



STADTMANNHEIM<sup>2</sup>

**BOMBARDIER**



primove  
true e-mobility

## Leuchtturmprojekt PRIMOVE Mannheim



**PRIMOVE Mannheim: Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb**

Gefördert durch:

### I – II Schlussbericht



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

**Angaben zu den Antragstellern:**

**Name der Stelle:** Rhein-Neckar-Verkehr-GmbH  
**Anschrift:** Möhlstraße 27, 68165 Mannheim  
**Name des Verantwortlichen:** Sebastian Menges  
**Telefon:** 0621/465-1706  
**E-Mail:** s.menges@rnv-online.de  
**Internet:** www.rnv-online.de

**Name der Stelle:** Bombardier PRIMOVE GmbH  
**Anschrift:** Schöneberger Ufer 1, 10785 Berlin  
**Name des Verantwortlichen:** Dana Hahn  
**Telefon:** 030/98607-1144  
**E-Mail:** Dana.Hahn@rail.bombardier.com  
**Internet:** www.bombardier.com

**Name der Stelle:** Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Institut für  
Fahrzeugsystemtechnik – Teilinstitut für  
Bahnsystemtechnik  
**Anschrift:** Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe  
**Name des Verantwortlichen:** Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld  
**Telefon:** 0721/608-48608  
**E-Mail:** peter.gratzfeld@kit.edu  
**Internet:** <http://www.fast.kit.edu/bst/>

**Name der Stelle:** Stadt Mannheim  
**Anschrift:** Dezernat 1 Rathaus E5, 68159 Mannheim  
**Name des Verantwortlichen:** Alexandre Hofen-Stein  
**Telefon:** 0621 / 293-9317  
**E-Mail:** Alexandre.Hofen-Stein@mannheim.de  
**Internet:** www.mannheim.de

---

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Kurze Darstellung .....</b>	<b>7</b>
<b>1.</b>	<b>Aufgabenstellung.....</b>	<b>7</b>
1.1	Gesamtziel des Projektes.....	7
1.2	Förderpolitische Aufgabenstellung .....	8
1.3	Wissenschaftliche und technische Aufgabenstellung .....	9
<b>2.</b>	<b>Voraussetzungen .....</b>	<b>11</b>
<b>3.</b>	<b>Planung und Ablauf des Vorhabens .....</b>	<b>12</b>
3.1	Stand der Wissenschaft und Technik.....	12
3.2	Bisherige Arbeiten .....	12
3.2.1	Bombardier Transportation.....	12
3.2.2	Rhein-Neckar-Verkehr-GmbH .....	13
3.2.3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) .....	14
3.2.4	Stadt Mannheim.....	15
<b>4.</b>	<b>Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....</b>	<b>16</b>
<b>II</b>	<b>Eingehende Darstellung .....</b>	<b>17</b>
<b>1.</b>	<b>Erzielte Ergebnisse.....</b>	<b>17</b>
1.1	Arbeitspaket 0 – Projektleitung.....	17
1.2	Arbeitspaket 1 – Öffentlichkeitsarbeit.....	19
1.3	Arbeitspaket 2 – Bürgerbeteiligung .....	20
1.3.1	Informationsveranstaltung für die Bürgerschaft.....	20
1.3.2	Informationsflyer .....	22
1.3.3	Website .....	22
1.3.4	Fahrgastbefragung .....	23
1.3.5	Anwohnerbefragung .....	25
1.4	Arbeitspaket 3 – Wissenschaftliche Begleitung .....	26
1.4.1	Untersuchung verschiedener Ladesegment-Topologien.....	26
1.4.2	Erstellung eines Simulationsmodell des Gesamtsystems samt Validierung	29
1.5	Arbeitspaket 4 – Systemdefinition .....	44
1.6	Arbeitspaket 5 – Genehmigung Bus / Infrastruktur .....	47
1.6.1	Genehmigungsprozess.....	47
1.6.2	Fahrzeug.....	48
1.6.3	Ladeinfrastruktur.....	48
1.6.4	Systeminbetriebnahme.....	49

