

Verbundprojekt: Schnellladesysteme für Elektrobusse im ÖPNV (SEB)

Teilvorhaben: EDDA-Bus Lademanagement und Systemintegration

Abschlussbericht des Fraunhofer IVI

Förderkennzeichen:

16N11612

Bearbeitungszeitraum:

01.02.2012 – 30.04.2015

Klausner, Sven (Fraunhofer IVI)

Dresden, 15.07.2015



Gefördert durch



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Inhalt

1	Einleitung	3
1.1	Wissenschaftlich-technische Ausgangssituation	3
1.2	Rahmenbedingungen	4
1.3	Ziele des Projekts	5
1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.5	Aufgabenschwerpunkte des Fraunhofer IVI	9
1.6	Zusammenarbeit	9
2	Ergebnisse	10
2.1	Fahrzeugumbau	10
2.1.1	Identifikation kritischer Parameter	10
2.1.2	Umbaumaßnahmen	11
2.2	Adaption und Entwicklung von Fahrzeugkomponenten	13
2.2.1	Elektrische Traktionsausrüstung	13
2.2.2	LiOn Batteriesystem mit Klimatisierung	15
2.2.3	Hochstromkontaktsystem	16
2.2.4	Automatisierungslösung für den Nachladevorgang	19
2.3	Umsetzung Schnellladung Fahrzeugenergiespeicher	20
2.3.1	Infrastruktur am Ladepunkt	20
2.3.2	Aufbau der Ladestationen	21
2.3.3	Sicherheits- und Steuerungskonzept	23
2.3.4	Ablauf des Ladeprozesses	24
2.4	Praxiserprobung	26
2.4.1	Randbedingungen des Fahrzeugeinsatzes	26
2.4.2	Fahrverhalten	27
2.4.3	Energiebedarf	27
2.4.4	Ergebnisse der Fahrerbefragung	28
2.4.5	1. Phase der Praxiserprobung	29
2.4.6	2. Phase der Praxiserprobung	31
2.4.7	3. Phase der Praxiserprobung	32
2.5	Zusammenfassung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	32
2.6	Ausblick	33
3	Nutzen und Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse	34
4	Fortschritt an anderer Stelle	36
5	interne Berichte	39
6	Veröffentlichung der Ergebnisse	40
	Abbildungen	41

1 Einleitung

1.1 Wissenschaftlich-technische Ausgangssituation

Die Idee für einen vollelektrischen Busbetrieb nach dem DockingPrinzip entstand am Fraunhofer IVI bereits vor mehr als 10 Jahren. Mit DockingPrinzip wird eine neue Art der Energieversorgung elektrisch betriebener Fahrzeuge des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) bezeichnet. Hierbei befindet sich ein Energiespeicher als alleinige Energieressource im Fahrzeug. Der Energiespeicher nimmt aus wegseitig punktuell installierten Schnellladeeinrichtungen (Dockingstationen) Energie auf und gibt diese zum Antrieb des Fahrzeuges und zur Versorgung elektrischer Hilfsbetriebe bedarfsgerecht ab. Bild 1 zeigt einen ersten prototypischen Ansatz des Fraunhofer IVI aus dem Jahr 2006. Dabei kam als Energiespeicher im Fahrzeug ein Schwungradspeicher zum Einsatz. Die Energie wurde über eine im Bordstein eingebaute Kontaktstelle aus der wegseitigen Dockingstation in das Fahrzeug übertragen. Der Systemansatz der Dockingstation entsprach bereits der später im Text beschriebenen Pulsladestation.

Bild 1:
Prototypischer Ansatz des Docking-Prinzip (2006)



In den vergangenen Jahren wurden innerhalb verschiedener Projekte die Weiterentwicklungen von Schlüsselkomponenten maßgeblich begleitet. So war das Projekt „Das DockingPrinzip – Klimaschutz durch emissionsreduzierte Nahverkehrssysteme“ eines der im Rahmen des Forschungsprogramms „KlimaZwei“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Vorhaben, welches sich mit einem neuartigen Konzept für oberleitungsfreien Betrieb von Straßenbahnen mit diskontinuierlicher Energieversorgung – dem Docking-Prinzip – beschäftigt hat.

Für die seriennahe Umsetzung und Erprobung bildete sich innerhalb des SEB-Teilprojektes EDDA-Bus ein Konsortium, bestehend aus Industrie- und Ver-

kehrunternehmen sowie dem Fraunhofer IVI. Als Ergebnis gemeinsamer Projektarbeit wurde das DockingPrinzip in den Linienbusbetrieb der Dresdner Verkehrsbetriebe AG (DVB) integriert und ab dem 03.11.2014 für sechs Monate dessen Anwendung im Fahrgastbetrieb auf verschiedenen Teilstücken der Dresdner Buslinie 61 und 85 demonstriert.

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns waren in ersten Projekten Lösungskonzepte und Systemarchitekturen erarbeitet, prototypisch realisiert und teilweise in den Testbetrieb überführt worden. Dabei wurden mögliche Speichertechnologien (Doppelschichtkondensator- und Hochleistungsbatterie-Energiespeicher) in verschiedenen Konfigurationen und verschiedener Hersteller sowohl auf Bussen, als auch auf Straßenbahnen eingesetzt.

Nachteil dieser Konfigurationen war es, dass sich der Einsatz der vergleichsweise teuren Speichertechnik allein durch die Energieeinsparung aus rückgespeicherter Bremsenergie nicht amortisiert. Vor allem Hochleistungsbatterie-Energiespeicher zeigten außerdem teilweise erhebliche Einschränkungen hinsichtlich der technischen Beherrschbarkeit und der Lebensdauer im ÖPNV-Traktionseinsatz.

Wegseitige Systeme zum Aufladen eines fahrzeugseitigen Energiespeichers während der Fahrt oder zum Betrieb eines Fahrzeuges ohne Verwendung von Oberleitungen waren zum Zeitpunkt des Projektbeginns nur unter Nutzung von im Fahrweg eingebrachten Strom- bzw. Kontaktschienen bekannt. Ein Hauptmangel dieser Verfahren ist, dass zumindest auf einem hohen Anteil der Fahrtstrecke die Infrastruktur für diese Leitungen ausgelegt werden muss. Umleitungen von einzelnen Teilstrecken oder einfache, kurzfristige Linienänderungen sind nur mit einem Mehraufwand an baulichen Maßnahmen oder dem Einsatz von Batterien möglich. Ferner wurden als problematisch die Anfälligkeit dieser Systeme gegen Verunreinigungen, kleinere technische Ausfälle und die Gefährdung bei stehendem Wasser gesehen. Vor allem diese im Vergleich zu konventionellen Oberleitungen resultierende geringe Verfügbarkeit hat einer breiten Anwendung der im Übrigen auch recht kostenintensiven Technologien bisher enge Grenzen gesetzt.

1.2 Rahmenbedingungen

Bei einem Fahrzeug, das mit einem fahrzeugseitigen Energiespeicher ausgerüstet ist, soll das gesamte Potential der Bremsenergie genutzt werden. Dadurch kann der erforderliche Traktionsenergiebedarf auf etwa 60% reduziert werden, da bis zu 40% dieser Energie aus dem fahrzeugseitigen Energiespeicher entnommen werden können, welcher in Bremsphasen und während Bergabfahrten durch Einspeicherung dabei anfallender Bremsenergie nachgeladen wird.

Das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI verfügte zu Projektbeginn über einen seriellen Hybridbus mit Dieselgenerator und Superkondensatorspeicher, welcher als Basisfahrzeug für das Projekt diente und innerhalb dessen zu einem Batteriebus mit Schnellladeeinrichtung umgebaut wurde.

Auf dem Gebiet stationärer Schnelladeeinrichtungen konnte das Institut zu Projektbeginn auf einen langjährigen Erfahrungsgewinn theoretischer Untersuchungen und prototypischer Umsetzung zurück greifen. Eine erste technische Realisierung ging dabei von einem Netzbezug kleiner Leistung aus, über den ein in der Station integrierter Zwischenspeicher über einige Minuten vorgeladen werden konnte. Die Energieübertragung zu den jeweiligen Fahrzeugenergiespeichersystemen erfolgte dann über ein erstes vereinfachtes Kontaktierungssystem mit hoher Leistung aus dem Zwischenspeicher der Ladestation.

Weiterhin beschäftigt sich das Fraunhofer IVI seit mehreren Jahren mit der Entwicklung und Erprobung von Strategien zur Steuerung und Regelung von Energieflüssen eines elektrisch betriebenen Fahrzeuges zur Erfüllung unterschiedlicher Betriebsziele (Oberbegriff Energiemanagement). Für vielfältige Untersuchungen steht dabei ein breit gefächertes Spektrum von am Fraunhofer IVI entwickelten Simulationswerkzeugen zur Verfügung.

Für eine enge Orientierung an den Bedürfnissen der Betreiber öffentlicher Verkehrssysteme sorgen die guten Beziehungen des Fraunhofer IVI zu der Dresdner Verkehrsbetriebe AG (DVB) und dem Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV). Beide Institutionen standen zur Verfügung, die Entwicklungen projektbegleitend zu betreuen und die hierfür notwendige Datenerfassung unter Praxisbedingungen zu realisieren.

1.3 Ziele des Projekts

Das Ziel des Projektverbundes ist die Realisierung eines neuen Antriebskonzeptes das es erlaubt, Fahrzeuge des öffentlichen Nahverkehrs:

- lokal emissionsfrei,
- hoch effizient und
- mit geringen Aufwendungen für die wegseitige Infrastruktur

zu betreiben. Damit soll das DockingPrinzip zu folgenden klima- und gesundheitsrelevanten Problemstellungen einen deutlichen Beitrag leisten können:

- Reduzierung des Primärenergiebedarfes von Fahrzeugantrieben in öffentlichen Verkehrsmitteln um 30%,
- Reduzierung der klima- und gesundheitsrelevanten Emissionen des öffentlichen Verkehrs um 30% bei gleicher Verkehrsleistung,
- Reduktion der Lebenszykluskosten emissionsfreier Antriebstechnik gegenüber oberleitungsgebundenem ÖPNV,
- langfristige Reduzierung verkehrsbedingter Schadstoffimmissionen vor allem in den kritischen Belastungsräumen urbaner Ballungszentren und damit
- Erhöhung des Attraktivitätspotentials öffentlicher Verkehrsträger als saubere, effiziente und geräuscharme Transportsysteme.

Das Konzept des Dockingprinzips wird von vier Komponenten gebildet:

- dem fahrzeugseitigen Energiespeicher, der in die Fahrzeugumgebung eingebunden ist,
- der wegseitigen Schnellladestation, die Energie mit ausreichend hoher Leistung abgeben kann,
- dem Energieübertragungssystem, das Energiespeicher und Ladestation während des Dockingvorgangs elektrisch verbindet und
- dem Energiemanagement, das als übergreifendes System die Energieflüsse zum und auf dem Fahrzeug steuert.

Resultierend aus den Erfahrungen und Kompetenzen der Projektpartner wurden in der Antragsphase wissenschaftliche und technische Aufgabenstellungen formuliert, die sich aus den identifizierten technologischen „Engpässen“ im Gesamtkonzept ergeben. Es war Ziel des Projektes, die komplette technische Umsetzung im ÖPNV zu demonstrieren und die zur Verfügung stehenden Ressourcen gezielt für die Lösung kritischer Teilaufgaben mit bisher nicht befriedigendem Entwicklungsstand einzusetzen.

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele waren:

- Auswahl geeigneter Energiespeichertechnologien für Busse im öffentlichen Nahverkehr anhand detaillierter Analysen der zu erfüllenden Anforderungen.
- Erarbeitung der technischen Randbedingungen für die Einbindung von Energiespeicherkomponenten in Fahrzeugkonzepte von Bussen.
- Entwicklung eines Energiemanagements zur Steuerung des Energiespeichers im Hinblick auf Effizienz, Verfügbarkeit und Lademanagement.
- Entwicklung und Aufbau eines Mechanismus zur Energieübertragung als Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Schnellladestation. Dieser soll flexibel in unterschiedliche Verkehrssysteme und Straßensituationen eingepasst werden können, wobei Sicherheit und Zuverlässigkeit, d. h. der Nachweis der Zulassungsfähigkeit, in den verschiedenen Umgebungsbedingungen im Vordergrund stehen.
- Optimierung der Leistungselektronik von Energiespeicher und Schnellladestation zur schnellen Energieübertragung auf das Fahrzeug. Nur so können kurze Übertragungszeiten gesichert werden. Es wird als wesentliche Voraussetzung für eine breite Akzeptanz des Dockingprinzips bei Fahrzeugbetreibern betrachtet, dass durch das Laden des Energiespeichers sich die bisher realisierten Umlaufzeiten nicht verlängern.
- Entwicklung und Realisierung eines Steuersystems für die Schnellladestationen zur Regelung eines sicheren und automatischen Ladeprozesses. Das beinhaltet keine zusätzlichen Handlungen des Fahrzeugführers beim Anfahren von Haltestellen, automatische galvanische Kontaktierung bei Initialisierung des Ladevorgangs beziehungsweise Trennung der Kontaktvorrichtung bei kontrolliertem Abbruch oder im Fehlerfall.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsprojekt EDDA-Bus gliederte sich in vier große Arbeitspakete (AP), an denen die Projektpartner jeweils mehr oder weniger stark beteiligt waren. Eine Übersicht der Arbeitspakete und deren hauptsächlichlichen Inhalte gibt Bild 2.

Das AP 3.1 „Technologieentwicklung“ bildete die Grundlage der Systementwicklung für das Hochstromkontaktsystem und die Schnelladeeinrichtung (Dockingstation). Die Projektpartner stützten sich dabei vornehmlich auf Ergebnisse der Grundlagenermittlung, beispielsweise Simulationsergebnisse zum erwarteten Energiebedarf des Fahrzeuges, Kennwerte verfügbarer Energiespeichertechnologie, aus dem Betriebsablauf von Linienbussen des ÖPNV resultierende Anforderungen und die Kenntnis verfügbarer Bauraum- und Gewichtsreserven des Projektfahrzeuges. In die Entwürfe der neu zu entwickelnden Komponenten wurden selbstverständlich darüber hinaus die Kenntnisstände der Industriepartner auf ihrem jeweiligen Technologiefeld einbezogen.

Die Entwicklung des LiOn-Batteriesystems mit Klimatisierung war innerhalb des Gesamtvorhabens SEB-Strom buchhalterisch dem Parallelprojekt „E-ÖPNV“ zugeordnet. Als gemeinsame Entscheidungen der am Entscheidungsprozeß beteiligten Projektpartner des Gesamtverbundes erfolgten die Auswahl des eingesetzten Einzelzelltyps sowie Festlegung sinnvoller Modulgrößen und Arbeitsspannungsbereiche. Eine spezielle Anpassung von Teilbatteriekonfigurationen war für das Projekt EDDA-Bus durch die Verfügbarkeit entsprechender Bauraum- und Gewichtsreserven auf dem Dach des Projektfahrzeuges nicht erforderlich.

