verringern ohne in großem Umfang auf neue und ggf. knappe Rohstoffe für Energiespeicher angewiesen zu sein. Im Ergebnis werden die Grundlagen geschaffen, Deutschland nicht nur zum Leitmarkt für individuelle Elektromobilität mit PKW zu entwickeln, sondern auch für den weiterhin wachsenden Straßengüterverkehr saubere und zukunftsfähige Elektromobilitätslösungen anbieten zu können.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>EINFÜHRUNG .....</b>	<b>5</b>
1.1	Aufgabenstellung gemäß Förderantrag .....	5
1.2	Einordnung des Projekts ENUBA in den förderpolitischen Rahmen .....	7
<b>2</b>	<b>VORAUSSETZUNGEN UND STRUKTUR DES PROJEKTS .....</b>	<b>9</b>
2.1	Voraussetzungen des Vorhabens .....	9
2.2	Stand der Technik zu Projektbeginn .....	9
2.2.1	Bahnenergieversorgung .....	9
2.2.2	Fahrleitungen .....	12
2.2.3	Stromabnehmer .....	14
2.2.4	Fahrzeug (Antriebstechnik) .....	16
2.3	Inhaltliche und zeitliche Planung .....	18
2.3.1	Struktur des Projekts .....	18
2.3.1.1	<i>Technisches Konzept</i> .....	18
2.3.1.2	<i>Einrichtung und Betrieb einer Versuchsanlage</i> .....	19
2.3.1.3	<i>Ökonomische und Ökologische Bewertung</i> .....	21
2.3.2	Zeitlicher Ablauf und Rahmenterminplan .....	21
2.3.3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	22
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE DES FÖRDERVORHABENS .....</b>	<b>23</b>
3.1	Technisches Konzept und Studien zum Gesamtsystem .....	23
3.1.1	Überblick über das Gesamtsystem .....	23
3.1.2	Beschreibung des Zielsystems Elektrifizierter Straßengüterverkehr .....	24
3.1.2.1	<i>Elektrische Energieversorgung</i> .....	24
3.1.2.2	<i>Fahrleitung</i> .....	26
3.1.2.3	<i>Stromabnehmer für den Betrieb an der Fahrleitung</i> .....	27
3.1.2.4	<i>LKW mit seriellem dieselektrischen Hybridantrieb</i> .....	28
3.1.2.5	<i>Streckenausrüstung und Kommunikation</i> .....	30
3.2	Praktische Erprobung .....	32
3.2.1	Konzeption und Aufbau der Versuchsanlage Groß Dölln .....	32
3.2.1.1	<i>Stromversorgung und Netzanschluss</i> .....	32
3.2.1.2	<i>Fahrleitung der Versuchsanlage</i> .....	33
3.2.1.3	<i>Stromabnehmer-Funktionsmuster für den Betrieb an der Fahrleitung</i> .....	34
3.2.1.4	<i>LKW mit seriellem dieselektrischen Hybridantrieb</i> .....	36
3.2.1.5	<i>Streckenausrüstung und Kommunikation</i> .....	38
3.2.2	Testplanung und Überblick über die erzielten Ergebnisse .....	39
3.2.2.1	<i>Umfang und Ergebnisse der Systemintegrationstests</i> .....	39
3.2.2.2	<i>Testergebnisse der Performance Tests (UseCases)</i> .....	40
3.2.3	Wesentliche Testergebnisse aus den Teilsystemen .....	42
3.2.3.1	<i>Testergebnisse Stromversorgung</i> .....	42
3.2.3.2	<i>Testergebnisse Fahrleitung</i> .....	43
3.2.3.3	<i>Testergebnisse Stromabnehmer</i> .....	44
3.2.3.4	<i>Testergebnisse Fahrzeug</i> .....	46
3.2.4	Weitere Testergebnisse .....	47
3.2.4.1	<i>Vergleichsfahrten mit einem Standard-Diesel-LKW</i> .....	47
3.2.4.2	<i>Vergleichende Geräuschmessungen</i> .....	48
3.3	Ökonomische und ökologische Bewertung .....	50

<b>4</b>	<b>ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT UND VERWERTUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE .....</b>	<b>51</b>
4.1	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	51
4.2	Ergebnisverwertung entsprechend Verwertungsplan .....	51
4.3	Geplante Veröffentlichungen .....	53
4.4	Angemeldete Schutzrechte und Erfindungen .....	54
<b>5</b>	<b>WEITERENTWICKLUNG DURCH DRITTE .....</b>	<b>55</b>
5.1	Vorstudie für elektrischen LKW-Verkehr auf Autobahnen in Schweden .....	55
5.2	Konzept für einen innovativen Straßengüterverkehr in Frankreich.....	57
5.3	Wachstumsmarkt Hafenhinterlandverkehr am Beispiel L. A.....	58
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>60</b>
7.1	Abkürzungen .....	60
7.2	Quellen .....	61
<b>8</b>	<b>ANLAGEN .....</b>	<b>64</b>
8.1	Luftbild der Querwindbahn auf den Flächen des Driving Centers Groß Dölln.....	64

# 1 Einführung

## 1.1 Aufgabenstellung gemäß Förderantrag

Der Transport von Gütern ist eine wesentliche Voraussetzung für eine moderne, arbeitsteilige Volkswirtschaft. Allerdings führen die Veränderungen in der Güterstruktur, die Verringerung der Wertschöpfungstiefe sowie die zunehmende Verflechtung regionaler, nationaler und internationaler Wirtschaftsbeziehungen zu einem deutlich wachsenden Güterverkehr. Vor allem der Straßengüterverkehr hat in den vergangenen Jahrzehnten aufgrund seiner räumlichen und zeitlichen Flexibilität erheblich zugenommen – und wird auch in Zukunft wachsen. So gehen aktuelle Prognosen davon aus, dass sich der Straßengüterverkehr bis zum Jahr 2050 in Deutschland verdoppeln wird [1]. Aber auch in anderen Ländern wird ein erhebliches Wachstum im Straßengüterverkehr vorausgesagt. Dieses Wachstum stellt Deutschland – wie viele andere Länder auch – vor große Herausforderungen:

- Der Straßengüterverkehr ist als Rückgrat unseres Transportsystems fast vollständig vom Erdöl abhängig, einem Energieträger, der zunehmend knapper wird und häufig in politisch z. T. wenig stabilen Regionen vorkommt.
- Auch der Straßengüterverkehr muss trotz des prognostizierten Wachstums einen maßgeblichen Beitrag zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten, um die international vereinbarten Klimaschutzziele zu erreichen.
- Die lokalen Schadstoff- und Lärmemissionen des Straßengüterverkehrs sind vor allem in den weltweit stetig wachsenden Ballungsräumen noch erheblich zu verringern, um trotz Urbanisierung für die Bevölkerung lebenswerte Räume zu erhalten und zu gestalten.

Durch steigende Ölpreise, das Fortschreiten des Treibhauseffekts und die Endlichkeit der fossilen Energieträger steigt der Druck auf die Gesellschaft, neue Mobilitätskonzepte zu entwickeln. Als Konsequenz hieraus müssen auch für den Straßengüterverkehr effizientere, umweltverträglichere und im Idealfall klimaneutrale Antriebstechnologien entwickelt werden. Abbildung 1-1 zeigt Ansätze, um die Umweltbelastungen zu reduzieren, die sowohl durch den vorhandenen als auch durch den laut Prognosen noch steigenden Güterverkehr verursacht werden.

**Abbildung 1-1 Konzepte zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Güterverkehr**

<p style="text-align: center;"><b>Ziel:</b></p> <p style="text-align: center;">bis 2050 Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 % gegenüber 1990</p>	<p><b>a) Güterverkehr verringern</b> Arbeitsteilige Fertigung erfordert Güterverkehr</p> <p><b>b) Güterverkehr auf Schiene verlagern</b> Bahn zu unflexibel wg. gebrochener Logistikketten, Ausbaupläne unzureichend (Umfang / Zeitrahmen)</p> <p><b>c) Effizienz der Dieselmotoren erhöhen</b> Potenzial zu gering, weiter vom Erdöl abhängig</p> <p><b>d) Diesel durch Bio-Diesel ersetzen</b> Mengen zu gering, Ressourcenkonkurrenz</p> <p><b>e) Fern-Lkw mit Batterien als Speicher</b> Batterien für Einsatzprofil zu groß und schwer</p> <p><b>f) Brennstoffzellen für Fern-Lkw</b> gute Ergänzung, nicht ideal für lange Strecken, beschränkte Lebensdauer</p> <p><b>g) Elektrifizierung Straßengüterverkehr</b> Transfer bewährter Bahntechnik möglich</p>
--	---

Die Lösungsansätze **a – f** in Abbildung 1-1 (S. 5) zeigen, dass aufgrund individueller Nachteile und Gegenargumente das übergeordnete Ziel der CO<sub>2</sub>-Reduktion durch diese Maßnahmen allein sehr wahrscheinlich nicht erreicht werden kann. Demgegenüber kann Ansatz **g**, aufbauend auf den in mehr als 100 Jahren im Industrieland Deutschland entwickelten Bahn- und Antriebstechnologien erheblich zur Erreichung des Ziels beitragen, gerade weil Elektroantriebe aufgrund ihrer hohen Effizienz und der Möglichkeit zum Einsatz des gesamten Spektrums der erneuerbaren Energien die größten Wachstums- und gleichzeitig Emissionssenkungspotenziale bieten.

Aufgabe der beteiligten Siemens-Divisionen in dem Förderprojekt war, zu untersuchen, ob und wie ein elektrischer Betrieb schwerer Nutzfahrzeuge des Straßengüterverkehrs möglich ist und wie damit die Umwelt entlastet und die Abhängigkeit von Erdölimporten verringert werden kann.

Gegenstand des Forschungsvorhabens ENUBA (Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen) war somit die Entwicklung eines umfassenden Konzepts zur Nutzung elektrischer Energie im Wirtschaftsverkehr mit schweren Nutzfahrzeugen. Durch den Wechsel zur elektrischen Antriebstechnik kann mit dem Ausbau der alternativen Energieträger, insbesondere der Solar- und Windenergie, der Ausstoß klimawirksamer Emissionen begrenzt und die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern verringert werden. Wenn die lokalen Verbraucher konsequent durch lokale Erzeuger versorgt werden, können außerdem die Übertragungswege verkürzt und Umwandlungs- und Übertragungsverluste minimiert werden.

Das Förderprojekt gliedert sich in drei Haupttätigkeitsbereiche:

1. Die Entwicklung einer technischen Vorzugslösung zum Einsatz elektrischer Energie im Wirtschaftsverkehr.
2. Die Erprobung der Vorzugslösung auf einer Teststrecke zum Nachweis der technischen Machbarkeit.
3. Die ökonomische und ökologische Bewertung der Vorzugslösung unter Berücksichtigung kurz- und langfristiger Umsetzungsszenarien.

Dazu wurde aufbauend auf einer ersten Projektskizze im Frühjahr 2010 eine detaillierte Vorhabensbeschreibung erarbeitet [2], die Basis des beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) beantragten und am 30.07.2010 bewilligten Förderantrags war.

Ziel dieses Forschungsprojekts war es, die technologische und konzeptionelle Ausgangsbasis für eine weitergehende Forschung und Entwicklung in Vorbereitung einer mittelfristigen Pilotierung auf einer ersten Strecke im öffentlichen Raum zu definieren. Ebenso sollten mit dem Fernziel einer Ausrüstung längerer Strecken für größere Transportaufgaben vorbereitende Studien und Grundlagenuntersuchungen zur Integration der technischen Vorzugslösung in den bestehenden Verkehrsträger erfolgen.

Der vorliegende Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben ENUBA dokumentiert die während der nur 16-monatigen Projektlaufzeit vom Juni 2010 bis zum September 2011 unternommenen Lösungsschritte und erreichten Ergebnisse. Ausgehend von einer kurzen Einordnung des Projekts in den förderpolitischen Rahmen werden im Bericht folgende Schwerpunkte gesetzt:

- Technische und allgemeine Voraussetzungen des Vorhabens einschließlich des Stands der Technik zu Projektbeginn
- Technische Ergebnisse unter drei Blickwinkeln (1) Vorzugslösung für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs, (2) Design und Bau der Versuchsanlage und (3) Testergebnisse
- Kernaussagen der ökologischen und ökonomischen Bewertung der Vorzugslösung unter Berücksichtigung der wesentlichen privaten und staatlichen Akteure
- Kernaussagen weiterer Ergebnisverwertung, wobei auch auf technische Weiterentwicklungen Dritter zum Forschungsgegenstand und auf mögliche Anschlussprojekte eingegangen wird

## 1.2 Einordnung des Projekts ENUBA in den förderpolitischen Rahmen

Ausgehend von der Bekanntmachung des BMU über die Förderung von Forschungsaktivitäten in der Elektromobilität [3], die Grundlage des gestellten und bewilligten Förderantrags war [2], ordnet sich das Vorhaben in folgende übergeordnete Förderprogramme und Leitlinien ein:

- Mobilität und Verkehrstechnologien - 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung [4]
- Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung [5]
- Regierungsprogramm Elektromobilität [6]
- Mobilität und Verkehr [7]
- Positionspapier Alternative Antriebe und Hybridsysteme [8]

Die Ziele und Themen der wichtigsten Programme fasst Tabelle 1-1 ausschnittsweise zusammen.

**Tabelle 1-1 Ziele und Themen staatlicher Förderung der Elektromobilitätsforschung im Kontext des Projekts ENUBA**

Titel und Referenz	Ziele und Forschungsthemen
Bekanntmachung über die Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität [3]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feldversuche zur Erprobung von Fahrzeugen im Wirtschaftsverkehr hinsichtlich Energiebedarf und Nutzerakzeptanz.</li> <li>• Erprobung von Verfahren zur Integration des Wirtschaftsverkehrs in das Energiesystem einschließlich der Rückspeisung rekuperativ gewonnener Energie anhand typischer Lastprofile.</li> <li>• Begleitforschung zur Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten einschließlich des Mobilitätsverhaltens der Nutzer und Abschätzung von Marktpotenzialen.</li> <li>• Einzelfallförderung von Projekten mit besonderer wissenschaftlicher, technischer oder wirtschaftlicher Bedeutung und hoher Relevanz für die Entwicklung Deutschlands zum Leitmarkt für Elektromobilität.</li> </ul>
Mobilität und Verkehrstechnologien - 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung [4]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Präzisierung und Detaillierung der High-Tech-Strategie der Bundesregierung im Bereich der Verkehrsforschung.</li> <li>• Forschungsförderung zur Entwicklung von Lösungen zur effizienteren Ausnutzung der Verkehrsträger und zur Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern.</li> <li>• Beitrag zum Klima- und Umweltschutz, u. a. durch Effizienzsteigerung durch neue Antriebskonzepte, durch Technologien zur verstärkten Nutzung energieeffizienter Verkehrsmittel im intermodalen Verkehrssystem und durch Maßnahmen zur Senkung der verkehrsbedingten Schadstoff- und Lärmemissionen.</li> <li>• Bewältigung des stark wachsenden Güterverkehrs durch intelligente Lösungen zur effizienten Nutzung aller Kapazitäten und Reserven aller Verkehrsträger.</li> </ul>
Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung [5]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterstützung der breiten Markteinführung von (batterieelektrischen) Elektrofahrzeugen durch Förderung von Projekten zur Verbesserung der Kostenstrukturen und Alltagstauglichkeit.</li> <li>• Gestaltung des Übergangs zu neuen Effizienztechnologien einschließlich der Anpassung des Plans an technische und wirtschaftliche Entwicklungen im Sinne eines „lernenden Programms“.</li> <li>• Schaffung und Unterstützung politischer, regulatorischer, technischer, infrastruktureller und normativer Voraussetzungen.</li> <li>• Reduzierung der Abhängigkeit vom Erdöl und Erhöhung der Freiheitsgrade bei der Wahl der primären Energiequelle für den Verkehr durch neue Fahrzeugkategorien und moderne Verkehrskonzepte mit verstärkter Nutzung elektrischer Energie.</li> <li>• Förderung von Konzepten zur Integration zusätzlich generierter Stromnachfrage durch Elektromobilität und zur Verknüpfung dieser Nachfrage mit erneuerbaren Energien.</li> </ul>

(Fortsetzung nächste Seite)

(Tabelle 1-1, Fortsetzung)

Titel und Referenz	Ziele und Forschungsthemen
Regierungsprogramm Elektromobilität [6]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufsetzung eines technologieoffenen Förderprogramms für ehrgeizige Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum Einsatz innovativer Technologien für die Elektromobilität.</li> <li>• Etablierung der Elektromobilität als Querschnittstechnologie zur Integration von Automobilindustrie und Energieversorgungswirtschaft.</li> <li>• Schaffung normativer Regeln zur Zulassung von Elektrofahrzeugen unter Beachtung der Sicherheits- und Umweltschutzziele.</li> <li>• Harmonisierung der Regelungen im Straßen-, Bau-, Energie- und Umweltrecht insbesondere bei den Fernstraßen mit Baulastträgerschaft des Bundes im Rahmen der Bundesauftragsverwaltung der Fernstraßen des Bundes durch die Straßenbaubehörden der Länder.</li> <li>• Beachtung der Rohstoffstrategie bei der Verringerung der Abhängigkeit vom Erdöl ohne für zentrale Komponenten der Elektromobilität neue Abhängigkeiten bei Hochtechnologie-Rohstoffen zu schaffen.</li> <li>• Verstärkte Nutzung von Kommunikations- und Informationstechnik über den Aktionsplan „Intelligente Transportsysteme“ für die Kommunikation zw. Fahrzeug und Infrastruktur oder Energieversorger und Kunden.</li> </ul>

In der vorliegenden Abschlussdokumentation wird zusammenfassend beschrieben, wie im Projekt ENUBA in den Schwerpunkten (a) Technisches Konzept (einschl. Zielsystem), (b) Erprobung der Vorzugslösung und (c) Ökologisch-ökonomische Gesamtbewertung ein technisch und wirtschaftlich tragbares Konzept zur Elektromobilisierung schwerer Nutzfahrzeuge erarbeitet wurde. Dabei wird an zahlreichen Stellen gezeigt, wie die zuvor dargestellten förder- und forschungspolitischen Ziele aufgegriffen und erfolgreich umgesetzt wurden. Dies betrifft u. a. folgende zehn Aspekte:

- Entwicklung eines innovativen Konzepts zum umfassenden Einsatz elektrischer Energie im Straßengüterverkehr mit hohen Lasten und über große Entfernungen.
- Nachweis der grundsätzlichen Eignung des entwickelten Konzepts durch intensive Erprobung der Kernkomponenten einschließlich ihrer Integration in ein Gesamtsystem bei alltagsnahen Verkehrs- und Umgebungsbedingungen.
- Praktische Umsetzung des Querschnittsthemas Kraftfahrzeugtechnik und externe elektrische Versorgung einschließlich Rückspeisung von Bremsenergie ins öffentliche Netz.
- Durchführung einer ökonomischen und ökologischen Gesamtbewertung im Rahmen einer Szenarioanalyse unter Berücksichtigung verschiedener Betreibermodelle und zeitlicher Horizonte beim Wandel des Energieversorgungssystems hin zu mehr regenerativer Erzeugung.
- Beschreibung der verkehrs- und kommunikationstechnischen Grundlagen zur Erstellung eines Kommunikations-, Signalisierungs- und Berechtigungskonzepts.
- Erprobung zentraler Elemente wie Inspektion und Kontrolle der Teilnehmer (Fahrzeuge) mit Aufbau bidirektionaler Kommunikation Infrastruktur – Leitstelle bzw. Fahrzeug – Infrastruktur.
- Erstellung eines Konzepts zur Energiemessung und -abrechnung unter Nutzung von Verfahren, die für die diskriminierungsfreie Nutzung des elektrischen Netzes der Deutschen Bahn AG durch verschiedene Eisenbahnverkehrsunternehmen entwickelt wurden.
- Erreichung einer Dauerzulassung der umgerüsteten, dieselektrischen Hybridfahrzeuge mit dem Betriebsmodus „rein elektrischer Betrieb“ unter Einbeziehung externer Gutachter (TÜV).
- Erstellung eines externen Rechtsgutachtens u. a. zur Einordnung der Oberleitungsinfrastruktur als Teil einer Bundesfernstraße sowie zur Notwendigkeit bestimmter Planungsverfahren für eine Pilotstrecke im öffentlichen Straßenraum bzw. eine spätere Umrüstung längerer Abschnitte.
- Das vorgelegte Konzept kann dazu beitragen, auch im Straßengüterverkehr die Abhängigkeit vom Erdöl zu verringern ohne in großem Umfang auf neue und ggf. knappe Rohstoffe für Energiespeicher angewiesen zu sein. Der hohe Bedarf an Kupfer für die elektrischen Komponenten kann z. B. unter Berücksichtigung der Vorkommen in der Lausitz [9] langfristig die Unabhängigkeit der Transportwirtschaft und -industrie von externen Rohstoffen unterstützen.

## 2 Voraussetzungen und Struktur des Projekts

### 2.1 Voraussetzungen des Vorhabens

Als wesentliche Grundlage für dieses Vorhaben diente das bei Siemens vorhandene Know-how sowie die langjährige Erfahrung sowohl im Bereich des Aufbaus und Ausbaus elektrischer Verkehrssysteme als auch im Bereich der Ausrüstung von Fahrzeugen mit Elektroantrieben.

Als Systemhaus für elektrische Verkehrssysteme verfügt Siemens über Kompetenzen im gesamten Systemlebenszyklus von der Konzeption und Auslegung über die Detailplanung, Errichtung, Inbetriebnahme und bei Bedarf auch den Betrieb und die Wartung elektrischer Bahnsysteme für den Personennahverkehr, Regional- und Fernverkehr sowie im Hochgeschwindigkeits- und Hochleistungsgüterverkehr. Weltweit erfolgreich realisierte Kundenprojekte auf dem Gebiet der elektrischen Infrastruktur für Gleich – und Wechselstrombahnen dokumentieren die führende Marktstellung der Siemens AG als Anbieter und Ausrüster von Verkehrssystemen.

Der Bereich Antriebstechnik beschäftigt sich seit 1996 mit Hybridantriebssystemen für unterschiedliche Straßenverkehrs Anwendungen. Dabei wurden bis heute ca. 1 500 Serienhybridantriebssysteme in etwa 50 Kundenprojekten weltweit geliefert, schwerpunktmäßig für Stadtbusanwendungen. In einigen Projekten wurden auch Systeme für Müllfahrzeuge oder andere Sonderfahrzeuge realisiert.

Seitens der Projektleitung wurde sichergestellt, dass durch Einbindung weiterer Siemens-Einheiten das im Konzern vorhandene Spezial-Know-How nach besten Möglichkeiten genutzt wird und die benötigten Ressourcen dem Forschungsprojekt zur Verfügung stehen.

So wurden z. B. Siemens-Einheiten beratend einbezogen, die sich mit der Ausrüstung von Tagebau-Spezialfahrzeugen mit Stromabnehmern beschäftigen (Einsatz in Erzminen) und diese Fahrzeuge für den elektrischen Betrieb an einer Oberleitung ertüchtigen. Ebenso haben Experten der Straßenverkehrstechnik das Projekt im Bereich „Car-to-Infrastructure-Kommunikation“ unterstützt und am umfassenden Telematikkonzept mitgewirkt. Weiterhin wurden die Kollegen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes bei Planung, Errichtung und Betrieb der Versuchsanlage einbezogen, um sichere Arbeits- und Testbedingungen zu gewährleisten.

Bei der Entwicklung des neuartigen Stromabnehmersystems konnte auch auf die Expertise aus dem Bau elektrischer Schienenfahrzeuge zurückgegriffen werden. In dieser Einheit erfolgt die elektrische und mechanische Integration von verschiedenen Stromabnehmern in Straßenbahnen, Triebzüge und Lokomotiven. Die dort vorhandenen Erfahrungen konnten bei der Neuentwicklung des aktiv nachgeregelt Stromabnehmers für das Förderprojekt genutzt werden und waren ein Grundstein für die geleistete Entwicklungsarbeit.

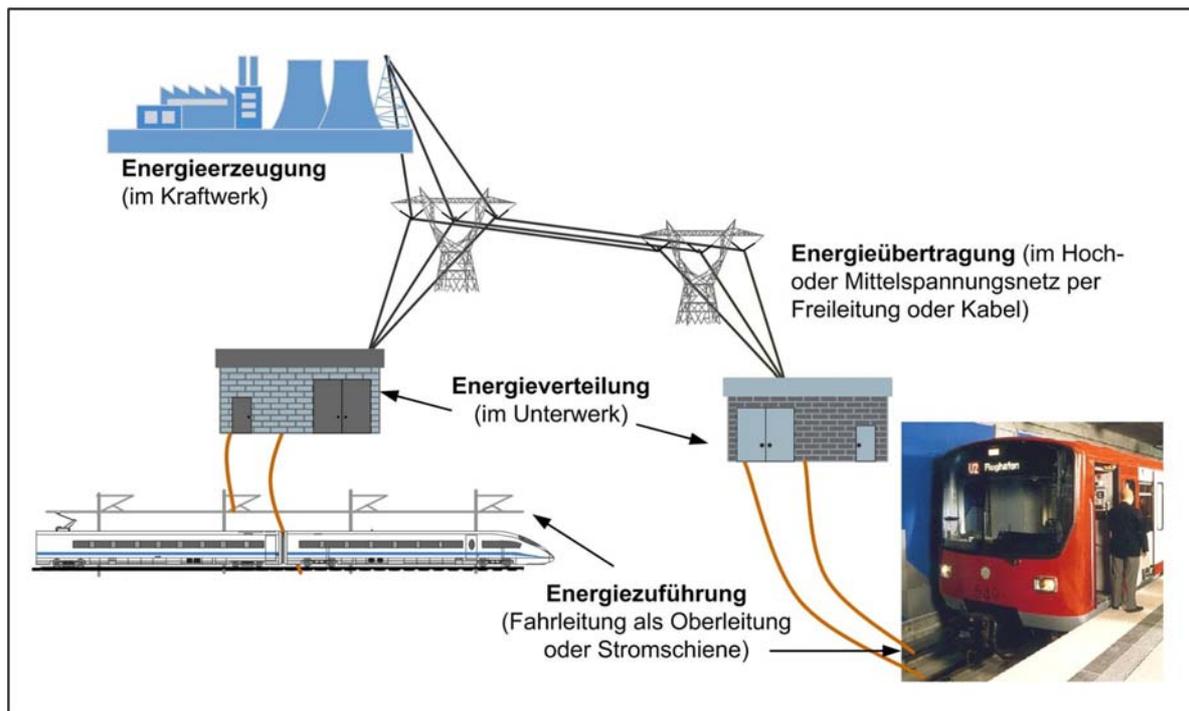
Unter diesen Voraussetzungen konnte das Forschungsprojekt ENUBA kompetent, inhaltlich umfassend und sicher bearbeitet werden.

### 2.2 Stand der Technik zu Projektbeginn

#### 2.2.1 Bahnenergieversorgung

Wichtigster Meilenstein für Entwicklung, Errichtung und Betrieb elektrischer Verkehrssysteme war die Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips durch Werner von Siemens im Jahr 1866. Dieses Prinzip ermöglicht die Umwandlung mechanischer Rotationsenergie in die einfacher zu übertragende elektrische Energie und die Rückwandlung in Bewegungsenergie in Fahrmotoren am beabsichtigten und beliebig wählbaren Einsatzort. Beginnend mit den ersten Anwendungen bei Straßenbahnen (ab 1880), U-Bahnen (ab ca. 1900) und Eisenbahnen (ab ca. 1910) weist die Energieversorgung elektrischer Verkehrssysteme einen Aufbau entsprechend Abbildung 2-1 (s. S. 10) auf [10].

Abbildung 2-1 Prinzipieller Aufbau eines elektrischen Bahnsystems



Aus Primärenergieträgern wird in Kraftwerken elektrische Energie erzeugt und über Freileitungsnetze zu den entlang der Strecke aufgestellten Unterwerken übertragen. Diese passen die elektrische Energie in Spannung und Frequenz an und speisen sie in das Fahrleitungsnetz ein. Aus dem Fahrleitungsnetz beziehen die ortsveränderlichen Fahrzeuge über einen oder mehrere Stromabnehmer elektrische Energie, um sie anschließend in mechanische Energie zur Fortbewegung der Züge umzuwandeln. Der dazu notwendige Energiebedarf schwankt in Abhängigkeit der Lage der Bahnhöfe und Haltestellen, der Topographie, des Fahrplans und der eingesetzten Züge. Grundsätzlich ist dabei auch die Rückgewinnung elektrischer Energie beim Bremsen oder in Gefällen möglich, wobei entweder andere Züge versorgt werden oder die Energie ins übergeordnete Netz zurückgespeist wird.

Zwei Schnittstellen sind im System von besonderer Bedeutung:

- Über den Kontakt zwischen Fahrleitung und Stromabnehmer müssen bei jeder Geschwindigkeit die für die Traktionsleistung notwendigen Ströme sicher, kontinuierlich und mit minimalem Verschleiß übertragen werden. Die Ströme können mehrere Tausend Ampere betragen und müssen über Kontaktflächen von ca. 1 cm<sup>2</sup> (bei Oberleitungen) übertragen werden.
- Die stark schwankende Bahnbelastung darf am Übergabepunkt zwischen dem öffentlichen Energieversorgungsnetz und dem Bahnstromnetz das speisende Netz nicht unzulässig belasten, sodass Überwachungs- und ggf. Kompensationseinrichtungen vorzusehen sind.

Die wesentlichen Vorteile der Elektrotraktion in Verkehrssystemen sind zusammengefasst [11]:

- Der hohe Wirkungsgrad elektrischer Triebfahrzeuge von ca. 75-85 %.
- Die Unabhängigkeit des Verkehrssystems von einzelnen Energieträgern, wie Kohle oder Erdöl, da Elektroenergienetze aus verschiedenen Energiequellen gespeist werden und sich an lokal verfügbare Energieträger und technologische Entwicklungen anpassen können.
- Die weitgehende Emissionsfreiheit (hinsichtlich CO<sub>2</sub>, Ruß, Abgase) am Einsatzort.
- Die geringen Transportkosten im Vergleich zu anderen Traktionsarten, insbesondere der Dieseltraktion, wenn das Verkehrsaufkommen eine Elektrifizierung rechtfertigt, da diese mit relativ hohen einmaligen Infrastrukturkosten jedoch geringeren Betriebskosten verbunden ist.

Mit der technologischen Weiterentwicklung kommen für unterschiedliche Anwendungsfälle verschiedene Bahnenergieversorgungssysteme zum Einsatz. Dabei kann zwischen Gleichstrombahnen mit max. 3 kV sowie Wechselstrombahnen mit max. 50 kV Nennspannung unterschieden werden.

Gleichstromsysteme verfügen aufgrund der früheren Einsatzreife immer noch über einen Anteil von ca. 40 % an allen elektrifizierten Fernverkehrsstrecken. Ebenso dominieren sie den Markt der Massenverkehrsmittel im Personennahverkehr. Wesentliche Vorteile von DC-Systemen sind die verhältnismäßig geringen Isolationsabstände, die den Einsatz in dicht besiedelten Bereichen sowie Straßenträumen erleichtern. Weiterhin ist der Aufbau der Fahrzeuge relativ einfach, da weniger Energieumwandlungen auf den Fahrzeugen notwendig sind. Wesentlicher Nachteil ist, der hohe Traktionsstrom, der hohe Spannungsfälle im Fahrleitungsnetz, höhere Übertragungsverluste sowie eher geringe Unterwerksabstände bedingt. Sonderformen elektrischer Verkehrssysteme mit Gleichspannung sind Obusse (typischerweise bis 750 V DC Nennspannung) und die sog. Truck-Trolley-Systeme (bis 3 kV Nennspannung), die in Tagebauten zum Antrieb von Schwerlast-LKW errichtet werden [12], [13].