---

---

1.7	Arbeitspaket 6 – Bus .....	50
1.8	Arbeitspaket 7 – Elektro-Lieferfahrzeug / Van .....	53
1.8.1	Fahrzeugseitige Komponenten.....	53
1.8.2	Ladestation .....	55
1.8.3	Umbau eines Vans mit Dieselantrieb zum Elektrofahrzeug .....	57
1.8.4	Integration des neuentwickelten induktiven Ladesystems in den E-Van .....	57
1.8.5	Einsatz des Vans im Arbeitsalltag .....	58
1.9	Arbeitspaket 8 – Infrastruktur-Ausbau.....	59
1.9.1	Ladepad.....	59
1.9.2	Versorgungseinheit.....	60
1.9.3	Kühleinheit.....	61
1.10	Arbeitspaket 9 – Vorbereitung rnv-Betrieb und –Werkstatt.....	63
1.11	Arbeitspaket 10 – Testbetrieb .....	64
1.12	Arbeitspaket 11 – Dauerbetrieb im Fahrgasteinsatz auf der Linie 63 .....	66
1.13	Arbeitspaket 12 – Evaluation.....	67
1.13.1	Praxistauglichkeit.....	67
1.13.2	Energieverbrauch .....	68
1.13.3	Ökologischer Effekt .....	69
1.13.4	TCO .....	70
1.13.5	Akzeptanz .....	71
1.13.6	Ausblick: Elektrifizierung Mannheimer Buslinien.....	72
<b>2.</b>	<b>Nachweis der wichtigsten Positionen des zahlenmässigen Nachweises .....</b>	<b>73</b>
2.1	Kosten.....	73
2.2	Zeitablauf.....	74
<b>3.</b>	<b>Nachweis der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit... 75</b>	
<b>4.</b>	<b>Nachweis des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....</b>	<b>76</b>
4.1	Nutzen für die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten.....	76
4.2	Nutzen für wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichte.....	76
<b>5.</b>	<b>Nachweis des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen... 77</b>	
<b>6.</b>	<b>Nachweis der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses . 78</b>	

---

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: PRIMOVE Labor in Mannheim .....	13
Abbildung 2: Projektorganisation .....	19
Abbildung 3: Informationsflyer zum rnv-Primove Projekt .....	22
Abbildung 4: Internetseite zum Projekt.....	23
Abbildung 5: Gesamtstruktur Softwaremodell .....	30
Abbildung 6: Logarithmisch skalierte Untersuchung der Haltestellenstandzeiten aus dem Jahr 2014, Linie 63.....	31
Abbildung 7: Graphische Benutzeroberfläche zur Konfiguration eines zu simulierenden Betriebstages .....	32
Abbildung 8: Visualisierung E-Bus-Simulation .....	32
Abbildung 9: Charakteristika SORT 1 Fahrzyklus (Quelle: UITP-Projekt „SORT“, Standardisierte Zyklen für Straßentests, 2. Auflage, 2009).....	33
Abbildung 10: Energiebedarf E-Bus Mannheim für den angenäherten SORT 1 Fahrzyklus, links KIT-Messergebnisse, rechts die parallelen Bombardier-Messergebnisse .....	33
Abbildung 11: Eindruck von der Messfahrt unter Passagierbetrieb am 28. Januar 2016 .....	34
Abbildung 12: Dauer und Energiebedarf pro Umlauf des Betriebstags 28. Januar 2016 .....	35
Abbildung 13: Validierung des Softwaremodells anhand des Vergleichs der simulierten mit der gemessenen Motorleistung .....	36
Abbildung 14: Möglicher Linienvverlauf einer E-Bus-Linie durch die Mannheimer Konversionsflächen Franklin- und Taylor-Village (blaue Markierung) .....	37
Abbildung 15: Generischer Fahrzyklus für neue E-Buslinie durch die Mannheimer Konversionsflächen mit Markierung der Haltestellen .....	38
Abbildung 16: SOC-Verlauf für die Simulation eines E-Bus-Umlaufs gemäß des in Abbildung 12 gezeigten Fahrzyklus mit einer Ladehaltestelle je Richtung am Platz der Freundschaft .....	39
Abbildung 17: Ladezustandsverlauf unter den gleichen Rahmenbedingungen wie in Abbildung 13, allerdings unter Hinzunahme einer weiteren Ladestation am Bahnhof Käfertal.....	40
Abbildung 18: Ergebnisse zum TCO-Vergleich Diesel- vs. E-Bus für die Jahre 2014, 2020 und 2030 .....	42
Abbildung 19: Vergleich der CO <sub>2</sub> -Emissionen über den gesamten Lebenszyklus für einen E-Bus im Gegensatz zu einem Dieselbus für den Betrieb auf der Mannheimer Linie 63 ..	43