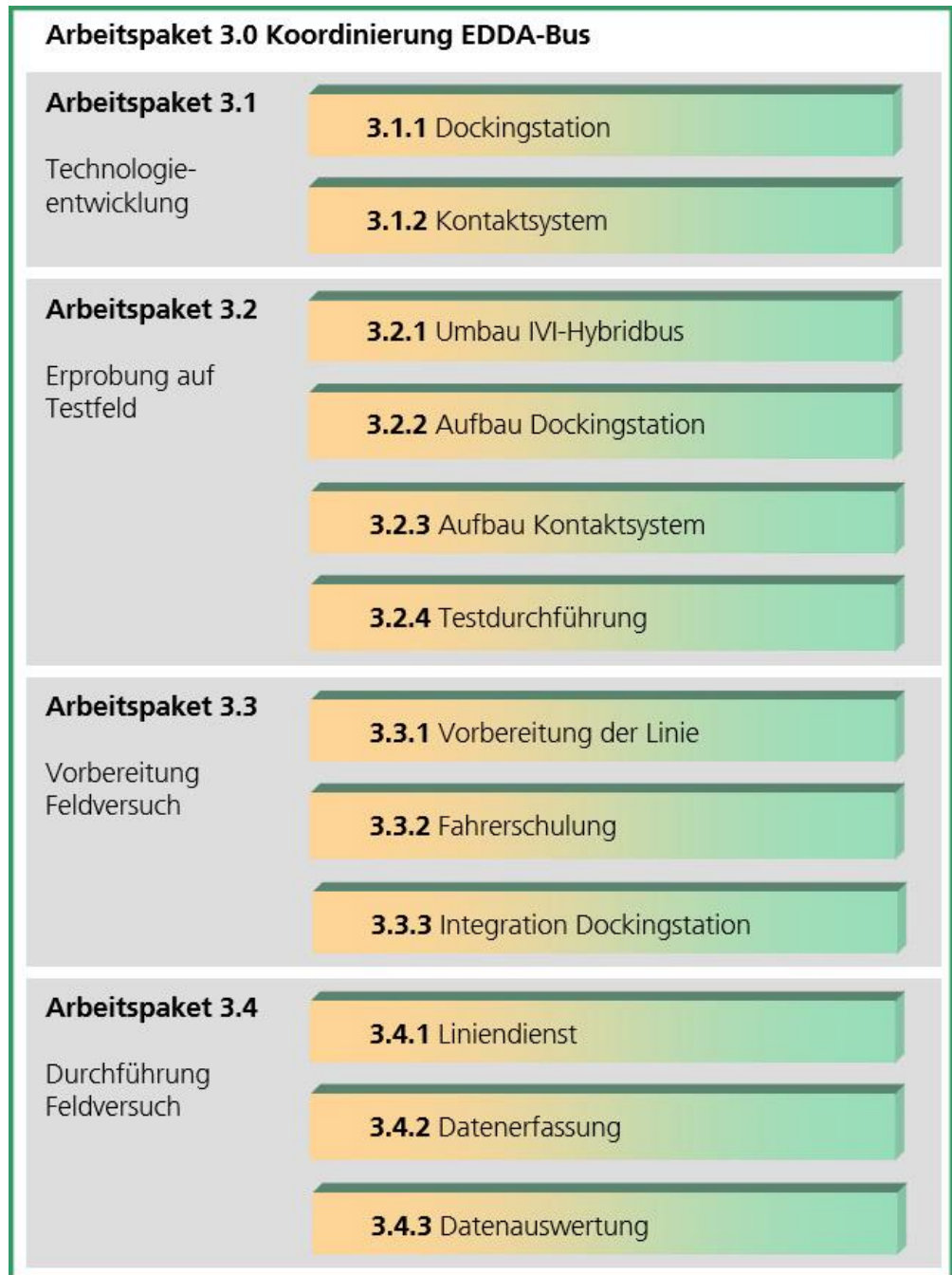
Im AP 3.2 „Erprobung auf Testfeld“ erfolgte durch iterative Prozesse die Umsetzung der einzelnen Systementwürfe zu den angestrebten technischen Lösungen. Anschließende InbetriebnahmeprozEDUREN und zulassungsrelevante Abnahmeverfahren sicherten und dokumentierten den erreichten Entwicklungsstand. Folgende wesentliche Systemlösungen wurde innerhalb des Projektes EDDA-Bus erreicht:

Die Arbeiten des AP 3.3 „Vorbereitung Feldversuch“ beinhalteten alle notwendigen Maßnahmen zur Überführung der entwickelten Systemlösungen in die Praxiserprobung. Als organisatorische Maßnahmen erfolgten hier die Festlegung von Linienführung und Fahrplan für den Testbetrieb sowie die sicherheitstechnische und fachliche Unterweisung des ausgewählten Fahrpersonals.

Innerhalb eines Planungs-, Ausschreibungs- und Ausführungsverfahrens wurden die notwendigen infrastrukturellen Maßnahmen zur Ausgestaltung des Ladepunktes am Betriebshof Gruna realisiert. Zentrale Bestandteile waren dabei die mechanische und elektrotechnische Integration der Ladeeinrichtungen, die Installation des wegseitigen Teils des Hochstromkontaktsystems sowie die Schaffung einer Haltestellenähnlichen Anfahrsituation durch Ausführung entsprechender Hochbauarbeiten.

Die Schwerpunkte im AP 3.4 „Durchführung Feldversuch“ lagen in der Absicherung einer hohen Verfügbarkeit des Gesamtsystems im Linienfahrgastbetrieb sowie in der messtechnischen Begleitung der Praxiserprobung.

Bild 2:
Struktur der Arbeits-
pakete



Die Projektkoordination, Einbindung von Partnern und Unterauftragnehmern sowie alle damit verbundenen weiteren Aufgaben waren Bestandteil von AP 3.0 „Koordinierung EDDA-Bus“.

Die ursprünglich von Februar 2012 bis Januar 2015 vorgesehene Projektlaufzeit wurde auf Wunsch der Projektpartner Fraunhofer IVI und Dresdner Verkehrsbetriebe AG im Sinne des Ausbaus der Kompetenz beider Unternehmen auf dem Gebiet des vollelektrischen Busbetriebs mit Schnellladung mit Genehmigung des Projektträgers um drei Monate bis April 2015 kostenneutral verlängert.

1.5 Aufgabenschwerpunkte des Fraunhofer IVI

Das Fraunhofer IVI war in allen Arbeitspaketen mit unterschiedlicher Intensität involviert. Neben der organisatorischen Steuerung der Projektaktivitäten (AP 3.0) übernahm das Fraunhofer IVI ebenfalls die Koordination des Gesamtvorhabens mit den Teilprojekten „E-ÖPNV“ und „EDDA-Bus“.

Nach intensiver Beteiligung an der Grundlagenermittlung [1] in Form von Simulationsarbeiten [2], strukturmechanischen Untersuchungen sowie Aufbereitung und Zusammenstellung der Ergebnisse vorgelagerter Projektaktivitäten für die Erstellung der Spezifikationen [3,4,5] und Durchführung des Technologieentwicklung (AP 3.1) lag der Schwerpunkt der Projektarbeiten der beteiligten Institutsmitarbeiter auf dem Umbau des Projektfahrzeuges (AP 3.2). Hier beinhalteten die Arbeiten vornehmlich die Ableitung und Umsetzung notwendiger Konstruktionsarbeiten, den Entwurf der Automatisierungslösung für den Schnellladevorgang des Fahrzeugenergiespeichersystems sowie die iterative Bearbeitung der parallelen Zulassungsprozeduren für das Fahrzeug und das Gesamtsystem.

In den Planungsprozeß des Ladepunktes zur Vorbereitung des Feldversuches (AP 3.3) war das Fraunhofer IVI intensiv einbezogen und übernahm die sicherheitstechnische Unterweisung des ausgewählten Fahrpersonals

Die ingenieurtechnische Begleitung sowie wartungs- und instandhaltungstechnische Absicherung des Linieneinsatzes, die Integration von notwendiger Messtechnik in das Projektfahrzeug und die nachgelagerte Datenerfassung und -auswertung (AP 3.4) lagen in der Federführung des Institutes.

1.6 Zusammenarbeit

Das Verbundprojekt wurde in Zusammenarbeit von

- Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme Dresden IVI
- HOPPECKE Advanced Battery Technology GmbH
- M&P Motion Control und Power Electronics GmbH
- Schunk Bahn- und Industrietechnik GmbH
- Vossloh Kiepe GmbH
- Dresdner Verkehrsbetriebe (DVB) AG

bearbeitet. Der vorliegende Abschlussbericht beinhaltet im Wesentlichen den Projektanteil des Fraunhofer IVI. Für einen Überblick von Gesamtlösungen werden notwendigerweise wesentliche Entwicklungsleistungen der Projektpartner ebenfalls dargestellt.

In Abhängigkeit von den inhaltlichen Schwerpunkten, die jeder Projektpartner zu bewältigen hatte, erfolgte die konkrete Sacharbeit in Projektgruppen der Partner. Die Kohärenz der Arbeiten und der Ergebnisse wurde durch regelmäßige Treffen der Projektpartner und planmäßige Meilensteintreffen in Gegenwart des zuständigen Bearbeiters des Projektträgers sichergestellt.

2 Ergebnisse

Durch den Projektverbund wurde ein neuartiges elektrisches Antriebskonzept – das DockingPrinzip – an einem vollelektrischen Stadtlinienbus realisiert.

Hierfür erarbeitete die HOPPECKE Advanced Battery Technology GmbH den Aufbau eines elektrischen Energiespeichersystems sowie dessen Integration in das Projektfahrzeug.

Das Fraunhofer IVI und Schunk Bahn- und Industrietechnik GmbH entwickelten gemeinsam ein Hochstromkontaktsystem für die Schnellladung des Energiespeichers während regulärer Betriebshalte, am Fraunhofer IVI entstand eine zugehörige Automatisierungslösung.

Aufbauend auf Erfahrungen vorgelagerter Projektarbeit realisierte die Firma M&P Motion Control und Power Electronics GmbH den Aufbau von zwei Ladestationen und deren mechanische, elektrotechnische und steuerungstechnische Integration am gewählten Ladepunkt in Dresden-Gruna.

Die für den Umbau zu einem Batterieelektrischen Bus mit Schnellladefunktion notwendige Anpassung elektrotechnischer und leistungselektronischer Fahrzeugkomponenten wurde durch den Projektpartner Vossloh Kiepe GmbH ausgeführt.

Die Praxiserprobung des Gesamtsystems im Fahrgastlinienbetrieb erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Praxispartner Dresdner Verkehrsbetriebe (DVB) AG.

Bei der Wiedererlangung der Betriebserlaubnis nach Fahrzeugumbau sowie der Zulassung des Gesamtsystems, einem Batterieelektrischen Bus mit Schnellladesystem und stationärer Nachladetechnologie, wurde mit dem externen Partner TÜV Rheinland zusammen gearbeitet.

Für die Erreichung der Projektziele wurden mit den nachfolgend dargestellten Ergebnissen wesentliche Teilkomponenten des innovativen Antriebskonzeptes erarbeitet oder weiterentwickelt und Studien zur Ermittlung hierfür benötigter Grundlagen durch den externen Partner VCDB durchgeführt.

2.1 Fahrzeugumbau

2.1.1 Identifikation kritischer Parameter

Die Arbeiten wurden durch den externen Partner VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH (VCDB) ausgeführt [6,7]. Ausgehend von im Einsatz befindlichen konventionellen Dieselnbussen, seriellen Hybridbussen und Obussen wurden Obergrenzen für Einbauvolumen und Einbaugewicht der elektrischen Antriebskomponenten und Speicher abgeschätzt. In den Untersuchungen wurden verschiedene Fahrzeugkonzepte bewertet und Annahmen getroffen, die für alle europäischen Bushersteller umsetzbar erscheinen.

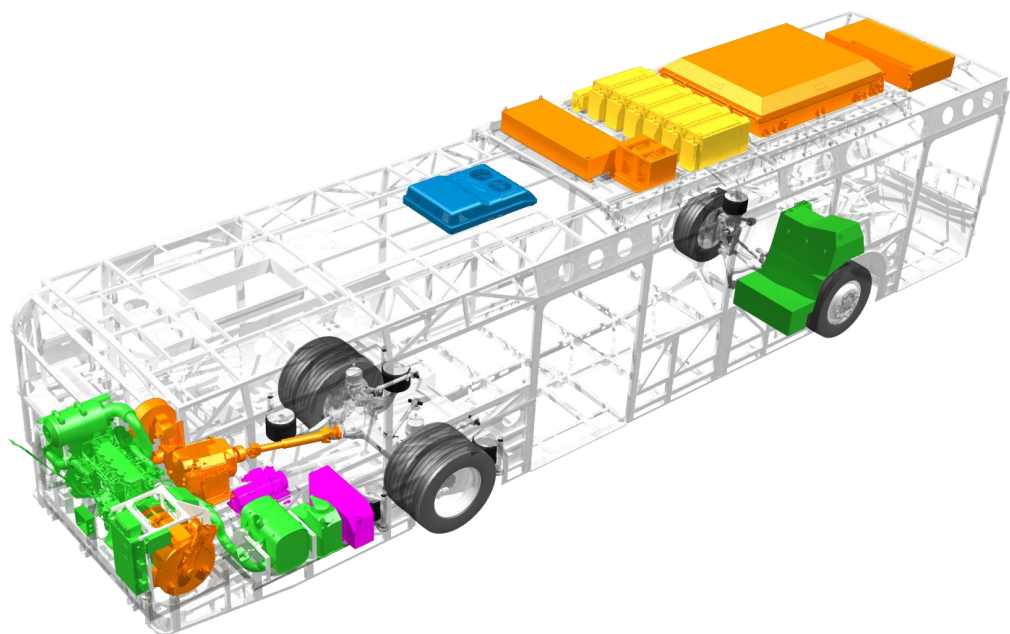
Unter der Annahme einer weiteren Leichtbauweise der Fahrzeuge wird im Ergebnis der Betrachtung ein mögliches Gewicht für Energiespeicher im Zweiachsbus von 1.500kg und im Gelenkbus von 2.500kg ermittelt. Diese Gewichtsannahme gilt nur für Fahrzeuge mit einer Standardausrüstung für den Linienverkehr. Bei zusätzlichen Einbauten wie Klimaanlage oder größerer Platzkapazität können diese Angaben nicht gehalten werden.

Die Einbauorte wurden für beide Fahrzeugtypen festgelegt. Dabei hat sich als vorzugsweiser Einbauort bei beiden Fahrzeugtypen der offene Einbauraum des Dieselmotor/Getriebe bestätigt. Hier ist es möglich, bei einem Bruttoeinbauvolumen von ca. 5m³, Komponenten mit einem Gesamtgewicht von 1,5t zu positionieren. Im Bereich der Radkästen an der Vorderachse beider Fahrzeugtypen und an Achse 2 von Gelenkbussen ist es möglich ein Bruttoeinbauvolumen zwischen ca. 0,15m³ und 0,45m³ je Radkasten zur Verfügung zu stellen. Das mögliche Gesamtgewicht für Komponenten beträgt dabei je 0,25t. Mit den ermittelten Lösungen ist es möglich, die Fahrzeuge innerhalb des maximalen zulässigen Gesamtgewichts in Betrieb zu nehmen.

2.1.2 Umbaumaßnahmen

Die Ausgangsbasis für den Aufbau des vollelektrischen Projektfahrzeuges bildete ein 12m-Hybridbus des Fraunhofer IVI (Bild 3).