Mit dem Aufkommen leistungselektronischer Bauelemente ab den 1970er Jahren sind AC-Systeme mit Landesfrequenz und max. 50 kV Nennspannung die Vorzugslösung für Hochgeschwindigkeitsstrecken oder Strecken des Hochleistungsgüterverkehrs. Die hohe Spannung bedingt geringere Traktionsströme und Spannungsfälle im Fahrleitungsnetz und erlaubt größere Unterwerksabstände. Es müssen jedoch größere Isolationsabstände vorgesehen werden. Ebenso nehmen mit steigenden Transportaufkommen und Unterwerksabständen die einphasig aus dem Landesnetz entnommenen Lasten zu, so dass leistungsfähige Drehstromnetze erforderlich sind und Maßnahmen zur Kompensation der unsymmetrischen Leistungsentnahme ergriffen werden müssen [10].

Um den stetig wachsenden Anforderungen hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit elektrischer Verkehrssysteme gerecht zu werden, ist eine integrierte Systemauslegung Stand der Technik geworden. Diese berücksichtigt einerseits die vom Betreiber aktuell und für längere Planungshorizonte prognostizierten Verkehrsaufkommen, Fahrzeuge und Fahrpläne. Andererseits werden die Anschlussbedingungen des speisenden Energieversorgungsnetzes beachtet. Ausgehend von der fahrdynamischen Simulation mit paralleler und ggf. auf die Fahrdynamik zurückwirkender elektrischer Netzberechnung hat die Systemauslegung folgende Ziele [14], [15]:

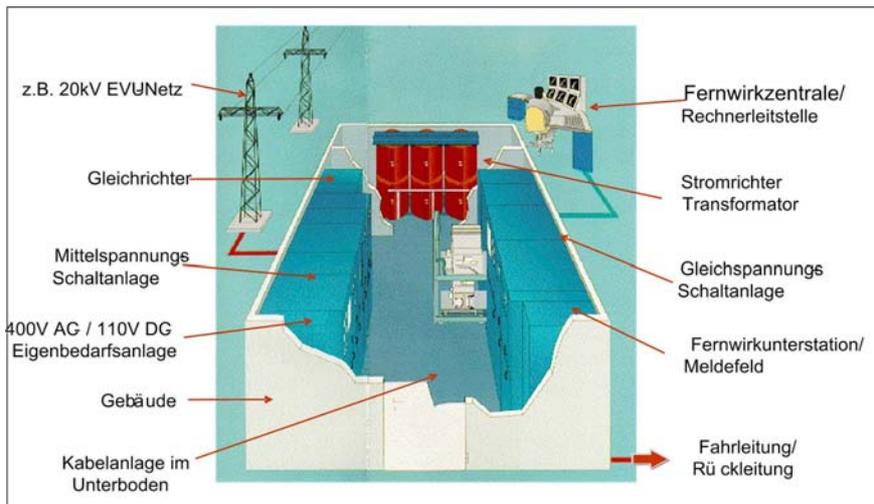
- Auswahl der Komponenten der Unterwerke und Fahrleitungen, die bei allen definierten Betriebs- und Ausnahmesituationen nicht unzulässig überlastet werden.
- Entwicklung und Anpassung von Schutz- und Erdungskonzepten, die den Anforderungen des Personen- und Anlagenschutzes gerecht werden und trotzdem eine hohe Verfügbarkeit des Systems gewährleisten, die z. B. durch Abschaltung gestörter Bereiche erreicht wird.
- Untersuchung und Überwachung der Wechselwirkungen des elektrischen Verkehrssystems mit seiner Umgebung, um zur Vermeidung negativer und ggf. unzulässiger Rückwirkungen Schutz- und Kompensationsmaßnahmen vorsehen und anpassen zu können.

Seit ca. 130 Jahren ist die Siemens AG erfolgreich am Markt tätig und belegt in der Bahnbranche weltweit einen der führenden Plätze. Als Systemhaus bestehen Kompetenzen in folgenden Bereichen:

- Konzeption, Auslegung, Detailplanung, Errichtung, Inbetriebnahme und bei Bedarf Wartung elektrischer Bahnsysteme für den Personennahverkehr, Regional- und Fernverkehr sowie im Hochgeschwindigkeits- und Hochleistungsgüterverkehr
- Ausrüstung von Gesamt- und Teilsystemen, z. B. Unterwerkstechnik und Fahrleitungssysteme, für alle Stromsysteme und Geschwindigkeiten
- Auslegung und Ausrüstung unkonventioneller elektrischer Verkehrssysteme, z. B. Obus- und Truck-Trolley-Systeme, People-Mover oder Magnetschwebbahnen
- Untersuchung und Bewertung der Wechselwirkungen zwischen Fahrzeugen, Bahn- und Landesenergieversorgung sowie Auslegung geeigneter Kompensationseinrichtungen zur Einhaltung allgemein verbindlicher oder lokal spezifizierter Grenzwerte und Vorgaben
- Erstellung und Implementierung von Schutzkonzepten einschließlich der Schutzeinrichtungen mit dem Ziel einer aufeinander abgestimmten Auslegung aller Komponenten und Teilsysteme

Den Aufbau eines Unterwerks für Gleichstrombahnen zeigt Abbildung 2-2 am Beispiel eines kompakten Typs, wie er häufig bei Straßenbahnen eingesetzt wird. Die optimierte Ausführung gestattet die Integration aller Komponenten in einen Container, dessen Außenscheinung sich nach den Kundenwünschen richtet und der vollständig ausgerüstet angeliefert, aufgestellt und in Betrieb gesetzt wird.

Abbildung 2-2 Aufbau eines kompakten Unterwerks für Gleichstrombahnen



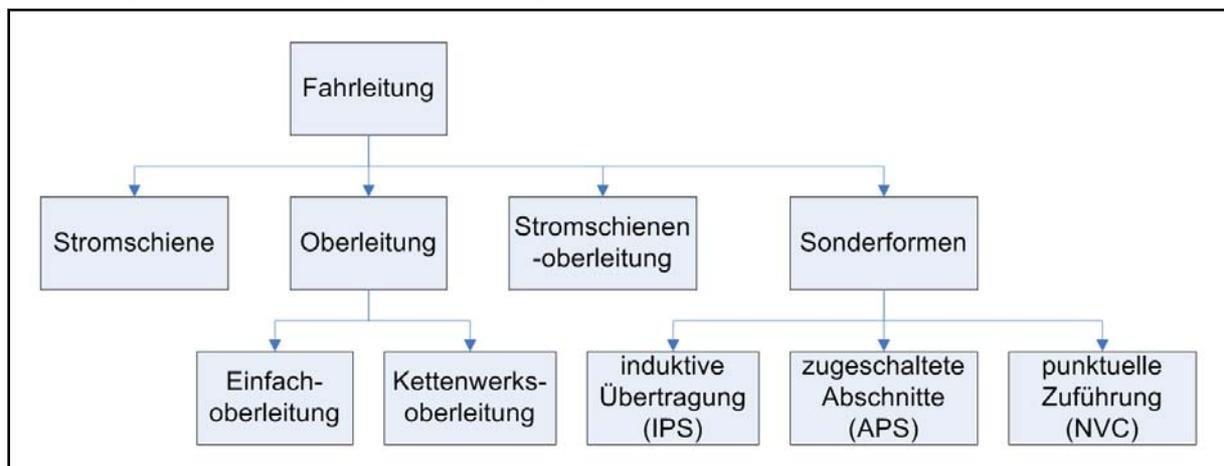
Kern jedes DC-Unterwerks ist die Transformator-Gleichrichter-Kombination, die den primärseitigen Drehstrom (z. B. aus einem 20-kV-Netz) in Gleichstrom der gewünschten Spannung gleichrichtet. Stand der Technik sind Reihen- oder Parallelschaltungen von 6-Puls-Brücken, die zu einer 12-pulsigen, d. h. bereits gut geglätteten Gleichspannung führen. Häufig werden dazu Dioden eingesetzt, wobei das gesamte Unterwerk für eine geeignete Leerlaufgleichspannung ausgelegt wird. Im Betrieb und vor allem bei Vollast sinkt die Spannung am Unterwerk durch die Spannungsfälle an der Transformator-Gleichrichter-Einheit, sodass für die im Fahrleitungsnetz auftretenden Spannungsfälle weniger Reserven zur Verfügung stehen. Dieser Effekt kann ausgeglichen werden, wenn für den Gleichrichter steuerbare leistungselektronische Bauelemente (z. B. Thyristoren) zum Einsatz kommen. Diese gewährleisten auch bei Vollast eine stabil hohe Spannung am Unterwerk, tragen zu einer Senkung der Übertragungsverluste bei und ermöglichen größere Abstände zwischen den Unterwerken [10].

Moderne Fahrzeuge wandeln beim Bremsen und in Gefällen mechanische Energie in elektrische zurück und speisen diese ins Fahrleitungsnetz ein. Diese Energie kann von anderen Fahrzeugen genutzt werden. Sind keine Verbraucher in der Nähe des rückspeisenden Fahrzeugs, so kann die Energie zum Unterwerk zurückübertragen werden. Dort muss sich entweder ein Energiespeicher befinden oder das Unterwerk muss mit einem Wechselrichter ausgerüstet sein, der den Gleichstrom in Drehstrom zurückwandelt und ins Energieversorgungsnetz zurückspeist [16], [17].

### 2.2.2 Fahrleitungen

Die elektrische Traktion bewährt sich seit über 100 Jahren im spurgeführten oder spurgebundenen Nah- und Fernverkehr. Zur Zu- und Rückleitung der elektrischen Energie zu den Fahrzeugen werden Fahrleitungen benötigt. Diese weisen unterschiedliche Formen auf (s. Abbildung 2-3).

Abbildung 2-3 Einteilung der Fahrleitungen (nach [18])



Beim spurgeführten Verkehr auf Schienen erfolgt die Rückführung der elektrischen Energie meist durch die Fahrschienen zum Unterwerk. Daher wird pro Fahrtrichtung nur eine einpolige Leitung für die Energieversorgung der Fahrzeuge benötigt. Bei diesen Systemen ist die Siemens AG seit den Anfängen der Elektrischen Bahnen 1879 maßgebend an den Entwicklungen der Fahrleitungen beteiligt. Bereits 1960 wurden Oberleitungen für 200 km/h Befahrgeschwindigkeit vorgestellt. Diese Entwicklung wurde mit dem Bau von Oberleitungen für Hochgeschwindigkeitsstrecken für über 300 km/h Geschwindigkeit bis heute fortgeführt. Die langjährige Erfahrung sowie die anerkannte und gleichbleibend hohe Qualität der Fahrleitungsprodukte und -systeme sowie die Planung und Lieferung von Komplettsystemen sind Hauptmerkmale der angebotenen Lösungen.

Beim spurgebundenen Verkehr wird keine mechanische Zwangsführung durch den Fahrweg auf die Fahrzeuge ausgeübt. Typisches Beispiel dafür ist im Bereich des Nahverkehrs seit 1882 das Konzept des Busses mit Einfachoberleitung, auch als Oberleitungsbus (kurz Obus) bekannt. Da der Rückstrom nicht über den Fahrweg Straße zum Unterwerk fließen kann muss die Oberleitung zweipolig ausgeführt werden. Hierzu werden zwei Leiter mit einer Spannungsdifferenz von 600 V bis 750 V zwischen Plus- und Minuspol oberhalb der Fahrbahn verlegt. Die Abnahme des Stromes erfolgt über zwei drehbare Stangenstromabnehmer mit Schleifschuhen, wie in Abbildung 2-4 dargestellt.

**Abbildung 2-4 Obus mit Einfach-Oberleitung und Stangenstromabnehmer [19]**



Basierend auf dieser Lösung für die Personenbeförderung gab es in der Vergangenheit spezielle Strecken mit Oberleitungsfahrzeugen für den Güterverkehr:

- Hafenschleppbahn Altona (1912-1950)
- Industriebahn Wurzen (1905-1928)
- Valtellina-Tal-Projekt in Italien (1938-1962)

Unter dem Begriff „Trolleytruck“ sind weitere Beispiele für den elektrischen Güterverkehr auf Straßen zu finden. Heute gibt es in Russland und in der Schweiz in einigen Städten mit Obussystemen Lastkraftwagen mit Stangenstromabnehmer. Diese Fahrzeuge sind als Unikate anzusehen und sind vom technischen Konzept her Obusse für den Transport von Gütern.

Des Weiteren gibt es in einigen Minen für schwere Muldenkipper Kettenwerksoberleitungen. Der Obergriff hierfür ist „Trolley Assist“ bzw. Truck-Trolley-System. Die erste Anwendung hierfür gab es Ende der 60er Jahre. Seit 1981 wurden einige Minen durch die Siemens AG ausgerüstet, wobei die Energieversorgung einschließlich Fahrleitung und Unterwerken sowie die elektrische Antriebstechnik der Fahrzeuge geliefert werden. Ein Beispiel zeigt Abbildung 2-5 (S. 14). Die Anlagen werden meist nur im Bereich der Steigungsstrecken für Geschwindigkeiten bis 25 km/h gebaut. Die Ein- und Ausfahrt in das System sowie das Heben und Senken des Stromabnehmers und die Spurführung erfolgt manuell. Aufgrund der Breite der Trucks und der zur Verfügung stehenden Fahrspuren kommen hier herkömmliche Scheren- oder Einholmstromabnehmer aus der Bahntechnik zum Einsatz. Ebenso ist es möglich, den Verschleiß der Schleifleisten zu vergleichmäßigen, indem wie bei Eisen- und Straßenbahnen die Fahrleitung im Zick-Zack verlegt wird [13].

**Abbildung 2-5 Dump-Truck mit Trolley-Assist und zweipoligem Stromabnehmer [13]**

Als Sonderlösung ist bisher die induktive Energieversorgung (IPS - inductive power supply) einzuschätzen. Diese Systeme sind momentan nur im innerbetrieblichen Transport im Einsatz, obwohl auch Versuche mit Straßenbahnen unternommen werden. Der Leistungsbedarf für den Antrieb eines 40-t-LKW, insbesondere in Steigungen, konnte bisher aber nicht zuverlässig, energetisch sinnvoll und ohne unzulässige Beeinflussung Dritter (EMV) übertragen werden.

Einen ähnlichen Spezialfall, jedoch mit einigen kommerziell in Betrieb befindlichen Strecken, stellen Straßenbahnsysteme mit abschnittsweise bei Überdeckung durch die Fahrzeuge zugeschalteten Stromschienen dar, die straßenbündig im Fahrweg eingelassen und von den Fahrzeugen von oben bestrichen werden. Das System ist auch als APS (frz.: alimentation par le sol, dt.: Versorgung durch den Boden) bekannt [20].

### 2.2.3 Stromabnehmer

Der Stromabnehmer ist am Fahrzeug die Vorrichtung, die die elektrische Energie von der Oberleitung ins Fahrzeug, vor allem in den Elektroantrieb, überträgt [11]. Stromabnehmer werden heute hauptsächlich bei elektrisch angetriebenen Schienenfahrzeugen und bei Obussen angewendet. In Sonderanwendungen finden Stromabnehmer auch bei den Trolley-Trucks in Minen Anwendung [13].

Schienengeführte Fahrzeuge (Hochgeschwindigkeitszüge, Lokomotiven sowie Triebwagen für den Regional- und Nahverkehr) werden in sehr engen horizontalen und vertikalen Toleranzen unter der Oberleitung geführt. Die Stromabnehmer sind in der Regel einpolig, weil die Rückleitung des Fahrstroms durch die Schienen realisiert wird. Die mechanische Führung des Stromabnehmers ist dadurch bereits durch die Schienen und den Fahrweg gegeben. Die Stromabnehmer müssen deshalb nur in vertikaler Richtung bewegt werden können, um mit einer genügenden Kontaktkraft an die Oberleitung zu drücken. Typische Ausführungsformen sind der Scheren-Stromabnehmer, auch Pantografenstromabnehmer genannt (Abbildung 2-6) und der Einholmstromabnehmer (s. Abbildung 2-7). In diese Kategorie fallen auch Bügel- oder Lyra-Stromabnehmer, die aber nur in einer Fahrtrichtung betrieben werden konnten und deshalb heute kaum noch eingesetzt werden.

Abbildung 2-6 Pantografenstromabnehmer [21]

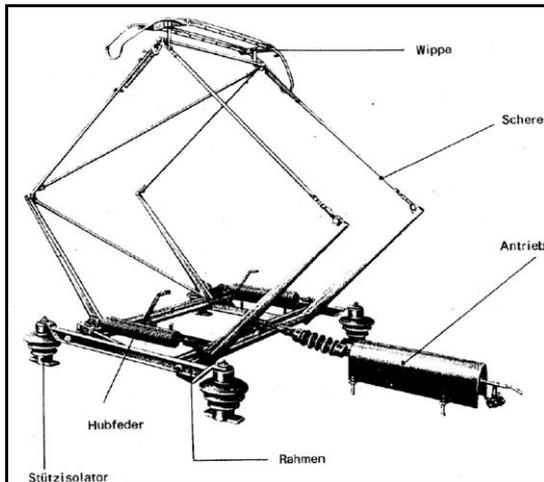
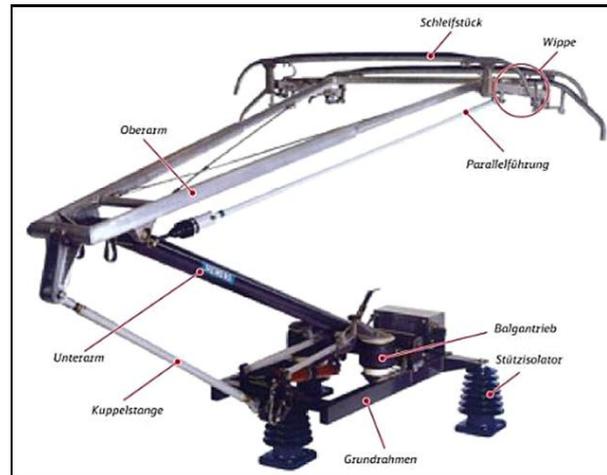


Abbildung 2-7 Einholmstromabnehmer [21]



Eine zweite Kategorie sind Stangenstromabnehmer mit Schleifschuh (s. Abbildung 2-4, S. 13 und Abbildung 2-8, S. 15). Diese Stromabnehmer sind zweipolig und stellen heute den Standard für Oberleitungsbusse dar. Die Beweglichkeit des Schleifschuhs ermöglicht ein größeres Ausweichen des Fahrzeuges horizontal zur Fahrtrichtung. Jedoch müssen die Weichen für Abzweigungen in der Oberleitung realisiert werden, was zu häufigem Herausspringen aus der Oberleitung führt. Dieses System garantiert deshalb nicht die notwendige Zuverlässigkeit, um einen behinderungsfreien Verkehr mit höheren Geschwindigkeiten zu gewährleisten. Außerdem müssen diese Stromabnehmer bei Stillstand des Fahrzeuges manuell eingedrahtet werden. Ein Anbügeln während der Fahrt ist nicht möglich.

Eine weitere Bauform an Stromabnehmern, die sich zwangsläufig aus den in Abbildung 2-3 (S. 12) aufgeführten Fahrleitungstypen ergibt, sind Vorrichtungen zur Beschleifung einer oder mehrerer seitlich oder unterhalb des Fahrzeugs angeordneter Stromschienen. Beispiele dafür zeigen Abbildung 2-9 und Abbildung 2-10 (beide S. 16). Solche Stromabnehmer sind typisch für U-Bahnen und S-Bahnen.

Schließlich gibt es auch eine kleine Zahl von Anwendungen, bei denen Sonderfahrzeuge (z. B. Schwerlast-Trucks in Minen) unter einer zweipoligen Oberleitung fahren und deshalb auch einen zweipoligen Stromabnehmer besitzen (s. Abbildung 2-5, S. 14). Diese zweipoligen Stromabnehmer sind im Prinzip wie zwei nebeneinander montierte Bahnstromabnehmer realisiert. Sie ermöglichen nur die Aufwärts- und Abwärtsbewegung der Wippen mit den Schleifleisten. Die seitliche Bewegung des Fahrzeuges ist durch die Breite der Schleifleisten limitiert. Der Fahrer muss hierbei, ggf. mit Unterstützung einer optischen Orientierungshilfe, die Spur unter der Oberleitung manuell halten.

Abbildung 2-8 Stangenstromabnehmer für Obusse [22]

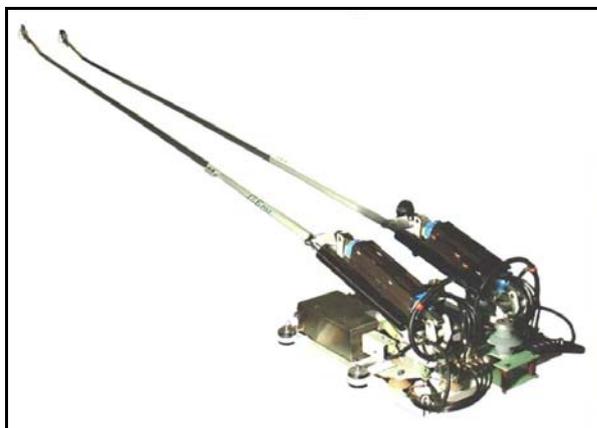


Abbildung 2-9 Stromabnehmer für Stromschienen (U-Bahn)



**Abbildung 2-10 U-Bahn mit Stromabnehmer und Stromschiene [21]**

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass heute keine Stromabnehmer-Systeme existieren, die den Anforderungen eines zuverlässigen Betriebs mit häufigen Wechseln zwischen elektrischem und dieselektrischem Betrieb auch während der Fahrt gerecht werden. Vielmehr bedarf es einer innovativen Entwicklung, um diese Anforderungen in einem Stromabnehmer-System zuverlässig zu gewährleisten. Abseits der etablierten Systeme war außerdem aus technischen und rechtlichen Gründen die Lage hinsichtlich Schutzrechten zu beachten und eine entsprechende Prüfung inklusive intensiver Patentrecherche durchzuführen, s. Abschnitt 4.4.

## 2.2.4 Fahrzeug (Antriebstechnik)

In den letzten Jahren hat der Hybridantrieb bei Nutzfahrzeugen mit den Schwerpunkten Stadtbuss, Liefer-LKW und Müll-LKW einen großen Zuwachs bekommen. Neben den o. g. Mining Trucks und Obussen beschäftigt sich Siemens seit 1996 auch mit Hybridantriebssystemen für Stadtbusse. Von 1996 bis heute hat man an diversen Prototypsystemen und Kleinserien in Asien, USA und Europa gearbeitet. In dieser Zeit wurden allein durch die Siemens AG ca. 1 500 Serienhybridantriebssysteme in etwa 50 Kundenprojekten weltweit geliefert. Die Systeme konzentrierten sich auf Stadtbusanwendungen, wie z. B. eine Reihe von Hybridbussen für New York City (s. Abbildung 2-11).

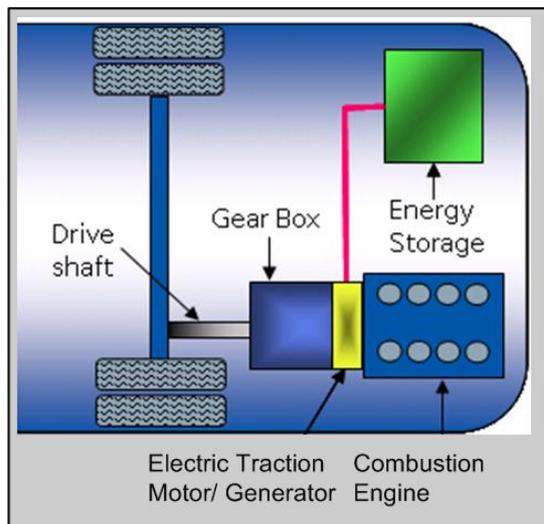
**Abbildung 2-11 Hybridbus in New York**

Obwohl es schon seit Jahrzehnten wiederholt Ansätze gab, konnte sich diese Technologie noch nicht als Standard durchsetzen. Erst in den letzten 10 Jahren, vor allem unterstützt durch die hohen Förderungen für Hybridbusse in den USA, hat sich die Hybridtechnologie beim Stadtbussignifikant weiterentwickelt. In den USA liegt der Anteil der Hybridfahrzeuge bei neuen Stadtbussen bereits bei ca. 20 %, und ein weiteres Wachstum ist absehbar. Aber auch andere Märkte sowohl in Asien und Südamerika als auch in Europa arbeiten gezielt an der Einführung dieser Technologie bei Stadtbussen.

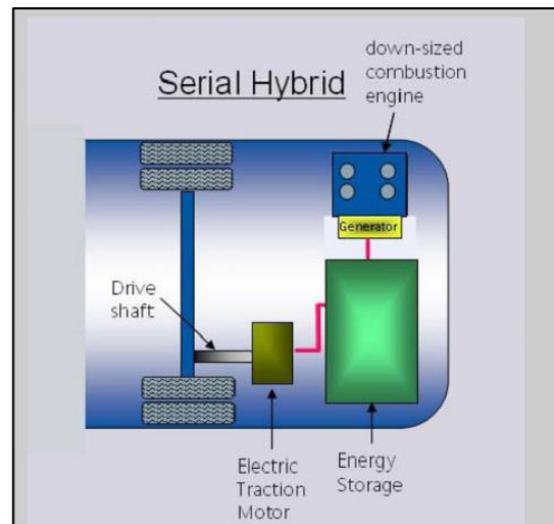
Bei Stadtbussen und Müll-LKWs kann der Hybridantrieb aufgrund der vielen Start- und Stopppzyklen und der hohen Betriebsstunden pro Jahr seine Vorteile besonders gut zeigen. Ein System, welches Bremsenergie speichert und darüber hinaus ein intelligentes Energiemanagement, Hilfsbetriebkonzept und Komponenten mit hohen Wirkungsgraden aufweist, kann bis zu 40 % Kraftstoff einsparen.

Man unterscheidet zwei Systemkonfigurationen, den Parallelhybrid (s. Abbildung 2-12) und den Serienhybrid (s. Abbildung 2-13). Je nach Anwendungsfall hat jedes System seine Vorteile gegenüber der anderen Variante. Beim Parallelhybrid ist in der Regel ein Elektromotor mit Kupplung zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe mechanisch integriert. Mit diesem Motor, der auch generatorisch beim Bremsen des Fahrzeuges wirken kann, kann man elektrisch rekuperieren, den Verbrennungsmotor beim Anfahren als „Booster“ unterstützen sowie bei niedriger Performance auch das Fahrzeug rein elektrisch betreiben. Dieses System ist dann vorteilhaft, wenn der Rekuperationsgrad des Fahrzeuges nicht sehr ausgeprägt ist und das Einsatzprofil eine hohe mittlere Verbrennungsmotorleistung anfordert. In diesem Fall kann der Elektromotor sowie der Energiespeicher relativ klein ausgelegt werden und der Zusatzaufwand für die Hybridisierung ist relativ klein. Diese Anforderungen findet man eher in Individualfahrzeugen, z. B. dem normalen PKW oder Nutzfahrzeug, d. h. das Fahrzeug kann individuell im Tageseinsatz in der Innenstadt, auf Landstrassen oder auf Autobahnen eingesetzt werden.

**Abbildung 2-12: Schema eines Parallelhybridantriebsstranges**



**Abbildung 2-13: Schema eines Serienhybridantriebsstranges**



Beim Serienhybrid ersetzt ein Elektromotor das Schalt- oder Automatikgetriebe des Fahrzeugs und am Verbrennungsmotor ist ein Generator angeflanscht. Da bei Nutzfahrzeugen in der Regel immer Dieselmotoren eingesetzt werden, spricht man im Allgemeinen von einem dieselektrischen Antriebssystem bzw. bei Kombination mit einem Energiespeicher vom Serienhybrid. Da das Fahrzeug immer vom Elektromotor angetrieben wird, kann der Antrieb die gesamte Rekuperationsleistung beim Bremsen auch dem Energiespeicher zur Verfügung stellen, weshalb diese eine hohe Leistung aufnehmen können muss. Die Dimensionierung des Verbrennungsmotors und des Generators hängt stark vom angestrebten Fahrzyklus sowie vom eingesetzten Energiespeicher ab. Insbesondere bei Stadtbussen ist die mittlere Leistung des Verbrennungsmotors wegen des Innenstadtverkehrs relativ niedrig, womit man hier das sog. „Downsizing“ anwenden kann. Hierbei werden Verbrennungsmotor und Generator für eine deutlich niedrigere Leistung als die Spitzenleistung ausgelegt, arbeiten somit als „Range-Extender“ (Reichweiten-Erhöher) und werden ausschließlich in ihren Spitzenwirkungsgraden bei nahezu konstantem Arbeitspunkt betrieben. Die Spitzenleistungen beim Beschleunigen werden aus der

Batterie gefahren. Somit begrenzt man auch den Wirkungsgradnachteil des Serienhybrids gegenüber dem Parallelhybrid, der durch die doppelte Umwandlung von mechanischer und elektrischer Energie begründet ist. Ein Serienhybrid ist immer ein sog. „Full Hybrid“, der die höchsten Kraftstoff- und Emissionsreduktionen erzielen kann und besser an eine externe Energieversorgung über eine Fahrleitung anpassbar ist. Daher eignet sich der Serienhybrid insbesondere für Fahrzeuge, die in Anwendungen mit innenstadttypischen Fahrzyklen oder die über längere Strecken durch eine externe Einspeisung voll elektrisch betrieben werden. Neben Bussen und Sonderfahrzeugen für den städtischen Bereich sind dies z. B. Flughafenvorfeldfahrzeuge sowie Nutzfahrzeuge in Häfen und Minen.

Nur in wenigen Ausnahmen wurden bisher bereits Hybridantriebssysteme für Müllfahrzeuge oder andere Sonderfahrzeuge geliefert. Bei der umfangreichen Felderfahrung mit Stadtbusanwendungen, die sich durch mehr als 35 Mio. Betriebsstunden und mehr als 300 Mio. km auszeichnet, hat man auch viel Erfahrung mit Verbrennungsmotoren und Energiespeichern der führenden Hersteller gewonnen. Für die nächsten Jahre wird mit einem großen, weltweiten Wachstum gerechnet. Die Annahme beruhen auf der hohen Kraftstoffeinsparung von 30 % und mehr und der damit verbundenen hohen Emissionsreduktion, bei gleichzeitig stetig steigenden Kraftstoffpreisen. Außerdem lassen sich beim Stadtbus mit dem Serienhybridsystem zusätzlich signifikante Vorteile beim Komfort (keine Schaltstöße, deutlich niedrigere Geräusche für Fahrgäste und Passanten) erzielen, die weitere wichtige Argumente für den Einsatz im ÖPNV sind.