---

Abbildung 20: GPS Streckenaufzeichnung .....	45
Abbildung 21: Streckensimulation der Linie 63.....	47
Abbildung 22: Zulassungsprozess .....	48
Abbildung 23: Darstellung der Ergebnisse der stufenweisen Inbetriebnahme .....	50
Abbildung 24: PRIMOVE-Hess Bus .....	52
Abbildung 25: ORU .....	54
Abbildung 26: Ladesäule .....	55
Abbildung 27: Ladepad .....	56
Abbildung 28: e-Vito .....	58
Abbildung 29: Ladepad .....	59
Abbildung 30: Versorgungseinheit .....	60
Abbildung 31: Kühleinheit .....	61
Abbildung 32: Streckenverlauf der Linie 63.....	62
Abbildung 33: Haltestelle Pfalzplatz mit dem installierten PRIMOVE-System .....	63
Abbildung 34: Gesamtsystemverfügbarkeit im Dauerbetrieb auf der Linie 63 .....	68
Abbildung 35: Energieverbrauch der Busse .....	69
Abbildung 36: Realisierte CO <sup>2</sup> -Einsparungen durch E- Busse im Jahr des Dauerbetriebs ..	69
Abbildung 37: Kostenverteilung über 10 Jahre für zwei Dieselbusse .....	70
Abbildung 38: Jährliche TCO-Kosten im Vergleich.....	71

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Konzeptvarianten für Ladesegment-Topologien .....	28
Tabelle 2: Energetische Kennzahlen E-Bus Mannheim für einen exemplarischen Betriebstag (28. Januar 2016) .....	35
Tabelle 3: Übersicht der ausgewählten Haltestellen.....	46
Tabelle 4: Kostenübersicht.....	73

# I Kurze Darstellung

## 1. Aufgabenstellung

### 1.1 Gesamtziel des Projektes

Elektromobilität ist ein Schlüssel zu einer nachhaltigen, klima- und umweltverträglichen Mobilität. Mit dem Ziel der Reduktion von Schadstoffemissionen und von Lärm im Sinne der Ressourcenschonung, des Umweltschutzes und der Erhöhung der Lebensqualität, verpflichten sich weltweit Länder und vor allem Städte den Anteil verbrennungsmotorischer Antriebe im Verkehr zu senken. Auch der ÖPNV ist hiervon betroffen und kann mit seiner breiten öffentlichen Wahrnehmung dazu beitragen die E-Mobilität als alternative Antriebsform zu etablieren.

Durch den Ersatz der beiden auf der Mannheimer Linie 63 (Hauptbahnhof – Pfalzplatz) verkehrenden Dieselsebusse durch zwei induktiv (mit der PRIMOVE-Ladetechnologie) im Betrieb nachladende Elektrobusse sowie durch den Einsatz eines Elektro-Lieferfahrzeugs/ Vans als Servicefahrzeug in der Metropolregion Rhein-Neckar, sollte der erste Schritt für einen zukünftigen elektrischen Stadtverkehr in Mannheim gegangen werden. Hierfür sollte in Zusammenarbeit zwischen der Rhein-Neckar-Verkehr GmbH (rnv) und der Bombardier Transportation GmbH (jetzt Bombardier PRIMOVE GmbH) sowie unterstützt durch die Stadt Mannheim und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), im Rahmen des Projektes neue Technologien entwickelt, aufgebaut und im Praxiseinsatz erprobt werden. Mit der PRIMOVE-Technologie können Elektrobusse während der fahrplanmäßigen Standzeiten nachgeladen werden. Die induktive Ladetechnik ermöglicht das kontaktlose Laden mit Leistungen bis 200 kW und fügt sich nahezu unsichtbar in den Straßenraum und das Stadtbild ein. Diese Technologie eliminiert damit zwei wesentliche Schwächen für die Alltagstauglichkeit von Elektrofahrzeugen: geringe Reichweite und lange Ladezeiten. Auf diese Weise können Buslinien komplett elektrisch betrieben werden. Die zu elektrifizierende Linie 63 entspricht dem SORT 1-Zyklus, einem Vergleichszyklus für schweren Innenstadtverkehr mit geringen Standzeiten an den Wendehaltstellen und einer hohen zu durchfahrenden Verkehrsdichte im Zentrum Mannheims. Aus diesem Grund gilt es auszutesten, inwieweit, neben den Ladepunkten an den Endhaltstellen, Ladepunkte an Zwischenhaltstellen den elektrischen Betrieb vereinfachen.