Bild 3:
Hybridbus des
Fraunhofer IVI zum
Projektstart (2012)



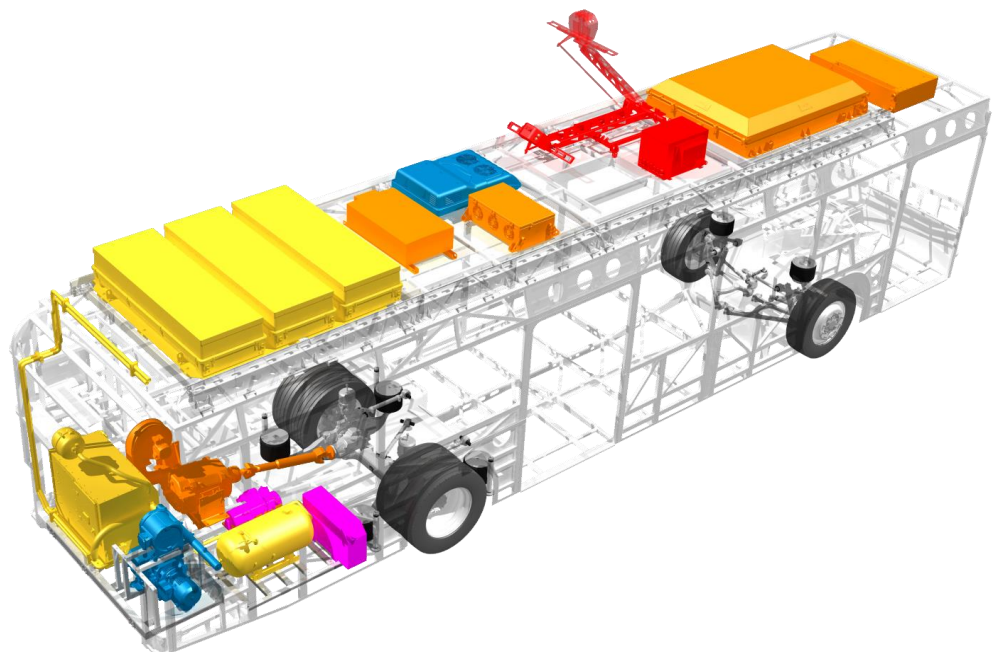
Dieses mit einem seriellen Hybridantrieb ausgestattete Fahrzeug wurde zum Elektrobus umgebaut. Der überwiegende Teil des elektrischen Antriebssystems, insbesondere die Traktionsbatterie, alle leistungselektronischen Komponenten sowie das Hochstromkontaktsystem konnten durch den Einsatz einer speziellen Dachträgerkonstruktion mittels Dachgeräteträger auf dem Fahrzeugdach angeordnet werden. Die Entwicklungsarbeiten stützten sich dabei auf die Ergebnisse vorausgegangener Projektarbeiten des Fraunhofer IVI mit der Göppel Bus GmbH.

Folgende Umbaumaßnahmen des Projektfahrzeuges wurden abgeschlossen:

- Anpassung der Dachstruktur sowie Dimensionierung und Montage eines erweiterten Dachgeräteträgers inklusive zusätzlicher Kabelkanäle,
- Konstruktion, Fertigung und Montage eines Aggregat-Trägers im Fahrzeugheck,
- Einbau des Kompressors, der Hydraulikpumpe und der Klimaanlage zur Batteriekühlung inklusive Kältespeicher und Verrohrung,
- Anpassung von Heizölleitungen (Rückbau Verbrennungsmotor),
- Montage der modifizierten Leistungselektronik inklusive Schütze und Dioden, Speicherdrossel und Bremswiderstand,
- Umpositionierung der Klimaanlage zur Fahrerarbeitsplatzklimatisierung,
- Modifikation der Kühlanlage der Leistungselektronik,
- Integration der Komponenten für die externe Nachladeeinrichtung,
- Montage der Batterien, Anschluss an die Klimaanlage zur Batteriekühlung und steuerungstechnische Integration,
- Montage des Kontaktsystems und steuerungstechnische Integration und
- Hochvoltprüfung der elektrischen Traktionsanlage und Bordnetzversorgung.

Um die geplanten Modifikationen zu dokumentieren und den Umbauaufwand abschätzen zu können, wurden zwei Übersichtsdokumente erarbeitet. Die DELTA-Liste [8] enthält Angaben zu den mechanischen Umbaumaßnahmen, das Dokument Spannungsversorgung [9] listet die elektrischen Verbraucher im Fahrzeug auf und klassifiziert diese nach Spannungsebenen. Diese Dokumente bildeten nach dem Fahrzeugumbau die Grundlage zur Anpassung der technischen Dokumentation des Fahrzeugs im finalen Ausbausezustand (Bild 4).

Bild 4:
Projektfahrzeug im
finalen Ausbause-
zustand



Nach Fertigstellung aller erforderlichen Umbaumaßnahmen erfolgte zunächst die Inbetriebnahme von Teilkomponenten wie der Traktionsbatterie, dem Traktionsantrieb, des Fahrzeugbordnetzes und Hilfsaggregaten. In einem zweiten Schritt konnte dann die Inbetriebnahme des Gesamtfahrzeuges im Fahr-, Brems- und Ladebetrieb erfolgreich durchgeführt werden. Während der Inbetriebnahme auf dem Betriebsgelände der Göppel Bus GmbH kam zur Nachladung der Traktionsbatterie das durch den Projektpartner Motion control and Power electronics GmbH (M&P) entwickelte externe Ladegerät zum Einsatz.

Als vorteilhaft für die Zulassung erwies sich der Umstand, dass in dem Projekt ein bereits als Hybrid-Bus für den öffentlichen Personentransport zugelassenes Fahrzeug umgebaut wurde, wodurch nach den Umbaumaßnahmen erheblich weniger Punkte zu prüfen waren.

Mit Wirkung vom 30.09.2014 wurde für das Fahrzeug mit vollelektrischem Antrieb die Einzelgenehmigung nach §13 EG-FGV durch den TÜV Rheinland erteilt und die durchgeführte Hauptuntersuchung gemäß §42 BOKraft bestätigt. Im Rahmen des Zulassungsverfahrens erfolgten unter anderem die Nachweisführungen hinsichtlich:

- ausreichender konstruktiver Fahrzeugfestigkeiten mittels FEM-Analyse,
- vorschriftsmäßiger Achslasten und zulässigem Gesamtgewicht
- ECE-R79 (Lenkanlagen),
- ECE-R13 (Bremsanlagen),
- ECE-R10 (Funkentstörung),
- ECE-R107 (Kraftomnibusse) und
- ECE-R100 (Elektrische Sicherheit).

Das Gutachten [10] bestätigt neben der Einhaltung aller einschlägigen Vorschriften für KOM ebenfalls den Nachweis der Elektrischen Sicherheit des Fahrzeuges und aller in diesem verbauten Komponenten nach ECE-R 100.01. Insbesondere betrifft dies nachfolgende Fahrzeugkomponenten, für welche die Hersteller gegenüber der begutachtenden Behörde in der Nachweispflicht standen:

- Elektrische Traktionsausrüstung der Vossloh Kiepe GmbH
- LiOn Batteriesystem der HOPPECKE Batterien GmbH & Co. KG
- Hochstromkontaktsystem für Schnell- und Pulsladevorgänge der Schunk Bahn- und Industrietechnik GmbH.

2.2 Adaption und Entwicklung von Fahrzeugkomponenten

2.2.1 Elektrische Traktionsausrüstung

Die Arbeiten wurden durch den Lieferanten der elektrischen Traktionsausrüstung, der Vossloh Kiepe GmbH Düsseldorf, ausgeführt, um eine anschließende Zulassung für den Liniendienst sicherzustellen.

Im Vergleich zum konventionellen Antriebssystem eines Linienbusses bestehen in einem Batteriebus erhöhte Anforderungen hinsichtlich elektrisch angetriebener Bordnetzverbraucher. Die Bereitstellung von Druckluft für die Bremsanlage und die Fahrniveauregulierung mittels eines mit Drehstrom betriebenen Rotationskolbenverdichters bei ansonsten weitgehender Verwendung von Standardkomponenten hat sich dabei als verhältnismäßig unproblematisch erwiesen.

Demgegenüber erforderte die Versorgung der Servolenkung mittels einer mit Drehstrom betriebenen Hydraulikpumpe einen Eingriff in die konventionelle Hydraulikanlage. Die permanent mit Nennfrequenz des Drehstromnetzes betriebene Förderpumpe bewirkt speziell bei Fahrzeugstillstand, dass die Hydraulikflüssigkeit mit einer wesentlich höheren Frequenz beaufschlagt wird, als dies beim Einsatz einer über einen Riemenantrieb am Dieselmotor angeordneten Hydraulikpumpe der Fall ist. In der Folge regt das pulsierende Fluid die auf konventionelle Art im Fahrzeug verlegte Hydraulikanlage schwingungstechnisch wesentlich stärker an, was zu einer im Fahrgastinnenraum als inakzeptabel empfundenen Geräuschentwicklung von 70 dB(A) bei Fahrzeugstillstand führt.

Durch Integration eines geeigneten hydraulischen Schalldämpfers (Silencer) direkt am Ausgang der Hydraulikpumpe konnte die Geräuschbelastung im Fahrgastinnenraum auf einen akzeptablen Wert von 58 dB(A) bei Fahrzeugstillstand abgesenkt werden.

Bild 5:
Lenkhydraulikpumpe
ohne Silencer (links)
und nach Integration
des Bauteils (blau)



Die zentrale Fragestellung zur Auslegung der Leistungselektronik für die Nachladung der Traktionsbatterie bestand in der Abwägung, mit welchem Konzept der hierfür notwendige leistungselektronische Aufwand minimal gestaltet werden kann. Bei Einspeisung der elektrischen Leistung am Fahrzeugzwischenkreis müssen sowohl der Ausgangswandler der Ladestation als auch in Summe die leistungselektronischen Wandler der Teilbatterien am Fahrzeugzwischenkreis den Nachladestrom tragen können. Speziell mit Blick auf die Anforderungen bei den im Projekt vorgesehenen Pulsladevorgängen mit Strömen bis 1000 A liegen diese wesentlich über denen des normalen Fahr- und Bremsbetriebes.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegung wurde entschieden, die Nachladung der Traktionsbatterien über eine Schütz- und Diodenstrecke direkt auf die Batterieklemme zu realisieren. Über die leistungselektronische Ankopplung der einzelnen Teilbatterien ist während der Nachladevorgänge gleichzeitig die Versorgung von Hilfsaggregaten mit elektrischer Energie gewährleistet. Durch das gewählte Konzept wird der leistungselektronische Anlagenaufwand minimiert, gleichzeitig bestehen erhöhte Anforderungen hinsichtlich des Kommunikati-

onsaufwandes zwischen Fahrzeug und Ladestation bei der dadurch notwendigen Stromregelung am Ausgangswandler der Ladestation. Der angeforderte Ladestrom wird anhand des aktuellen Zustandes der Traktionsbatterien hinsichtlich Klemmenspannung und Zelltemperatur durch das übergeordnete Batteriemangement errechnet und mittels nicht leitungsgebundener Kommunikation als Sollwertvorgabe an die Ladestation übermittelt.

Mit der separaten leistungselektronischen Kopplung jeder Teilbatterie ist neben der erwähnten erhöhten Redundanz hinsichtlich des Fehlerfalls einer Teilbatterie gleichzeitig die Voraussetzung eines aktiven Klemmenspannungsausgleichs der Teilbatterien im Fahr- und Bremsbetrieb gegeben. Mittels leitungsgebundener CAN-Kommunikation übermittelt das Batteriemangement die berechneten Ladezustände jeder Teilbatterie an das übergeordnete zentrale Fahrzeugsteuergerät. Die Informationen hinsichtlich der aktuellen Ladezustände werden dergestalt verarbeitet, dass die Beteiligung der einzelnen Teilbatterien am Fahr- und Bremsbetrieb sowie zur Versorgung notwendiger Hilfsbetriebe nicht zu einer unverhältnismäßig großen Abweichung der Ladezustände der Teilbatterien untereinander führt. Beim nachfolgenden Ladeprozess kann somit ein ausreichend genauer Ladespannungsausgleich aller Teilbatterien erfolgen, bevor der nächste Streckenumlauf absolviert wird.

2.2.2 LiOn Batteriesystem mit Klimatisierung

Nach einem Benchmark in Frage kommender Batteriezellen zu Projektbeginn fiel die Wahl auf das Produkt eines koreanischen Herstellers. Die Einzelzellen sind als sogenannte „coffee bags“ ausgeführt, besitzen eine Einzelzellkapazität von 46 Ah und können beim Laden dauerhaft mit einem Strom in Höhe von 230 A belastet werden. Der zulässige Entladestrom liegt technologiebedingt weit oberhalb dieses Wertes, dies besitzt jedoch für den Anwendungsfall keine Relevanz, da die im Fahrbetrieb abgerufenen Entladeströme wesentlich unter diesem Niveau liegen. Die Verschaltung der Einzelzellen zu Modulen und aus diesen zu Batterieblöcken erfolgte so, dass auf dem Fahrzeug 3 Teilbatterien mit je 46 Ah Nennkapazität und einer Nennspannung von 621 V installiert sind. Die Teilbatterien sind leistungselektronisch separat an den Fahrzeugzwischenkreis angeschlossen. Dies bedeutet im Fehlerfall einer Teilbatterie eine erhöhte Redundanz bezüglich der Aufrechterhaltung der vollen Betriebsbereitschaft des Fahrzeuges.

Insbesondere die ausreichende Rückkühlung der Energiespeicherelemente während der Nachladevorgänge bei hohen Umgebungstemperaturen stellte eine neue Herausforderung dar. Durch die Firma ATK Magdeburg wurde nach Vorgaben des Projektkonsortiums eine spezielle Klimaanlage entwickelt, welche im Vorlauf des Batteriekühlungssystems eine maximale Temperatur von 20°C garantiert. Als Besonderheit weist die ausgeführte Klimaanlage einen Kältemittelspeicher mit einem Fassungsvermögen von 100 Litern auf. Hierdurch wird dem speziellen Konzept einer punktuellen Energieversorgung nach dem Docking-Prinzip Rechnung getragen. Während des Nachladevorgangs der Traktionsbatterie am Linienendpunkt wird parallel das Kühlmedium in der Anlage mittels Energie aus der Ladestation rückgekühlt. Dies ermöglicht eine ausreichende Kühlenergiereserve für den nachfolgenden Linienumlauf, wodurch hierfür keine Energie aus der Traktionsbatterie entnommen werden muss.

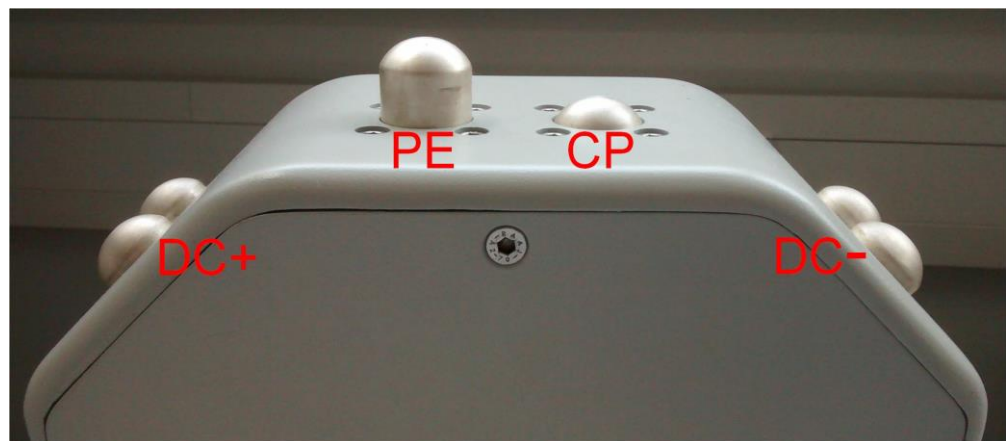
2.2.3 Hochstromkontaktsystem

Verfügbare Energieübertragungseinrichtungen im ÖPNV (Stromabnehmer mit Schleifkohlen und Oberleitung bzw. Stromschiene) sind hauptsächlich für die Energieübertragung während der Fahrt ausgelegt. Um vor allem bei Pulsladungen ausreichend viel Energie in begrenzter Zeit aufzunehmen, bedarf es hoher Ladeleistungen. Diese erfordern bei feststehenden Ladespannungen hohe Ladeströme. Als Ergebnis der Systemauslegung sind bis zu 1000 A für 15 s zu übertragen.