## 2.3 Inhaltliche und zeitliche Planung

### 2.3.1 Struktur des Projekts

Zu Beginn des Projekts wurde ein Projektstrukturplan mit allen zu bearbeitenden Arbeitspaketen erstellt. Er verdeutlicht die Gliederung des Förderprojekts in drei Themengebiete:

1. Entwicklung einer technischen Vorzugslösung zum Einsatz elektrischer Energie im Wirtschaftsverkehr („Technisches Konzept“)
2. Erprobung der technischen Vorzugslösung zum Nachweis der Machbarkeit auf einer im Rahmen dieses Projekts zu errichtenden Teststrecke („Erprobung / Pilotierung“)
3. Ökonomische und ökologische Bewertung der Vorzugslösung unter Berücksichtigung kurz- und langfristiger Umsetzungsszenarien („Ökologische / Ökonomische Bewertung“).

Die Inhalte dieser drei Hauptbestandteile des Forschungsvorhabens werden in den folgenden Unterkapiteln kurz erläutert.

#### 2.3.1.1 Technisches Konzept

Im Rahmen dieses Aufgabengebiets wurden sämtliche technischen Analyse-, Berechnungs- und Planungstätigkeiten ausgeführt. Diese teilen sich in folgende zwei Blöcke auf:

- Definition, Bewertung und Beschreibung des Vorzugssystems mit den dazu erforderlichen Untersuchungen, Studien und Analysen.
- Erforderliche Simulationen, Auslegungen und Projektierungen für Errichtung und Betrieb der Teststrecke

#### **Definition eines Vorzugssystems für die zukünftige Implementierung**

Für die Erstellung des technischen Gesamtkonzepts wurden zunächst verschiedene technische Alternativen untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs bewertet. Im Bereich der Infrastruktur wurden dabei, ausgehend von den auf das System ENUBA zugeschnittenen Grundlagen für den Aufbau elektrischer Verkehrssysteme, die grundsätzlichen Elektrifizierungsvarianten (Gleichstrom oder Wechselstrom), mögliche Spannungsebenen und Versorgungstopologien sowie verschiedene Fahrleitungssysteme betrachtet. Parallel dazu wurde eine Normen-Recherche sowie eine Prüfung der für den öffentlichen Verkehrsraum relevanten Richtlinien und Ausführungsbestimmungen durchgeführt.

Anschließend wurde ein Vorzugssystem definiert und im Rahmen der orientierenden Systemauslegung und Optimierung wurden für zwei repräsentative Referenzstrecken Standorte für Unterwerke festgelegt und diese hinsichtlich der zu installierenden Leistung dimensioniert. Dabei wurden sowohl unterschiedliche Verkehrsaufkommen berücksichtigt, als auch den Optimierungszielen minimaler Investitionen bzw. maximaler Verfügbarkeit des Systems mit Auslegungsvarianten Rechnung getragen.

Auf Basis dieser grundlegenden Festlegungen zur Ziel-Systemarchitektur wurden im Folgenden weitergehende Studien erarbeitet, die eine detailliertere Definition und Beschreibung des Vorzugssystems im Bereich der Infrastruktur zum Inhalt hatten, wie z. B. ein Schutzkonzept, eine Studie zur Beurteilung von Netzurückwirkungen, ein Instandhaltungskonzept, ein Sicherheitskonzept. Im Bereich der Nutzfahrzeuge umfassten die Untersuchungen u. a. die Konzeption des Antriebssystems, die Wahl des Hybridsystems, Lösungen für die Integration des Stromabnehmersystems sowie die Definition einer geeigneten Ausrüstung für die Anbindung der externen Energieeinspeisung.

### **Planungen für Errichtung und Betrieb der Teststrecke**

Neben den für die Errichtung der Infrastruktureinrichtungen erforderlichen Planungstätigkeiten, fanden in diesem Aufgabengebiet sämtliche Entwicklungstätigkeiten in den Teilsystemen Stromabnehmer und Fahrzeug statt:

- Umfassende Neuentwicklung eines innovativen, für den spurgebundenen Betrieb von Nutzfahrzeugen geeigneten, aktiv nachgeregelten Stromabnehmers
- Anpassentwicklung zur Integration eines seriellen Hybridantriebssystems in Nutzfahrzeuge einschließlich der Möglichkeit zur externen Einspeisung in den Zwischenkreis

Weiterer Schwerpunkt des „Technisches Konzepts“ waren die Klärungen mit den für Errichtung und Betrieb der Testanlage zuständigen Behörden, wie z. B. Bauordnungsamt, Landesamt für Arbeitssicherheit u. a. von der Antragstellung bis zum Nachweis der Erfüllung der behördlichen Auflagen.

#### **2.3.1.2 Einrichtung und Betrieb einer Versuchsanlage**

Diese Aufgabengebiete umfasste zahlreiche Tätigkeiten, wie z. B. Beschaffung, Fertigung, Konstruktion, Transport und Testbetrieb. Dazu gehörten neben der Vorbereitung und Errichtung der Versuchsanlage auch Herstellung und Test der Stromabnehmer sowie die Umrüstung der beiden Serien-LKW. Die Labortests der Stromabnehmer wurden an einem eigens dafür errichteten Teststand durchgeführt. Vor Aufnahme des Testprogramms erfolgte die Umrüstung der beiden Versuchs-LKW vom Typ Daimler Benz Actros 1841 auf dieselelektrische Antriebstechnik mit Stromabnehmereinspeisung.

Als Testgelände für die praktische Erprobung und Überprüfung des technischen Konzepts wurde eine Start-/ Landebahn eines früheren Militärflughafens im Norden Brandenburgs ausgewählt. Ein Luftbild der Flächen zeigt Anlage 8.1. Verwalter und Betreiber der Flächen ist das Driving Center Groß Döln. Parallel zum Abschluss eines Mietvertrags wurde mit dem zuständigen Energieversorgungsunternehmen ein Netzanschlussvertrag zur Energieversorgung der Teststrecke geschlossen. Das Versorgungskonzept sah auch die Möglichkeit der elektrischen Rückspeisung von überschüssiger Bremsenergie in das Mittelspannungsnetz vor. Die Konditionen des eigentlichen Energiebezugs regelte ein separater Stromliefervertrag, der auch den Erwerb von RECS-Zertifikaten (Renewable Energy Certificate System) vorsah. Diese sog. „Grünstrom-Zertifikate“ stellten die Versorgung der Versuchsanlage mit umweltfreundlich erzeugtem Strom sicher.

Nach Vorlage der behördlichen Genehmigungen und Erfüllung der erteilten Auflagen (u. a. Nachweise über Kampfmittelfreiheit, Einhaltung der TA Lärm und Standsicherheit des Fahrleitungssystems) wurde ab März 2011 die Versuchsanlage errichtet. Dazu gehörte ein ca. 1,5 km langes Fahrleitungssystem, welches aus einem Container-Unterwerk mit einer Traktionsspannung von 670 V DC versorgt wurde. Die folgenden Abbildungen auf S. 20 zeigen:

- die Aufstellung des bereits voll ausgerüsteten Container-Unterwerks (s. Abbildung 2-14)
- die Arbeiten zur Verlegung des 10-kV-Drehstrom-Kabels (s. Abbildung 2-15)
- das Aufstellen der Fahrleitungsmaste (s. Abbildung 2-16)
- die Montage der Ausleger an den Fahrleitungsmasten (s. Abbildung 2-17)

Abbildung 2-14 Aufstellung des Unterwerks



Abbildung 2-15 Arbeiten am 10-kV-Kabel



Abbildung 2-16 Aufstellen der FL-Maste



Abbildung 2-17 Auslegermontage für die FL



Im Anschluss an die Errichtung der Teststrecke und die Umrüstung der LKW erfolgte die Durchführung des Testprogramms sowie die Auswertung der dadurch gewonnenen Informationen und Erkenntnisse, s. Abschnitte 3.2.2 - 3.2.4 mit den entsprechenden Unterkapiteln.

Zusammenfassend standen in dieser Themensäule folgende Arbeiten im Fokus:

- Ausrüstung von zwei Serien-Lastkraftwagen mit serieller Hybridantriebstechnik und Energiespeichern sowie Ertüchtigung des Antriebsstrangs für die Speisung mit elektrischer Energie über eine installierte Anlage zur kontinuierlichen Energieversorgung (Fahrleitung).
- Errichtung einer Anlage für die kontinuierliche Energieversorgung elektrischer Fahrzeuge, die die elektrische Energie umwandelt und zu den Fahrzeugen überträgt. Die kontinuierliche Energieversorgung ermöglicht dabei die Rückspeisung elektrischer Energie von bremsenden Fahrzeugen ins Energieversorgungsnetz, sodass gerade beschleunigende Fahrzeuge nicht nur durch das Unterwerk sondern auch durch die rückspeisenden Fahrzeuge versorgt werden, wodurch der Energiebedarf insgesamt erheblich sinkt.
- Ausrüstung der beiden Serien-Lastkraftwagen mit Stromabnehmern zur Übertragung der elektrischen Energie von der Energieversorgungsanlage ins Fahrzeug. Diese Abnehmer verfügen über geeignete Sensoren und Aktoren, sodass einerseits die elektrische Energieversorgung der Fahrzeuge sicher und zuverlässig erfolgt und andererseits der Fahrer nicht in seinen Fahrmanövern und in der Verkehrsbeobachtung eingeschränkt wird.
- Neben den Untersuchungen auf der Versuchsanlage erfolgten auch Fahrversuche und Dauerfahrten mit den umgerüsteten Versuchs-LKW auf öffentlichen Fernstraßen. Dieser Teil der Feldversuche dient einerseits Funktionsnachweisen der eingesetzten Hybrid-Fahrzeuge und andererseits der Gewinnung praktischer Fahr- und Betriebsdaten in realer Verkehrsumgebung.

### 2.3.1.3 Ökonomische und Ökologische Bewertung

Neben den technisch-konzeptionellen Studien und den Arbeiten und Auslegungsdokumenten zur Planung und Errichtung der Versuchsanlage kommt der ökologischen und ökonomischen Bewertung des Systems erhebliche Bedeutung zu. Die ökologische Dimension ergibt sich schon aus der Motivation und Zielstellung des Vorhabens, dass durch die zu entwickelnde Elektrifizierungstechnologie ein signifikanter Beitrag zur Senkung der durch den Straßengüterverkehr erzeugten CO<sub>2</sub>-Emissionen geleistet werden soll. Die ökonomische Dimension ergibt sich zwangsläufig aus dem Umstand, dass das System nur dann Akzeptanz findet, wenn es sich für die Nutzer wirtschaftlich rentiert und gleichzeitig für Errichtung und Betrieb der Infrastruktur ein tragfähiges Finanzierungskonzept entwickelt werden kann.

In [23] werden Einsatzgebiete der beschriebenen Elektrifizierungstechnologie kategorisiert und grundsätzliche Aussagen zur Ableitung eines Bewertungsverfahrens getroffen. Schwerpunkt der im Rahmen des Forschungsprojekts ENUBA durchgeführten Untersuchungen ist die ökonomische und ökologische Bewertung der Elektrifizierung eines größeren Netzes für den Straßengüterfernverkehr.

Die Bewertung basiert grundsätzlich auf dem Vergleich eines „Most-Likely-Szenarios“ mit einem Basiszenario („optimierter Ohne-Fall“). Die wichtigsten Ergebnisse der Bewertung werden in Abschnitt 3.3 vorgestellt. Dabei konzentriert sich die Bewertung auf drei wesentliche Stakeholdergruppen:

- Öffentliche Hand: Beauftragung der zu errichtenden Infrastruktur über eine öffentliche Betreibergesellschaft und Sicherstellung des ordnungspolitischen Rahmens.
- Spediteure/Frachtführer: Anschaffung dieselektrischer Hybridnutzfahrzeuge vom OEM und Nutzung der elektrischen Infrastruktur.
- Technologieunternehmen: Entwicklung und Bereitstellung der Hybridfahrzeuge (z. B. OEM, Sonderfahrzeugbau) und der elektrischen Anlagen (z. B. Unterwerke, Fahrleitungssystem).

### 2.3.2 Zeitlicher Ablauf und Rahmenterminplan

Das Forschungsprojekt ENUBA wurde nach dem gültigen Prozess für Forschungs- und Entwicklungsprojekte bearbeitet. Für das Projekt wurden sieben Meilensteine definiert:

- Abschluss Lastenheftphase
- Abschluss Pflichtenheftphase
- Abschluss Designphase
- Abschluss Fertigungsphase
- Abschluss Testphase
- Lieferfreigabe zur Teststrecke
- Projektabschluss

Vor dem Hintergrund des engen Terminplans und der zügigen Bestellung von Produkten und Komponenten mit langen Lieferzeiten hat sich die Startphase des Projektes zunächst auf die Tätigkeiten für die Erprobung und Pilotierung auf der Teststrecke konzentriert. Mit den Untersuchungen, Studien und Analysen hinsichtlich der Gesamtkonzeption zur zukünftigen Implementierung im öffentlichen Raum wurde nachgelagert begonnen.

- Die Arbeiten des Forschungsprojektes ENUBA konnten im Wesentlichen entsprechend der im Terminplan des Projektantrags dargestellten Abfolge durchgeführt werden. Die Gesamtprojektlaufzeit von 16 Monaten (Juni 2010 bis September 2011) wurde eingehalten.

### 2.3.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für einen Teil der Forschungs- und Entwicklungsleistungen sowie bei den Bauleistungen wurde mit externen Partnern zusammengearbeitet. Dies waren schwerpunktmäßig:

#### **a) Firma Paul Nutzfahrzeuge GmbH in Passau**

Diese Firma war für den Ankauf der beiden Nutzfahrzeuge sowie für alle Umbau- und Umrüstungsarbeiten zuständig. Darunter fiel die Integration des dieselektrischen Hybridantriebssystems inkl. der Hilfsbetriebeeinrichtungen sowie die Montage und funktionale Integration des Stromabnehmers.

#### **b) Technische Universität Dresden (TUD)**

Für die videobasierte Überwachung des Schleifleistenprofils wurde durch die Professur Elektrische Bahnen der TU Dresden ein Softwaretool für die Speicherung, Übertragung und Wiedergabe der Bild- und Kamerasequenzen entwickelt und auf der Versuchsanlage erfolgreich getestet. Desweiteren wurden durch die Fakultät Verkehrswissenschaften der TU Dresden vergleichende Schallmessungen mit einem Mikrofonarray an den ENUBA-Versuchs-Lkw sowie an einem konventionellen Lkw der gleichen Baureihe ausgeführt.

#### **c) SPL Powerlines GmbH und FEAG Dormagen GmbH**

Die Firma SPL Powerlines GmbH hat das Fahrleitungssystem errichtet und montiert. Dies umfasste alle notwendigen Arbeiten beginnend mit den Gründungen der Fahrleitungsmaste bis zur Einmessung der Fahrtdrahtlage zur Vorbereitung der Abnahme des Fahrleitungssystems. Die FEAG Dormagen GmbH war verantwortlich für die Konzeption und Gestaltung des Unterwerkscontainers sowie für die Montage und elektrische Installation des gesamten Stromversorgungssystems in dem Container.

#### **d) Elektroinstallation Rainer Thomas GmbH**

Eine lokal ansässige Firma wurde als Fachbetrieb für Nieder- und Mittelspannungsinstallation und wegen der Ortskenntnis auf ehemaligen Militärgelände mit der Ausführung sämtlicher Kabelarbeiten im Mittelspannungs- und Niederspannungsbereich beauftragt (d. h. Verlege-, Verbindungs-, und Anschlussarbeiten). Darüber hinaus wurden alle weiteren erforderlichen Elektroinstallationsarbeiten im und am Unterwerkscontainer durch die Rainer Thomas GmbH ausgeführt.

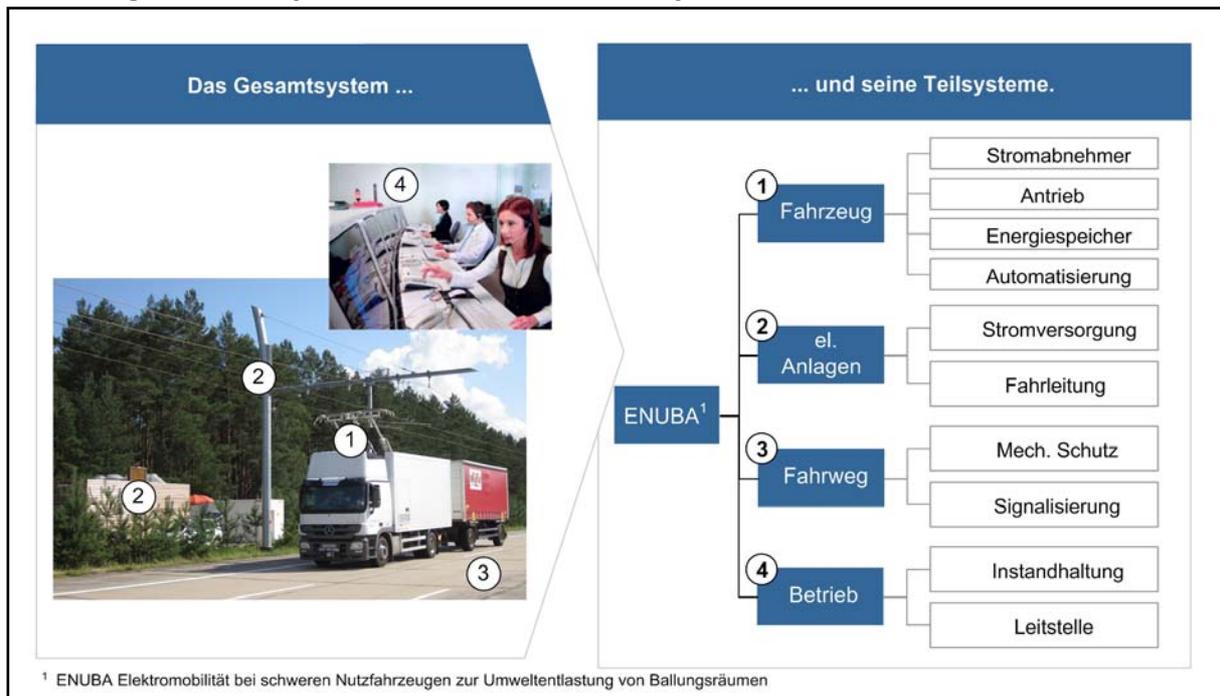
## 3 Ergebnisse des Fördervorhabens

### 3.1 Technisches Konzept und Studien zum Gesamtsystem

#### 3.1.1 Überblick über das Gesamtsystem

Auch der elektrifizierte Straßengüterverkehr besteht wie jedes elektrische Verkehrssystem aus den vier Teilsystemen (1) elektrisches Fahrzeug, (2) Energieversorgung, (3) Fahrweg und (4) Betrieb/Leitstelle. Anhand der Versuchsanlage verdeutlicht Abbildung 3-1 diese Zuordnung.

**Abbildung 3-1 Das System ENUBA und seine Teilsysteme**



Bei der Neuentwicklung komplexer technischer Systeme sind neben der Auslegung und Erprobung der Teilsysteme und ihres Zusammenwirkens zwei Fragen von zentraler Bedeutung, die insbesondere bei neuen Verkehrssystemen im öffentlichen Raum Beachtung verdienen:

- Ist das neue System überhaupt zulässig, womit insbesondere die Einordnung in bestehende Rechtsnormen, tangierte Rechtsgebiete sowie die Möglichkeiten der Zulassung gemeint sind?
- Wurden die Wechselwirkungen des neuen Systems mit seiner Umgebung (z. B. Personen, Güter, Sachwerte, Umwelt) für den Normalbetrieb und in Ausnahmesituationen untersucht?

Gegenstand des Gutachtens [24] des Instituts für Klimaschutz, Energie und Mobilität (IKEM) waren die rechtlichen Aspekte der Elektrifizierung einer Erprobungsstrecke oder längerer Abschnitte öffentlicher Fernstraßen. Wesentliche Erkenntnisse sind u. a., dass die Oberleitung und die Unterwerke Zubehör bzw. Nebenanlagen der Fernstraßen wären, wobei offen blieb, ob deren bisherige Widmung für den ergänzt werden muss. Unstrittig war die Charakterisierung von Errichtung und Betrieb einer Oberleitung als erhebliche Änderung einer Fernstraße, sodass zumindest für längere Strecken Planfeststellungsverfahren unter Einbeziehung aller Betroffenen durchgeführt werden müssen.

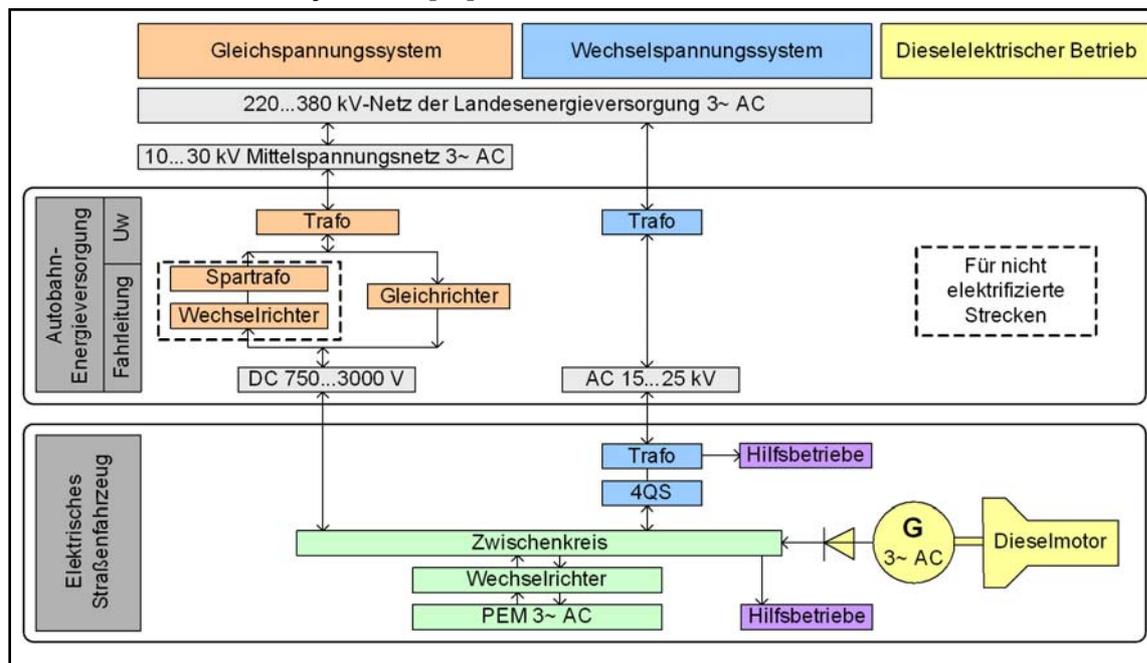
Der Frage nach den Wechselwirkungen des Zielsystems mit dem Schwerpunkt Fehlerszenarien und -auswirkungen wurde in zwei Expertenworkshops nachgegangen. Genutzt wurde die Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse (FMEA) in der Schadensausmaß, -häufigkeit und -entdeckbarkeit zahlreicher Fehlerfälle eingeschätzt und Maßnahmen zur Minderung der Einzelrisiken auf ein akzeptables Maß abgeleitet werden. Diese Maßnahmen wurden nach Möglichkeit noch im laufenden Projekt umgesetzt oder werden ggf. in Nachfolgeprojekten berücksichtigt [25].

### 3.1.2 Beschreibung des Zielsystems Elektrifizierter Straßengüterverkehr

#### 3.1.2.1 Elektrische Energieversorgung

Wenn man ausgehend von Abbildung 3-1 (S. 23) das Gesamtsystem in seine Teilsysteme und weiter in die Hauptkomponenten untergliedert wird schnell deutlich, dass das System durch vielfältige Schnittstellen gekennzeichnet ist, an denen mechanische Kräfte, elektrische Ströme und Daten übertragen werden. Folglich müssen bei der Planung eines Teilsystems seine Wechselwirkungen mit den benachbarten Teilsystemen beachtet werden. Bei den elektrischen Komponenten bestehen große Abhängigkeiten zwischen den Unterwerken und der elektrischen Antriebstechnik der Fahrzeuge. Abbildung 3-2 zeigt die Hauptkomponenten beider Teilsysteme bei Versorgung der Fahrzeuge mit Gleich- oder Wechselstrom und im dieselektrischen Betrieb.

**Abbildung 3-2 Hauptkomponenten der Unterwerke und Fahrzeuge bei unterschiedlichen Stromsystemen [26]**



Bei Wechselspannungssystemen mit Landesfrequenz findet in den Unterwerken nur eine Energiewandlung statt und durch die höhere Fahrleitungsspannung werden deutlich weniger Unterwerke benötigt. Demgegenüber sind die Fahrzeuge komplizierter aufgebaut und es kommen nur Hochspannungssysteme ab 15 kV in Frage. Bei den Systemen mit Gleichspannungen ist es umgekehrt – in den Unterwerken finden mehr Energiewandlungen statt und durch die niedrigere Spannung werden deutlich mehr Unterwerke benötigt. Andererseits vereinfacht sich der Aufbau der Fahrzeuge. Diese Betrachtungen zeigen, dass allein aus einem Vergleich der benötigten Hauptkomponenten kein Vorzugssystem abgeleitet werden kann. Nächster Schritt des Systemvergleichs war daher eine vergleichende Systemauslegung und Netzberechnung, um die Eignung der Systeme zur Elektrifizierung längerer Strecken bewerten zu können. Simulationsergebnisse sind umso belastbarer, je realitätsnäher die Randbedingungen und Annahmen gewählt werden. Daher fand der Systemvergleich anhand zweier 100 km langer Fernstraßenabschnitte im Flachland und im Mittelgebirge statt.

Unbeschadet der in Abschnitt 3.3 dokumentierten ökonomischen und ökologischen Gesamtbewertung muss für jede zu untersuchende Strecke als erstes die Elektrifizierungswürdigkeit geprüft werden. Diese ist bei elektrischen Eisenbahnen bei einer jährlichen Streckenbelastung (einschl. Leergewicht) von ca. 10 Mio. t je Richtung gegeben [18]. Setzt man diesen Referenzwert für LKW an und legt diesen auf einen richtungsbezogenen Stundenmittelwert um, so begründen bereits ca. 50 – 100 LKW je Stunde und Richtung eine Elektrifizierung. Ein Vergleich mit real gemessenen Verkehrsaufkommen zeigt, dass auf stark belasteten Fernstraßen des Bundes regelmäßig 200 – 400 LKW je Stunde und Richtung verkehren mit noch darüber hinaus gehenden Spitzenwerten an einzelnen Messstellen [28].

Um einerseits einem zunächst geringeren Anteil der elektrischen LKW und andererseits der für die Zukunft prognostizierten starken Zunahme beim Schwerlastverkehr gerecht zu werden, wurden die Rechnungen für eine Fahrzeugfolge von 30 s (120 LKW je Stunde und Richtung) sowie von 5 s (720 LKW je Stunde und Richtung) durchgeführt. Auslegungskriterium war zunächst, dass auch bei Ausfall eines Unterwerks die anderen Unterwerke und die Fahrleitungen nicht überlastet und die Grenzwerte der Fahrleitungsspannung an den Fahrzeugen nicht unterschritten werden. Dieses Kriterium ist typisch für Bahnsysteme, bei denen sehr hohe Anforderungen an die Energieversorgung gestellt werden, da sie die einzige Quelle für Traktionsenergie darstellt. Beim Betrieb dieselektrischer Hybridfahrzeuge an einer Fahrleitung muss dieses Kriterium für die Aufrechterhaltung des vollen Betriebs auch bei Ausfall eines Unterwerks nicht zwingend beachtet werden, da die Fahrzeuge weiterhin mit dem Dieselmotor über eine unabhängige Energiequelle verfügen [29].

**Tabelle 3-1 Anzahl Unterwerke für verschiedene Fahrzeugfolgen und Stromsysteme [29]**

Stromsystem	Variante	Flachland		Mittelgebirge	
		30 s*	5 s**	30 s*	5 s**
1,5 kV DC	mit Uw-Ausfall	27	51	27	51
	optimiert	7	20	7	20
3 kV DC	mit Uw-Ausfall	15	26	15	26
	optimiert	4	10	4	10
25 kV AC 50 Hz	mit Uw-Ausfall	3	4	3	4
	optimiert	2	3	2	3

\* entspricht 120 LKW je Stunde und Richtung; \*\* entspricht 720 LKW je Stunde und Richtung

Anders als aus dem Vergleich mit Bahnsystemen heraus zu erwarten war, wirken sich die stark unterschiedlichen Streckenprofile zwischen Flachland und Mittelgebirge kaum auf die Dimensionierung der Komponenten der Energieversorgung aus. Dies liegt vor allem daran, dass die Fahrzeuge auf beiden Strecken nahe ihrer Leistungsgrenze gefordert werden, die im Flachland erst bei der Systemgeschwindigkeit von ca. 80 km/h, im Mittelgebirge aber schon bei etwas niedrigeren Geschwindigkeiten erreicht wird. Dies erklärt auch die gleichen Unterwerksanzahlen in den Varianten, die sogar gleich dimensioniert werden konnten und nur im Flachland etwas weniger ausgelastet wurden [29].

Tabelle 3-1 zeigt erwartungsgemäß die geringste Anzahl benötigter Unterwerke beim Wechselstromsystem mit 25 kV Nennspannung und Landesfrequenz. Bei den beiden Gleichstromsystemen bedeutet die Verdopplung der Nennspannung eine Halbierung der Anzahl benötigter Unterwerke [30]. Ebenso deutlich ist der Einfluss des Verzichts auf die volle Systemverfügbarkeit bei dem erfahrungsgemäß seltenen Ereignisses eines kompletten Unterwerksausfalls. So werden bei 1,5 kV Nennspannung und 5-s-Takt anstatt 51 Unterwerke (alle 2 km) nur 20 Unterwerke benötigt (alle 5 km). Auch wenn der Vergleich der Spannungsebenen Ableitungen hinsichtlich der Aufwendungen für die Infrastruktur zulässt, können daraus allein keine Aussagen zu einer für das Gesamtsystem optimalen Spannungsebene abgeleitet werden. Dazu müssen mindestens folgende weitere Aspekte berücksichtigt werden:

- Wirkungsgrad des Gesamtsystems
- Auswirkung auf die Fahrzeugauslegung einschließlich Integration der Komponenten
- Schutztechnik, normatives Umfeld und Integration in den öffentlichen Straßenraum

Wie auch bei anderen elektrischen Verkehrssystemen hängt der Wirkungsgrad des Gesamtsystems vor allem von der Primärenergieerzeugung ab [10]. Vergleicht man die Systeme untereinander, so sind die Umwandlungsverluste in den Komponenten mit Leistungsumsatz in den Unterwerken und Fahrzeugen sowie die Übertragungsverluste im Fahrleitungssystem maßgeblich. Die Energieflüsse wurden dazu zunächst qualitativ analysiert und simuliert [26] und soweit messtechnisch erfassbar während der Testphase ausgewertet. Bei optimaler Systemauslegung unterscheiden sich die Gleichstromsysteme nur geringfügig hinsichtlich der Übertragungsverluste im Fahrleitungssystem mit leichten Vorteilen beim 3-kV-DC-System. Deutliche Effizienzvorteile auf dem Weg bis zum Fahrzeug weist das Wechselstromsystem auf. Bei diesem System sind jedoch die Fahrzeuge durch die mehrfache Energieumwandlung um ca. 5 % ineffizienter (s. [26], [30]).