Weiterhin sollen im Zuge des Projektes Bürger- und Nutzererfahrungen gesammelt und so ein aussagekräftiger Nachweis der Alltagstauglichkeit und Praktikabilität der E-Mobilität im öffentlichen Verkehr erbracht werden.

## 1.2 Förderpolitische Aufgabenstellung

Ziel des Projekts ist der Nachweis der Praktikabilität des Einsatzes rein elektrisch betriebener Stadtbusse mit Zwischenladung auf der Strecke sowie eines elektrischen Lieferfahrzeugs im Sinne der weiteren Optimierung eines emissionsarmen, öffentlichen Verkehrs. Dabei steht neben dem Erfahrungsaufbau von Zulassungs-, Bau- und Betriebsfragen, auch die Ermittlung von Kostensenkungspotenzialen in Abhängigkeit der ermittelten Rahmenbedingungen für einen zuverlässigen Alltagsbetrieb im Fokus. Die im Rahmen des Projekts „PRIMOVE Mannheim“ gesammelten Erfahrungen hinsichtlich Technik, öffentlicher Resonanz und Wirtschaftlichkeit werden dazu dienen den Einsatz der „PRIMOVE“-Technologie künftig für das gesamte Verkehrsgebiet der rnv vorzubereiten und ggf. zur Anwendung zu bringen.

In ihrer ‚Klimaschutzkonzeption 2020‘ hat die Stadt Mannheim sich zum Ziel gesetzt, bis 2020 die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Stadt um 40 Prozent im Vergleich zu 1990 zu senken. Der weitere Ausbau des Öffentlichen Personennahverkehrs ist ein wesentlicher Baustein hierfür. Auch die CO<sub>2</sub>-neutrale Elektromobilität kann einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen des Ziels erbringen. Beide Bausteine werden im Leuchtturmprojekt PRIMOVE Mannheim im Sinne des Klimaschutzes in der Stadt kombiniert. In diesem Zusammenhang unterstützt die Stadt Mannheim das langfristige Ziel der Rhein-Neckar Verkehr GmbH (rnv), bei der Beschaffung von Stadtbussen in Mannheim bis 2025 komplett auf Elektroantrieb zu setzen.

Ein emissionsfreier Öffentlicher Personennahverkehr, ermöglicht durch die PRIMOVE-Technologie, sorgt für weniger lokale Abgase in der ohnehin bereits stark belasteten Innenstadt. Gleichzeitig wird durch die leisen Elektromotoren der Straßenverkehrslärm deutlich reduziert. Damit erhöhen sich die Lebensqualität in der Stadt und auch die Attraktivität für Fachkräfte und Unternehmen sich in Mannheim anzusiedeln. Das Leuchtturmprojekt PRIMOVE Mannheim soll die bundesweite Aufmerksamkeit auf Mannheim lenken. Diese Aufmerksamkeit wird die Stadt nutzen, um auf ihr hohes Innovationspotenzial für umweltfreundliche Mobilitätslösungen hinzuweisen: Unter anderem gibt es in Mannheim bereits ein ‚Kompetenzzentrum für emissionsfreie Mobilität‘ eines der größten Bushersteller weltweit sowie eine entsprechende Forschungs- und Entwicklungsgruppe eines führenden Schienentechnikkonzerns.