Kontaktreihenfolge

Hinsichtlich normativer Vorgaben war für den Entwicklungsprozess des Hochstromkontaktsystems (HKS) insbesondere die nach DIN EN 61851 geforderte mechanisch festgelegte Kontaktreihenfolge PE / DC+, DC- / CP für den Kontaktierungsvorgang und die inverse Reihenfolge bei Abbruch des Ladevorgangs umzusetzen. Bild 6 zeigt die gewählte Anordnung der einzelnen Kontaktelemente am Kontaktkopf zur Realisierung dieser Vorgabe.

Bild 6:
Ausbildung der einzelnen Kontaktelemente zur Einhaltung der geforderten Kontaktreihenfolge



Kontaktqualität

Da bei Stillstand des Fahrzeuges keine Relativbewegung zwischen den Kontaktpartnern vorhanden ist, können hohe Ströme örtliche Überhitzungen und Schädigung der Kontaktpartner verursachen. Diesem Umstand war bei der Entwicklung eines Hochstromkontaktsystems (HKS) durch Vorhaltung einer ausreichend großen Anpresskraft oder/und Kontaktfläche Rechnung zu tragen.

Nach abgeschlossener Vordimensionierung und Designfindung für den Kontaktkopf (fahrzeugseitig) und Kontakthaube (wegseitig) beauftragte SBI das Fraunhofer IVI mit der messtechnischen Untersuchung der erreichten Kontaktqualität. Hierfür wurde unter Laborbedingungen die Kontaktierung hinsichtlich der Kontaktkraft realitätsnah nachgebildet und die Temperaturentwicklung als Reaktion auf die durch eine Laborstromquelle aufgebrachte Strombelastung in allen Leistungskontakten messtechnisch überwacht.

Bild 7:
zeitlicher Verlauf der
Temperatur in den
vier Kontaktbolzen
bei Dauerbelastung
(Schnellladung)

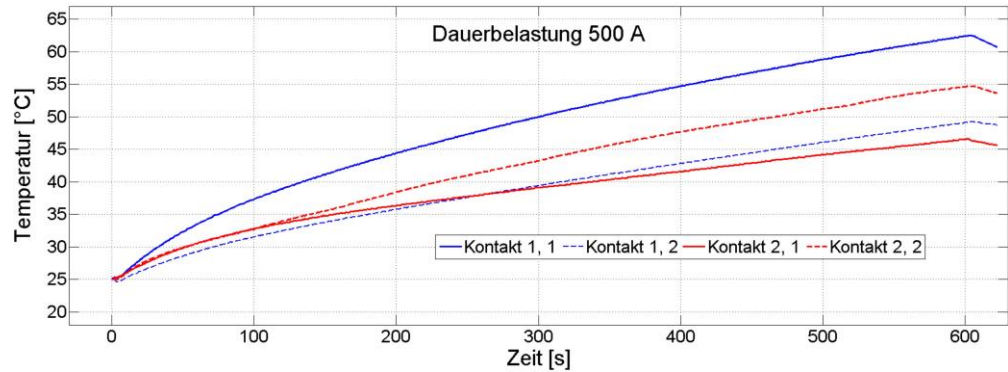
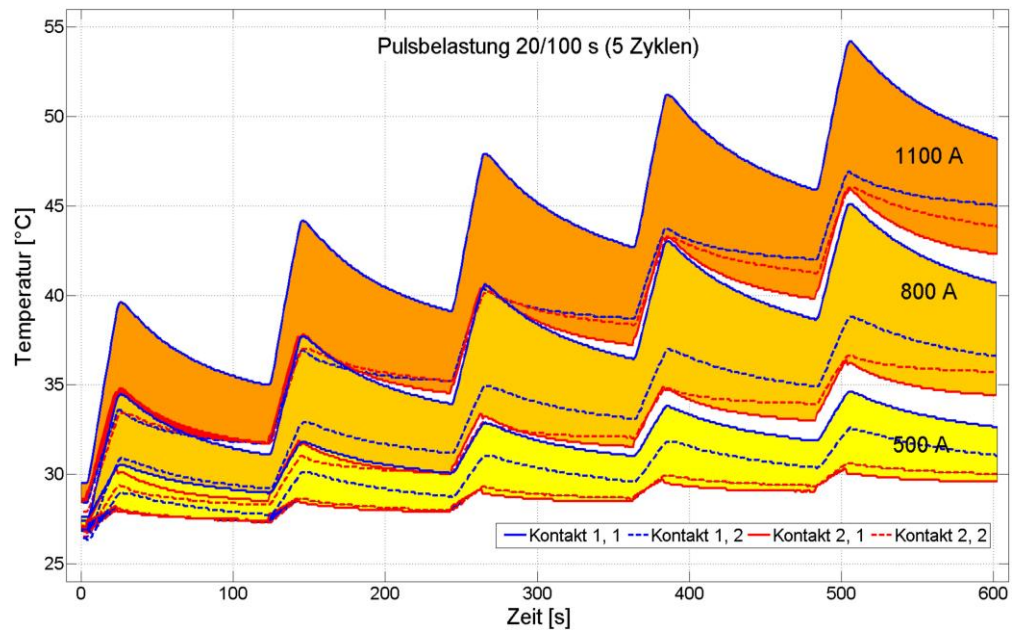


Bild 7 zeigt die thermische Reaktion der Leistungskontakte (DC+: Kontakte 1,1 und 1,2; DC-: Kontakte 2,1 und 2,2) während zehnteiliger Strombelastung mit konstant 500 A.

Bei pulsartiger Strombelastung bei festem zeitlichen Intervall von jeweils 20 Sekunden mit anschließender Abkühlphase durch natürliche Konvektion mit der Umgebungsluft über 100 Sekunden zeigten die Leistungskontakte die thermischen Reaktionen in Abhängigkeit der Strombelastung nach Bild 8.

Bild 8:
zeitlicher Verlauf der
Temperatur in den
vier Kontaktbolzen
bei Pulsbelastung
(Pulsladung)



Im Ergebnis der messtechnischen Untersuchung unter Laborbedingungen konnte festgestellt werden, dass mit dem untersuchten Arbeitsstand des Kontaktsystems die Entwicklungsziele hinsichtlich der Stromübertragung (1000 A Pulsbelastung mit 5 nachfolgenden Pulsen im Intervall 20/100 Sekunden und 500 A Belastung über 10 Minuten) erfüllt werden.

Sofern beide Kontaktbolzen eines Pols relativ gleichmäßig kontaktieren, somit der Übertragungsstrom eines Pols gleichmäßig über beide Kontaktbolzen fließt und der Pantograph die spezifizierten 200 N plus Gewichtskraft des Kontaktkopfes aufbringen kann, sind keine thermischen Überlastungen zu erwarten.

Ausgleich von Positionstoleranzen

Neben der Kontaktqualität ist vornehmlich bei einem Einsatz an nicht spurgeführten Fahrzeugen eine ausreichend große Positionierungstoleranz beim Kontaktschluss vorzusehen. Neben der Anfahrtoleranz in Fahrzeuglängsachse, welche durch eine entsprechende Abmessung des wegseitigen Kontaktpartners (Kontakthaube) ausgeglichen werden kann, stellt vor allem die durch das Hochstromkontaktsystem auszugleichende Positionierungstoleranz in Fahrzeugquerrichtung eine besondere Herausforderung dar. Diese wird durch den Einsatz speziell geformter Bordsteine im Haltestellenbereich minimiert, kann jedoch bei geschlossenem Kontakt durch den Fahrgastwechsel und die bei einem Linienbus zur Standardausstattung zählende Kneelingfunktion hohe dynamische Schwankungen aufweisen.

Das im Projekt EDDA-Bus in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Schunk Bahn- und Industrie-technik GmbH Wettenberg entwickelte HKS erfüllt die genannten Anforderungen und gewährleistet den zuverlässigen Energietransfer zwischen Ladestation und Fahrzeug.

Bild 9:
Hochstromkontakt-
system im geschlos-
senen Zustand bei
Fahrzeug in Normal-
lage



Bild 10:
Hochstromkontakt-
system im geschlos-
senen Zustand bei
einseitig abgesenk-
tem Fahrzeug (Knee-
ling)



Technisch gelöst werden die Anforderungen durch eine besondere geometrische Ausbildung von Kontakthaube und fahrzeugseitigem Kontaktpartner (Kontaktkopf), sowie dessen Querverschieblichkeit auf einer Führungsschiene (Bilder 9 und 10). Hierdurch wird eine ausreichend hohe Flexibilität der im Kontakt stehenden Kontaktpartner erreicht und gleichzeitig die notwendige geometrische Abmessung des vierpoligen Systems reduziert.

2.2.4 Automatisierungslösung für den Nachladevorgang

Im Zusammenspiel mit der am Fraunhofer IVI entwickelten Automatisierungslösung soll während des Pilotbetriebes demonstriert werden, dass zukünftig von der Verfügbarkeit eines sicheren und hinsichtlich der benötigten Ladeströme ausreichend dimensionierten HKS ausgegangen werden kann, welches zudem keinerlei zusätzliche Interaktion des Fahrzeugführers erfordert und schnelle An- und Abdockprozesse ermöglicht.

Erreicht wird dies durch eine Steuerung, die Daten vom Fahrzeug, der Ladestation und einer RFID-basierten Positionserkennung innerhalb der Haltestelle auswertet (Bild 11). Die Steuerung generiert hieraus Steuersignale für das Kontaktsystem und koordiniert mit den am Ladeprozess beteiligten Komponenten den Gesamtprozess.

Bild 11:
RFID-Technologie im
Bordstein für die
Positionserkennung
des Fahrzeuges



Die Initiierung des Ladeprozesses wird nur eingeleitet, wenn ein Ladeprozess als gewollt angenommen werden kann. Hierzu müssen die beteiligten Systeme bereit sein, das Fahrzeug die Haltestelle erkennen und ein Halt wahrscheinlich sein. Für einen schnellen Andockprozess wird das Kontaktsystem in eine Vorposition ausgefahren, sobald sicher angenommen werden kann, dass das Kontaktsystem in dieser Vorposition nicht mit gegenseitigen Installationen kollidiert.

Verkehrsbetriebe stellen bereits jetzt eine Anforderung an die Genauigkeit der Halteposition der Busse in der Haltestelle, damit auch für Kinderwagen und Rollstuhlfahrer ein müheloser Einstieg in das Fahrzeug möglich ist. Dieses sind ± 20 cm in Fahrtrichtung und maximal 7 cm in Querrichtung.

Hieraus wurde die Geometrie und Mechanik des Kontaktsystems abgeleitet, wodurch ein Kontaktschluss geometrisch möglich ist, sobald der Fahrer die bestehenden Toleranzen einhält. Eine Erweiterung dieser Toleranzen ist bereits beim bestehenden System gegeben und in Fahrtrichtung beliebig zu vergrößern. Sollte der Fahrer an der Halteposition vorbeifahren, wird dies von der Positionserkennung detektiert und das Kontaktsystem wieder eingefahren.

Hat der Fahrer die Halteposition eingenommen, erfolgt der Kontaktschluss erst, wenn der Fahrer, durch z.B. das Öffnen der Türen oder das Einlegen einer Bremse den Halt final signalisiert. Der Kontaktschluss wird von der Ladestation über eine Leiterschleife, welche von der Ladestation über das Kontaktsystem zum Fahrzeug führt, erkannt. Sobald hierdurch der physikalische Kontakt bestä-

tigt ist, beginnt die Energieübertragung. Im Umkehrschluss dient diese Leiterschleife als simple, sicherheitskritische Rückmeldung vom Fahrzeug zur Ladestation, über die das Fahrzeug ohne Nutzung komplexer und relativ anfälliger Funk-Übertragungssysteme den Ladeprozess jederzeit hart abbrechen kann.

Da die Steuerung des Kontaktsystems auf dem Fahrzeug liegt, kann das Fahrzeug weiterhin jederzeit einen „Normalzustand“ ohne Kontakt und somit einer Blockade, einnehmen und den Fahrbetrieb aufnehmen.

Das planmäßige Beenden des Ladeprozesses wird eingeleitet, wenn der Fahrer den Wunsch, die Fahrt fortzusetzen, signalisiert. Dieses erfolgt im Allgemeinen durch die Betätigung des Fahrpedals. Hierauf hin koordinieren alle beteiligten Komponenten über eine CAN-(Funk-)Verbindung das saubere Abrüsten des Ladeprozesses und das Einfahren des Kontaktsystems.

Bei der Planung und Umsetzung der Automatisierungslösung wurde folgenden Anforderungskriterien besondere Beachtung zugemessen:

- Für das Fahrpersonal dürfen sich im Vergleich zur Fahrt mit einem konventionellen Bus keine zusätzlichen Handlungen ergeben, welche die Konzentration beim Fahrgastwechsel beeinträchtigen könnten.
- Sicherheitskritische Funktionen auf möglichst einfache Weise umzusetzen.
- Der Kontaktprozess muss schnell auf- und abrüsten, damit auch bei kurzen Fahrzeughalten ein Nachladen sinnvoll möglich ist.

2.3 Umsetzung Schnellladung Fahrzeugenergiespeicher

2.3.1 Infrastruktur am Ladepunkt

Aus heutiger Sicht kommen zur Nachladung eines Fahrzeugenergiespeichers zwei Ladekonzepte in Betracht. Zum einen kann an den Linienendpunkten eine Schnellladung über mehrere Minuten mit einer Leistung von typischerweise 250 kW die notwendige Energie für den nachfolgenden Linienumlauf bereitstellen. Bei den aktuell zur Verfügung stehenden Energiespeichertechnologien kann es weiterhin sinnvoll sein, an den Haltestellen zusätzliche Ladepunkte zu installieren. Damit werden längere Linienführungen ohne unverhältnismäßig hohe Fahrzeugenergiespeicherkosten möglich. Nur an ausgewählten Haltestellen steht eine Aufenthaltszeit von etwa 15 Sekunden zur Verfügung, eine hier realisierte Nachladung des Energiespeichers mit einer Leistung von 700 kW wird als Pulsladung bezeichnet.

Die Firma M&P Motion Control & Power Electronics erstellte im Projekt EDDA-Bus zwei Ladestationen mit denen zum einen die Pulsladung und zum anderen die Schnellladung dargestellt werden können. Beide Stationen sind am Ladepunkt gegenüber des Betriebshofes der DVB in Dresden-Gruna installiert und können dort alternativ betrieben werden. Der Einsatz an räumlich getrennten Ladepunkten ist jedoch ohne weitere Maßnahmen problemlos möglich.