Auch unter Aspekten der Fahrzeugumbauten und Integration der Antriebskomponenten ist das Wechselspannungssystem mit 25 kV Nennspannung nicht als Vorzugslösung anzusehen. Die VersuchslKW zeigten bereits den erheblichen Platzbedarf der zusätzlichen Komponenten (s. Abschnitt 3.2.1.4), die in einer späteren Serienanwendung möglichst platzsparend unterflur bzw. auf dem Dach zu integrieren wären (s. Abschnitt 3.1.2.4). Der zusätzliche Raumbedarf einschl. Gewichtszunahme für eine Hochspannungsdachrüstung inkl. Hauptschalter, einen Traktionstransformator und den erforderlichen Vierquadrantensteller würde die Integrationsaufgabe erheblich erschweren.

Nicht zu vernachlässigen sind in diesem Kontext auch schutztechnische Erwägungen. Elektrische Systeme bis 1 000 V Wechselspannung bzw. 1 500 V Gleichspannung gelten als Niederspannungssysteme, alle darüberliegenden Spannungen bedeuten Hochspannungssysteme. Während zumindest aus dem städtischen Umfeld Gleichstromsysteme im Niederspannungsbereich bei Straßenbahnen und Obussen häufig in den öffentlichen Straßenraum integriert werden, ist dies bei Wechselstrombahnen im Hochspannungsbereich nur ausnahmsweise anzutreffen. Für Hochspannungssysteme ist folglich sowohl mit Akzeptanzproblemen seitens der Verkehrsteilnehmer als auch mit aufwändigeren Zulassungsprozeduren zu rechnen. In der Zusammenschau der system-, schutz- und fahrzeugtechnischen Aspekte wird für nähere Untersuchungen und Vorbereitungen einer Serienanwendung die Gleichstromversorgung der Fahrzeuge mit 750 V oder 1 500 V DC empfohlen.

Die Unterwerke selbst können je nach Standort und Spannungsebene ausgelegt und an bestehende Energieversorgungsnetze angeschlossen werden. Die modulare, kompakte Bauweise der Unterwerkskomponenten erlaubt deren Unterbringung in funktionalen Gebäuden, wie z. B. in Betonfertiggbauten oder in Containern. Sie sind in ihrer Bauform, Anbindung und Gestaltung nicht fest gebunden und leicht an die städtische oder ländliche Umgebung anzupassen. Man kann sie in Waldgebieten, wie auch auf der Versuchsanlage gezeigt, mit Holz beplanken oder in städtischen Bereichen dem Stadtbild anpassen.

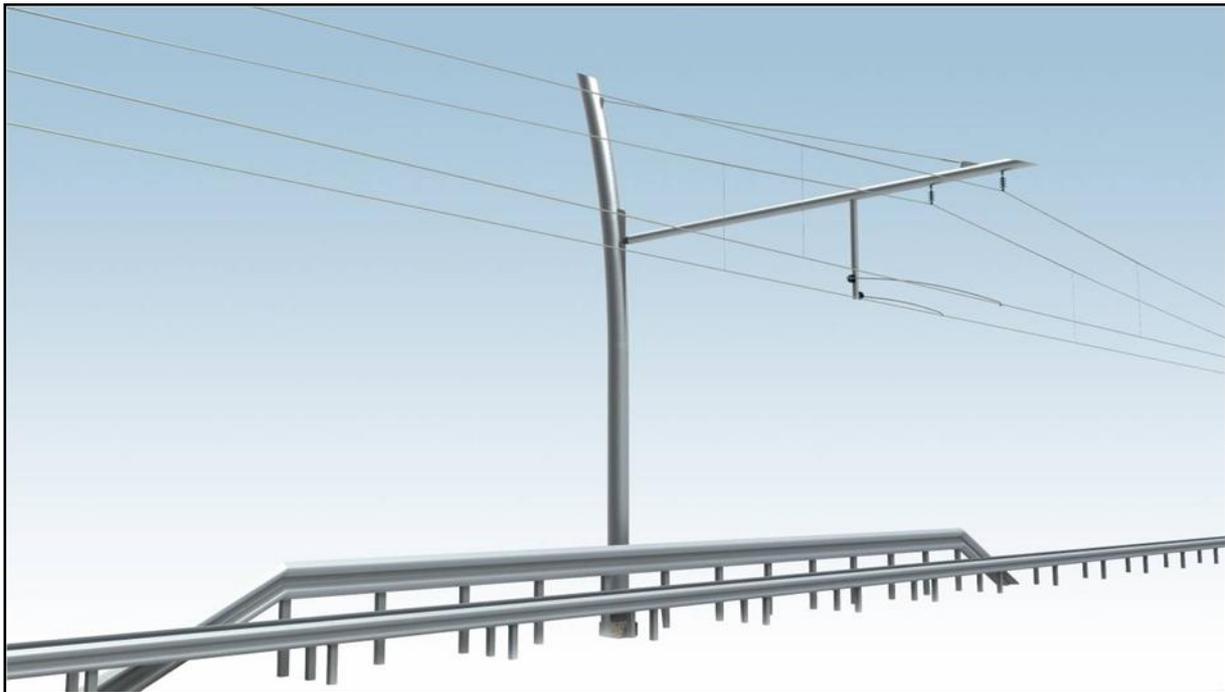
### 3.1.2.2 Fahrleitung

Ausgehend von der elektrischen Netzberechnung für die Energieversorgung des Schwerlastverkehrs auf Basis der in Abschnitt 3.1.2.1 dokumentierten Verkehrsaufkommen und realen Streckendaten wurde im nächsten Schritt ein Standardkonzept für die zugehörigen Fahrleitungen erarbeitet [31]. Demnach empfiehlt sich für die Elektrifizierung von Fernstraßen für LKW mit selbstständig nachregulierenden Stromabnehmern eine Oberleitung bestehend aus:

- zwei Kettenwerken mit je 1-2 Tragseilen und einem Fahrdraht
- Einsatz von Tragseilen 100 – 150 mm<sup>2</sup> im Bündel mit 10 - 25 kN nachgespannt
- Einsatz von Fahrdrähten 100 – 150 mm<sup>2</sup> mit 15 – 25 kN nachgespannt
- ggf. Einsatz von Verstärkungsleitungen

Durch den Einsatz von Kupfer-Tragseilen und Leitern mit 150 mm<sup>2</sup> Querschnitt kann ggf. auf Verstärkungsleitungen verzichtet werden. Die Kettenwerke beider Phasen werden in einem Abstand von ca. 1,0 - 1,5 m zueinander verlegt. Für die Verstärkungsleitungen gilt ein Abstand zwischen beiden Phasen von ca. 1,5 m. Dabei ist ein maximaler Durchhang von ca. 2 m zu berücksichtigen und auf die Lage der Leitungen über fremdem Grund und kreuzenden Oberleitungsseilen zu achten. Für 1,5-kV-Anlagen wird unter Einhaltung der Mindestfahrdrathöhe von 4,55 m eine Nennfahrdrathöhe von 5,30 m über der Fahrbahn benötigt. Ausschlaggebende Größe sind dabei die Eislasten der Seile und Drähte. Für eine Reduzierung der Nennfahrdrathöhe wird im Nachfolgeprojekt der Einsatz von Enteisungsanlagen geprüft. Unter Brücken, Verkehrsleitschildern und kreuzenden Freileitungen kann die Fahrdrathöhe unter Einhaltung gewisser Randbedingungen auf ca. 4,50 m reduziert werden [31].

Im Rahmen der Detailplanung des Fahrleitungssystems wurden für die Maste unterschiedliche Designs entwickelt. Unter Berücksichtigung technischer und ästhetischer Gesichtspunkte wurde als Vorzugslösung das in Abbildung 3-3 gezeigte Design ausgewählt und auch auf der Versuchsanlage umgesetzt. Detailstudien und die anderen Varianten sind [31] zu entnehmen.

**Abbildung 3-3 Oberleitungsstützpunkt mit passiver Schutzeinrichtung**

Der Übergang von einer auf die nächste Nachspannlänge kann zur Reduzierung der Einschränkung des Arbeitsbereiches des Stromabnehmers mit versetzten Überlappungen der beiden Phasenkettenwerke ausgeführt werden. Dadurch muss der Stromabnehmer jeweils nur eine Parallelführung zweier Fahrdrähte mit einem Abstand von 100 mm nachregulieren. Die Oberleitung ist so ausgelegt, dass die zulässige Seitenlageveränderung durch Wind und Kurven nicht überschritten wird [31].

Mit der Errichtung von Oberleitungsmasten längs einer Fernstraße wird auch die Installation eines durchgängigen Fahrzeug-Rückhaltesystems notwendig. Bei einer Einordnung des Oberleitungsmastes in die Gefährdungsstufe 1 als einsturzgefährdetes Bauwerk und einer Wirkbereichsklasse W4 kommt als Anprallschutz die z. B. Superrail Plus BW in Frage, s. auch Abbildung 3-3. Für den Personenschutz auf öffentlich zugänglichen Brücken müssen oberhalb der Oberleitung an den Brücken zusätzliche Hindernisse angebracht werden. Für die Feuerwehr, Rettungsfahrzeuge und Rettungshubschrauber stellt die Oberleitungsanlage eine neue Gefahrenquelle dar und muss in deren Einsatzkonzepten neu berücksichtigt werden. Auf die verkehrstechnische Streckenausrüstung wird außerdem in den Abschnitten 3.1.2.5 und 3.2.1.5 eingegangen.

Während sich die zuvor dargestellten konstruktiven Eigenschaften auf Aussehen und Ausführung eines Standardsystems für die Elektrifizierung konzentrieren wurde in einer weiteren Studie auf die Instandhaltung des Systems eingegangen [33]. Dies ist einerseits wichtig, da die für die Instandhaltung nötigen technischen und personellen Ressourcen in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eingehen und folglich abgeschätzt werden mussten. Andererseits müssen bei stark belasteten Verkehrswegen die Kapazitätseinschränkungen durch Wartung, Inspektion und Reparatur weitestgehend minimiert und in die bisher üblichen Abläufe integriert werden. Daher werden in [33] Aussagen zu Art und Häufigkeit der notwendigen Tätigkeiten als auch zur erforderlichen Qualifikation des Personals sowie zu Anzahl und Ergänzungsausstattung der bestehenden Straßenmeistereien getroffen.

### 3.1.2.3 Stromabnehmer für den Betrieb an der Fahrleitung

Aufbauend auf der Anforderungsdefinition für den neu zu entwickelnden Stromabnehmer wurde in einem mehrstufigen Verfahren aus einer umfangreichen Variantenuntersuchung ein Vorzugskonzept abgeleitet. Dieses Konzept wurde als Kombination aus bahntechnisch etablierten Varianten und Komponenten entwickelt und mit umfangreichen Modifikationen, insbesondere zur Detektierung der Fahrleitung und aktiven Nachführung des Stromabnehmers, an die Belange des ENUBA-Systems angepasst [36].

Die Vielzahl an Kriterien und möglichen Ausprägungen bedeutet eine hohe Komplexität des Vorhabens, wobei die Entscheidung nicht nur einseitig hinsichtlich des besten Stromabnehmerkonzepts getroffen werden kann sondern auch immer die Wechselwirkungen mit dem Fahrleitungssystem zu beachten sind. Ziel ist die optimale Ausgestaltung der Schnittstelle unter spezifischen Randbedingungen, wie sie bereits mehrfach z. B. bei Obus-Stromabnehmer und -Fahrleitung oder Seitenstromabnehmer und Stromschiene gefunden wurde (s. Abschnitte 2.2.2 und 2.2.3).

Nach Bewertung und Wichtung wurde als Vorzugsvariante das Konzept „Invers Trolley“ abgeleitet, woraufhin sich Ausgestaltung und Labor- bzw. Praxiserprobung auf diesen Stromabnehmer-Typ konzentrierten. Das Konzept „Invers Trolley“ basiert auf dem Trolleybus-Stangenstromabnehmer (vgl. Abbildung 2-4 und Abbildung 2-8) mit folgenden, bereits in der ersten Projektphase implementierten, umfangreichen Modifikationen [34]:

- Ersatz der obustypischen Schleifschuhe durch bahntypische Wippen mit Schleifleisten
- Drehung (180°, Inversion) der Stangen-Arme des Obus-Stromabnehmers in der Längsachse der Fahrzeugs
- Kürzung der beiden Arme, u. a. mit dem Ergebnis eines substantiell gestiegenen Anstellwinkels gegenüber der horizontalen, um ein Auskragen vor das Fahrerhaus zu verhindern
- Ermöglichung der seitlichen Drehung der gekoppelten Stromabnehmer-Arme durch einen Servomotor zum aktiven Ausgleich von Lenkbewegungen innerhalb der Fahrspur sowie der Unterschiede zwischen Fahrdrähtlage und Fahrzeugbewegung in Kurven
- Ergänzung eines Sensorik-Systems, um (a) das Vorhandensein einer Fahrleitung zu erkennen und um (b) kontinuierlich die vertikale und horizontale der Fahrleitung zu detektieren
- Entwicklung der zugehörigen Auswerte-, Steuerungs- und Bediensysteme

Bei den Tests am Labormuster wurde eine Reihe technischer Herausforderungen identifiziert [34]:

- Aufrechterhaltung einer konstanten bzw. nur im zulässigen Bereich schwankenden Andruckkraft des Stromabnehmers an die Fahrleitung unter Einwirkung von Windlastkollektiven die sowohl aus der Fahrbewegung als auch aus wechselnden meteorologischen Winden resultieren
- Konstanz der Andruckkraft des Stromabnehmers an die Fahrleitung unter Einwirkung von Trägheitsmomenten bei Beschleunigungs- und Brems-Vorgängen.
- Resonanzschwingungen bei und nach Änderung der seitlichen Positionierung

Die Ausgestaltung und Erprobung der Variante „Invers Trolley“ einschließlich der Lösungen für die dargestellten technischen Herausforderungen wird in 3.2.1.3 und 3.2.3.3 beschrieben.

### 3.1.2.4 LKW mit seriellem dieselektrischen Hybridantrieb

Wie in 2.2.4 beschrieben, wird ein serieller Hybridantrieb als beste Antriebsform für das Zielsystem angesehen. Abbildung 2-13 (S. 17) zeigt die zugehörigen Hauptkomponenten. Nachfolgend wird auf einzelne Baugruppen vertieft eingegangen.

#### **Anschluss des Stromabnehmers an den Zwischenkreis**

An den in Abbildung 2-13 (S. 17) rot eingezeichneten Zwischenkreis wurde der Stromabnehmer im Versuchsträger mittels einer sog. „Interfacebox“ angeschlossen. Diese Interfacebox stellt damit die Verbindung des Standard-ELFA-2-Antriebssystems [35] mit dem Stromabnehmer dar. Ausgestattet mit zwei Schützen kann sie die elektrische Verbindung zum Stromabnehmer herstellen und auch unter Last auftrennen. Desweiteren umfasst die Interfacebox Sicherungen und einen Spannungsmesser zur Erfassung der Spannung der Oberleitung, sobald der Stromabnehmer angebügelt ist.

#### **Schutzkonzept für das Fahrzeug**

Im Versuchsfahrzeug überwacht ein Isolationswächter den Isolationswiderstand zwischen Komponenten und Chassis. Die Schütze zur Trennung des Fahrzeugs von der Fahrleitung könnten durch Leistungsschnellschalter mit Kurzschlussabschaltvermögen ersetzt werden. Diese würden das System wartungsfreundlicher machen, allerdings mehr Bauraum beanspruchen.

## Generator

Der bisher eingesetzte Dieselmotor-Generator-Kombination ist relativ schwach. Von den max. 300 kW, die der Dieselmotor zur Verfügung stellt, kann der Generator nur 200 kW in elektrische Energie umsetzen. Bedingt durch diese nicht optimierte Übersetzung des Getriebes zwischen Motor und Generator wird der Dieselmotor in einen für ihn hohen Drehzahlbereich gezwungen (ca. 1600 Umdrehungen/min), was den Kompromiss bezüglich der Dieselmotorwirkungsgradcharakteristik darstellt. Dieser Betrieb in einem niedrigen Lastpunkt bei hoher Drehzahl führt dazu, dass der Dieselmotor suboptimal arbeitet. Dieser Betriebsmodus war allerdings den für die Versuchsfahrzeuge kurzfristig vorhandenen, für den Versuchsbetrieb jedoch ausreichend dimensionierten Komponenten geschuldet. In einer Weiterentwicklung ist der Generator leistungsstärker auszuführen. Das Getriebe muss ebenfalls an die Generator-Diesel-Kombination angepasst werden. Eine mögliche Lösung ist dabei ein permanenterregter Synchrongenerator, der direkt auf den Dieselmotor abgestimmt werden kann. Dadurch könnte das Getriebe entfallen und ca. 2% Getriebeverluste eingespart werden.

## Hilfsbetriebekonzept

Das bisherige Hilfsbetriebekonzept sieht vor, dass ein zusätzlicher Elektromotor bei Betrieb an der Oberleitung einen Riementrieb antreibt, der alle weiteren Hilfsbetriebe (z. B. Lenkhilfpumpe, Kompressor, Lichtmaschine) antreibt. Diese Dopplung der Hilfsbetriebe für beide Betriebsmodi ist für ein Seriensystem nicht sinnvoll. Es sollte lediglich ein Kompressor mit Elektroantrieb betrieben werden ebenso nur eine Lenkhilfpumpe. Der bisherige Kolbenkompressor ist aufgrund seiner Geräusentwicklung vorzugsweise durch einen Schraubenkompressor zu ersetzen. Diese Elektromotoren würden direkt durch einen eigenen Umrichter, der am Zwischenkreis angeschlossen ist, gespeist werden.

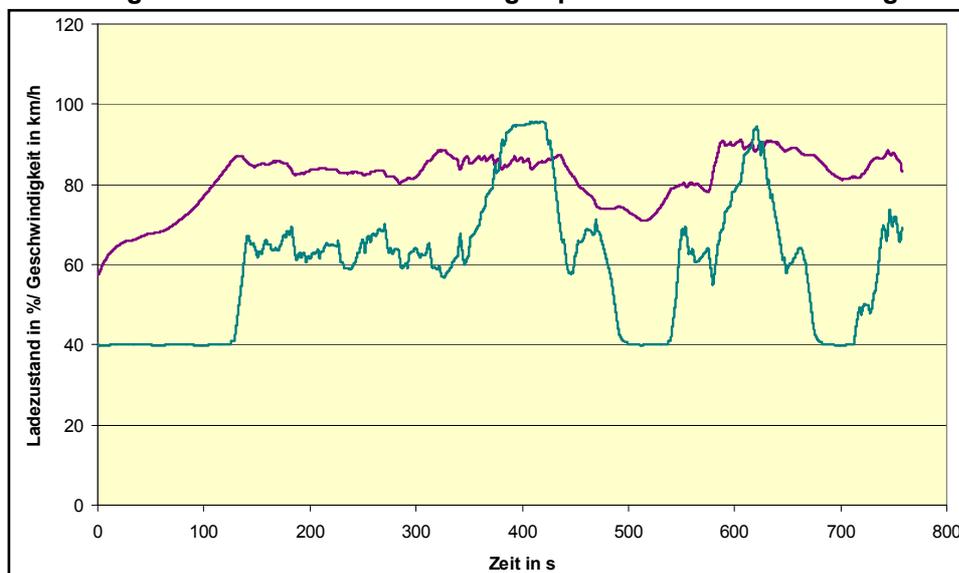
## Fahrmotor

Das Drehmoment des als Antriebsmotor verwendeten permanenterregten Synchronmaschine geht mit steigender Drehzahl stark zurück. Hinzu kommt noch die Begrenzung der zur Verfügung stehenden Leistung durch den Generator. Aus diesen Gründen wurde in der Testphase bei hohen Geschwindigkeiten Drehmomente gemessen, die relativ gering für einen 40-t-Zugverband sind. In einem Seriensystem ist daher die Leistung des Fahrmotors weiter zu erhöhen, um auch bei höheren Drehzahlen genug Drehmoment zur Verfügung zu haben. Darüber hinaus ist ein besser abgestimmter Generator einzusetzen.

## Energiespeicher

Die Verwendung eines Kondensatorspeichers bewährt sich auch im LKW-Betrieb. So konnte dieser selbst bei Testfahrten Bremsenergie speichern und wieder abgeben, s. Abbildung 3-4.

**Abbildung 3-4 Ladezustand des Energiespeichers und Geschwindigkeit**



Legende: lila => Fahrgeschwindigkeit in km/h; blau => Ladezustand Energiespeicher in %

Auch für das Überbrücken nicht elektrifizierter Abschnitte kann der Energiespeicher mit Kondensatoren die benötigte Energie zur Verfügung stellen. Bei einem Überholvorgang kann der Verbrennungsmotor schnell durch den angeflanschten Generator, der dann als leistungsstarker Anlasser arbeitet, auf Betriebsdrehzahl gebracht werden. Die dazu nötige Energie stellt der UltraCap zur Verfügung. Ebenso liefert der UltraCap Energie für eine Zusatzbeschleunigung beim Überholen.

### **Komponententräger und Fahrwerk**

Das Projekt ENUBA hatte zum Ziel, die generelle Machbarkeit einer externen Stromspeisung nachzuweisen. Daher wurde zunächst kein hoher Wert auf eine platzsparende Unterbringung der Komponenten gelegt. Im Zielsystem sollten die Komponenten dagegen so angebracht werden, dass keine oder nur sehr wenig Ladefläche/-volumen verlorengeht. Ebenso müssen Konzepte erarbeitet werden, wie die Komponenten in einem Sattelschlepper unterzubringen sind, da dieser Fahrzeugtyp hinsichtlich Integration die größte Herausforderung bedeutet. Hierfür bietet sich vor allem die unterflurige Anbringung am Fahrzeugrahmen an.

Da der Schwerpunkt des Fahrzeugs durch einen Stromabnehmer weiter nach oben rückt, wird das Fahrverhalten des LKW verändert. Die Verwendung von Blattfedern hat sich dabei im Versuchsfahrzeug als nachteilig herausgestellt. Bei einer Serienlösung sollte anstelle dessen eine Luftfederung gewählt werden, was auch dem heutigen Standard bei Groß-LKW entspricht.

#### **3.1.2.5 Streckenausrüstung und Kommunikation**

Aus der Integration eines neuen Verkehrssystems in ein bestehendes System ergeben sich zusätzliche Herausforderungen, die über das Miteinander-Funktionieren der Teilsysteme des neuen Systems hinausgehen. Ebenso ist bei dem vorgeschlagenen Elektrifizierungskonzept zu beachten, dass nicht nur die Hauptfunktionen des Systems hinsichtlich elektrischer Energieübertragung und -wandlung bzw. elektromechanischer Energiewandlung für den Antrieb der Fahrzeuge zu erfüllen sind. Ebenso muss von Anfang an bedacht werden, dass das Zielsystem durch zahlreiche, individuelle Nutzer nutzbar, durch Betreiber betreibbar und vor missbräuchlicher Nutzung und Beschädigung schützbar sein muss. Die sich aus beiden Aspekten ergebenden Anforderungen und Lösungen sind miteinander verknüpft und wurden im Rahmen des Projekts ENUBA mit folgenden Schwerpunkten untersucht:

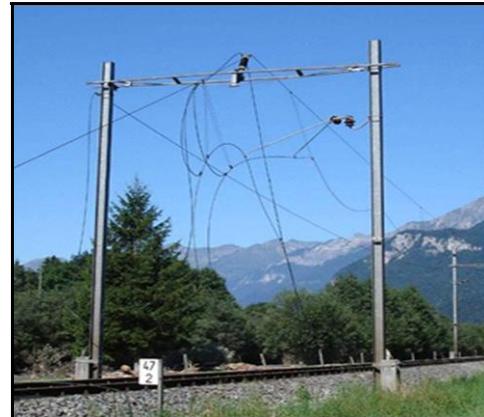
- Untersuchung der Informationsflüsse und -richtungen zwischen den Fahrzeugen, der Infrastruktur und dem Betreiber zur Ableitung geeigneter Kommunikationsstrukturen
- Analyse des Verkehrsablaufs, der sich aus dem Verkehrsträger ergebenden technischen Restriktionen sowie der bereits vorhandenen Leit- und Kommunikationseinrichtungen zur Ableitung einer Kommunikationssystemarchitektur sowie zur Präzisierung der Anforderungen an die Auslegung der Teilsysteme Stromversorgung und Fahrzeuge
- Definition der Anforderungen für Nutzung und Überwachung des neuen Systems einschließlich Ableitung (technischer) Maßnahmen zur Um- und Durchsetzung der Anforderungen
- Entwicklung eines Konzepts zur verbrauchsabhängigen Energiemessung und -abrechnung

Basis dieser auch als Telematik-Studien zusammenfassbaren Arbeitspakete war die detaillierte Analyse aller notwendigen Informationsübertragungen. Ausgehend davon wurden sowohl die Anforderungen an die zukünftige Kommunikation Fahrzeug – Infrastruktur unter Einbeziehung der bereits vorhandenen Technologien, z. B. der On-Board-Units (OBU), beschrieben, als auch der Vorschläge für eine Systemarchitektur erarbeitet. Diese umfasst verschiedene Aufgaben und Netzbereiche, z. B. die Betreiberzentrale zur Nutzerverwaltung und Energieabrechnung oder Leitstellen. Letztere werden neben ihrer aktuellen Aufgabe der Betriebsüberwachung und -führung zukünftig den elektrischen Betrieb mit leiten oder mit den Unterwerken und einer elektrischen Leitstelle verbunden sein.

Da Fahrleitungen nicht redundant ausführbar sind und ein Defekt dieses Teilsystems sofort zahlreiche Nutzer betrifft, ist der Schutz der Fahrleitung vor elektrischer Überlastung und vor mechanischer Beschädigung durch defekte Stromabnehmer von hoher Bedeutung (s. Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6). Die elektrische Überlastung wird im allgemeinen durch schnellwirkende Schutzabschaltungen mit zahlreichen Einstellparametern in den Unterwerken zuverlässig verhindert. Deutlich schwieriger ist bei der ggü. Bahnsystemen deutlich höheren Anzahl individueller Nutzer des Systems die Kontrolle des

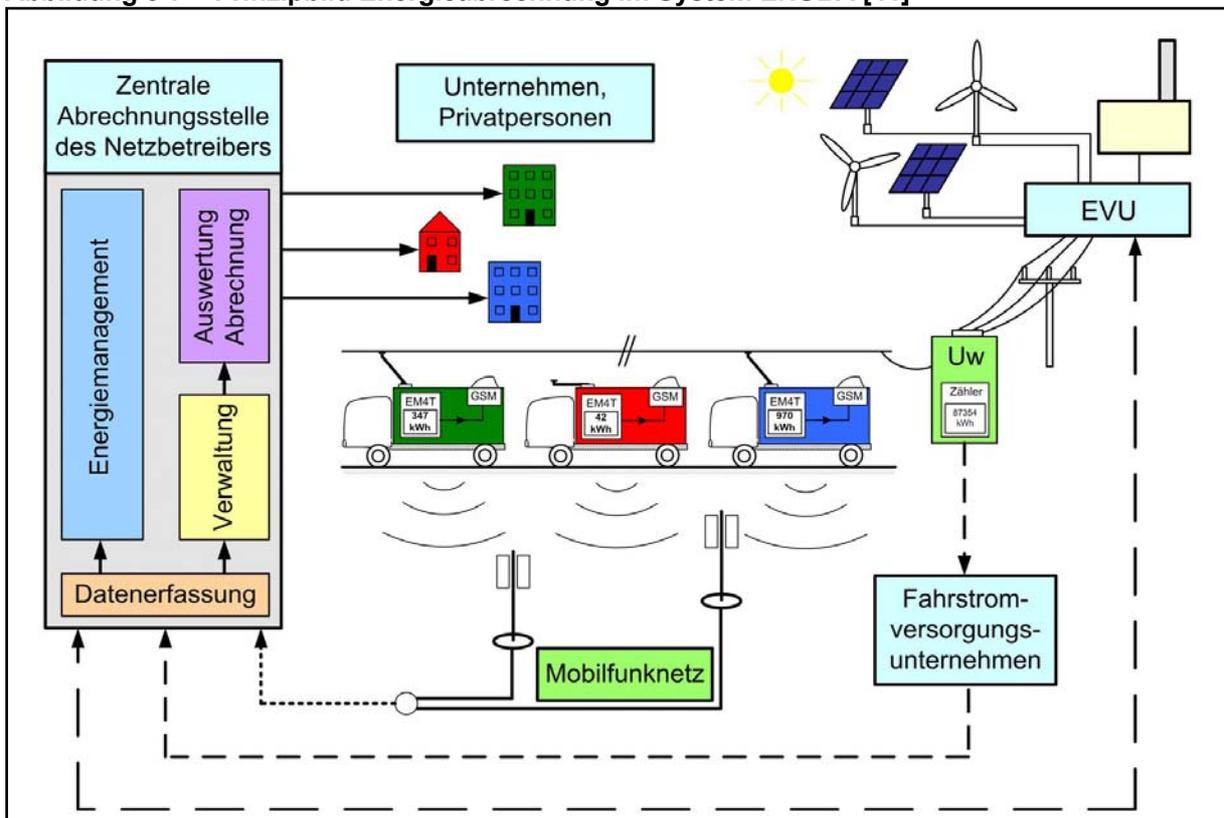
mechanischen Zustands der genutzten Stromabnehmer. Dazu wurden Möglichkeiten der Diagnose von Stromabnehmern vor und nach dem Anbügeln untersucht. Funktionsmuster dieser Diagnosesysteme wurden auf der Versuchsanlage installiert, s. Abschnitt 3.2.1.5.

**Abbildung 3-5 Defekter Stromabnehmer [40]**    **Abbildung 3-6 Fahrleitungsschaden [40]**



Mit der Trennung von Netz und Betrieb bei der Deutschen Bahn und der gleichzeitigen Öffnung des Systems für weitere Eisenbahnverkehrsunternehmen wurde ein System zur fahrzeug- und verbrauchsgenaue Messung und Abrechnung der elektrischen Triebfahrzeuge im deutschen Bahnnetz entwickelt. In [41] wird dieses Konzept aufgegriffen und die erforderlichen Anpassungen an einen elektrifizierten Straßengüterverkehr mit zahlreichen Einzel- aber auch Flottenkunden beschrieben. Abbildung 3-7 veranschaulicht das vorgeschlagene Prinzip.

**Abbildung 3-7 Prinzipbild Energieabrechnung im System ENUBA [41]**



## 3.2 Praktische Erprobung

### 3.2.1 Konzeption und Aufbau der Versuchsanlage Groß Dölln

#### 3.2.1.1 Stromversorgung und Netzanschluss

##### Aufbau des Unterwerks der Versuchsanlage

Das Gleichstromunterwerk (s. Abbildung 3-8) ist in zwei technische Funktionsräume aufgeteilt, einem Traforaum und einem Schaltanlagenraum. Im Traforaum befinden sich ein Gleichrichtertransformator, ein Eigenbedarfstransformator und eine Luftdrossel. Der Schaltanlagenraum hat eine Mittelspannungsanlage, einen Gleichrichter, einen Wechselrichter, eine Fahrdrabtüberwachungsanlage, eine Niederspannungsanlage und eine Eigenbedarfsanlage. Das Unterwerk sichert die Energieversorgung für die gesamte Teststrecke. Zusätzlich ist bei Bremsung der Fahrzeuge eine Energierückspeisung mit einem Wechselrichter realisiert. Den Schaltzustand der Anlage signalisieren Leuchten auf dem Unterwerksdach (s. Abbildung 3-9).