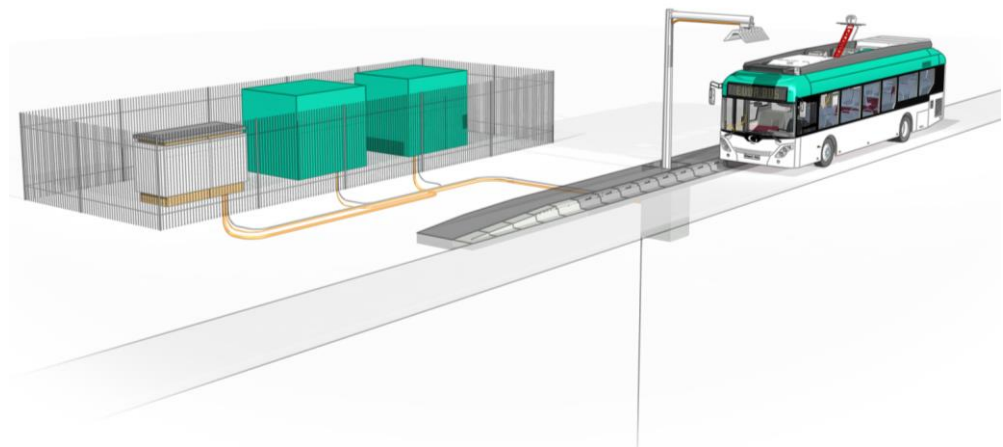
Hinsichtlich der Nutzung standardisierter Energieversorgungsnetze zum Anschluss der Ladestationen wurde für die Schnellladestation eine möglichst gro-

ße Flexibilität angestrebt. Der Betrieb dieser Station ist sowohl am Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz als auch an einem Bahnstromnetz möglich.

Für die Netzeinspeisung steht am Ladepunkt eine MS-/NS-Trafostation zur Verfügung. Die Infrastruktur für den Ladepunkt wurde von der DVB AG erstellt (Bild 12). Sie besteht aus:

- einer Haltestelle mit Kombibordelementen,
- dem Haltemast mit Ausleger zur Montage der Kontakthaube,
- Fundamenten zum Aufstellen der Ladestationen sowie
- der Elektroinstallation mit Verkabelung und Erdungsanlage.

Bild 12:
Ladepunkt in Dresden-Grüna



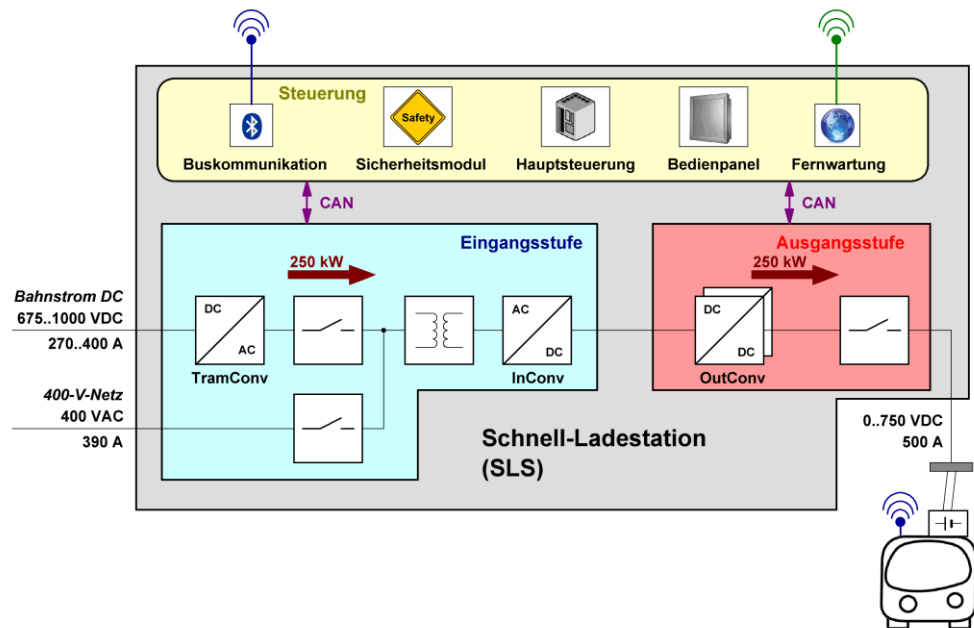
2.3.2 Aufbau der Ladestationen

Die Ladestationen sind jeweils in einem 10' Container untergebracht. Für den breiten Einsatz im Linienbetrieb sind einige Einsparpotentiale im Bauraum vorhanden. Im Projekt lag der Fokus der Konstruktion vornehmlich auf Wartungsfreundlichkeit und Skalierbarkeit der Einzelsysteme für Testzwecke. Die Leistungsumrichter basieren auf einer einheitlichen Hardwareplattform. Größtenteils konnte durch deren parallele Anordnung eine Redundanz in den einzelnen Wandlerstufen erreicht werden.

Im Bild 13 ist der Aufbau der Schnell-Ladestation dargestellt. Die Station ist für 250 kW Dauerausgangsleistung projektiert. In jedem Fall der benannten Netzeinspeisemöglichkeiten wird die galvanische Trennung zur Netzeinspeisung über einen Trenntransformator realisiert. Damit ist gewährleistet, dass bei Ankopplung des Fahrzeugtraktionsbordnetzes dessen Netzcharakteristik als IT-Netz erhalten bleibt.

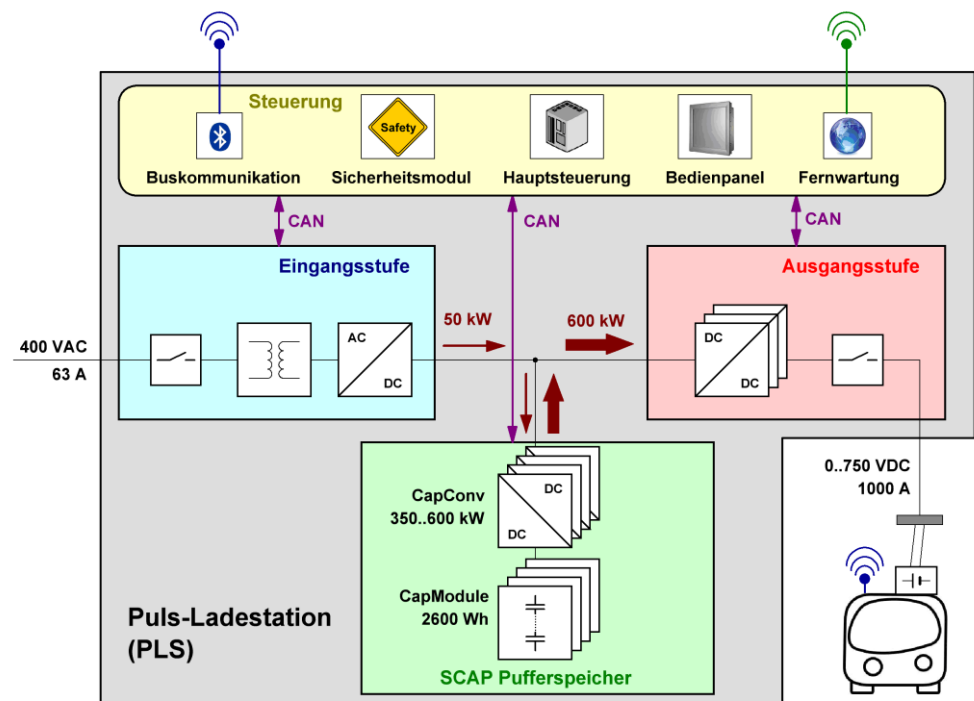
Zur Gewährleistung ausreichend kleiner Netzurückwirkungen ist die Eingangsstufe aktiv ausgeführt. Mit Hilfe des internen Anlagenzwischenkreises und der separaten Ausgangsstufe kann ein weiterer Spannungsbereich von 0 bis 750 V am Ausgang bereitgestellt werden. Ziel dieses Konzeptes ist es, die Anbindung unterschiedlicher Fahrzeugenergiespeicher weiterführender Technologien in einem weiten Rahmen zu ermöglichen.

Bild 13:
Aufbau der Schnell-
Ladestation



Den Aufbau der Puls-Ladestation zeigt Bild 14. Um die Netzbezugsleistung trotz der hohen Leistungsanforderung bei der Pulsladung gering zu halten, ist in dieser Station ein Superkondensatorspeicher mit 2,6 kWh Nutzenergieinhalt mit vier parallelen Strängen integriert, welche vom Netzeingang mit 50 kW über einige Minuten vorgeladen werden. Bei Bedarf ist vorgesehen, das Speichersystem um zwei weitere Stränge zu erweitern. Momentan stehen am Ausgang maximal 600 kW Ladeleistung bei maximal 1000 A für etwa 10 Sekunden zur Verfügung. In voller Ausbaustufe erhöht sich dieser Wert auf 700 kW für 15 Sekunden.

Bild 14:
Aufbau der Puls-
Ladestation



2.3.3 Sicherheits- und Steuerungskonzept

Die Sicherheits- und Betriebsfunktionen der Ladestation sind jeweils in einer getrennten Steuerung realisiert. Diese Herangehensweise ermöglicht eine wesentlich größere Flexibilität bei der Entwicklung der Hauptsteuerung und Anpassungen auch nach der Abnahme der sicherheitsgerichteten Funktionen.

Bei sicherheitskritischen Fehlern erfolgt eine Notabschaltung der Anlage und die sichere Trennung durch die Eingangs- und Ausgangsschalter, die als Leistungstrennschalter ausgeführt sind. Zur Fehlerdetektion der elektrischen Sicherheit gehören neben einem Isolationswächter die qualitative Überwachung des PE Kontakts während des Ladeprozesses über die CP-Schleife und eine Fehlerstromdetektion am DC-Ausgang.

Grundvoraussetzung für eine aus elektrotechnischer Sicht sichere Nachladung des Fahrzeugenergiespeichers aus einer wegseitigen Nachladestation ist die durchgängige Überwachung des Isolationswiderstandes der gesamten Anlage. Das zugehörige Isolationsmessgerät ist nach geltender Normenlage in der stationären Anlage zu integrieren.

Da zumindest die Hochvoltanlage des Fahrzeuges auch im Fahrbetrieb hinsichtlich eines ausreichend hohen Isolationswiderstandes überwacht werden muss, ergibt sich für die elektrotechnische Kopplung von Fahrzeug und Ladestation eine technische Herausforderung. Die aktiven Isolationsmessgeräte würden sich gegenseitig als Fehlerquellen erkennen, wenn sie am gemeinsamen Hochvoltanlagenkreis arbeiten. Von den beteiligten Projektpartnern wurde zur Problemlösung das „Konzept der gesunden Systeme“ erdacht und umgesetzt. Darunter wird verstanden, dass die Hochvoltanlagenteile des Fahrzeuges, im konkreten Fall die eigentliche Elektrotraktion mit Hilfsenergiebereitstellung und der separat zu- und abschaltbare Anlagenteil mit dem HKS für die Speichernachladung, und der Ladestation durch separate Isolationsmessgeräte überwacht und nur für die Dauer der Speicherladung die fahrzeugseitigen Geräte inaktiv geschaltet werden.

Die sicherheitsbasierte Überwachung des vollständigen Ladevorgangs mittels einer leitungsgebundenen Sicherheitsschleife, dem sogenannten Control Pilot, reduziert die Gefährdung von Menschen oder Anlagen durch Fehlfunktionen oder Fehlbedienung auf ein vertretbares Maß. Als zusätzliche Maßnahme des Anlagenschutzes erfolgt eine messtechnische Auswertung des Schleifenwiderstandes des durch CP und PE gebildeten elektrotechnischen Kreises. Hierdurch wird eine schnelle Reaktion auf einen signifikant verschlechterten Kontaktzustand möglich, wodurch zum Beispiel einer Überhitzung der Kontaktelemente entgegen gewirkt werden kann.

Durch die Zusammenarbeit mit dem TÜV Rheinland als technischer Überwachungsorganisation konnten mittels einer aus mehreren Iterationsschritten bestehenden Gefährdungs- und Risikoanalyse notwendige Maßnahmen zur Gewährleistung der funktionalen Sicherheit des Ladeprozesses abgeleitet werden. Die sowohl hardware- und softwaregebundenen Funktionalitäten wurden einzeln oder im Zusammenspiel innerhalb eines Prüfverfahrens nachgewiesen [11].

Insbesondere fanden dabei folgende Anforderungen gültiger technischer Regelwerke Anwendung:

- IEC 61508 („Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme“),
- DIN EN 61851 T: 1,21,23,24 (Einsatz eines CP-Kontaktes zur Sicherheitsüberwachung der elektrotechnischen Verbindung des Fahrzeugchassis mit der Erdverbindung (PE) der stationären Ladestation während des Ladevorgangs),
- DIN EN 50159:2010 (Sicherheitsgerichtete Ansteuerung (Programmierung) bei beweglichem Nachladesystem) und
- RAST: 2006 (Einhaltung von Lichtraumprofilen in Verbindung mit Vorgaben zum konstruktiven Fahrzeugaufbau nach der StVZO).

Darüber hinaus wurde der Nachweis zur Einhaltung von Grenzwerten elektrischer und elektromagnetischer Felder gemäß 26. BImSchV in der Umgebung des Fahrzeugs und der Ladestationen beim Ladebetrieb erbracht [12].

Die Hauptsteuerung der Ladestation enthält folgende Funktionen:

- Gerätemanagement zur Konfiguration, Ansteuerung, Überwachung und Sollwertvorgabe der Leistungsumrichter,
- Anlagenmanagement zur Steuerung und Überwachung des Gesamtsystems,
- Energiemanagement mit Funktionen zur Stabilität des Anlagenzwischenkreises, der Koordination der Leistungsflüsse und für Schnittstellen einer externen Energieeinsatzoptimierung (z.B. mit einem RBL-System),
- Fahrzeuginterface als Schnittstelle für den Dockingprozess und Sollwertaufbereitung und
- Schnittstellen zum Bedien- und Beobachtungssystem.

Zum Bedienen und Beobachten steht ein Panel PC zur Verfügung, auf welchen mittels GSM-Funkmodul über das WWW zugegriffen werden kann. Eine zusätzliche SMS-Alarmfunktion erhöht die Handlungsmöglichkeiten im Fehlerfall.

2.3.4 Ablauf des Ladeprozesses

Die Kommunikation zum Fahrzeug wird über ein Bluetooth-Funkmodul realisiert, welches als Gateway zum Fahrzeug-CAN arbeitet. Die Reichweite von etwa 100 m ermöglicht einerseits eine rechtzeitige Aktivierung der Ladestation aus dem Standby zur Bereitschaft und verhindert andererseits als zusätzliche Bedingung zur Positionserkennung des Fahrzeuges in der Haltestelle ein unbeabsichtigtes Ausfahren des Hochstromladesystems außerhalb dieses Bereiches.

Insbesondere für die Pulsladung ist ein schneller Ablauf des Kontaktvorganges entscheidend, der in Verbindung mit einer im Haltestellenbereich integrierten Positionserkennung des Fahrzeuges und einem auf dieser Information basierenden Vorausfahren des Hochstromladesystems auf eine Höhe knapp unter

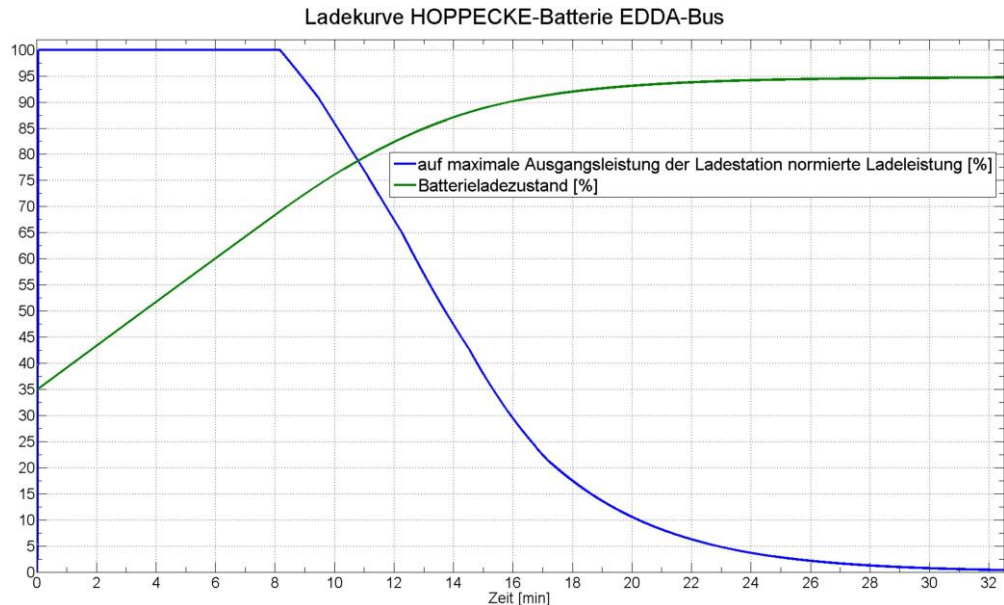
Unterkante der Kontakthaube erreicht wird. Der Ladeprozess startet innerhalb von 500 Millisekunden nach dem Kontaktschluss des Hochstromladesystems. Dieser wird durch Einlegen der Park- oder Haltestellenbremse eingeleitet, zusätzlich erfolgt dabei eine Prüfung auf korrekte Fahrzeugpositionierung mittels der bereits erwähnten Positionserkennung.

Die Ladeanforderung und Sollwertvorgabe erfolgt fahrzeugseitig zur Ladestation, welche diese in Abhängigkeit der momentan verfügbaren Leistung umsetzt. Der Energiefluss zum Fahrzeug wird durch die Ausgangsstufe der Ladestation direkt gesteuert. Dabei ist eine strom-, spannungs- als auch leistungsgeregelte Nachladung des Fahrzeugenergiespeichers möglich. Um ein Überladen der Batterie zu verhindern, wird im zentralen Fahrzeugsteuergerät stets der Ladestrom gegen den vom Batteriemanagementsystem vorgegebenen Grenzwert überwacht.

In Abhängigkeit der lokalen Fehlerlage wird der Ladeprozess vom Fahrzeug aus oder von der Ladestation abgebrochen. Die Sicherheitsabschaltung basiert ausschließlich auf der CP-PE-Schleifenüberwachung in der Ladestation. Somit sind keine Übertragungen sicherheitsrelevanter Datenpunkte über die Funkverbindung notwendig.

Bild 15 zeigt die mittels Simulation erzeugte Ladekurve des Fahrzeugenergiespeichers an der Schnellladestation. Es ist anzumerken, dass eine Entladung des Speichers unter 35 % Ladezustand seitens des Batterieherstellers nur mit stark eingeschränkter Stromaufnahme bzw. -abgabe zulässig ist, wodurch ein Normalbetrieb des Fahrzeuges nicht mehr möglich ist. Die Grafik der Ladekurve verdeutlicht, dass Energieverbräuche zwischen zwei nachfolgenden Ladevorgängen auslegungsgemäß nur bis zu einem bestimmten Grad technisch realisierbar sind. Einerseits besteht darüber hinaus nahezu keine Reserve hinsichtlich der Batteriekapazität, wodurch ein sicheres Befahren des Umlaufs mit voller Fahrzeugperformance nicht gewährleistet ist. Zudem werden Nachladezeiten benötigt, die nicht mehr dem Charakter des entwickelten Antriebskonzeptes mit Schnellladung nach jedem Streckenumlauf entsprechen. Die Grenzbelastung hierfür liegt bei einer Entladung des Batteriespeichers von etwa 35 %, dies entspricht in etwa einer „Reichweite“ von 25 km zwischen zwei geplanten Nachladevorgängen.

Bild 15:
mittels Simulation
ermittelter Verlauf
der Schnellladung
des Batteriespeichers



2.4 Praxiserprobung

2.4.1 Randbedingungen des Fahrzeugeinsatzes

Der Einsatz der Gesamtlösung im Linienbetrieb wurde gemeinsam mit der Dresdner Verkehrsbetriebe AG (DVB) als Praxispartner realisiert. Die DVB beteiligte sich aktiv am Projektvorhaben durch:

- die Gewährung eines Nutzungsrechtes auf einer Grundstücksfläche gegenüber dem Busbetriebshof Dresden-Gruna zur Errichtung des Ladepunktes,
- die Ausführung der gemeinsam mit den entsprechenden Projektpartnern geplanten Baumaßnahmen am Ladepunkt,
- Reparaturarbeiten am konventionellen Teil des Projektfahrzeuges im Bedarfsfall sowie
- dem Einsatz von 12 speziell geschulten Mitarbeitern des Fahrbetriebs zur Durchführung des Linienverkehrs.

Die befahrenen Teilstücke der Buslinien 61 und 85 wurden zur Minimierung von Projektkosten als Rundkurs ohne Zwischenhalt am eigentlichen Linienendpunkt ausgelegt. Die betriebsgemäße Schnellladung nach jedem Umlauf sowie die Demonstration der Pulsladung erfolgten am Ladepunkt am Busbetriebshof Dresden-Gruna.

Das Fahrzeug kam jeweils als ungeplante Linienverstärkung wöchentlich von Montag bis Freitag zum Einsatz. Bei einer täglichen Einsatzzeit von 2 Arbeitsschichten wurden 14 Linienumläufe absolviert, die verbleibenden 2 Linienumläufe, resultierend aus notwendigen Lenkpausen für das Fahrpersonal, werden innerhalb der Projektlaufzeit für die Erprobung und Demonstration von mehrfach nacheinander durchgeführten Pulsladevorgängen vorgehalten. Bild 16 zeigt das Fahrzeug auf einem der ersten Linienumläufe am 3.11.2014 an der Haltestelle Staats- und Universitätsbibliothek beim Fahrgastwechsel.

Bild 16:
Projektfahrzeug im
Liniendienst



2.4.2 Fahrverhalten

Mittels intensiver Erprobung des Fahrzeugeinsatzes auf dem zu befahrenden Streckenabschnitt mit unterschiedlichen Zuladungsverhältnissen erfolgte die Ableitung eines hierfür als günstig anzusehenden maximalen Antriebsdrehmomentes von etwa 42 %, bezogen auf den maximal möglichen Wert. Neben einem für die beteiligten Antriebskomponenten lebensdauerschonen Betriebsverhalten wird für das Gesamtfahrzeug eine Steigerung der Energieeffizienz erreicht. In Verbindung mit einer softwaretechnisch realisierten Begrenzung der Anfahrbeschleunigung bewirkt die Begrenzung des maximalen Antriebsdrehmomentes zudem eine, gegenüber einem konventionellen Fahrzeug, geringere und gleichmäßigere Beschleunigung bei Anfahrvorgängen, dies wird vor allem vom Fahrgast als angenehm empfunden. Durch das gegenüber Standardbussen überlegene Beschleunigungsverhalten im unteren und mittleren Drehzahlbereich hat das Projektfahrzeug keine, durch das Antriebssystem bedingten Probleme, den vorgegebenen Fahrplan einzuhalten.

Besonders erwähnenswert ist der extrem niedrige Innengeräuschpegel, insbesondere bei Fahrzeugstillstand und im unteren bis mittleren Drehzahlbereich. Im oberen Drehzahlbereich erinnert die Fahrgastinnenraumgeräuschsituation an einen Stadtbahnwagen, was durch die Geräuschentwicklung der als zentrale Antriebseinheit fungierenden Asynchronmaschine hervorgerufen wird.

2.4.3 Energiebedarf

Vorausgegangene eigene Untersuchungen am Beispiel des Linienverkehrs eines Stadtbahnwagens [4, 5] zeigen, dass beim Einsatz eines Fahrzeuges im öffentlichen Nahverkehr dessen Energie- und Leistungsbedarf durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren komplex beeinflusst werden. Für die Bewertung des Energiebedarfs ab Batterieklemme des mit einer konventionellen Heizöl-Heizung ausgestatteten und bisher ausschließlich bei herbst- und leicht winterlichen Außen-

temperaturen auf einem Streckenabschnitt mit nur mäßigen Steigungsabschnitten betriebenen Projektfahrzeuges haben folgende Parameter besondere Relevanz:

- *Fahrzeug und Fahrzeugausrüstung* mit Parametern wie beispielsweise Fahrzeuggröße und installierte Antriebsleistung, Fahrzeugmasse infolge Fahrgastbelegung, maximale Beschleunigung und maximale Geschwindigkeit des Fahrzeugs im Betrieb, Möglichkeit zur Rückgewinnung von Bremsenergie und
- *Fahrweg* mit Parametern wie beispielsweise Haltestellenabstand und Streckenneigung.

Erst nach Beginn der Praxiserprobung wurde geeignete Messtechnik zur Ermittlung von Energiebedarfswerten in das Projektfahrzeug integriert und steht seit 13.11.2014 zur Verfügung. Die hier dargelegten Werte beziehen sich auf eine Datenbasis, die seither auf einer Gesamtfahrstrecke von etwa 18.300 km erfasst wurden. Sie sollen lediglich einen ersten Anhaltspunkt bezüglich der Größenordnung des zu erwartenden mittleren streckenbezogenen Energiebedarfes eines solchen Fahrzeuges darstellen.

Der mittlere Gesamtenergiebedarf des Fahrzeuges im Fahrbetrieb ab Hochstromkontaktsystem ergibt sich zu 1.20 kWh/km. Davon entfallen 0.77 kWh/km auf den Fahrzeugantrieb, 0.33 kWh/km auf das Fahrzeugbordnetz und 0.10 kWh/km auf Übertragungsverluste in Fahrzeugenergiespeicher, leistungselektronischen Stellgliedern und Leistungskabeln. Der für die Elektrotraktion benötigte Wert ergibt sich aus 1.25 kWh/km aufgenommener Energie des Fahrmotors und einem Anteil von 0.48 kWh/km, welcher dem Antriebsaggregat aus zurückgewonnener Bremsenergie zugeführt wird. Der ermittelte Rückspeisegrad der Elektrotraktion liegt damit unter Berücksichtigung aller Übertragungsverluste von der Motorwicklung bis zur Traktionsbatterieklammer und zurück bei 38,4 %.

2.4.4 Ergebnisse der Fahrerbefragung

Mittels mit dem Gesamtbetriebsrat der DVB AG abgestimmtem Fragebogen wurden die Fahrer um eine Einschätzung des Fahrzeuges mit Schnellladung mit Benotungen von 1 (sehr gut) bis 5 (ungenügend) gebeten. Es wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Bewertungen als durchschnittliche Werte der von allen 11 regelmäßig eingesetzten Fahrern ausgefüllten Fragebögen ermittelt:

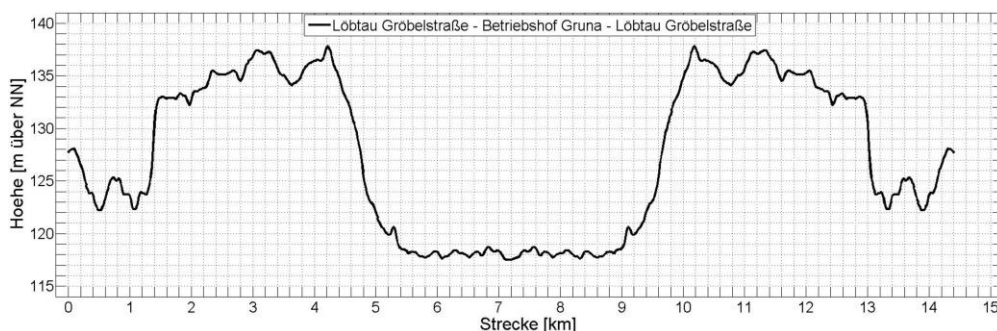
Tabelle 1:
Fahrerbefragung
(Mai 2015)

Bewertungskriterium	Ø Note
Fahrerarbeitsplatz/Bedienung Bedienelemente, Lenkrad, Fahrerfenster, Fahrertür, Fahrersitz, Heizung/ Klimatisierung, Einsicht, Spiegel, Türbedienung, Türöffnungsgeschwindigkeit, Fahrgastrückhaltesystem, Geräuschempfinden Fahrerarbeitsplatz	1,53
Bedienungsaufwand Schnellladesystem	1,27
Fahrverhalten Beschleunigung, Bremsen, Lenkeinschlag, Kurvenfahrverhalten, Kurvenanfahrt, Kurvendurchfahrt, Federung, Nick- und Wankbewegungen	1,76
Fahrgasttauglichkeit Sitzplätze, Stehplätze, Ein- und Ausstieg (Türen), Fahrräder/ Kinderwagenmitnahme, Fahrgastverteilung im Fahrzeug, Be- und Entlüftung Fahrzeug, Fußboden, Griffstangen/Halteschlaufen, Türöffnungs- und Schließzeiten	1,85
Verwendbarkeit für die DVB	1,45
Fahrgastmeinung Anfahren, Innenausstattung, Geräuschkulisse	1,55

2.4.5 1. Phase der Praxiserprobung

Im Zeitraum vom 03.11.2014 bis zum 30.01.2015 erfolgte die im Projektablauf vorgesehene Praxiserprobung. Hierbei befuhr das Fahrzeug einen gegenüber den ursprünglichen Planungen erweiterten Rundkurs mit 14,4 km Umlauflänge zwischen dem Betriebshof Gruna und dem Endpunkt der Linie 61 in Löbtau (Bild 17).

Bild 17:
Höhenprofil der in
der 1.Phase der
Praxiserprobung
befahrenen Strecke



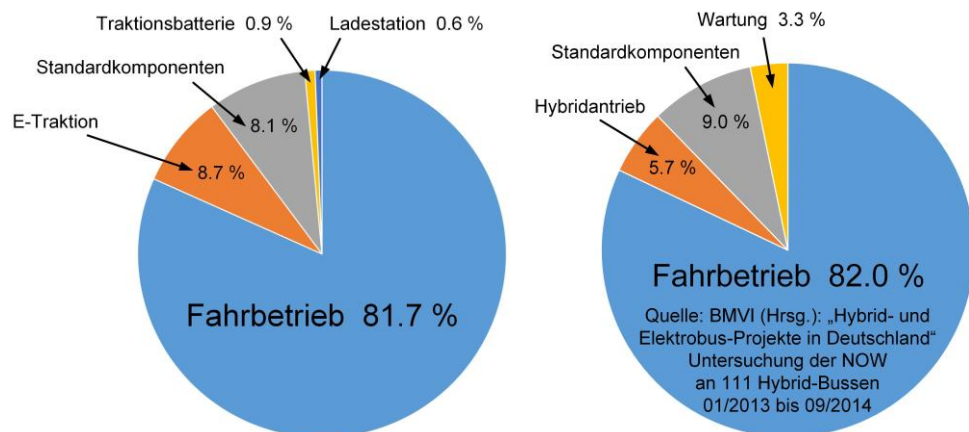
Die im Projekt entwickelten Kerntechnologien Batteriespeicher, Ladestation und Kontaktsystem mit Automatisierungslösung zeigten nahezu vom Beginn der Erprobung an eine zum Normalbetrieb von konventionellen Fahrzeugen vergleichbare Verfügbarkeit.