Das Gleichstromunterwerk wird über eine Kabelstrecke von Kuppelstation mit AC 10 kV Drehstrom gespeist. Diese AC-10-kV-Spannung wird im Unterwerk über einen Gleichrichtertransformator und anschließend über einen Diodengleichrichter auf DC 670 V gleichgerichtet. Zwei Kabel dienen als Einspeisung der Fahrleitung. Die Eigenbedarfsleistung des Unterwerks wird über einen Eigenbedarfs- transformator AC 10 kV / 400 V und eine Batterieanlage mit integriertem Gleichrichter bereitgestellt.

##### Gleichrichterschaltanlage und Wechselrichter

Die Gleichstromschaltanlage in kompakter Bauform (Typ Sitras® CSG) besteht aus einem Einspeise-Gleichrichter-Rückleiterfeld, einem Einspeise- und einem Rückspeiseschaltfeld. Der 12-Puls-Diodengleichrichter ist über einen Trennschalter mit den DC-seitigen Streckenabgangsfeldern und dem Rückleiterfeld über Kupferschienen verbunden. Das Streckenabgangs- und das Rückspeisefeld verfügen jeweils über einen Gleichstromschnellschalter. Das Streckenfeld ist für die Speisung der zweipoligen Fahrleitung zuständig. Das Rückspeisefeld ist über eine Luftspule mit dem Wechselrichter verbunden und führt diesem den bei Bremsung der Fahrzeuge entstehenden Rückspeisestrom zu.

Der Wechselrichter ist eingangsseitig über eine Luftspule an das DC-Rückspeisefeld und ausgangsseitig über einen AC-Leistungsschalter an die Sekundärseite des Gleichrichtertransformators angeschlossen. Der Wechselrichter ist für die Rückspeisung des aus der Bremsung der Fahrzeuge entstehenden Stromes in das 10-kV-Netz zuständig. Dieser Gleichstrom wird über eine B6-Schaltung in Drehstrom umgeformt und mit einem Spartransformator an die AC-Spannung angepasst, um anschließend über den Gleichrichtertrafo in das EVU-Netz zurückgespeist zu werden.

**Abbildung 3-8 Gesamtansicht Uw-Container mit Holzverkleidung**



**Abbildung 3-9 Signalleuchten und akust. Alarmgeber auf Uw-Dach**



### 3.2.1.2 Fahrleitung der Versuchsanlage

Mit Erteilung der Baufreigabe konnte die Fahrleitungsanlage errichtet, abgenommen und in Betrieb gesetzt werden. Auf der Versuchsanlage wurde für die Tests auf ca. 1,5 km eine Oberleitungsanlage errichtet. Der mit den Stromabnehmern beschleifbare Abschnitt erstreckt sich über 1,2 km und beinhaltet einen Überlappungsbereich zwischen zwei Nachspannlängen. In der Mitte der Anlage befindet sich das Unterwerk mit der Einspeisung der Oberleitung (s. Abbildung 3-11). Dort schützt je Phase ein Überspannungsableiter die Anlage und die Einspeisekabel vor Überspannungen.

Jedes Kettenwerk besteht aus einem nachgespannten Trageil und nachgespannten Fahrdrabt. Die Nachspannung der Leiter erfolgt über eine Gewichtsnachspanneinrichtung, bei der die Gewichtssätze im Innern der Abspannmaste geführt werden (s. Abbildung 3-10).

**Abbildung 3-10 Nachspanneinrichtung mit Gewichten im Mast**



**Abbildung 3-11 Einspeisemast mit zweipoliger Einspeisung**



Die beiden Kettenwerke werden über Trageinrichtungen über der Fahrspur gehalten. Die Trageinrichtungen bestehen aus:

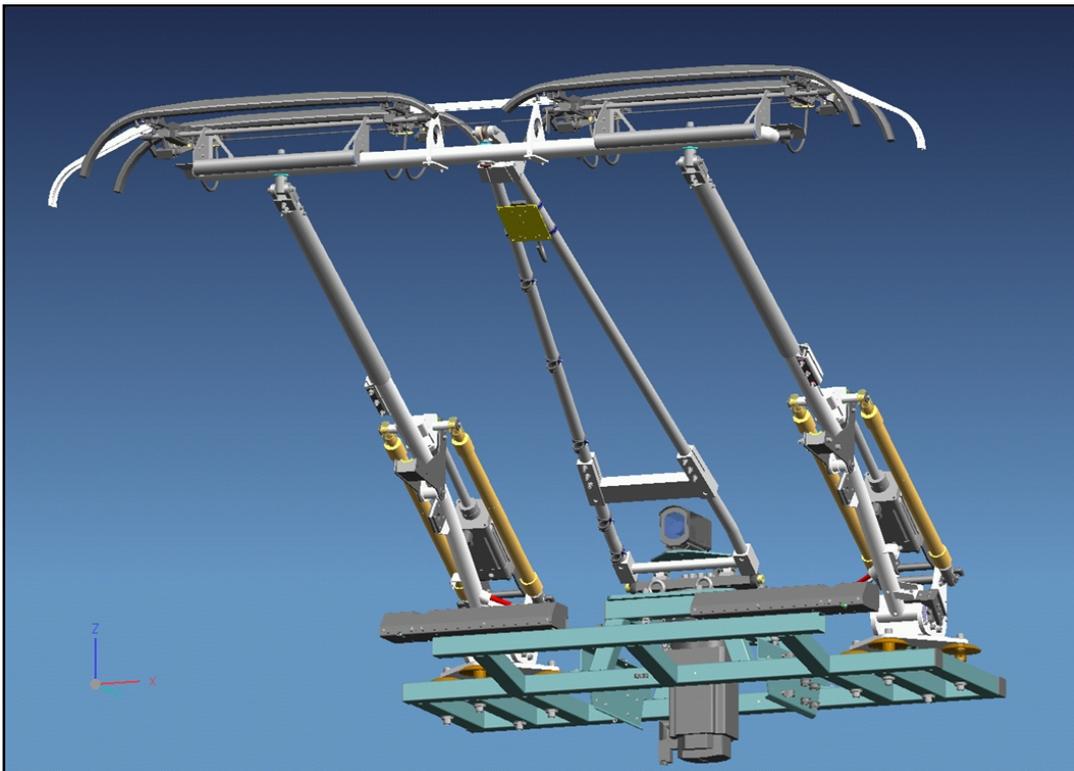
- Seitenhaltern für die Fixierung der Fahrdrähte
- höhenverstellbaren Hängesäulen zur Befestigung der Seitenhalter
- bis zu 10 m lange Querträger mit Ankerseilen zum Tragen der Kettenwerke
- über 30 Maste für die Befestigung der Querträger
- Rammrohrgründungen als Fundamente für die Maste
- Rückanker für die Verankerung der Abspannmaste

Die Rammrohrgründungen bestehen aus langen Stahlrohr mit einem Durchmesser von ca. 0,6 m. Die feuerverzinkten Rohr-Maste mit einem Durchmesser von ca. 0,4 m wurden 1,25 m tief in die Rammrohre gestellt und mit Mörtel vergossen. Zur Erhöhung der Erdfähigkeit der Maste sind zwischen Rammrohr und Mast Erdungsverbinder eingebaut. Vor Festlegung der Mastausführung erarbeitete ein Designerbüro verschiedene Vorschläge. Gemeinsam mit den Auftraggebern wurde das in Abbildung 3-11 gezeigte Mastdesign ausgewählt. Die Fahrdrähte beider Phasen sind in einer Höhe von 5,15 m über Fahrbahn ohne regelmäßige Seitenverschiebungen verlegt. Die Systemhöhe, der Abstand zwischen Trageilen und Fahrdrähten an den Stützpunkten, beträgt 1,70 m. Im Bereich der Parallelführung der Überlappung variieren die Anbauhöhen, um Kollisionen zwischen den Leitern zu umgehen. An einem Mast wurde zusätzlich eine Fahrdrahtanhubmessung installiert.

### 3.2.1.3 Stromabnehmer-Funktionsmuster für den Betrieb an der Fahrleitung

Auf Grundlage der in Abschnitt 3.1.2.3 beschriebenen Variantenuntersuchung mit anschließender Ableitung der Vorzugslösung „Invers Trolley“ für einen aktiv nachgeregelten Stromabnehmer wurde das Vorzugskonzept detailliert untersucht, verfeinert und schließlich konstruiert und erprobt. Umfangreiche Tests der sog. Labormuster wurden zunächst im Labor in einem Teststand durchgeführt, wobei bereits in dieser Phase entkoppelte, seitliche Bewegungen von Fahrzeug und Fahrleitung getestet wurden. Anschließend erfolgte die Fertigung und Vor-Montage der integrationsbereiten Stromabnehmer-Funktionsmuster als Gesamt-Baugruppe, die dann in dieser Form bei der Sondernutzfahrzeugebau-Firma Paul in Passau auf die Versuchs-LKW montiert und dann nach Groß Dölln überführt wurden. Die Umsetzung des Prinzips „Invers Trolley“ zeigt Abbildung 3-12.

**Abbildung 3-12 3-D-Modell des Stromabnehmers und seiner Baugruppen [34]**



Die wichtigsten Baugruppen des Stromabnehmers sind (Abbildung 3-12):

- Grundgestell mit Servomotor
- zwei Arme mit je einer Wippe mit jeweils zwei Schleifleisten
- Steuerschrank im Komponententräger (hier nicht dargestellt)
- Laserscanner an der Stoßstange (hier nicht dargestellt)

Das umgesetzte und in [34] beschriebene Konzept berücksichtigt auch Maßnahmen im Bereich der Sensorik, Aktorik und Mechanik, die zur Lösung der zu Beginn der Labortests festgestellten Probleme beitragen (s. Abschnitt 3.1.2.3), wie z. B.:

- Optimierung des Kräfteinleitungspunkts mit Hilfe des Teststandes
- Einsatz einer regelbaren Pneumatik zur Nachregelung der Andruckkraft

Wesentliche Bedeutung beim gewählten Stromabnehmerkonzept hat die Sensorik. Dabei ist zwischen den zwei folgenden Systemen zu unterscheiden:

- Die Nahbereichssensorik (NBS) ist in der Lage, im angebügelten Zustand an diskreten kritischen Punkten die Lage der Fahrleitungen eindimensional zu detektieren.
- Die Fernbereichssensorik (FBS) ist in der Lage, im an- oder abgebügelten Zustand die Lage der Fahrleitungen zweidimensional zu detektieren.

Für die Nahbereichssensorik wurden mehrere induktive Näherungssensoren direkt an der Schleifleiste eingesetzt, die verschiedene Arbeits- und Grenzlagen erkennen und melden können.

Für die Fernbereichssensorik empfehlen sich Lasersensoren /-scanner aufgrund der folgenden Eigenschaften für die Lösung der gestellten Aufgabe. Sie zeichnen sich aus durch [34]:

- Ein enges Frequenzspektrum, d. h. das Licht hat nur eine Farbe. Daraus folgt, dass ein Lasersensor relativ unempfindlich gegen Fremdlicht anderer Farben ist.
- Eine sehr geringe Divergenz, d. h. hohe Parallelität der Strahlen, die den Laserstrahl auch über große Entfernung kaum breiter werden lässt.
- Eine große Kohärenzlänge, also der Weglängen- oder Laufzeitunterschied, den zwei Lichtstrahlen, die derselben Quelle entstammen, maximal haben dürfen, damit bei ihrer Überlagerung noch ein Interferenzmuster entsteht.

Im Projekt ENUBA kamen zwei unterschiedliche Typen von Laserscannern zum Einsatz, welche an einen gemeinsamen PC mit einer selbst entwickelten Bewertungs-Software angeschlossen wurden, in denen weitere Aufbereitungsalgorithmen die Fahrleitungs koordinaten an die Hauptsteuerung des Stromabnehmers liefern [34]. Nachteil jedes optischen Verfahrens ist die Empfindlichkeit gegenüber Witterungseinflüssen (Schnee, Regen, Hagel, Nebel, Sonneneinstrahlung, Betauung, Vereisung) und Verschmutzung. Deshalb kann eine Reinigung der Sensoren, z. B. automatisch, erforderlich sein.

Wichtig bei der Konzeption und Ausführung der leistungselektrischen und kommunikationstechnischen Stromkreise und Anlagen war die Integration des Stromabnehmers in die Fahrzeugelektrik und – kommunikation, die wiederum die herstellerseitige Grundausführung und die Anpassungen zur Einbindung des dieselektrischen Hybridantriebs berücksichtigen musste (s. dazu auch Abschnitte 3.1.2.4 und 3.2.1.4). Wesentlich für die Nutzung des Stromabnehmers sind die Aspekte Steuerung und Bedienung. Die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an die Steuerung wurden in einem Pflichtenheft definiert [36]. Am wichtigsten sind dabei das An- und Abbügeln, Nachregelung des Stromabnehmers bei Fahrbewegungen innerhalb der Fahrspur sowie das „Wear Levelling“, die Vergleichmäßigung des Stromabnehmerverschleißes zum Verhindern punktförmiger Abnutzung.

Die Steuerungs-Software basiert auf "PNFramework“, einem OO/UML- und Java- basierten Software-Framework für die Entwicklung von Steuerungs-Applikationen mittels Feldbus-Ankopplung zu Simatic- und anderer Hardware [34]. Wesentliche Eigenschaften sind:

- Verwendung von Siemens-Hardware gekoppelt über Profinet, z. B.:
  - MicroBox und ET200
  - Antriebe und Regler CU320
- Moderne Programmiertechnologien: OO, UML
- Operator-GUI mit leistungsfähiger und ressourcenschonender Web-Technologie Silverlight
- Service- und Diagnosetool auf Basis der Webtechnologie Java für z. B. Tracing, Parameterhandling, Wechsel der Betriebsmodi
- Lauffähigkeit dieser Webtechnologien auf preiswerten Handheld-Geräten:
  - Java Service- und Diagnosetool unter der Dalvik VM auf Betriebssystem-Kern Linux 2.6, z. B. in Android Smartphones
  - Silverlight-GUI auf dem Betriebssystem-Kern Windows Embedded Compact, z. B. in Windows Phone 7 Smartphones

### 3.2.1.4 LKW mit seriellem dieselektrischen Hybridantrieb

Im Rahmen des Förderprojekts wurden zwei Serien-LKW in dieselektrische Hybridfahrzeuge mit der Möglichkeit zur externen Energieeinspeisung über einen Stromabnehmer umgebaut. Zum Einsatz kamen Antriebskomponenten der Siemens-Division „Drive Technologies“, die auch federführend für den Fahrzeugumbau war. Der Umbau selbst erfolgte durch die Paul Nutzfahrzeuge GmbH in Passau.

#### Der Mercedes-Benz Actros 1841 als Ausgangsbasis

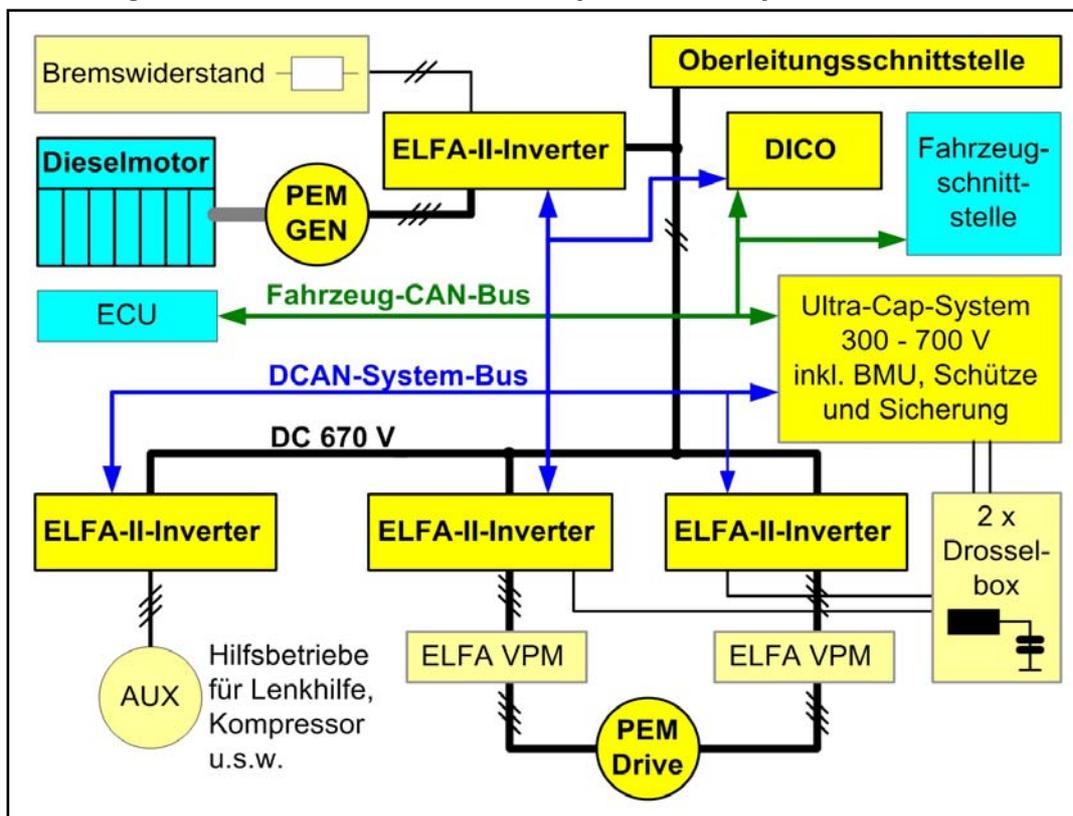
Als Grundlage für das Projekt diente ein Mercedes-Benz-LKW vom Typ Actros 1841. Dieser besitzt in der gewählten Konfiguration einen Dieselmotor mit einem Hubraum von 12 Litern, der eine Leistung von 300 kW und ein Drehmoment von 2000 Nm abgibt. Der Wirkungsgrad des Dieselmotors beträgt ca. 40 %. Das zulässige Sologesamtgewicht des LKW beträgt 18 t. Mit einem geeigneten Anhänger steigt das zulässige Gesamtgewicht auf 40 t. Weitere Kenndaten sind:

- V6 Dieselmotor wassergekühlt, 300 kW bei 1 800 u/min
- 4-Takt Direkteinspritzung, 4 Ventile pro Zylinder
- Gesamtlänge (sog. Fahrgestelllänge) 8 005 mm, Radstand 4 500 mm
- Breite (ohne Spiegel) 2 500 mm, Höhe (unbeladenen) 3 099 mm

#### Serielles Hybridantriebssystem

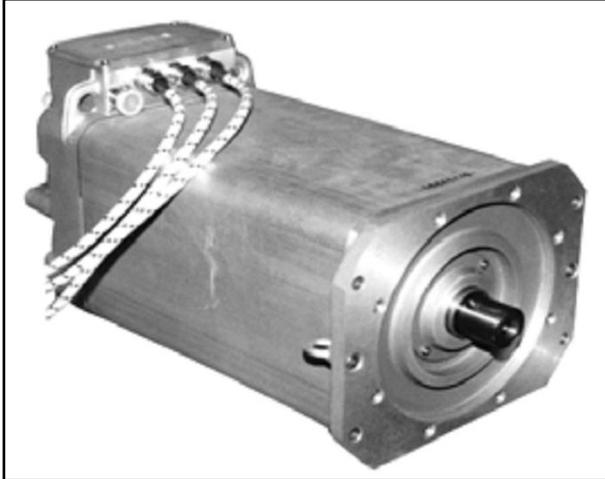
Als Antriebstopologie wurde ein serielles Hybridantriebssystem gewählt. Dabei hat der Verbrennungsmotor keinerlei mechanische Verbindung zu den angetriebenen Rädern. Er treibt lediglich einen Generator an, der dann die elektrische Energie für den Elektromotor zur Verfügung stellt, der allein die Räder antreibt. Ultrakondensatoren (sog. UltraCaps) sind als Energiespeicher im System integriert. Sie können Bremsenergie speichern, Lastspitzen vom Generator puffern und dem Elektromotor Energie für kurzfristige Lastspitzen zu Verfügung stellen. Über die Oberleitungsschnittstelle ist das Fahrzeug mit dem Stromabnehmer verbunden. Über einen Bremswiderstand kann überschüssige Energie durch Umwandlung in Wärme aus dem System gebracht werden. Es stellt somit die Funktion eines Retarders im herkömmlichen LKW dar. Abbildung 3-13 zeigt das Antriebssystem.

**Abbildung 3-13 Blockschaltbild des Serienhybridantriebssystems**



Außerhalb des elektrifizierten Bereichs arbeitet das Fahrzeug wie ein vollwertiger Serienhybrid-LKW, der später keine Einbußen in der Fahrleistung ggü. dem Betrieb an der Fahrleitung haben soll. Die meisten der Komponenten aus Abbildung 3-13 sind im Fahrzeug direkt hinter der Fahrerkabine in einem Komponententräger (Abbildung 3-17) verbaut. Der Synchrongenerator (Abbildung 3-14) und der Fahrmotor (Abbildung 3-16) befinden sich in Fahrtrichtung hinter dem Dieselmotor.

**Abbildung 3-14 Synchrongenerator**



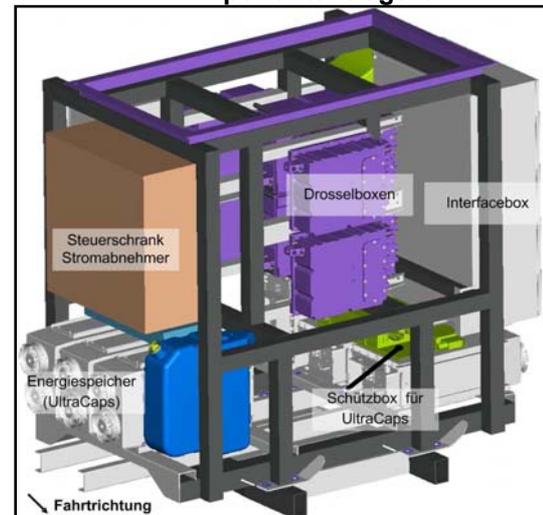
**Abbildung 3-15 Umrichtermodul**



**Abbildung 3-16 Fahrmotor**



**Abbildung 3-17 3D-Zeichnung des Komponententrägers**



Das Power-Module ist für die Bereitstellung der erforderlichen Energie im dieselektrischen Betrieb zuständig. Es besteht aus dem Generator, der am Motor angeflanscht ist, einem Einstufengetriebe (1,875:1) und einem Umrichter. Das Traktionsmodul ist für den Antrieb des Fahrzeuges zuständig. Ihm zugeordnet sind der permanenterrregte Synchronmotor (PEM), zwei Umrichter, zwei Spannungssicherheitsmodule (VPM) und der Digitalcontroller (DICO). Der DICO ist die Fahrsteuerung des Fahrzeuges. Über diese Baugruppe lassen sich auch mit entsprechender Software viele Parameter einstellen und Daten für die Fehleranalyse und Messungen herauslesen.

Der Ultrakondensator ist vom Typ her ein Doppelschichtkondensator. Dieser eignet sich anders als Akkumulatoren für Energiespeicher, die häufig und schnell geladen und entladen werden müssen. Zusätzlich zeichnet diesen Typ eine hohe Zuverlässigkeit aus. Zu diesem Modul gehören neben sechs Ultrakondensatoreinheiten noch andere Bauteile, die hier nicht genauer erläutert werden.

### 3.2.1.5 Streckenausrüstung und Kommunikation

Soweit in dem frühen Entwicklungsstand hinsichtlich der Anwendungen im Zielsystem möglich, wurde zentrale Elemente des in Abschnitt 3.1.2.5 beschriebenen Kommunikationskonzeptes auf der Versuchsanlage umgesetzt. Mit der Motivation sowohl Unterstützungsfunktionen für eine entwicklungsnahe Diagnose bereitzustellen als auch als Technologie-Studien im Vorgriff auf spätere Weiterentwicklungen durchzuführen, wurde ein Internet-Protocol-basiertes Kommunikationskonzept entwickelt [34].

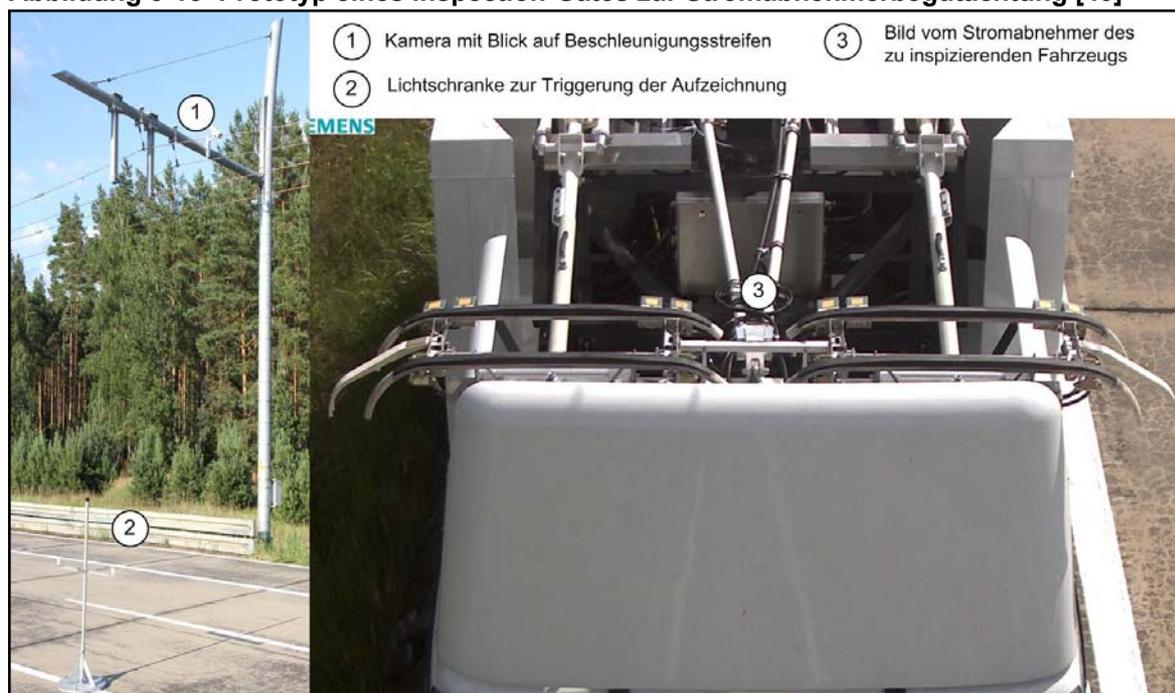
Die Kommunikation erfolgte sowohl lokal am Standort der Versuchsanlage, als auch via Internet in das Siemens-Intranet. Das erarbeitete und umgesetzte Kommunikationskonzept erlaubt u. a.:

- Passiven Zugriff auf Laufzeitdaten und Alarmmeldungen zur Diagnose der Teilsysteme
- Aktiven Zugriff zu Testmodi oder zur Fahrbeeinflussung (z. B. Anbügel-Freigabe)
- Bildverarbeitung und Datenauswertung einer Vorversion eines Inspektion-Gates
- Kommunikation zwischen Hauptsteuer-PC, FBS-PC und Mini-Touch-Panel

Im Zuge der Umsetzung und Weiterentwicklung des Kommunikationskonzeptes wurde in der Fahrerkabine der ursprünglich auf der Mittelkonsole angeordnete, sehr großzügig dimensionierte Diagnose- und Bedienungs-PC für die Funktion der Stromabnehmerbedienung durch ein Mini-Touch-Panel ersetzt. Als Teil des Berechtigungskonzeptes einschließlich der Simulation externer Kontrollen wurde ein „Enforcement Device“ entwickelt, mit dem ein Inspektor von außen einem nachträglich geprüften Stromabnehmer die Zulässigkeit bestätigen und dem Fahrer das Anbügeln ermöglichen kann.

Auf der Versuchsanlage wurde außerdem ein Prototyp einer personengebundenen Stromabnehmer-Inspektion installiert. Die Kamera fokussiert den Stromabnehmer des LKW auf dem Beschleunigungsstreifen bei der Auffahrt auf den elektrifizierten Streckenabschnitt. Lichtschranken oder andere Detektoren triggern eine Videoaufnahme bei Durchfahrt eines LKW und liefern im Stand oder bei geringen Geschwindigkeiten Rohdaten des Stromabnehmers zur manuellen Inspektion. Ein Rechner in der Leitstelle empfängt die Triggerimpulse und kommuniziert mit der Kamera. Je nach Einstellung wird ein Video mit variabler Länge generiert und gespeichert [40]. Der reale oder später ggf. automatische Inspektor kann anhand der Einzelbildauswertung entscheiden, ob dem Stromabnehmer das Anbügeln erlaubt wird (Abbildung 3-18).

**Abbildung 3-18 Prototyp eines Inspection-Gates zur Stromabnehmerbegutachtung [40]**



### 3.2.2 Testplanung und Überblick über die erzielten Ergebnisse

Für teilsystemübergreifende Entwicklungsprojekte mit einerseits seriennahen, abnahmepflichtigen Anlagenteilen und andererseits Neuentwicklungen mit prototypischem Charakter sind in den verschiedenen Projektphasen umfangreiche Tests notwendig. Ebenso stellt die Erprobung des Gesamtsystems unter realitätsnahen Verkehrs- und Witterungsbedingungen eine Testphase dar, die der eigentliche Zweck des Erprobungsträgers bzw. der Versuchsanlage ist. Der herausgehobenen Bedeutung des Testens, Prüfens und Erprobens wurde am Projektbeginn zunächst mit der Grobplanung der Testphasen sowie später mit einem zusammenfassenden Testkonzept [43] Rechnung getragen.

#### 3.2.2.1 Umfang und Ergebnisse der Systemintegrationstests

Von Systemintegration und den zugehörigen Tests spricht man immer dann, wenn ein autonomes, zuvor geprüftes und ggf. abgenommenes Teilsystem mit mindestens einem weiteren Teilsystem an mindestens einer Schnittstelle Daten, elektrische Ströme oder mechanische Kräfte austauscht. Ausgehend von den vier in Abbildung 3-1 (S. 23) dargestellten Teilsystemen sind vier Einzelphasen der Systemintegration zu absolvieren, nämlich drei unter Beteiligung jeweils zweier benachbarter Teilsysteme und eine weitere Testphase für die Integration und das Zusammenwirken des Gesamtsystems.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Systemintegration in allen Teilphasen erfolgreich durchlaufen wurde. Beispiele zeigen Abbildung 3-19 und Abbildung 3-20. Vor Aufnahme der eigentlichen Tests wurden dabei zunächst immer die elektrischen bzw. sonstigen Schutzmaßnahmen zur Sicherstellung der Arbeitssicherheit für das Testpersonal in ihrer Funktion geprüft und in Arbeitsanweisungen dokumentiert.

Im Testbetrieb erwies es sich außerdem als zweckmäßig, die Phasen Systemintegration und Performance Tests nicht nacheinander sondern z. T. gleichzeitig anzugehen und den Schwerpunkt schrittweise von Funktions- und Stabilitätstest (Systemintegration) zunehmend zu Wiederholungen verkehrstypischer Situationen (Performance Tests) zu verschieben.

**Abbildung 3-19 Kontrolle der Stromabnehmerbewegung im Stillstand**



**Abbildung 3-20 Kontrolle der Schutzmaßnahmen zur Arbeitssicherheit**



### 3.2.2.2 Testergebnisse der Performance Tests (UseCases)

In der ca. 10-wöchigen Test- und Erprobungsphase wurden zahlreiche Fahrten mit verschiedenen Manövern durchgeführt. Einen Überblick über die getesteten Situationen gibt Tabelle 3-2, einzelne Tests zeigen Abbildung 3-21 bis Abbildung 3-24 (S. 41).

**Tabelle 3-2 Durchgeführte Tests in Betriebs- und Gefahrensituationen**

Nr.	Beschreibung des Manövers oder der Testreihe	Testergebnisse / Bemerkungen
1	Anbügeln mit Geschwindigkeit bis $v_{max}$ , Erkennung der Fahrleitung und Umschaltung auf el. Betrieb	getestet bis 80 km/h (typische Auffahrgeschwindigkeit), für Geschwindigkeiten ab 80 km/h Anlauf aus nicht elektrifiziertem Abschnitt nötig
2	Mechanische Bremsung einschl. Gefahrenbremsung aus bis zu 90 km/h, am Mast und in Feldmitte	Keine kritischen Situation, z. T. Kontaktverluste und Auftreten der üblichen FL-Schwingungen bei erneutem Kontakt. Keine Gefahrenbremsung mit Anhänger.
3	Elektrische Bremsung (ohne NetZRückspeisung zum EVU): Retarderbremsung zum Energieaustausch zwischen beiden LKW	Erfolgreich getestet, Energieübertragung zwischen bremsendem und beschleunigendem LKW möglich.
4	Elektrische Bremsung mit Rückspeisung zum Netz mit 1 und 2 LKW	Max. Rückspeisestrom 350 A, Rückspeisung begrenzt durch Antriebskomponenten.
5	Stausimulation (Stop & Go) simuliert durch häufiges Bremsen und Anfahren.	Ohne Probleme erfolgreich getestet.
6	Überholen mit Geschwindigkeiten bis $v_{max}$ . Anschließend wieder el. Betrieb. Heftiges Ausweichen mit Geschwindigkeiten bis $v_{max}$ . Ausweichen beim Anbügelvorgang.	Erfolgreich getestet. Ab 50 km/h wg. Streckenlänge kein erneutes Anbügeln möglich. Lange Zeiten für An- und Abbügelvorgang wurden verkürzt.
7	Einfahrt in einpolig geerdeten oder neutralen Abschnitt nach dieselelektrischem oder elektrischen Vorbetrieb.	Fahrzeug reagiert erwartungsgemäß. Anbügeln im geerdeten oder neutralen Abschnitt nicht möglich. Angebügelte LKW bügeln bei Einfahrt ab.
8	Belastungsfahrt mit 2 LKW und max. Leistungsaufnahme.	Zahlreiche Fahrten m/o Anhänger. Max. Leistung über 30 min mit 2 LKW ermittelt.
9	Fahrten über Hindernisse mit Geschwindigkeiten bis $v_{max}$ realisiert durch kleine Curbs (einseitiges Schlagloch, zweiseitig, zweiseitig versetzt).	Ohne Probleme bis 90 km/h getestet. LKW reagiert erwartungsgemäß, vereinzelte Lichtbögen bei mittleren Geschwindigkeiten (30 – 60 km/h).
10	Nachtfahrten, z. T. mit Hindernissen. Überprüfung Funktion der Scanner.	Ohne Probleme bis 90 km/h getestet, LKW reagiert erwartungsgemäß, vereinzelte Lichtbögen.

Insgesamt wurden in der Testkampagne 1700 Fahrten auf der Versuchsanlage durchgeführt. Einige statistische Daten zum Testbetrieb sind in Tabelle 3-3 aufgeführt.

**Tabelle 3-3 Statistische Daten zum Testbetrieb (zusammengefasst für beide LKW)**

Fahrten bzw. Vorgänge	Anzahl / Strecke
Fahrten auf der Versuchsstrecke, entspr. der Anzahl an An- und Abbügelvorgängen	1700
auf der Versuchsanlage zurückgelegte elektrische Fahrstrecke	1 500 km
auf der Versuchsanlage zurückgelegte dieselelektrische Fahrstrecke	2 500 km
außerhalb der Versuchsanlage zurückgelegte dieselelektrische Fahrstrecke	mind. 4 500 km
Vollbremsungen aus versch. Geschwindigkeiten	mind. 70
Fahrten über Hindernisse	mind. 150
Fahrten bei Nacht	ca. 50
Fahrten mit Anhänger	ca. 500

Zusammenfassend kann hinsichtlich der durchgeführten Tests festgestellt werden:

- Unter vers. Witterungsbedingungen einschließlich starker Winde und häufiger Regenfälle zeigte sich der gewählte mechanische und regelungstechnische Ansatz als funktionsfähig und stabil.
- Zu Beginn der Beschleunigungsphase sind die Versuchsfahrzeuge im elektrischen Betriebsmodus vergleichbaren LKW hinsichtlich Beschleunigungsvermögen überlegen. Bei höheren Geschwindigkeiten wirkt sich die noch nicht optimierte Antriebskonfiguration aus.
- Auf der Versuchsanlage ist es erstmals gelungen, zwischen für den öffentlichen Straßenverkehr zugelassen LKW elektrische Energie von einem bremsenden Fahrzeug auf ein beschleunigendes Fahrzeug oder von zwei bremsenden LKW ins öffentliche Netz zu übertragen.

Abbildung 3-21 Schnelles Ausweichen bei  $v_{max}$



Abbildung 3-22 Fahrt über Hindernis (Schlagloch)



Abbildung 3-23 Nachregelung Stromabnehmer bei Spurdrift



Abbildung 3-24 Funktionstest Scanner bei zunehmender Dunkelheit



### 3.2.3 Wesentliche Testergebnisse aus den Teilsystemen

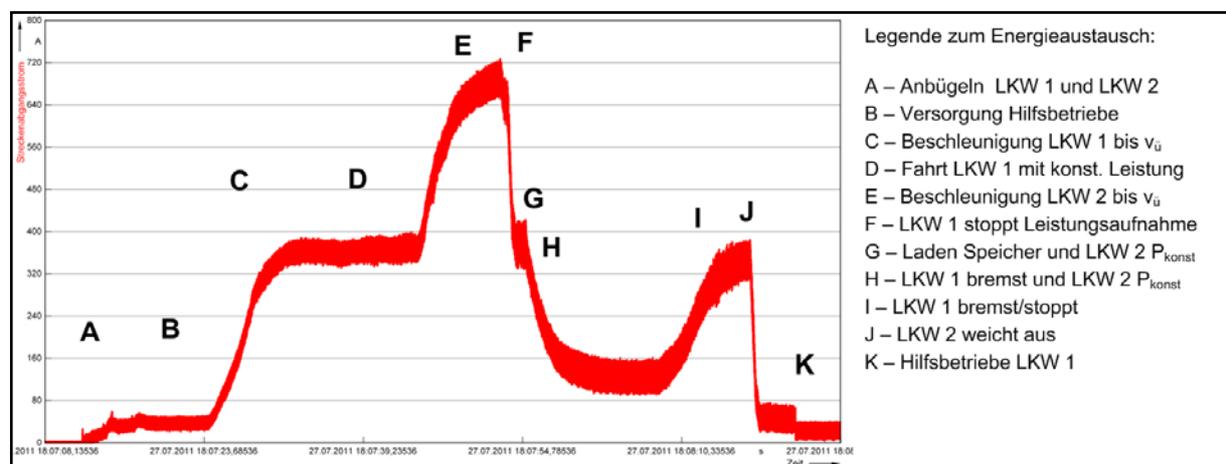
#### 3.2.3.1 Testergebnisse Stromversorgung

Durch die günstigen Testbedingungen mit einem Messarbeitsplatz im Unterwerk und ohne den sonst bei Inbetriebsetzungen und Messungen typischen Zeitdruck wurde die Gelegenheit genutzt, mit einem mehrkanaligen Messsystem alle relevanten Daten im Gleich- und Wechselrichterbetrieb zu messen. Wesentliche Ergebnisse sind:

- Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Qualität einer Bahnenergieversorgung ist die Fahrleitungsspannung. Messungen dieser Größe am Unterwerksausgang für Beschleunigungsvorgänge von 0 auf 90 km/h mit einem LKW zeigen, dass die Spannungsspitzen kurz nach dem Anbügeln beim Nachladen des Energiespeichers auf dem LKW auftreten. Danach sinkt die Fahrleitungsspannung mit zunehmender Übertragungsleistung auf ca. 625 V.
- Einen bedeutenden Schritt in der Geschichte elektrischer Verkehrssysteme stellt der Einsatz eines Wechselrichters im individuellen Straßengüterverkehr dar. Erstmals konnte praktisch erprobt und nachgewiesen werden, dass elektrisch angetriebene LKW beim Bremsen aus der kinetischen Energie elektrische zurückgewinnen und diese ins speisende Energieversorgungsnetz zurückspeisen können. Dies ist bisher nur bei Eisenbahnen und im Nahverkehr typisch. Bei Stillstandsbremsungen eines LKW aus 90 km/h wurden jeweils max. 240 A in der Spitze zurückgespeist.
- Jeder an einem Energieversorgungsnetz betriebene Gleich- bzw. Wechselrichter belastet das Netz mit Oberschwingungen mit einem charakteristischen harmonischen Spektrum, das abhängig vom Schaltungstyp und den eingesetzten leistungselektronischen Bauelementen ist. Der Gleichrichter der Versuchsanlage ist ein 12-Puls-Diodengleichrichter, der Wechselrichter ist ein gesteuerter 6-Puls-Thyristor-Wechselrichter. Die charakteristischen Spektren konnten gemessen und die Einhaltung der technischen Netzanschlussbedingungen nachgewiesen werden.

Im Zielsystem wird nicht jedes Unterwerk über einen Wechselrichter verfügen, sondern nur ausgewählte Standorte mit stark asymmetrischem Verkehr und häufig zu erwartenden Energieüberschüssen durch zahlreiche bremsende Fahrzeuge. Aber auch in allen anderen Streckenabschnitten ohne Wechselrichter werden bremsende Fahrzeuge regelmäßig elektrische Energie ins Fahrleitungsnetz zurückspeisen, um diese Energie beschleunigenden Fahrzeugen der gleichen oder der Gegenrichtung zur Verfügung zu stellen. Abbildung 3-25 zeigt dies am Beispiel eines Energieaustauschs zwischen den beiden Versuchs-LKW auf der Versuchsanlage, wobei wiederum der Streckenabgangsstrom zur Analyse herangezogen wird. Es ist damit ebenfalls erstmalig ein elektrischer Energieaustausch zwischen zwei Fahrzeugen des individuellen Straßengüterverkehrs erfolgreich erprobt worden.

**Abbildung 3-25 Energieaustausch zwischen bremsendem und beschleunigendem LKW**



### 3.2.3.2 Testergebnisse Fahrleitung

Die Fahrleitungsanlage wurde im Testzeitraum mit ca. 1 700 Stromabnehmerdurchgängen beschliffen. Es fanden zwei Inspektionen der Oberleitungsanlage (s. Abbildung 3-26) statt. Beide Inspektionen haben einen sehr guten Zustand der Anlage bestätigt. Über den gesamten Betriebszeitraum konnte an den Fahrdrähten kein Verschleiß gemessen werden. An vereinzelt Stellen hatten sich Abriebspuren von den Kohleschleifleisten der Stromabnehmer abgelagert und Schmausspuren von Lichtbögen gebildet. Beides allerdings in einem sehr geringen Umfang, s. Abbildung 3-27.

**Abbildung 3-26 Fahrleitungsinspektion mit Hubsteiger**

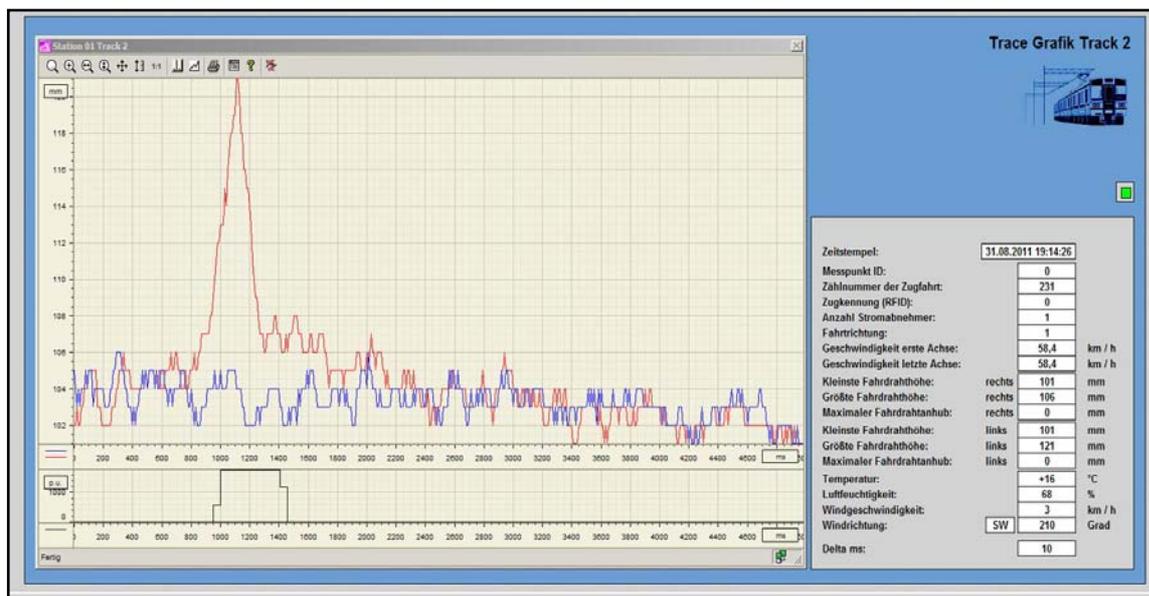


**Abbildung 3-27 Schleifleistenabrieb durch Bewegung im Stillstand**



Während der Messkampagne wurden auch Fahrdrahtanhub und Fahrgeschwindigkeit sowie die Umgebungsbedingungen ermittelt. Abbildung 3-28 verdeutlicht die Aussagekraft der Fahrdrahtanhubmessung zur Beurteilung von Stromabnehmern. Die roten und blauen Linien kennzeichnen die Kettenwerke. Durch eine Fehlparametrierung des Stromabnehmers eines LKW fuhr dieser eine Zeit lang mit unterschiedlichen Andruckkräften der rechten und linken Seite, was gut in Abbildung 3-28 zu erkennen ist. Für die spätere Anwendung bedeutet dies bei Verbindung der Messdaten mit einer Fahrzeugidentifizierung, dass auch angebügelte Stromabnehmer beurteilt werden können.

**Abbildung 3-28 Messschrieb Fahrdrahtanhubmessung [40]**



### 3.2.3.3 Testergebnisse Stromabnehmer

Die Erprobung des Stromabnehmers zum Nachweis der in den Abschnitten 3.2.2.1 und 3.2.2.2 beschriebenen Funktionen und Manöver erfolgte in Hochstast-Fahrten für die einzelnen Manöver. Ergänzend und präzisierend zu den bereits aufgelisteten Manövern sind besonders hervorzuheben:

- regelmäßige Fahrten mit der max. Geschwindigkeit von 90 km/h
- Driften innerhalb der Spur („Schlangenlinien-Fahrten“) zum Austesten der Nachregelung
- zahlreiche Fahrten bei verschiedenen Regen-Bedingungen
- Fahrt bei nasser Fahrbahn mit kurzem LKW-Abstand (Gischt-Effekt)
- regelmäßige Fahrten im Parallelfeld unter verschiedenen Bedingungen und Manövern, die im Vorfeld als regelungstechnisch besonders anspruchsvoll angesehen wurden

Bedingt durch die sehr niederschlagsreiche Witterung im Sommer 2011 konnte insbesondere die Stabilität bei Regen häufig getestet werden, Abbildung 3-29.

**Abbildung 3-29 Funktionstests bei Regen und Gischt**



Bei den zahlreichen Messfahrten wurden im Teilsystem Stromabnehmer folgende Daten gewonnen:

- Logfiles der Stromabnehmersteuerung
- Videos der zusätzlich installierten Diagnosekamera
- Rohdaten der Laser-Scanner, wobei immer die Daten beider Scanner-Typen für spätere Vergleichsauswertungen mitgeschrieben wurden

Mit Standbildern der SA-Überwachungskamera ist auch nachträglich die Analyse von regulären Vorgängen wie Wear-Levelling oder von Sondersituationen wie Lichtbögen und irregulären Abbügel-Ereignissen möglich.

Im Testbetrieb wurden folgende Beobachtungen gemacht, die z. T. zu Anpassungen in der Testplanung und in der Testabdeckung führten:

- Auftreten von Lichtbögen in folgenden Situationen
  - nach Nichtbenutzung der Fahrleitung über mehrere Stunden oder Tage, dies verstärkt in Kombination mit korrosionsfördernden Wetterlagen
  - teilweise in den Parallelfeldern und am Fahrleitungsfestpunkt (typische Orte)
  - bei Notbremsungen
  - teilweise bei Überholvorgängen
- Die Adaptierbarkeit der Andruckkraft auf verschiedene Windverhältnisse funktioniert grundsätzlich mit einem Parameter, der über das Service- und Diagnosetool einstellbar ist. Auch Bei stärkeren Windgeschwindigkeiten in Längsrichtung zur elektrischen Fahrstrecke ab ca. 20..30 km/h wurde diese Möglichkeit der manuellen Adaption praktisch genutzt.
- Im Bereich der Schleifleisten wurde kein wesentlicher Verschleiß beobachtet – auch wenn die angebugelt gefahrene Gesamtstrecke je LKW im dreistelligen km-Bereich lag, s. Tabelle 3-3.
- Jahreszeitlich bedingt fehlen außerdem Testfahrten zum Nachweis der Allwettertauglichkeit bei Schnee, Hagel, Nebel, Eisregen, Frost, aber auch extremer Hitze über 30 °C.
- Die beiden LKW weisen individuelle Besonderheiten auf, die aus Exemplarunterschieden sowohl innerhalb als auch außerhalb des Teilsystems Stromabnehmer resultierten (z. B. Unterschiede in der Federung, unterschiedliche Stromabnehmer-Servomotoren)

### **Bewertung der Testergebnisse und der Funktionsmuster**

Insgesamt waren die praktischen Testergebnisse sehr ermutigend, sodass von einer grundsätzlichen Eignung des Stromabnehmer-Konzepts „Invers Trolley“ ausgegangen werden kann. In über 1 700 Fahrten konnte ein zunehmend stabiles Verhalten nachgewiesen werden. Sowohl Mechanik und Kinematik als auch das Bedienkonzept haben sich als praktikabel erwiesen. Das Konzept kann somit als Grundlage für eine Integration in Serienfahrzeuge verwendet werden. Bei dieser Integration wird eine Optimierung des erforderlichen Einbauraums umzusetzen sein.

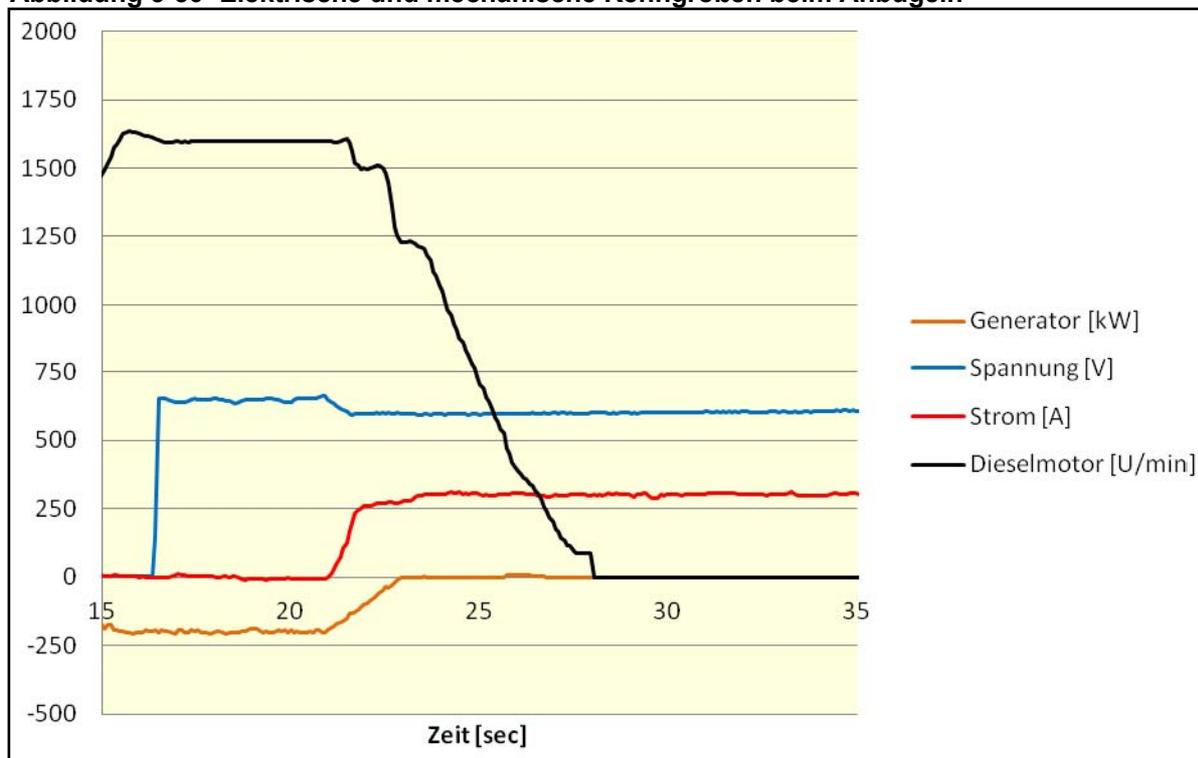
### 3.2.3.4 Testergebnisse Fahrzeug

Ähnlich wie beim Stromabnehmer war die Beurteilung der generellen Eignung des dieselektrischen Hybridantriebs mit zusätzlicher Einspeisung über die Fahrleitung Schwerpunkt der Messkampagne. Somit konzentrieren sich die Testergebnisse im Teilsystem Fahrzeug auf die Analyse des Anbügelvorgangs und das Rückspeisen sowie die Vergleichsfahrten und mit einem gleich motorisierten und ballastierten Serien-LKW.

#### Anbügeln und Wechsel des Betriebsmodus

In Abbildung 3-30 ist der zeitliche Ablauf des Anbügelns dargestellt. Nachdem der Pantograph eine lose mechanische Verbindung mit der Fahrleitung hergestellt hat, erkennt wenig später die Software die anliegende Spannung. Ab diesem Zeitpunkt erfolgt der Umschaltvorgang auf den rein elektrischen Fahrmodus. Nach einigen Sekunden, die Zeit variiert entsprechend den äußeren Bedingungen wie Fahrgeschwindigkeit, Wind, u. s. w., fließt auch der Strom von der Fahrleitung ins Fahrzeug und Dieselmotor sowie Generator schalten sich ab. Der LKW fährt ab diesem Zeitpunkt rein elektrisch.

**Abbildung 3-30 Elektrische und mechanische Kenngrößen beim Anbügeln**



#### Rückspeisung ins Fahrleitungsnetz

Die Testfahrzeuge wurden für die Rückspeisung ins Fahrleitungsnetz konzipiert. Während einer dieselektrischen Fahrt ohne Verbindung mit der Oberleitung wird die Bremsenergie im Energiespeicher aufgenommen oder im Bremswiderstand in thermische Energie umgesetzt. Bei Fahrt an der Oberleitung kann deutlich mehr elektrische Energie zurückgespeist werden, wenn entweder genug Verbraucher, z. B. beschleunigende oder bergwärts fahrende LKW im gleichen Speiseabschnitt fahren oder wenn das Unterwerk über einen Wechselrichter verfügt, sodass die Energie ins Mittelspannungsnetz zurückgespeist werden kann. Mittels des Retarderbremshebels im Fahrzeug aktiviert der Fahrer den Bremsvorgang mit Rückspeisung. Im Testbetrieb wurden Rückspeisungsströme von bis zu 300 A getestet. Dabei fällt zunächst der von der Fahrleitung bezogene Strom unter die Nulllinie, d. h. das Fahrzeug benötigt keine Leistung mehr. Nach wenigen Sekunden beginnt die Rückspeisung in die Fahrleitung. Diese dauert so lange an bis der Fahrer den Rückspeisevorgang beendet.

### 3.2.4 Weitere Testergebnisse

#### 3.2.4.1 Vergleichsfahrten mit einem Standard-Diesel-LKW

Die bisherigen Testergebnisse aus den Teilsystemen haben den Nachweis erbracht, dass die gewählten technischen Ansätze für den Stromabnehmer und das Hybridantriebssystem die beabsichtigten Funktionen erfüllen und das Gesamtsystem zuverlässig funktioniert. Maßgeblich für eine Akzeptanz des Systems ist aber auch, ob die elektrischen Fahrzeuge konkurrenzfähig oder sogar besser als Serien-LKW sind. Dies betrifft vor allem folgende Aspekte:

- Wie ist das Beschleunigungsverhalten bis zum Erreichen bestimmter Endgeschwindigkeiten?
- Wie verhalten sich die verschiedenen Fahrzeuge hinsichtlich Schallemissionen?
- Wie ist das Betriebsverhalten (Kraftstoffverbrauch und Fahrdynamik) der Versuchsfahrzeuge im dieselektrischen Betriebsmodus?

Auf die vergleichenden Schallemissionsmessungen wird in Abschnitt 3.2.4.2 eingegangen. Gegenstand dieses Kapitels sind die in Vergleichsfahrten mit einem typähnlichen Serien-LKW auf der Versuchsanlage Groß Dölln erzielten Ergebnisse hinsichtlich Beschleunigungsverhalten und Kraftstoffverbrauch.

#### **Vergleichsfahrzeug Mercedes-Benz Actros 2541**

Als Vergleichsfahrzeug wurde ein MB Actros 2541 angemietet, der ebenfalls über einen 410-PS-Motor verfügt. Dieser wurde mit einer Wechselbrücke ausgestattet und mit Kies auf das gleiche Gesamtgewicht von ca. 18 t wie die Versuchsfahrzeuge ballastiert.

Das Beschleunigungsverhalten wurde für folgende Betriebsmodi und Fahrzeugkonfigurationen verglichen:

- Solo-LKW (17,7 t): Beschleunigungen 0 – 60 km/h, 0 – 70 km/h, 0 – 80 km/h, 0 – 90 km/h
- Betriebsmodus Vergleichs-LKW: nur Dieselantrieb
- Betriebsmodi Versuchs-LKW: dieselekt., rein elektr. ( $P_{\max} = 240 \text{ kW}$ )

Einen Vergleich der in diesen Konfigurationen erzielten Zeiten für die angegebenen Beschleunigungsvorgänge zeigt Tabelle 3-4.

**Tabelle 3-4 Vergleich Beschleunigungszeiten zw. Standard- und Versuchs-LKW**

Beschleunigung Konfiguration	Standard-LKW Diesel 300 kW	Versuchs-LKW dieselektisch	Versuchs-LKW elektrisch
Solo-LKW 17,7 t 0 – 60 km/h	20,0 s	15,7 s	15,3 s
Solo-LKW 17,7 t 0 – 70 km/h	24,2 s	22,5 s	21,0 s
Solo-LKW 17,7 t 0 – 80 km/h	33,2 s	31,9 s	28,7 s
Solo-LKW 17,7 t 0 – 90 km/h	40,1 s	46,7 s	39,6 s

Die im Rahmen dieser Vergleichsfahrten zugelassenen Leistungserhöhung bei den Versuchsfahrzeugen zeigen, dass mit einer max. Leistung von 240 kW die elektrischen Fahrzeuge dem Diesel-LKW bei der Beschleunigung z. T. deutlich überlegen sind. Dies gilt bei den Beschleunigungen bis 80 km/h auch für den dieselektrischen Betriebsmodus der Versuchsfahrzeuge.

Zusammenfassend wird deutlich, dass der Elektromotor als Fahrmotor durch das deutlich höhere Drehmoment auch bei geringerer Leistung als ein hinsichtlich des Dieselmotors gleich motorisierter LKW ein wesentlich günstigeres Beschleunigungsverhalten zeigt. Bei identischer Leistung beider Fahrzeuge von 300 kW elektrisch bzw. mechanisch am Dieselmotor würde ein elektrischer LKW noch erheblich bessere Beschleunigungswerte erzielen als ein reines Dieselfahrzeug.

### 3.2.4.2 Vergleichende Geräuschmessungen

Das vorgeschlagene Elektrifizierungs- und Antriebskonzept ist technisch ein neues Verkehrssystem und unterliegt wie jeder Verkehrsträger bestimmten Auflagen hinsichtlich der Schallemission und des Immissionsschutzes der Anwohner. Folglich ist an das neu entwickelte System mindestens der Anspruch zu stellen, dass es in den relevanten Beurteilungsgrößen nicht signifikant schlechtere Werte als die bestehender Fahrzeuge erzielt. Wenn sich darüber hinaus die Erfahrungen aus anderen Anwendungen im Verkehrsbereich bestätigen, dass der Wechsel zur Elektrotraktion subjektiv wahrnehmbar und objektiv messbar zu leiseren Verkehrsmitteln führt, kann das neue System sowohl durch die Reduzierung der Schadstoffemissionen als auch durch die geringeren Schallemissionen zu einem besseren Image des LKW-Verkehrs beitragen.

Zur Untersuchung dieser Effekte wurden auf der Versuchsanlage vergleichende Messungen zwischen dem Standard-Diesel-LKW und den Versuchsfahrzeugen durchgeführt, auch wenn zu diesem Zeitpunkt bereits feststand, dass die Versuchsfahrzeuge weder hinsichtlich der Optimierung des Antriebsstrangs noch hinsichtlich der weiteren Emissionsquellen zukünftigen Serienfahrzeugen entsprechen. Die Messungen wurden von der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden durchgeführt, die im Bereich der Schallquellenortung und vergleichenden Schallmessung über umfangreiche Erfahrungen verfügt. Zum Einsatz kommt dabei ein Mess-Array mit mehr als 32 Mikrofonen (s. Abbildung 3-31) sowie 2 Referenzmikrofonen zur Aufnahme von Dauerschallpegeln. Abbildung 3-32 zeigt die Vorbeifahrt des Versuchs-LKW im elektrischen Betrieb an der Messeinrichtung.

Untersucht wurden folgende Antriebsmodi und Geschwindigkeiten:

- Vergleichs-LKW mit Dieselantrieb
- Versuchs-LKW im dieselelektrischen Modus (DE) und im rein elektrischen Betrieb
- Geschwindigkeiten: Stillstand, 15 km/h, 50 km/h, 90 km/h

Abbildung 3-31 Aufbau der Messeinrichtung



Abbildung 3-32 Vorbeifahrt im elektr. Modus



Die Auswertung der mit dem Mikrofon-Array durchgeführten Messungen erfolgte im Frequenzbereich von 0,5-2 kHz. Mit Auswertungsalgorithmen können dann Schalldruckpegel berechnet und veranschaulicht werden [44]. Abbildung 3-33 (S. 49) zeigt diese Bilder für 1 kHz bei 15 km/h und 90 km/h. Tabelle 3-5 zeigt aufgenommenen äquivalenten Schalldruckpegel sowohl unbewertet  $L_{eq}$  (dB) als auch A-bewertet  $L_{Aeq}$  (dB). Mit dem Verfahren der A-Bewertung wird versucht, das subjektive Hörempfinden bei der Angabe äquivalenter Schalldruckpegel zu berücksichtigen.