In den ersten 4 Wochen nach Beginn der Praxiserprobung ergab sich eine Verfügbarkeit des im Projektrahmen entwickelten Hochstromkontaktsystems mit Automatisierungslösung von 87 %. Von den durchgeführten 192 Schnellladevorgängen konnten 168 vollautomatisch realisiert werden. Die verbleibenden 24 Schnellladevorgänge wurden durch das Fahrpersonal mittels eines für diesen Fall eingerichteten Tasters am Fahrerarbeitsplatz zur manuellen Initialisierung des Ladevorgangs eingeleitet und in der Folge automatisch ausgeführt.

Vornehmlich bedingt durch eine Anpassung der Software zur Ansteuerung des Hochkontaktsystems und den Einsatz eines zusätzlichen 24V-DC/DC-Wandlers zur Stabilisierung von dessen Versorgungsspannung aus der Bordnetzbatteie konnte in Verbindung mit der fortschreitenden Bediensicherheit des Fahrpersonals die Verfügbarkeit der Automatisierungslösung in den nachfolgenden zwei Wochen der Praxiserprobung auf annähernd 97 % erhöht werden. 113 der 116 durchgeführten Schnellladevorgänge erfolgten ohne zusätzlichen Eingriff des Fahrpersonals. Dieser Wert blieb in den nachgelagerten Phasen der Praxiserprobung unverändert. Die Ausfälle der Automatisierungslösung sind dabei im Wesentlichen auf die zur Lageerkennung des Hochstromkontaktsystems eingesetzten Magnetkontakte zurück zu führen, der Industriepartner Schunk arbeitet an einer verbesserten Lösung.

Nach anfänglich auftretenden Fehlern von Standardkomponenten (Standheizung, Elektrotraktion) konnten diese im Verlauf der Erprobung durch Mitarbeiter des Fraunhofer IVI unter Einbeziehung von Werkstattkapazitäten der DVB schrittweise minimiert werden. Wurde in den ersten Wochen bis zum Jahreswechsel 2014/15 eine Gesamtverfügbarkeit von 77 % erreicht, lag diese betrachtet über den gesamten Zeitraum der Praxiserprobung bei 81,7 % und damit auf dem erreichten Niveau von Serienfahrzeugen mit Hybridantrieben verschiedener Hersteller (Bild 18).

Bild 18:
Vergleich der erreichten Verfügbarkeiten des Projektfahrzeuges und von Hybridbussen



Auf insgesamt 9400 km ergab sich ein durchschnittlicher Energiebedarf von 1.19 kWh/km ab Kontaktsystem. Mit der am Ladepunkt installierten Übertragungsleistung der Schnellladestation von 250 kW wurden im Mittel 4:30 min. Nachladezeit für den Ausgleich der Energiebilanz des Fahrzeugenergiespeichers nach jedem Umlauf benötigt.

Über die Gesamtheit der durch Abgleich eigener Messdaten auf dem Fahrzeug und Ablesewerten des Energieversorgungsunternehmens am Ladepunkt ausgewerteten mehr als 600 Schnellladevorgänge lag der Übertragungswirkungsgrad zwischen Netzeinspeisung und Traktionsbatterieklemme bei 94,7 %. Dieser Wert änderte sich in den anschließenden Phasen der Praxiserprobung lediglich marginal. Bild 19 zeigt das Projektfahrzeug bei einem Nachladevorgang am Ladepunkt in Dresden-Gruna.

Bild 19:
Projektfahrzeug
beim Nachladevor-
gang

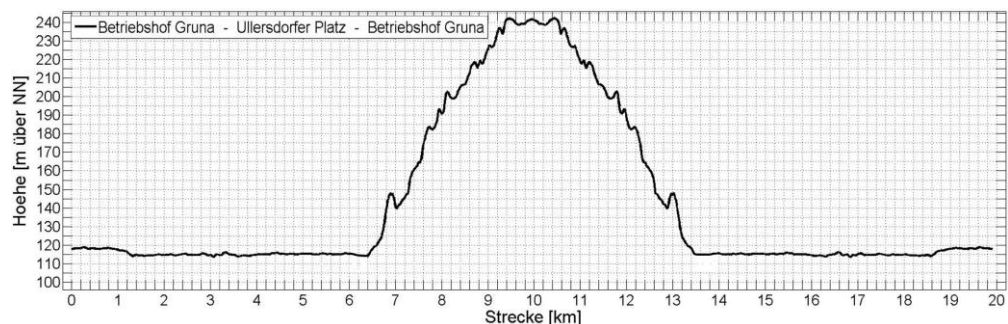


2.4.6 2. Phase der Praxiserprobung

Aufgrund der erzielten Projektergebnisse entschlossen sich die DVB und das Fraunhofer IVI zur Beantragung einer dreimonatigen, kostenneutralen Projektverlängerung für eine Erweiterung der Praxiserprobung. Dem Antrag wurde seitens des Projektträgers statt gegeben und der Projektzeitraum bis 30.04.2015 ausgedehnt.

Im Zeitraum vom 02.02.2015 bis zum 27.03.2015 befuhr das Fahrzeug erneut einen Rundkurs zwischen dem Betriebshof Gruna und einem anderen Endpunkt der Linie 61 in Dresden-Bühlau. Die befahrene Strecke war mit 19,5 km Umlauflänge und einem Streckenabschnitt mit starker Streckenneigung (Grundstraße) gegenüber dem Linienumlauf der ersten Phase deutlich anspruchsvoller hinsichtlich der Leistungsbeanspruchung des Fahrzeuges (Bild 20).

Bild 20:
Höhenprofil der in
der 2.Phase der
Praxiserprobung
befahrenen Strecke



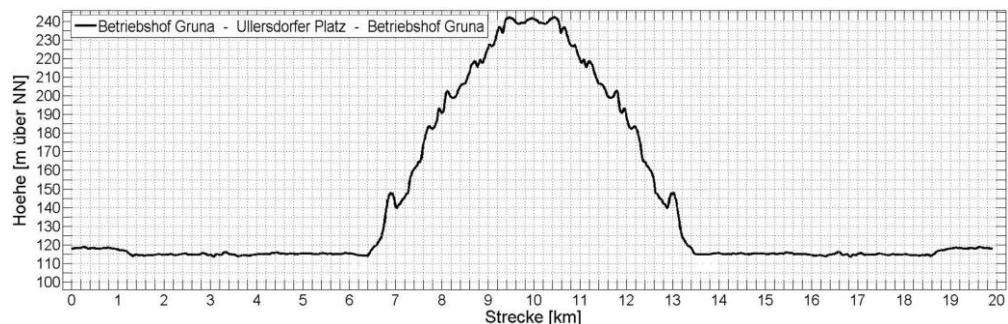
Die im Projekt entwickelten Kerntechnologien Batteriespeicher, Ladestation und Kontaktsystem mit Automatisierungslösung zeigten auch in der zweiten Phase der Praxiserprobung eine zum Normalbetrieb von konventionellen Fahrzeugen vergleichbare Verfügbarkeit. Es wurde eine Gesamtverfügbarkeit von 94 % erreicht.

Auf insgesamt 5100 km ergab sich ebenfalls ein durchschnittlicher Energiebedarf von 1.19 kWh/km ab Kontaktsystem. Es wurden im Mittel 6:30 min. Nachladezeit für den Ausgleich der Energiebilanz des Fahrzeugenergiespeichers nach jedem Umlauf benötigt.

2.4.7 3. Phase der Praxiserprobung

Ab 30.03.2015 war das Fahrzeug bis zum Ende des verlängerten Projektzeitraums auf einem Rundkurs mit 15,5 km Umlauflänge zwischen dem Betriebs-hof Gruna und einem Endpunkt der Linie 85 in Löbtau-Süd eingesetzt (Bild 21).

Bild 21:
Höhenprofil der in
der 3.Phase der
Praxiserprobung
befahrenen Strecke



Nach anfänglich notwendig gewordenen Reparaturarbeiten am Batteriespeicher (ausgefallener Temperatursensor) zeigen die im Projekt entwickelten Kerntechnologien Batteriespeicher, Ladestation und Kontaktsystem mit Automatisierungslösung weiterhin eine zum Normalbetrieb von konventionellen Fahrzeugen vergleichbare Verfügbarkeit.

Auf den absolvierten 3800 km ergab sich ein leicht erhöhter durchschnittlicher Energiebedarf von 1.22 kWh/km ab Kontaktsystem. Die Ursache hierfür wird in der gegenüber den zuvor befahrenen Rundkursen geringeren Umlaufgeschwindigkeit vermutet. Mit einem weiteren Anstieg wird durch den Einsatz der Fahrerarbeitsplatzklimatisierung bei steigenden Umgebungstemperaturen gerechnet.

2.5 Zusammenfassung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Gesamtvolumen des Fraunhofer IVI im Projekt EDDA-Bus betrug etwa 930 TEUR, die zu 100% als Förderung vom Bundesministerium für Bildung und Forschung zur Verfügung gestellt wurden.

Der Aufwand des Fraunhofer IVI für die im Bericht dargestellten Ergebnisse bezifferte sich im Projektzeitraum von Februar 2012 bis April 2015 (39 Monate) einschließlich der Material- und Reisekosten und Fremdleistungen auf rund 944 TEUR. Die berichtsgegenständliche Arbeitszeit summierte sich dabei auf 75 Personenmonate.

2.6 Ausblick

Wie beschrieben, wurde innerhalb der Projektbearbeitung weitergehender Forschungsbedarf hinsichtlich der Technologieentwicklung von auf das DockingPrinzip angepassten Klimatisierungs- und Heizungskonzepten und zur weiteren Absenkung des Fahrzeugenergiebedarfs durch eine bedarfsgerechte Regelung von Bordnetzverbrauchern und durch Minimierung der Fahrzeugleermasse identifiziert. In der Vorbereitung befindliche Forschungsvorhaben des Fraunhofer IVI fokussieren auf diese Themenstellungen.

Darüber hinaus besteht ebenfalls weiterhin Forschungs- und Entwicklungsbedarf hinsichtlich der technologischen Umsetzung des vollelektrischen Busbetriebs nach dem DockingPrinzip. Mit der erreichten industriellen Verfügbarkeit Personen- und Anlagensicherer Komponenten für vollautomatisierte Schnell- und Pulsladevorgänge bei Fahrgastwechsel wurden in Verbindung mit der Integration von schnellladefähiger Batterietechnologie und Leistungselektronik in einen 12m-Standardbus die technischen Voraussetzungen für den vollelektrischen Busbetrieb im Liniendienst geschaffen.

Weitere Entwicklungsarbeiten müssen auf die ökonomische Konkurrenzfähigkeit des DockingPrinzips gegenüber konventionellem Busbetrieb abzielen. Die Fortschritte auf dem Gebiet der Batterietechnologie in den zurückliegenden 10 Jahren beachtend, wird die Einschätzung vertreten, dass in den folgenden 5 Jahren nicht mit der Verfügbarkeit von schnellladefähigen Akkumulatoren mit ausreichender Zyklenfestigkeit und/oder entsprechend niedrigem Preisniveau für den Einsatz in Fahrzeugen des ÖPNV gerechnet werden kann. Die notwendige Absenkung der Energiespeicherkosten kann daher nur mittels Substitution der eingesetzten Traktionsbatterie durch andere Energiespeichertechnologien oder deren Kombination in Verbindung mit Pulsladevorgängen erreicht werden. Derzeit wäre der Einsatz eines reinen Superkondensatorspeichers die ökonomisch überlegene Variante, erscheint jedoch vor dem Hintergrund der für diese Speichertechnologie erreichten Energiedichte momentan nicht in bestehende Fahrzeugkonzepte integrierbar.

Überschlägige Berechnungen zeigen, dass der Einsatz sogenannter Lithium-Kondensatoren auf dem heutigen Preisniveau für Elektroenergie und Dieseldieselkraftstoff einen erfolgversprechenden Systemansatz darstellt. Unter Beachtung der notwendigen infrastrukturellen Aufwendungen für Pulsladestationen an ausgewählten Haltestellen und Schnellladestationen an Linienendpunkten erscheint vollelektrischer Busbetrieb nach dem DockingPrinzip auf dem ökonomischen Niveau des konventionellen Linienvverkehrs möglich. Zudem könnte die damit verbundene Absenkung notwendiger Nachladezeiten an den Linienendpunkten das DockingPrinzip für Busbetreiber nochmals attraktiver machen.

3 Nutzen und Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse

Der wesentliche Nutzen der Projektergebnisse besteht in der Übertragbarkeit aller Methoden und Lösungen auf Busbetriebe in anderen Städten. Im Kern ging es vor allem um die Frage, ob und wie alternative und neuartige elektrische Antriebskonzepte im ÖPNV – wie der realisierte Batteriebusbetrieb mit Gelegenheitsladung (opportunity charge) nach dem DockingPrinzip - zu einer energieeffizienten und ressourcenschonenden urbanen Mobilität bei systemübergreifender Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen beitragen können. Anhand der fahrzeugseitigen und wegseitigen Lösungen wurden die Möglichkeiten und Grenzen klar aufgezeigt und Ansätze für künftige Entwicklungspfade identifiziert.

Für das Fraunhofer IVI sind aus der Vielzahl der gewonnenen Erkenntnisse für die künftige Verwertung vor allem drei Ergebnisse des Forschungsprojektes EDDA-Bus interessant:

- Erfahrungen mit dem fahrzeugseitigen Energiespeichersystem,
- kommerzielle Verfügbarkeit zuverlässiger und sicherer Hochstrom-Energieübertragungssysteme und
- Notwendigkeit zur Entwicklung Speicherbasierter Lösungen zur elektrischen Heizung und Klimatisierung von ÖPNV-Fahrzeugen ohne kontinuierliche Energieversorgung.

Der erste Punkt bezieht sich auf die deutlichen Fortschritte, die bezüglich der Einbindung und des Betriebs eines fahrzeugseitigen Traktionsenergiespeichers in Linienbusse gemacht werden konnten. Bereits derzeit besteht großes Interesse vieler Betreiber am Einsatz fahrzeugseitiger Energiespeicher. Das belegen die Forderungen in den derzeit laufenden Ausschreibungen für neue Fahrzeuge. Allein aus den eingesparten Energiekosten lassen sich aber die finanziellen Vorteile nur schwer darstellen. Daher verhalten sich die Betreiber bezüglich einer Umrüstung der Fahrzeuge nach wie vor zurückhaltend. Da die Installation eines Energiespeichersystems auf einem Fahrzeug zu höheren Anschaffungskosten führt, müssen diese, um eine positive Bilanz für den Fahrzeugbetreiber darzustellen, im Laufe der Zeit von geringeren Energiekosten kompensiert werden. Die Zeitdauer dafür ist maßgeblich von der jeweiligen Anwendung abhängig.

Das Fraunhofer IVI verfügt nach dem Projekt über eine sehr weitreichende Datenbasis und zugehörige Auswertungs- und Analysetools für den Energie- und Leistungsbedarf von Linienbussen unter verschiedenen Einsatzbedingungen. Mit dem aufgebauten Instrumentarium ist es dem Fraunhofer IVI nunmehr möglich, mit vergleichsweise geringem Aufwand die Projektergebnisse auch auf andere Städte zu übertragen. Das Institut baut damit seine Kompetenz in der Beratung zur Machbarkeit des vollelektrischen Linienbusbetriebs im ÖPNV weiter aus.