Tabelle 3-5 Äquivalente Schalldruckpegel versch. Antriebsmodi bei 15 km/h u. 90 km/h [44]

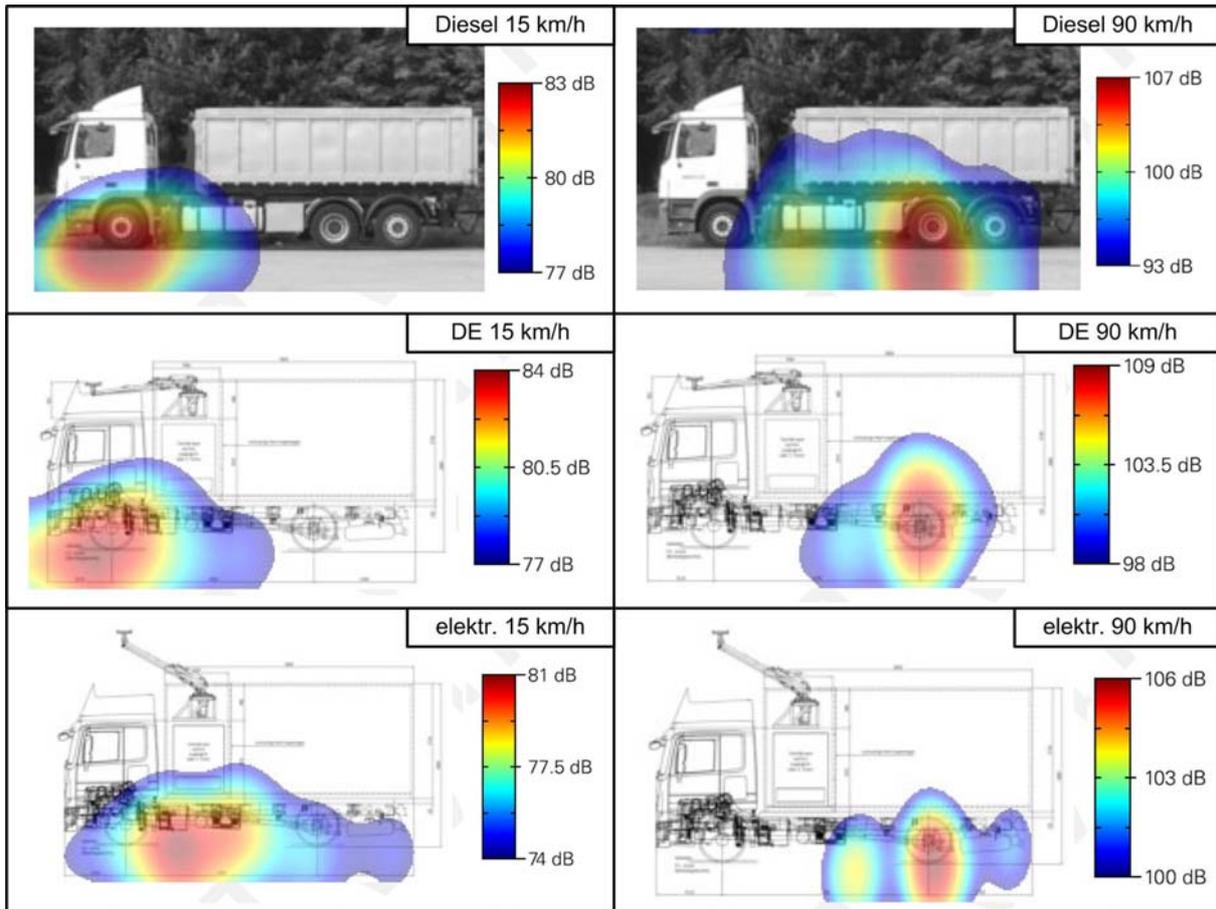
	LKW 3 15 km/h	LKW 2 DE 15 km/h	LKW 2 E 15 km/h	LKW 3 90 km/h	LKW 2 DE 90 km/h	LKW 2 E 90 km/h
$L_{eq}$ (dB)	85,4	84,0	80,7	94,8	95,3	96,2
$L_{Aeq}$ (dB)	71,6	72,9	71,6	85,7	89,5	89,3

LKW 2 ist einer der Versuchs-LKW, LKW 3 ist der Standard-Diesel-LKW; DE = dieselelektrisch, E = rein Elektrisch

Die Schalldruckpegel in Tabelle 3-5 (S. 48) zeigen:

- Bei 15 km/h werden im elektrischen Modus des Versuchs-LKW niedrigere äquivalente Schalldruckpegel als beim Vergleichs-Diesel-LKW gemessen. Die A-Bewertung führt zu gleichen äquivalenten Schalldruckpegeln.
- Der dieselelektrische Betriebsmodus des Versuchs-LKW zeichnet sich bei beiden Geschwindigkeiten durch die vergleichsweise höchsten äquivalenten Schalldruckpegel aus, was vor allem auf die ungenügende Abstimmung zwischen Dieselmotor und Generator zurückzuführen ist, durch die der Dieselmotor tendenziell mit ungünstigen Drehzahlen läuft.

**Abbildung 3-33** Schallquellenverschiebung (1 kHz) bei verschiedenen Antriebsmodi und Geschwindigkeiten [44]



Bei der Frequenz 1 kHz handelt es sich um die Mittenfrequenz einer Oktave.

Deutlich erkennbar in Abbildung 3-33 ist:

- Bei 15 km/h liegen die Schallquellen hauptsächlich bei der Fahrerkabine, wo sich der Dieselmotor oder im rein elektrischen Betrieb Kompressoren und Lüfter befinden.
- Bei 90 km/h dominieren bei allen Antriebsarten die Rollgeräusche.
- Der Stromabnehmer der Versuchs-LKW stellt weder im angebügelten noch im abgebügelten Zustand eine identifizierbare Schallquelle dar.

Bei allen Messungen ist zu berücksichtigen, dass der Versuchs-LKW im elektrischen Betrieb durch den nicht schallgedämmten Kolbenkompressor über eine subjektiv deutlich wahrnehmbare, zusätzliche Schallquelle verfügt, die bei einer Serienlösung definitiv nicht zum Tragen käme. Den ungünstigen Einfluss des ungedämmten Kompressors bestätigten auch die Messungen im Stillstand.

Beim Vergleich der Messwerte mit anderen Messungen von LKW auf verschiedenen Straßenbelägen muss beachtet werden, dass die Fahrbahn der Versuchsstrecke durch zahlreiche Teerfugen relativ uneben und damit nicht repräsentativ ist. Daher können für die verglichenen LKW in allen Betriebsmodi auf ebenen Fahrbahnen noch etwas niedrigere Messwerte erwartet werden.

### 3.3 Ökonomische und ökologische Bewertung

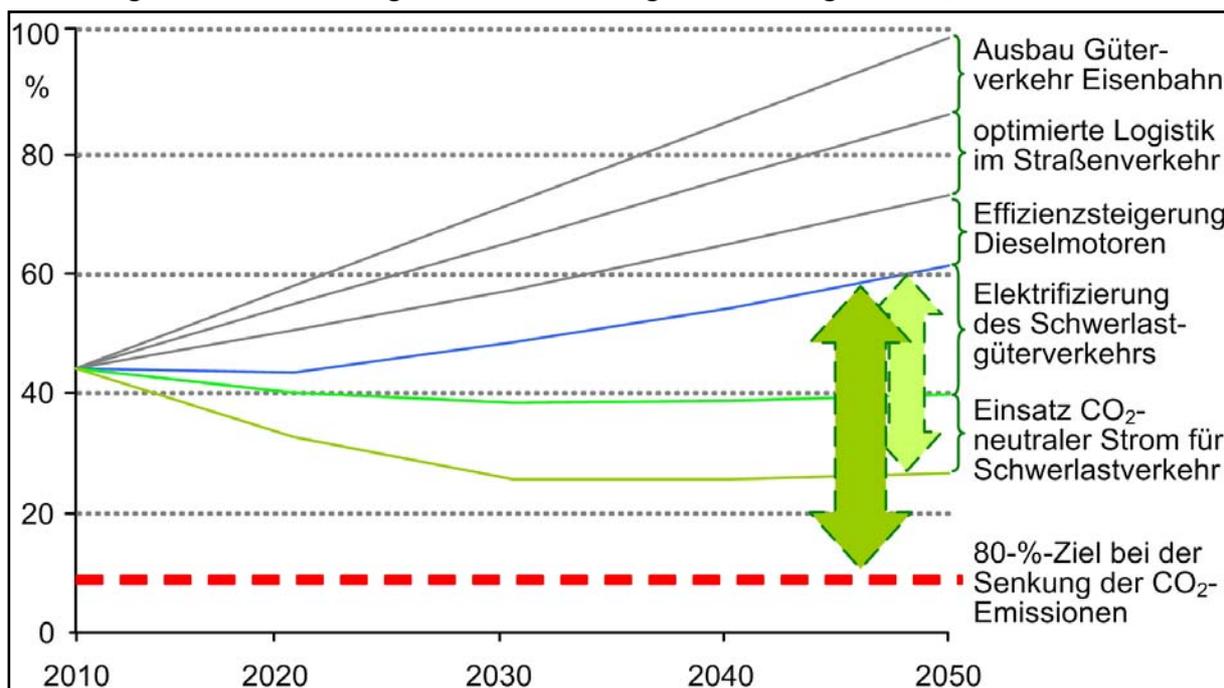
Begleitende ökologische und ökonomische Studien belegen, dass die Elektrifizierung erhebliches Potenzial zur Umweltentlastung bei allen Verkehren mit zahlreichen LKW-Fahrten auf konzentriertem Raum bietet. Bei der untersuchten elektrischen Traktion auf Teilabschnitten öffentlicher Fernstraßen verschiedener Verbindungsfunktion bleiben alle vorhandenen und gewohnten Anlagen wie Zufahrten, Lager- und Umschlaganlagen, Wege und auch die Arbeitsabläufe für Auftraggeber, Spediteure und Fahrer bestehen. Nur die Fahrzeugtechnik wird den geänderten verkehrlichen und energietechnischen Rahmenbedingungen angepasst.

Die elektrotechnische Ausrüstung entlang der ausgewählten Strecke ist mit überschaubarem Mitteleinsatz herzustellen. In zwei vordringlichen Einsatzgebieten ist die elektrische Traktion besonders sinnvoll:

- Pendelverkehre über kurze und mittlere Entfernungen bis etwa 50 km, zum Beispiel zwischen Güterverkehrszentren und Häfen oder Fabrikanlagen
- Anbindungen von Gruben und Minen an zentrale Lager- und Umladestellen

Diese Einsatzgebiete bieten sich an, wenn die Transportmengen einen direkten Bahnanschluss nicht rechtfertigen oder wenn dieser aufgrund der Topographie nicht möglich ist. Unter Berücksichtigung der prognostizierten wachsenden Verkehrsaufkommen [49] lassen sich verschiedene Szenarien zur Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ableiten. Die relative Darstellung in Abbildung 3-34 gilt sowohl für Einzelfahrten, bestimmte Relationen als auch für größere elektrifizierte Netze.

**Abbildung 3-34 Szenarienvergleich relationsbezogener Senkung von CO<sub>2</sub>-Emissionen**



Aus Abbildung 3-34 ist zu erkennen, dass die bisher vorgesehenen Maßnahmen wie forcierter Ausbau des Eisenbahnverkehrs, Optimierung der Logistikketten und Effizienzsteigerungen der Verbrennungsantriebe die Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen insgesamt nur bremsen können. Erst durch die Elektrifizierung besonders aufkommensstarker Verbindungen und den Einsatz diesel-elektrischer Hybrid-Lkw wird eine Trendwende hin zu sinkenden CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht.

Ökonomische Modellrechnungen zeigen, dass sich die Elektrifizierung größerer zusammenhängender Netze schon ab einigen Zehntausend Kilometer jährlicher Fahrleistung je LKW rechnet. Die konkrete Ausgestaltung der Finanzierungsmodelle ist dabei stark von der jeweiligen nationalen Gesetzgebung und Tradition der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung abhängig.

## 4 Angemessenheit der geleisteten Arbeit und Verwertung der Forschungsergebnisse

### 4.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Umsetzung der Entwicklungsschwerpunkte des Forschungsvorhabens ENUBA kann insgesamt als erfolgreich bewertet werden. Wie bereits im Vorhabensantrag richtig eingeschätzt, standen die personellen Forschungs- und Entwicklungsleistungen bei der Zielerreichung im Vordergrund. Dazu hat wesentlich die während der gesamten Vorhabenslaufzeit stattfindende enge Abstimmung mit dem Fördermittelgeber beigetragen.

Alle entstandenen Kosten des Vorhabens ENUBA sind ausschließlich zur Erreichung der formulierten Entwicklungs- und Umsetzungsziele angefallen und waren somit für die Zielerreichung des Vorhabens notwendig. Die Angemessenheit der geleisteten Arbeit sowie der dabei entstandenen Kosten ergibt sich außerdem unter Beachtung der folgenden Aspekte:

- Die Umrüstung von zwei LKW auf dieselektrischen Hybridantrieb und externe Energieversorgung über einen Stromabnehmer war notwendig, um einerseits die gegenseitige Beeinflussung mehrerer Fahrzeuge an der Fahrleitung zu testen und um andererseits während Kontroll-, Wartungs- und Reparaturpausen eines Fahrzeugs, den zeitlich beschränkten Testbetrieb mit dem anderen Fahrzeug fortsetzen zu können.
- Der ca. 10-wöchige Testbetrieb war für die Integration aller Teilsysteme in das Gesamtsystem sowie die anschließende Erprobung des Systems in möglichst vielen Verkehrssituationen und Umgebungsbedingungen notwendig und bildete die Basis für die abschließende Einschätzung der technischen Machbarkeit der umgesetzten Vorzugslösung.
- Noch vor den Material- und Reisekosten bildeten die Personalkosten für die Arbeiten zur Auslegung der Versuchsanlage und für die Studien zum Gesamtsystem den größten Kostenblock, waren jedoch unverzichtbar, um einerseits eine funktionstüchtige und sichere Versuchsanlage zu gewährleisten und um andererseits die Untersuchungen für das Zielsystem vorzunehmen, die Grundlage der Beurteilung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit sind.
- Durch das ausgeprägte Kostenbewusstsein des ENUBA-Projektteams konnte das gesamte Projekt mit nur ca. 90 % der ursprünglich geplanten Kosten umgesetzt werden, ohne dass wesentliche Abstriche an Qualität und Quantität der erreichten Projektziele zu verzeichnen sind.

Die Angemessenheit der geleisteten Arbeit folgt aus der Erfüllung der im Projektantrag beschriebenen Aufgaben und Tätigkeiten sowie der Erreichung der definierten Projektziele. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Machbarkeit des gewählten Vorzugssystems zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs erfolgreich nachgewiesen wurde. Damit hat Siemens den Grundstein für dieses neuartige Verkehrskonzept gelegt und beabsichtigt, die Entwicklungsarbeiten in einem Folgeprojekt fortzusetzen, mit dem Ziel, die wirtschaftlichen und technischen sowie die energie- und klimapolitischen Potenziale der Elektromobilität auch für den Wirtschaftsverkehr weiter zu erschließen.

### 4.2 Ergebnisverwertung entsprechend Verwertungsplan

Beim Nutzen, d. h. 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**

Die Logistik-Branche sowie die durch ihre Dienstleistungen versorgten Industrien sind einerseits auch in Zukunft auf den kostengünstigen Betrieb von Fern-LKW angewiesen. Auf der anderen Seite werden die Betriebskosten durch die Verknappung des Rohstoffes Erdöl weiterhin stetig steigen. Darüber hinaus werden zunehmend ökologisch berechnete Forderungen an die Spediteure hinsichtlich der Umweltverträglichkeit des LKW-Verkehrs gestellt, deren Erfüllung sich in Anbetracht des prognostizierten hohen Anstiegs des Güterfernverkehrs insgesamt jedoch schwierig gestalten wird.

Der elektrische Betrieb von Fern-LKW an einer Oberleitung bietet hier die Möglichkeit, sowohl die Betriebskosten als auch die Umweltbelastung zu reduzieren. Dass ein solcher Betrieb sowohl aus Sicht der Spediteure als auch aus Betreibersicht unter bestimmten Annahmen ökologisch sinnvoll ist, wird in Abschnitt 3.3. dargelegt. Gleichzeitig wird aber ebenso deutlich, dass der wirtschaftliche Erfolg der Implementierung eines solchen Systems maßgeblich von den politischen Rahmenbedingungen (z. B. Finanzierungsmodellen, Implementierungszeitraum), den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (z. B. Preisentwicklungen von Erdöl und Strom) und dem technologischen Fortschritt (z. B. Effizienzsteigerungen, Produktionskostensenkungen) abhängig ist. So wird die alleinige Reduzierung der Betriebskosten das Konzept für Spediteure unter Umständen erst mittelfristig attraktiv machen.

Die am Projekt beteiligten Experten der Siemens AG sehen auf Basis der bereits mit Bussen und Spezialfahrzeugen gemachten Erfahrungen in den Bereichen dieselektrischer Hybridantriebe und an der Schnittstelle Fahrleitung – Stromabnehmer sowie unter Berücksichtigung der in diesem Projekt erzielten Ergebnisse und gesammelten Erkenntnisse weiteres Potential hinsichtlich der Systemoptimierung und damit der Steigerung der Wirtschaftlichkeit.

Die Siemens AG beabsichtigt daher, die in diesem Projekt errichtete Versuchsanlage einschließlich der beiden LKW für die weitere 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 notwendigen Voraussetzungen z. B. hinsichtlich Technologiereife, ordnungspolitischem Rahmen (Gesetze, Richtlinien, Verordnungen) und Nutzerakzeptanz für einen ersten Feldversuch im öffentlichen Raum zu schaffen.

Gestärkt durch die eigenen Erkenntnisse sowie durch Beobachtungen, dass andere europäische Länder wie z. B. Schweden, Frankreich und Österreich ebenso wie die USA und Japan an ähnlichen Elektromobilitätslösungen für den Wirtschaftsverkehr forschen, hält die Siemens AG unverändert an dem Vorhaben fest, Produkte für den elektrifizierten Straßengüterverkehr zu entwickeln und damit einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung dieses wirtschaftlich sinnvollen und umweltverträglichen Verkehrssystems zu leisten.

### **Technische Erfolgsaussichten und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit**

Aus technischer Sicht bestanden die Hauptaufgaben dieses Forschungsprojektes in der Analyse und Bewertung verschiedener Konzepte zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs, der Definition eines Vorzugssystems sowie in der Untersuchung und Erprobung dieses Vorzugssystems mit der Zielstellung, die technische Machbarkeit des Gesamtsystems nachzuweisen.

Wie bereits eingangs dargestellt, verfügt die Siemens AG über umfangreiche Erfahrungen im Bereich des seriellen Hybridantriebs beim Einsatz in Stadtbussen. Die das Teilsystem „Antrieb“ betreffende Hauptaufgabe bestand somit darin, das bekannte technische Antriebskonzept auf den LKW zu übertragen und alle notwendigen Anpassentwicklungen für die externe Einspeisung über eine Fahrleitung durchzuführen. Demgegenüber musste beim Teilsystem „Stromabnehmer“ technisches Neuland betreten werden, auch wenn bei der Siemens AG über mehr als 100 Jahre Erfahrungen mit der Ausrüstung von Bahn- bzw. Spezialfahrzeugen mit Stromabnehmern gesammelt wurden. Bei diesem Teilsystem war die vollständige Neuentwicklung eines intelligenten mechatronischen Systems notwendig, das mit Hilfe geeigneter Sensorik, Aktorik und Steuerungstechnik in der Lage ist, trotz der spezifischen horizontalen und vertikalen Bewegungseinflüsse eine sichere und zuverlässige Stromübertragung von der Fahrleitung zum LKW zu gewährleisten.

Die Aufgabenschwerpunkte für die Teilsysteme „Fahrleitung“ und „Stromversorgung“ lagen in der technischen Integration bestehender Komponenten und Anlagenteile in die veränderte Anwendungsumgebung mit dem neuartigen Verbraucher „Nutzfahrzeug“.

Es wurden alle im Projektantrag sowie im Aufstockungsantrag beschriebenen Arbeitspakete im Rahmen dieses Forschungsprojektes erfolgreich bearbeitet. Terminverzögerungen konnten weitestgehend kompensiert werden, sodass das Testprogramm zur Erprobung der entwickelten und errichteten Systeme sowohl auf dem Versuchsgelände als auch auf öffentlichen Straßen umgesetzt werden konnte.

Die erzielten Ergebnisse dürfen als sehr zufriedenstellend bewertet werden und übertreffen in einigen Aspekten die Erwartungen erheblich. Dies betrifft insbesondere die untypisch kurze Entwicklungszeit für den Stromabnehmer sowie dessen betrieblich erprobtes, zuverlässiges Verhalten und sein gutes Zusammenspiel mit der Fahrleitung. Die Machbarkeit des gewählten Vorzugssystems zur Elektrifizierung des schweren Wirtschaftsverkehrs wurde nachgewiesen. Damit hat die Siemens AG den technologischen Grundstein für dieses neuartige Verkehrssystem gelegt.

Bis zu einem ersten Feldversuch im öffentlichen Raum sind allerdings noch einige technische Fragen zu beantworten. Eine umfassende Betrachtung möglicher Fehler und Risiken im Zuge der Implementierung des Systems ENUBA auf öffentlichen Straßen wurde als Gesamtsystem-FMEA (en.: „Failure Mode and Effects Analysis“, dt.: „Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse“) durchgeführt. Wesentliche Fragestellungen darin betreffen z. B. die Personen- und Anlagensicherheit, die Interaktionen aller Verkehrsteilnehmer sowie das Zusammenwirken mit bereits bestehenden Infrastruktureinrichtungen.

Um diese und weitere technische Themen detaillierter zu untersuchen und auch zur Beibehaltung des im internationalen Vergleich bedeutsamen Wissens- und Erfahrungsvorsprungs beabsichtigt die Siemens AG die Fortsetzung der Arbeiten in einem Anschlussprojekt. Im Rahmen dieses Anschlussprojekts wird ein erster Feldversuch im öffentlichen Raum vorbereitet, um den Einstieg in die post-fossile Mobilität auch bei Fern-LKW zu ermöglichen.

### 4.3 Geplante Veröffentlichungen

Unter Beachtung der mit dem Fördermittelgeber vereinbarten Vertraulichkeit des Forschungsvorhabens erfolgten noch keine umfassenden Veröffentlichungen zum Projekt und zu den im Detail erzielten Ergebnissen. Dies liegt u. a. auch maßgeblich an der Zielrichtung des Vorhabens, zunächst die technische und wirtschaftliche Machbarkeit des Konzepts „Elektrifizierter Schwerlastverkehr“ nachzuweisen. Erst nach Erbringung dieses Nachweises können nach Projektabschluss in weiterhin enger Abstimmung mit dem Fördermittelgeber Veröffentlichungen geplant werden.

Sinnvolle Plattformen und Medien zur Vorstellung des Projekts sind dabei u. a.:

- Veranstaltungen mit zukünftigen Schlüsselakteuren, wie Nutzfahrzeugherstellern, Logistikunternehmern oder Energieversorgern
- „Going-Public-Event“ auf der Versuchsanlage
- Präsentation der Fahrzeuge und des Konzepts auf geeigneten Fachmessen
- Präsentation des Konzepts auf Konferenzen der Verkehrs- und Logistikbranche, z. B. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden, Greifswalder Forum Umwelt und Verkehr, Nationale Konferenz Güterverkehr und Logistik
- Fachveröffentlichungen in Zeitschriften der Verkehrs- und Logistikbranche, z. B. eb – Elektrische Bahnen, Internationales Verkehrswesen, Der Güterverkehr
- Veröffentlichungen für allgemeine Interessenten, z. B. VDI-Nachrichten oder renommierte Tages- und Wirtschaftspresse

Zur einheitlichen Darstellung des Projekts und der Fahrzeuge und zur Vorbereitung späterer Veröffentlichungen wurde projektbegleitend und ebenfalls in enger Abstimmung mit dem Fördermittelgeber ein Marketing- und Kommunikationskonzept erarbeitet. Dies beinhaltet neben der Einordnung in die Dachmarke „Link green“ der Siemens AG die Aufbereitung der Vorteile des Konzepts und die attraktive Außengestaltung der Fahrzeuge. Abbildung 4-1 (S. 54) zeigt die Fahrzeuge nach Aufbringung der Werbefolien.

**Abbildung 4-1 Beklebte LKW mit Werbefolien „Ich bin ein Stromer!“**

#### 4.4 Angemeldete Schutzrechte und Erfindungen

Zu Beginn des Projektes wurde für das Gesamtsystem unter Beteiligung von Vertretern aller Teilsysteme ein sog. Patent-Workshop durchgeführt, in dem von den Teilnehmern innovative Ideen und Lösungsansätze zu den unterschiedlichen Teilbereichen der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs sowie zum technologischen Umfeld formuliert wurden. Ziel dieses Workshops war die systematische Entwicklung und Absicherung von Schutzrechten durch geeignete Ideen und Erfindungen. Zusätzlich zu den aus dem Workshop heraus generierten Erfindungsmeldungen wurden durch die Projektmitarbeiter projektbegleitend weitere Erfindungsmeldungen formuliert. Die von den Projektmitarbeitern eingereichten Erfindungsmeldungen wurden durch die zuständigen Stellen der Siemens AG dahingehend geprüft, ob sie für das Ergebnis bedeutsam sind oder sein können und somit eine Schutzrechts- oder Patentanmeldung notwendig bzw. sinnvoll ist.

Für sechs der von der Siemens AG in Anspruch genommenen Erfindungen wurde eine Patentanmeldung ausgearbeitet und diese unter Angabe des Förderkennzeichens beim Deutschen Patentamt in München eingereicht. Vier dieser sechs Patentanmeldungen haben Lösungen bzw. Lösungsansätze zum Inhalt, die das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Stromabnehmersystem bzw. entsprechende Alternativkonzepte betreffen. Die beiden anderen Schutzrechtsanmeldungen beschäftigen sich inhaltlich mit dem Thema Energiebedarfsoptimierung.

Aus schutzrechtlichen Gründen kann an dieser Stelle auf die konkreten Inhalte dieser Patentanmeldungen nicht eingegangen werden.

Neben den im Rahmen der Entwicklungsarbeit entstandenen Erfindungen und Patenten ist bei Forschungsprojekten mit hohem Neuigkeitsgrad auch die Klärung der technisch-rechtlichen Umfelds hinsichtlich bereits bestehender Patente und Geschmacksmuster Dritter wesentlich. Dazu wurde zu Beginn des Projekts eine umfangreiche Patentrecherche initiiert und kontinuierlich fortgeführt.

Zusammenfassend kann hinsichtlich der Schutzrechte festgestellt werden, dass für die im Rahmen des Projekts entwickelten und als bedeutsam und schützenswert eingeschätzten Entwicklungen Patentanmeldungen eingereicht wurden und gleichzeitig bei der Entwicklung der technischen Vorzugslösung nicht auf patentierte Lösungen Dritter zurückgegriffen werden musste.

## 5 Weiterentwicklung durch Dritte

Durch die Bandbreite der im Rahmen des Projekts ENUBA direkt und indirekt berührten Technikbereiche und Anwendungsfelder muss an dieser Stelle eine Einschränkung auf solche Entwicklungen Dritter erfolgen, die technisch ähnliche Ansätze für einen elektrischen Straßengüterverkehr verfolgen und die ggf. bei den nächsten Projektphasen von ENUBA zu berücksichtigen sind.

### 5.1 Vorstudie für elektrischen LKW-Verkehr auf Autobahnen in Schweden

Ende April 2010 wurde durch die international tätige Ingenieur- und Planungsgesellschaft Grontmij eine Studie zur technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit eines elektrischen LKW-Verkehrs auf den Magistralen des schwedischen Autobahnnetzes veröffentlicht [54].

Schwerpunkte der Studie waren [54]:

- Analyse der verkehrlichen Ausgangssituation und Ableitung des Handlungsbedarfs
- Untersuchung der technischen Randbedingungen (z. B. Durchfahrthöhen, Struktur des Autobahnnetzes)
- Diskussion und Entwicklung technischer Einzellösungen für Fahrleitung, Stromabnehmer und Antriebssystem
- Betrachtungen zur Rentabilität und zum Energiebedarf für das System

Im Ergebnis der Studie wurde als Vorzugslösung ein System mit kontinuierlicher Energiezuführung über eine oberhalb der rechten Fahrspur installierte Fahrleitung empfohlen. Um die Fahrleitung nutzen zu können, müssen die Fahrzeuge über Stromabnehmer verfügen. Da Kreuzungsbereiche und niedrige Brücken nicht elektrifizierbar sind, müssen die Fahrzeuge dieselektrische Hybrid-LKW mit Energiespeichern sein. In kurzen oberleitungsfreien Abschnitten wird mit Energie aus dem Speicher gefahren, bei längeren Abschnitten steht der Dieselmotor als Antriebskomponente zur Verfügung [54]. Abbildung 5-1 zeigt den Systemaufbau bis zum Stromabnehmer.

**Abbildung 5-1** Prinzipskizze für elektrischen Autobahn-LKW-Verkehr [54]

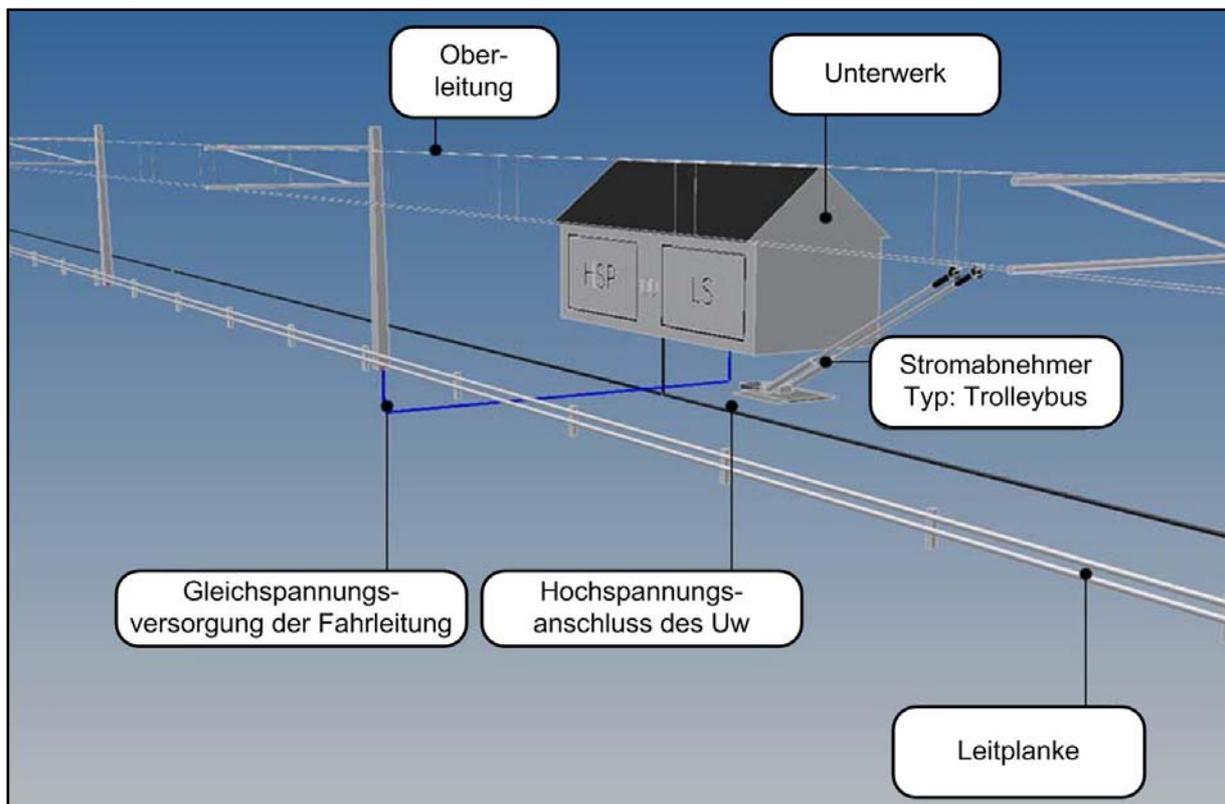


Abbildung 5-2 Vergleich möglicher Stromabnehmerkonzepte [54]

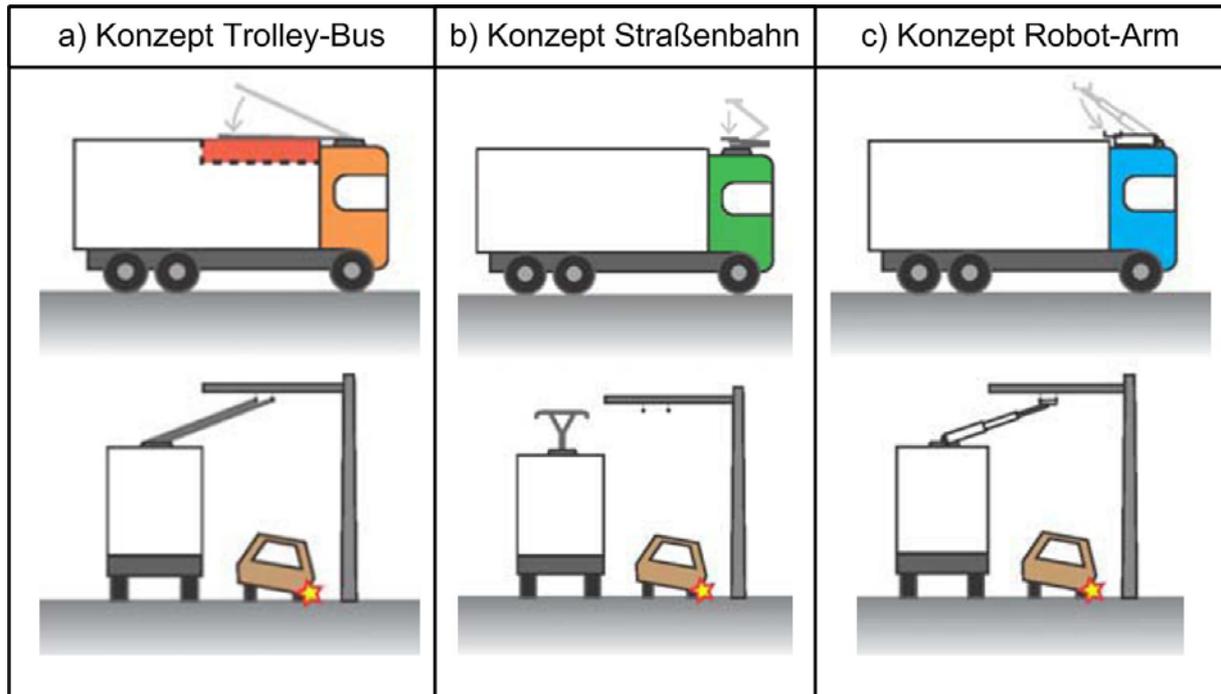


Abbildung 5-2 stellt die drei untersuchten Stromabnehmertypen sowie deren Eignung zum Verlassen der Fahrspur dar. Das Konzept „b) Straßenbahn“ kommt dem im Projekt ENUBA entwickelten am nächsten. Das Trolley-Bus-Konzept stellt richtigerweise die Einschränkungen im Laderaum dar. Das Konzept „Robot-Arm“ wirkt mechanisch sehr aufwändig.

Wie bereits dargestellt war die Ingenieurgesellschaft Grontmij Treiber dieser Studie. Konkretere Planungsschritte und ggf. praktische Umsetzungen sind bisher nicht erfolgt, da dazu vermutlich ein Industriepartner fehlt. Aufbauend auf den Ergebnissen werden in der Studie folgende Schritte, jedoch ohne feste Terminierung, vorgeschlagen [54]:

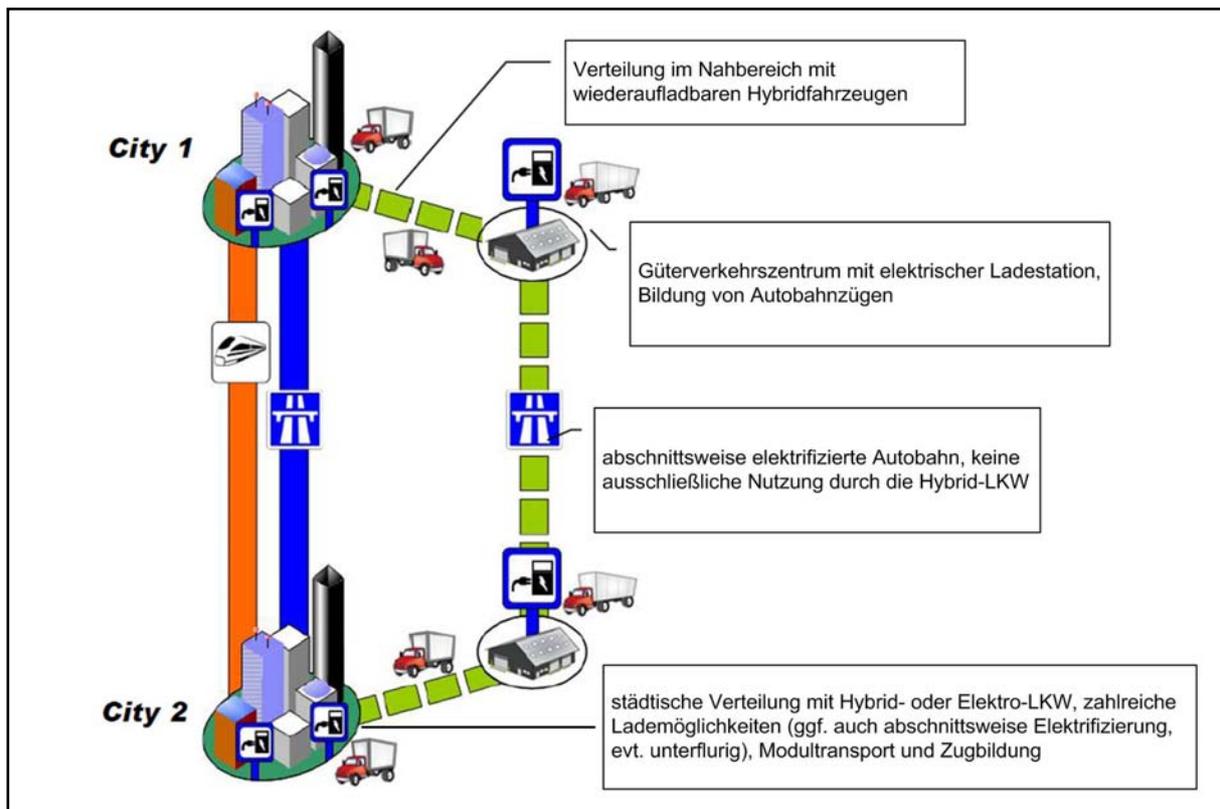
- öffentlichkeitswirksame Verbreitung des Konzepts mittels dieser Studie, weiteren Präsentationsmedien und Videoanimationen
- Entwicklung von Fahrzeug-Prototypen
- Weiterentwicklung der technischen Schnittstelle Fahrleitung – Stromabnehmer zur Ableitung einer optimalen Lösung

Zu einzelnen Aspekten der Studie sind im Internet Videos verfügbar [55]. Ob diese direkt mit den Untersuchungen und Aktivitäten von Grontmij in Verbindung stehen ist unklar.

## 5.2 Konzept für einen innovativen Straßengüterverkehr in Frankreich

In der Umsetzung des Forschungsprogramms Innofret der Europäischen Kommission wurde in Frankreich unter Federführung der CEA - Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (dt. Forschungszentrum für atomare und alternative Energieerzeugung) das interdisziplinäre Projekt MAREL – MArchandises sur Routes ELectriques (dt. Warenverkehr auf elektrischen Straßen) entwickelt. Dieses sieht ein mehrstufiges Logistikkonzept unter Nutzung verschiedener Fahrzeuggrößen und Antriebssysteme vor [56]. Einen Überblick gibt Abbildung 5-3.

**Abbildung 5-3** Prinzipskizze integriertes Logistikkonzept MAREL [56]



Wesentliche Bestandteile des in Abbildung 5-3 skizzierten Konzepts sind:

- Innerstädtischer Verteilungsverkehr mit nachladbaren Hybrid-LKW oder über Fahrleitungen (Oberleitungen oder unterflur) angetriebene LKW, wobei ggf. modulare Einheiten für einzelne Abschnitte kombiniert werden.
- Regionaler Sammel- und Verteilungsverkehr mit Hybrid-LKW begrenzter Reichweite, die in den Städten oder in Güterverkehrszentren (GVZ) nachgeladen werden.
- Überregionaler Verkehr auf Autobahnen mit besonderen Hybrid-LKW, die abschnittsweise während der Fahrt über eine Fahrleitung nachgeladen werden können. In der Ausprägung als Zugmaschine sollen die Fahrzeuge bis zu 3 Wechselbrücken o. ä. führen können.

Anders als das im Projekt ENUBA entwickelte Vorzugssystem wird bei MAREL massiv auf Batterien auch im Straßengüterverkehr gesetzt. Maßgeblich für diese Entscheidung ist wahrscheinlich auch die umfangreiche Beteiligung von Forschungsinstituten mit dem Schwerpunkt Material- und Batterieforschung an dem Forschungsverbund MAREL.

In der nächsten Projektphase von MAREL soll bis 2013 die vorgeschlagene Langstreckenlösung präzisiert und auf einem kurzen Abschnitt demonstriert werden. Mittelfristig sollen ab 2015 Flottenversuche mit Hybrid-LKW im Verteilungsverkehr stattfinden und ab 2020 längere elektrifizierte Autobahnabschnitte zur Verfügung stehen. Für diese Projekt- und Forschungsphasen werden aktuell Industriepartner gesucht [56].

### 5.3 Wachstumsmarkt Hafenhinterlandverkehr am Beispiel L. A.

Die Anbindung von Güterhäfen an das Landesinnere z. B. an und über Güterverteilzentren ist weltweit mit einer Reihe von spezifischen Herausforderungen verknüpft. Über Güterhäfen werden gigantische Waren- und Gütermengen transportiert, die zudem oftmals einem signifikanten Wachstum unterliegen. So liegt das prognostizierte Wachstum des Seehafenhinterlandverkehrs für Container bei deutschen Häfen im Zeitraum von 2004 bis 2025 bei 6,5 % jährlich [51]. Für Nichtcontainerverkehr wird im selben Zeitraum ein jährliches Wachstum von 3 % erwartet [51]. Dies erzeugt neben den erheblichen logistischen Herausforderungen vor allem auch enorme ökologische Belastungen für die Umwelt.

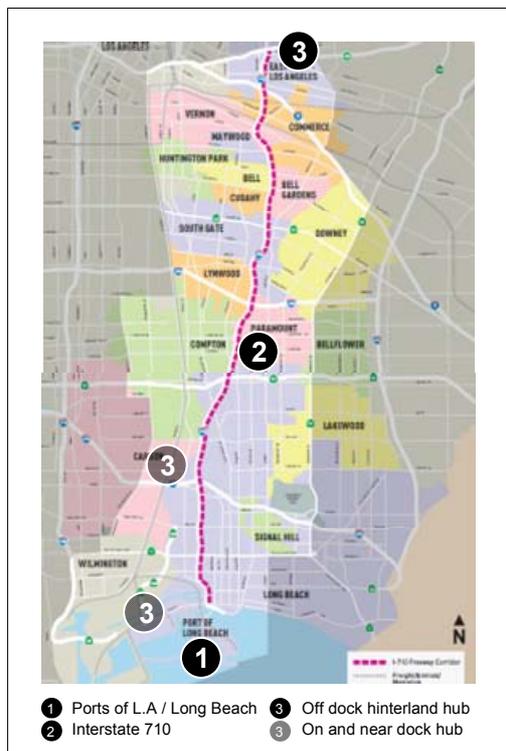


Abbildung 5-4 Verlauf Interstate 710 bei L. A.

Über den Hafenkomplex in Los Angeles und Long Beach in Kalifornien gehen beispielsweise ca. 40 % aller Importe der USA ein. Die Interstate 710 (I-710) verbindet den Hafenkomplex mit der Innenstadt bzw. mit Schienengüterverteilzentren, die sich in verschiedenen Entfernungen befinden. Die Container werden entweder direkt an den Häfen, d. h. „On dock“ per Schiene verteilt oder zunächst per LKW zum „Near dock“- oder zum „Off dock“-Verteilzentrum transportiert. Die I-710 ist dabei die Hauptverkehrsader für Güter aus den Häfen an die Schienengüterverteilzentren und weist eine sehr hohe Streckenbelastung von täglich ca. 20 000 LKW auf [52]. Es wird erwartet, dass sich der Güterverkehr bis zum Jahr 2035 auf ca. 43 Mio. TEU mehr als verdoppelt (2007: ca. 16 Mio. TEU) [53]. Das damit in Zusammenhang stehende Wachstum auf der I-710 wird bis zum Jahr 2035 85 % betragen. Mit der derzeit verfügbaren Verkehrsinfrastruktur ist dieser Anstieg nicht zu bewältigen.

Entlang des Korridors sind zahlreiche Industrieunternehmen als auch Wohngebiete mit Kindergärten und Schulen angesiedelt. Bei den Anwohnern im Korridor wurden vermehrt Erkrankungen der Atemwege als auch Krebs diagnostiziert, was vielfach auf die Emissionen im Korridor zurückgeführt wird. Zur Lösung dieser Herausforderungen wurden Projekte initiiert, welche die gesamten Bedingungen im Korridor der I-710 verbessern sollen (Emissionen, Streckenbelastung, Sicherheit etc.). In diesem Rahmen finden Untersuchungen statt mit zum Teil sehr umfangreichen, auch baulichen Maßnahmen.

Ein wesentlicher Stakeholder ist in diesem Zusammenhang die Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority (L. A. Metro) als lokaler Verkehrsplaner und -betreiber sowie Vertreter des „Zero Emission Freight Corridor“-Programms. Die 4-spurige Erweiterung der Straßenkapazität für den LKW-Verkehr direkt neben der I-710 in Verbindung mit ökologisch nachhaltigen Antriebskonzepten gilt als eine der denkbaren Lösungen im Rahmen dieses Programms. Dabei wird auch die in diesem Bericht beschriebene Elektrifizierung von (Teil-)Autobahnstrecken in Erwägung gezogen und geprüft. Vor diesem Hintergrund wäre die Elektrifizierung ausschließlich für die Erweiterung der I-710 vorzunehmen, wobei die technischen Rahmenbedingungen für ein oberleitungsbasiertes Antriebskonzept bereits frühzeitig bei der Planung der zusätzlichen Fahrspuren berücksichtigt werden könnten.

Die technischen Voraussetzungen sowie die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Elektrifizierung z. B. auf die Port-Trucker in L. A. sind im Rahmen von weiteren Gesprächen zu bewerten bzw. zu verifizieren. Insbesondere alternative Finanzierungsmodelle z. B. variable Gebührenmodelle sind dabei zu betrachten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Unter Beachtung der zu Beginn formulierten Ziele und des kurzen Entwicklungs-, Umsetzungs- und Erprobungszeitraums kann zusammenfassend das Forschungsvorhaben ENUBA als erfolgreich eingeschätzt werden. Dies ergibt sich insbesondere aus folgenden Aspekten:

- Der aus einer Variantenuntersuchung als Vorzugslösung umgesetzte Stromabnehmer des Typ „Invers Trolley“ konnte trotz der für solche Entwicklungsprojekte typischen, noch während der Fertigung nötigen Anpassentwicklungen termingerecht geliefert werden und zeichnete sich bereits nach kurzer Inbetriebsetzungsphase als funktionsgerecht und zuverlässig aus.
- Ebenso wurde das serielle, dieselektrische Hybridantriebssystem erstmals auf einem Serien-LKW implementiert und gleichzeitig für den Betrieb mit einem Stromabnehmer an einer Fahrleitung ertüchtigt. Die prinzipielle Eignung des Antriebssystems einschließlich der Fahrleitungspeisung wurde in LKW-typischen Lastprofilen nachgewiesen.
- Nach nur 9-monatiger Planungsphase konnte bereits mit der Errichtung der Versuchsstrecke begonnen und diese nach nur 3-monatiger Bauzeit fertig gestellt werden. Davor mussten in kurzer Zeit die Genehmigungsschritte Bauordnungsverfahren und Verhandlung eines Netzananschlussvertrags mit Genehmigung der Rückspeisung erfolgreich abgeschlossen werden.
- Anders als für eine zunächst temporär konzipierte Versuchsanlage notwendig wurden beim Design der Fahrleitungsmaste und des Unterwerks optisch ansprechende Lösungen gesucht und umgesetzt, die Maßstäbe für ein modernes Industriedesign für Verkehrssysteme setzen.
- Auch wenn noch nicht alle gewonnenen Messdaten detailliert ausgewertet wurden, ist bereits jetzt ablesbar, dass der rein elektrische Betrieb von LKW mittels Stromabnehmer, Fahrleitung und Unterwerken möglich ist. Weiterhin können durch den gemeinsamen Betrieb an der Fahrleitung bremsende LKW durch die Rückgewinnung elektrischer Energie gerade beschleunigende LKW mit Energie versorgen und bei fehlenden Verbrauchern im gleichen Abschnitt sogar elektrische Energie ins Netz des Stromversorgers zurückspeisen.
- Zusätzlich sind in Studien zum Gesamtsystem die positiven ökologischen Auswirkungen bewertet, die wirtschaftliche Machbarkeit nachgewiesen und wichtige technische Grundlagen hinsichtlich einer späteren Implementierung erarbeitet worden.
- Das Projekt wurde ohne nennenswerte bzw. die Ergebnisqualität beeinträchtigende Terminverzögerungen sowie unter Einhaltung des geplanten Budgets umgesetzt.

Unter Beachtung der bereits erzielten Ergebnisse sind die nachstehend aufgeführten Punkte im Rahmen eines Folgeprojekts als vordringlich zu betrachten, um dem hier vorgeschlagenen Vorzugssystem abschließend die umfassende technische Eignung zu attestieren:

- Nachweis der Allwettertauglichkeit des Systems auch bei Schnee und Eis, was durch die terminliche Lage der Messkampagnen bisher nicht möglich war.
- Ausrüstung eines LKW mit einem für jeden Betriebsmodus optimierten Antriebssystem, sodass der elektrische LKW im rein elektrischen und im dieselektrischen Betrieb bei allen Geschwindigkeiten und Ladezuständen konkurrenzfähig zu reinen Diesel-LKW ist.

Zusammen mit weiteren Themen sind diese Aspekte Gegenstand des geplanten und in der Antragsformulierung befindlichen Projekts „ENUBA 2“.

## 7 Anhang

### 7.1 Abkürzungen

AC	en.: alternating current, dt.: Wechselstrom
AfA	Absetzungen für Abnutzungen (handelsrechtlich Abschreibungen)
APS	fr.: augmentation par le sol, dt.: Versorgung über den Boden
AN	Antriebssystem (incl. Fahrzeug)
BAB	Bundesautobahn
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bauen und Stadtentwicklung
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft
cRSP	en.: Common Remote Service Platform; dt.: gemeinsame Fernwartungsumgebung
DC	en.: direct current, dt.: Gleichstrom
DE	dieselelektrisch
ENUBA	Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen
FBS	Fernbereichssensorik
FL	Fahrleitungssystem
FMEA	en.: Failure Mode and Effects Analysis, dt.: Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse
GPL	Gesamtprojektleitung
GUI	en.: graphical user interface, dt.: Grafische Bedienoberfläche
HW	Hardware
IBS	Inbetriebsetzung
IF	Interface
IKEM	Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. V.
IPS	en.: inductive power supply, dt.: Induktive Energieübertragung
MoRoS	en.: Modem Router Switch, dt.: Modem-Router-Schalter
NBS	Nahbereichssensorik
NVC	en.: non-visible contact line, dt.: unsichtbare Fahrleitung
PEM	permanentenerregte Synchronmaschine
PLM	Product Lifecycle Management
PM	Projektmanagement
PSP	Projektstrukturplan
QS	Qualitätssicherung
rpm	en.: revolutions per minute, de.: Umdrehungen pro Minute
SA	Stromabnehmersystem

SV	Stromversorgungssystem
SW	Software
TEU	en.: Twenty-foot Equivalent Unit, standardisierte Containereinheit à 20 Fuß Länge
Tphpd	en.: Trucks per hour per direction, dt.: LKW pro Stunde und Richtung
TPL	Teilprojektleiter
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UW	Unterwerk
VPM	en.: Voltage Protection Module, dt.: Spannungsschutzmodul
VQS, 4QS	Vierquadrantensteller

## 7.2 Quellen

- [1] Prograns [Hrsg.]: Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050. Studie im Auftrag des BMVBS, Basel, 2007. (unveröffentlichter Bericht)
- [2] Siemens AG, I MO CT IMS: ENUBA - Vorhabensbeschreibung der Projektpartner Siemens Mobility und Siemens Drives Technologies. Erlangen / Nürnberg, 2010 (unveröffentlichte Antragsunterlagen)
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.]: Bekanntmachung über die Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität. Berlin, 2009
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [Hrsg.]: Mobilität und Verkehrstechnologien - Das 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung. Berlin, 2008
- [5] Die Bundesregierung [Hrsg.]: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin, 2009
- [6] Die Bundesregierung: Regierungsprogramm Elektromobilität der Bundesregierung. Hrsg.: BMWI, BMVBS, BMU, BMBF. Berlin, 2011
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [Hrsg.]: Mobilität und Verkehr - Nachhaltigkeit, Sicherheit und Wettbewerbsfähigkeit durch intelligenten Verkehr. Berlin, 2007
- [8] Bundesministerium für Bildung und Forschung [Hrsg.]: Positionspapier - Alternative Antriebe und Hybridkonzepte. Bonn / Berlin 2004
- [9] Berger, T.: Noch mehr Kupfer und Gold in der Lausitz. In: Sächsische Zeitung, Online-Ausgabe, Dresden, 08.04.2010
- [10] Biesenack, H. u. a.: Energieversorgung elektrischer Bahnen. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2006
- [11] Bendel, H. u. a.: Die elektrische Lokomotive - Aufbau, Funktion, Neue Technik. transpress Verlag GmbH, Berlin, 1994
- [12] Breitling, W.: Entwicklung der elektrischen Zugförderung weltweit. In: eb - Elektrische Bahnen, Jg. 101 (2003) H. 6, S. 249ff
- [13] Siemens AG, I MO CT [Hrsg.]: Truck Trolley System, Reliable Energy Source for Dump Trucks in Mining. Erlangen, 2010 (Produktinformation)
- [14] Siemens AG [Hrsg.]: Systemauslegung mit Sitras Sidytrac, Simulation der AC- und DC-Bahnstromversorgung. Siemens AG - Transportation Systems, Erlangen, 2007
- [15] Siemens AG, I MO CT ED TP [Hrsg.]: Systemauslegung mit Sitras Sidytrac, Simulation der AC- und DC-Bahnstromversorgung, Referenzliste. Erlangen, 2011
- [16] Siemens AG [Hrsg.]: Sitras TCI, Wechselrichter für die DC-Bahnstromversorgung, Produktinformation. Siemens AG - I MO TK, Erlangen, 2008
- [17] Siemens AG [Hrsg.]: Sitras SES/MES, Energiespeicher in der DC-Bahnstromversorgung, Produktinformation. Siemens AG - I MO TK, Erlangen, 2008

- [18] Kießling, F. u. a.: Fahrleitungen elektrischer Bahnen - Planung, Berechnung, Ausführung. Teubner Verlag, Stuttgart/ Leipzig, 1998
- [19] Kiebler, R.: Oberleitungsbusse - Duo-Busse - Dieselsebusse, Die Geschichte des Städtischen Verkehrsbetriebes in Esslingen am Neckar. Online unter: <http://www.obus-es.de/index.htm> (abgerufen am 18.10.2011)
- [20] Groneck, C.: Neue Straßenbahnen in Frankreich. EK-Verlag, Freiburg, 2003
- [21] Hüniger, P.: Entwicklung eines Messsystems zur Beurteilung der Qualität der Stromabnahme eines Stromabnehmers. HTW Berlin, Fachbereich 1 – ET, Berlin, 2011, Bachelorarbeit
- [22] Faiveley Transport LEKOV a. s. [Hrsg.]: Stromabnehmer für Obusse. Produktinformation, Blovice, 2011. Online unter: [www.lekov.cz](http://www.lekov.cz) (abgerufen am 18.10.2011)
- [23] Siemens AG, I MO MC: ENUBA, Ökonomische und ökologische Bewertung - Abschlussbericht. München, 2011 (interner Bericht)
- [24] IKEM: Rechtliche Aspekte der Elektrifizierung von Autobahnen als E-Highway, Tangierte Rechtsbereiche national – Identifikation rechtlicher Barrieren. IKEM – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität, Berlin, 2011 (interner Bericht)
- [25] Siemens AG, I MO CT ED TP SE: FMEA-Workshop zum Gesamtsystem, Teil 2, Abschlussdokumentation. Erlangen, 2011 (interner Bericht)
- [26] Siemens AG, I MO CT ED TP SE: ENUBA – Berechnung und Messung von Wirkungsgrad und Energiebedarf im System. Erlangen, 2011 (interner Bericht)
- [27] Siemens AG, I MO CT ED TP SE: Systemvergleich zur Ableitung des Vorzugssystems. Erlangen, 2011 (interner Bericht)
- [28] BASt – Bundesanstalt für Straßenwesen [Hrsg.]: Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen, Auswertung 2009. Online unter: [www.bast.de](http://www.bast.de)
- [29] Siemens AG, I MO CT ED TP SE: DC-Studien für das Zielsystem. Erlangen, 2011 (interner Bericht)
- [30] Lehmann, M.: Grundlagen und Anforderungen an die Teilsysteme elektrischer Bahnen bei Nennspannungen über 25 kV AC und 3 kV DC. Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, 2009, Dissertation
- [31] Siemens AG, I MO CT ED CL: Standardkonzept Fahrleitung für das Zielsystem. Erlangen, 2011 (interner Bericht)
- [32] Siemens AG, I MO CT ED TP SE: Integriertes Schutzkonzept für das Zielsystem. Erlangen, 2011 (interner Bericht)
- [33] Siemens AG, I MO RS IS MS: Konzept für die Instandhaltung der elektrischen Infrastruktur der elektrifizierten Autobahn. Erlangen, 2011 (interner Bericht)
- [34] Siemens AG, I MO IL SPA: ENUBA – Abschlussbericht Teilsystem Stromabnehmer. Berlin, 2011 (interner Bericht)
- [35] Siemens AG – Industry Sector – Drive Technologies (Hrsg.): Wie machen wir Stadtbusse sauberer und komfortabler? Produktbeschreibung ELFA-Antriebs- System, Siemens AG I DT. Nürnberg, 2011.
- [36] Siemens AG, I MO IL SPA: ENUBA – Pflichtenheft für das Teilsystem Stromabnehmer. Berlin, 2010 (interner Bericht)
- [37] Siemens AG, I DT LD HD: ENUBA – Optimierung des Hybridantriebssystems für das Zielsystem. Nürnberg, 2011 (interner Bericht)
- [38] Siemens AG, I MO CT ITS: ENUBA - Untersuchung der Kommunikation zwischen LKW und Leitsystem. Wien, 2011 (interner Bericht)
- [39] Siemens AG, I MO CT ITS BP SE: ENUBA - Konzeption zusätzlicher Streckenausüstung - Integration BAB. München, 2011 (interner Bericht)
- [40] Siemens AG, I MO CT ED CL: ENUBA – Stromabnehmermonitoring für das Zielsystem. Erlangen, 2011 (interner Bericht)
- [41] Siemens AG, I MO CT ED TP SE: ENUBA – Konzept für Energiemessung und -abrechnung. Erlangen, 2011 (interner Bericht)

- [42] FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [Hrsg.]: RAA – Richtlinien für die Anlage von Autobahnen. Köln, 2008
- [43] Siemens AG, I MO CT ED TP SE: ENUBA – Testkonzept für Systemintegration und Performance-Tests. Erlangen, 2011 (interner Bericht)
- [44] Beitelschmidt, M.; Stier, J.: Vorbeifahrtmessungen mit einem Mikrofon-Array für die Siemens AG. Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Festkörpermechanik, Dresden, 2011 (unveröffentlichter Messbericht)
- [45] Google [Hrsg.]: Höhenprofil Kassel – Fulda. Erstellt durch Nutzung der Software GoogleEarth ®. Download unter: <http://www.google.de/intl/de/earth/index.html>
- [46] Kraftfahrt-Bundesamt – KBA [Hrsg.]: Verkehrsaufkommen 2010, Eigenschaften der Fahrt. Flensburg/Dresden, 2010, S. 4f
- [47] Shell Deutschland Oil GmbH [Hrsg.]: Shell Lkw-Studie, Fakten, Trends und Perspektiven im Straßen-güterverkehr bis 2030. Hamburg, 2010, S. 55
- [48] Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung - BGL e.V.: Modellrechnungen für Spediteure. Online unter: <http://www.bgl-ev.de/web/home/index.htm>
- [49] ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg [Hrsg.]: Energie, Emissionen und Verkehr bis 2030. Studie im Auftrag des BMU und BMVBS zu. Heidelberg, 2010
- [50] Intraplan Consult GmbH [Hrsg.]: Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr Mittelfristprognose Winter 2009/10, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, FE-Nr. 96.0927/2009. München, 2010
- [51] BMVBS [Hrsg.]: Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtung, Seeverkehrsprognose. Planco Consulting GmbH, Berlin, 2007
- [52] Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority (L. A. Metro): Technical Memorandum – Multimodel Review, Final Report. Los Angeles, 2009
- [53] Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority (L. A. Metro): Technical Memorandum – I-710 EIR/EIS Initial Feasibility Analysis, Final Report. Los Angeles, 2009
- [54] Grontmij AB [Hrsg.]: Elektrische Straßen – Elektrifizierung von schweren Straßentransporten, Vorstudie. Stockholm, 2010
- [55] Elvag [Hrsg.]: Online: <http://www.elvag.com/>. Video: <http://www.youtube.com/watch?v=yPQwjolnYDI>
- [56] Siemens SAS I MO France: Marel Presentation on CEA point of view, Präsentation am 20.04.2011. Erlangen, 2011 (interner Präsentation)
- [57] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.]: Bekanntmachung über die Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität. Berlin, 2011

# 8 Anlagen

## 8.1 Luftbild der Querwindbahn auf den Flächen des Driving Centers Groß Dölln