Durch die intensive Auseinandersetzung mit der Thematik der Hochstrom-Energieübertragung konnte sich das Fraunhofer IVI an der Konstruktionslösung

für die Energieübertragung auf einen Linienbus im Stillstand beteiligen. Damit wird erstmals eine signifikante Aufladung des fahrzeugseitigen Traktionsenergiespeichers innerhalb gewöhnlicher Haltestellenaufenthaltszeiten oder der vollständige Ausgleich des Energiebedarfes auf einem Linienumlauf bei einem anschließenden Nachladevorgang möglich. Es ist vorgesehen, die entsprechenden Kompetenzen in nachfolgenden Projekten gewinnbringend einzusetzen und in entsprechenden Praxislösungen zu vermarkten. Grundlage hierfür ist die während des Projektes gemeinsam mit dem Industriepartner Schunk Bahn- und Industrietechnik GmbH entstandene Patentanmeldung.

Für das Fraunhofer IVI als Institut einer großen Forschungsgesellschaft stellt neben den Potenzialen zur Vermarktung der Erkenntnisse im Rahmen künftiger Dienstleistungen und Produkte auch die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und die Übertragung von methodischen Kompetenzen auf künftige Generationen einen wichtigen Aspekt seiner Tätigkeit dar. So wurden 4 studentische Hilfskräfte in die teilweise recht komplexen konzeptionellen und umsetzungsbezogenen Arbeiten eingebunden. Es entstanden mehrere Praktikumsarbeiten sowie zwei Studien- bzw. Abschlussarbeiten. Für eine erfolgreich abgeschlossene Dissertation gab das Projekt wesentliche Anregungen.

Die Leserschaft der Fachzeitschrift OMNIBUSREVUE wählte die im Rahmen des Projektes EDDA-Bus gemeinsam mit dem Projektpartner Schunk Bahn- und Industrietechnik entwickelte Schnellladeeinrichtung unter dem Namen Fraunhofer Elektrobuskonzept für den Preis „Partner des Jahres 2015“ in der Kategorie Technik. Aus der mit diesem Preis verbundenen fachlichen Anerkennung der erreichten Arbeitsergebnisse ergibt sich für die beteiligten Mitarbeiter eine hohe Motivation für die weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Bereich elektrischer Antriebskonzeptionen für öffentliche Nahverkehrsmittel.

4 Fortschritt an anderer Stelle

Im Zeitraum des Forschungsprojektes gab es Aktivitäten im Bereich der Schnellladesysteme. So hat die Siemens AG zwischenzeitlich auf der „Innovationslinie 109“ der Hamburger Hochbahn AG ein ähnliches Nachladekonzept für einen Plug-in-Hybridbus vorgestellt. Im Gegensatz zum Systemansatz des Projektes „EDDA-Bus“ wird hier der bewegliche Teil des Hochstrom-Energieübertragungssystems nach entsprechender Positionierung des Fahrzeuges von oben in Richtung Fahrzeug abgesenkt und mit diesem elektrotechnisch verbunden (Bild 22).

Bild 22:
Schnellladesystem
von SIEMENS in
Hamburg



Ein weiteres Beispiel für einen alternativen Systemansatz zur Gestaltung eines Hochstrom-Energieübertragungssystems wurde im Parallelprojekt „E-ÖPNV“ durch die RWTH Aachen umgesetzt und für die Praxiserprobung bei den Stadtwerken Münster installiert. Hier wird nach Stillstand des Fahrzeuges im Haltestellenbereich der wegseitige Teil des Systems, welcher auf einem Haltestellendach angeordnet ist, in Richtung Fahrzeug bewegt und so der für die Energieübertragung notwendige Kontaktschluß erzielt (Bild 23).

Bild 23:
Schnellladesystem
der RWTH Aachen
in Münster



Forschungsbedarf

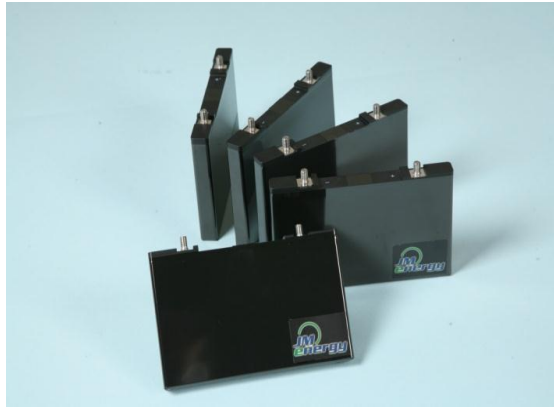
Als Besonderheit weist die im Projektfahrzeug für die Rückkühlung des LiOn Batteriesystems ausgeführte Klimaanlage einen Kältemittelspeicher mit einem Fassungsvermögen von 100 Litern auf. Hierdurch wird dem speziellen Konzept einer punktuellen Energieversorgung nach dem DockingPrinzip Rechnung getragen. Während des Nachladevorgangs der Traktionsbatterie am Linienendpunkt wird parallel das Kühlmedium in der Anlage mittels Energie aus der Ladestation rückgekühlt. Dies ermöglicht eine ausreichende Kühlenergiereserve für den nachfolgenden Linienumlauf, wodurch hierfür keine Energie aus der Traktionsbatterie entnommen werden muss. Diese energetische Entkopplung der Batteriekühlung vom Fahrbetrieb kann bei Anwendung des vollelektrischen Busbetriebs nach dem DockingPrinzip selbstverständlich auch auf andere notwendige Hilfsprozesse, beispielsweise die Fahrerarbeitsplatz- und Fahrgastraumklimatisierung oder die Beheizung des Fahrzeuges übertragen werden.

Zukünftige Entwicklungsarbeiten sollten auf die Verfügbarkeit leistungselektronischer Bordnetzrichter fokussieren, die sich durch mehrere unabhängig voneinander in Strom und Frequenz regelbare Drehstromausgänge auszeichnen. Hierdurch könnte in geeigneter Weise den erhöhten Anforderungen eines vollelektrisch angetriebenen Linienbusses hinsichtlich der elektrischen Versorgung notwendiger Hilfsbetriebe Rechnung getragen und sowohl Geräuschemissionen minimiert als auch die energetische Effizienz solcher Fahrzeuge weiter erhöht werden.

Der begonnene Standardisierungsprozess von Schnellladesystemen für ÖPNV-Fahrzeuge sollte neben der unabdingbaren Absicherung eines Personensicheren Ladebetriebes ebenfalls die Spezifik des Betriebseinsatzes dieser Fahrzeuge berücksichtigen und zukünftige Entwicklungen nicht beinhalten. Die derzeit in Fachkreisen favorisierte Übernahme des für die Nachladung von Fahrzeugen des Individualverkehrs aus gegenseitigen Ladestationen mittels Steckkontakten gültigen internationalen Standards ISO 15118 für konduktive Nachladesysteme des öffentlichen Personennahverkehrs erscheint ohne entsprechende Anpassungen nicht geeignet, um die hier bestehenden speziellen Anforderungen umsetzen zu können. Insbesondere die notwendige Zeit zwischen Kontaktschluss und Beginn der Energieübertragung von mehr als 30 Sekunden sollten bei einer solchen Anpassung durch entsprechende Gremien in UITP und VDV Beachtung finden. Aus gleichem Grund ist bei einer Übernahme des bestehenden technischen Regelwerkes aus dem Bereich des Individualverkehrs auf Fahrzeuge des ÖPNV der nach DIN EN 61851 geforderte fünfte Kontaktpol (PP) ebenfalls kritisch zu hinterfragen, mit welchem über einen festen Widerstandswert lediglich die maximale Stromhöhe zwischen Fahrzeug und Ladestation vermittelt wird.

Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf wird auf dem Gebiet schnellladefähiger Energiespeichertechnologie gesehen. Eine mögliche Alternative zu reinen LiOn Batteriesystemen stellt die Kombination von Li-Ionen Batterie und Doppelschichtkondensator dar (Li-Ionen-Kondensator – Bild 24). Sie soll die beiden positiven Eigenschaften der Technologien, hohe Energiedichte bei Batterien und hohe Leistungsdichte bei Kondensatoren, in einer Einzelzelle vereinen. Auf diese Weise kann der notwendige leistungselektronische und steuerungstechnische Beschaltungsaufwand des Dualspeichers minimiert werden.

Bild 24:
Li-Ionen-
Kondensator



Hier gibt es bereits kommerziell verfügbare Lösungen auf Einzelzellebene, in einem nächsten Schritt müssten auf dieser Basis komplette Energiespeichersysteme entwickelt, erprobt und kommerzialisiert werden.

5 interne Berichte

- [1] Schnittstellen und FunktionsprinzipV0_7.docx – Peppel, T.: „Spezifikation der Schnittstellen und Funktionsprinzipien zwischen Bus und Ladestation“
- [2] 130123_SIMULATION_EDDA_12_18m.doc - Klausner, S.: „Analytische Untersuchung des voll-elektrischen Fahrbetriebes“
- [3] 130328 Lastenheft_DS.pdf
- [4] 130308 Bewertungsmatrix_Grobkonzepte.xls
- [5] 130221 Präsentation_Grobkonzepte.pdf
- [6] Ergebnisbericht Linienanalyse (AP 1.1, 1.2).pdf - VCDB: „EDDA-Bus - Elektromobilitäts-Demonstration Docking-Anwendung Bus - AP 1.2 Einsatzbedingungen“
- [7] Ergebnisbericht Fahrzeuganalyse (AP 1.3).pdf - VCDB: „EDDA-Bus - Elektromobilitäts-Demonstration Docking-Anwendung Bus - AP 1.3 Fahrzeuge“
- [8] 131215_Delta Liste Projekt EDDA.pdf
- [9] 131029 EDDA_IVI_NEBENVERBRAUCHER.pdf
- [10] Gutachten 932/A806/00095-01 nach §13 EG-FGV der Technischen Prüfstelle für den Kraftfahrzeugverkehr im TÜV Rheinland Berlin Brandenburg Pfalz e.V. vom 30.09.2014
- [11] Gutachten 402/13102598/151 der TÜV Rheinland InterTraffic GmbH
- [12] Prüfbericht Elektrobus, Schnellladestationen und Haltestellen-Ladeeinrichtung nach 26.BImSchV, Nr. 1179-14-EE-14-PB001 der SLG Prüf- und Zertifizierungs GmbH Hartmannsdorf vom 07.10.2014

6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Posenau, C.; Engel, M.; Knote, T.; Klausner, S.; Dimter, T.: **Automated Boost-Charging at Selected Stops for All-Electric Buses in Urban Public Transport.** 14th International Workshop on Research and Education in Mechatronics REM 2013, Vienna, Austria, June 6-7, 2013. Erschienen in: Proceedings, Malisa, Viktorio; Komenda, Titanilla (Eds.). Wien, Österreich, Verein zur Förderung der Automation und Robotik (F-AR), 2013, S.173-177, ISBN 978-3-90275-907-8.

Büchner, S.; Klausner, S.: **Vollelektrischer Bus-Linienbetrieb nach dem Docking-Prinzip.** In: eb – Elektrische Bahnen, München, Deutscher Industrie-Verlag, 2015, Jg. 113, Heft 1, S. 44-53, ISSN 0013-5437

Büchner, S.; Klausner, S.: **Full-electric Bus Operation According to the Docking Principle in Regular Service.** In: eb – Elektrische Bahnen, special issue eb International, München, Deutscher Industrie-Verlag, 2015, vol. 113, issue 1, p. 38-43, ISSN 0013-5437.

Klausner, S.: **Schnellladekonzept für Elektrobusse.** In: Omnibusspiegel, Bonn, Hanke, 2015, Heft 5, S. 38-41, ISSN 0724-7664

Knote, T.: **Battery-Powered Bus Employs Fast Charging for Regular Operation.** In: power electronics (online-Artikel), URL: <http://powerelectronics.com/power-management/battery-powered-bus-employs-fast-charging-regular-operation>. Letzter Aufruf: 23.06.2015

Büchner, S.; Engel, M.; Klausner, S.: **Conception and Implementation of a Charging station for Electric Buses in Public Transport.** erschienen in 15. Internationales Stuttgarter Symposium - Automobil- und Motorentechnik; Springer Fachmedien Wiesbaden; 2015, S. 585-594, ISBN 978-3-658-08843-9

Büchner, S.; Klausner, S.; Engel, M.: **Konzeption und Realisierung einer Ladestation für Elektrobusse im ÖPNV.** 15. Internationales Stuttgarter Symposium »Automobil und Motorentechnik«, Stuttgart, 17. - 18. März 2015

Klausner, S.: **Batteriebus mit Schnellladung im Liniendienst – Projekterfahrungen.** Elektromobilität vor Ort – 2. Fachkonferenz des BMVI für kommunale Vertreter, Verkehrsbetriebe und Flottenbetreiber, Offenbach, 27.-28. Januar 2015

Klausner, S.: **EDDA-Bus: Schnellladefähiger Batteriebus im Linieneinsatz.** Fachtagung »Neue Bussysteme und Elektrofahrzeuge«, Dresden, 12.-13. März 2015

Knote, T.: **Das Konzept schnellladefähiger Batteriebusse am Beispiel EDDA-Bus.** Drive-E-Akademie 2015, Erlangen, 08.-13. März 2015.

Abbildungen

Bild 1:	Prototypischer Ansatz des DockingPrinzip (2006)	3
Bild 2:	Struktur der Arbeitspakete	8
Bild 3:	Hybridbus des Fraunhofer IVI zum Projektstart (2012)	11
Bild 4:	Projektfahrzeug im finalen Ausbaurzustand	12
Bild 5:	Lenkhydraulikpumpe ohne Silencer (links) und nach Integration des Bauteils (blau)	14
Bild 6:	Ausbildung der einzelnen Kontaktelemente zur Einhaltung der geforderten Kontaktreihenfolge	16
Bild 7:	zeitlicher Verlauf der Temperatur in den vier Kontaktbolzen bei Dauerbelastung (Schnellladung)	17
Bild 8:	zeitlicher Verlauf der Temperatur in den vier Kontaktbolzen bei Pulsbelastung (Pulsladung)	17
Bild 9:	Hochstromkontaktsystem im geschlossenen Zustand bei Fahrzeug in Normallage	18
Bild 10:	Hochstromkontaktsystem im geschlossenen Zustand bei einseitig abgesenktem Fahrzeug (Kneeling)	18
Bild 11:	RFID-Technologie im Bordstein für die Positionserkennung des Fahrzeuges	19
Bild 12:	Ladepunkt in Dresden-Gruna	21
Bild 13:	Aufbau der Schnell-Ladestation	22
Bild 14:	Aufbau der Puls-Ladestation	22
Bild 15:	mittels Simulation ermittelter Verlauf der Schnellladung des Batteriespeichers	26
Bild 16:	Projektfahrzeug im Liniendienst	27
Bild 17:	Höhenprofil der in der 1.Phase der Praxiserprobung befahrenen Strecke	29
Bild 18:	Vergleich der erreichten Verfügbarkeiten des Projektfahrzeuges und von Hybridbussen	30
Bild 19:	Projektfahrzeug beim Nachladevorgang	31
Bild 20:	Höhenprofil der in der 2.Phase der Praxiserprobung befahrenen Strecke	31
Bild 21:	Höhenprofil der in der 3.Phase der Praxiserprobung befahrenen Strecke	32
Bild 22:	Schnellladesystem von SIEMENS in Hamburg	36
Bild 23:	Schnellladesystem der RWTH Aachen in Münster	36
Bild 24:	Li-Ionen-Kondensator	38