Weiterhin steht die Stadt Mannheim in den nächsten Jahren vor einem beispiellosen Konversionsprogramm: Mit dem Abzug der amerikanischen Streitkräfte wurden bis Ende 2015 rund 510 Hektar – oder 3,5 Prozent der gesamten Gemarkungsfläche der Stadt – für neue, zivile Nutzungen frei. Das Leuchtturmprojekt PRIMOVE Mannheim trägt als Vorzeigebispiel der E-Mobilität dazu bei, für diese Flächen Unternehmen zu gewinnen, die zukunftssichere, attraktive Arbeitsplätze im Bereich der erneuerbaren Energien und der emissionsfreien Mobilität schaffen.

Mit der Akzeptanzarbeit für die neue PRIMOVE-Technologie baut die Stadt Mannheim ihre bereits vorhandene Methodenkompetenz in der Konzeption und Durchführung von Bürgerbeteiligungsprozessen aus. Gleichzeitig werden weitere Erfahrungen für erfolgversprechende Bürgerbeteiligungsprozesse bei Technologieprojekten gesammelt, die anderen Kommunen und Vorhabensträgern als Best Practice zur Verfügung gestellt werden.

## 1.3 Wissenschaftliche und technische Aufgabenstellung

Das physikalische Prinzip der berührungslosen Energieübertragung beruht auf der Nutzung des magnetischen Wechselfeldes einer Primärwicklung zur Übertragung elektrischer Energie auf einen mobilen Träger. Die primärseitige Induktionsschleife besteht aus einem mit hochfrequentem Wechselstrom gespeisten dreiphasigen Wicklungssystem. Das auf diese Weise erzeugte magnetische Wechselfeld induziert in dem fahrzeugseitig installierten induktiven Aufnehmer (Pick-Up) eine Spannung, welche der Fahrzeugbatterie zugeführt wird. Vorteile dieser Technologie sind Verschleißfreiheit, weitgehende Unsichtbarkeit im Haltestellenbereich, keine Oberleitung sowie durch das regelmäßige Nachladen auf der Strecke prinzipiell beliebig lange Reichweite.

Die Parameter für die Auslegung der Infrastruktur, des elektrischen Antriebsstrangs der Fahrzeuge, der induktiven Energieübertragung sowie des Betriebs sind für den konkreten Anwendungsfall der Linie 63 bzw. für das Einsatzprofil des Lieferfahrzeugs zu ermitteln. Aufbauend hierauf sind entsprechende technische Systeme zu entwickeln, zu erproben, zuzulassen und deren Alltagstauglichkeit im Praxiseinsatz zu verifizieren. Nachfolgend werden die gemäß des Förderantrags zu erreichenden Aufgabenstellungen detaillierter aufgelistet und präzisiert.

- Nachweis der Alltagstauglichkeit und der Praktikabilität der neuen Technologie der kontaktfreien, induktiven Batterieladung (PRIMOVE) sowie eines rein batteriebetriebenen Elektrobusses im öffentlichen Verkehr und Demonstration deren Bewährung über einen Zeitraum von zwölf Monaten.
- Nachweis, dass die für Dieselbusse ausgelegten, zeitlich sehr engen Fahrzeugumläufe der Linie 63 vollständig mit PRIMOVE-geladenen Elektrobussen ohne erhöhte Fahrzeuganzahl weiterhin unverändert angeboten werden können. Ermittlung der zeitlichen Zuschläge, welche gegebenenfalls erforderlich sind, um einen Busmehrbedarf im Businesscase abzubilden.
- Weiterentwicklung, Tests und Zulassung der induktiven Batterieladung (PRIMOVE) für den Anwendungsfall eines Elektro-Lieferfahrzeugs (Van) sowie die entsprechende Umsetzung in einem Prototyp.
- Erstellung eines Simulationsmodells, mit dessen Hilfe der Energiebedarf der Elektrobusse auf der Linie 63 berechnet werden kann. Insbesondere sind der Entladegrad der Traktionsbatterie während des Fahrbetriebs zwischen den einzelnen Haltestellen sowie die Ladehöhe an den Ladesegmenten simulativ zu ermitteln. Die Lastverläufe an den Einspeisestellen sind ebenfalls zu simulieren.
- Nach erfolgreicher Inbetriebnahme der Strecke sind die Simulationsergebnisse durch Messungen auf dem E-Bus zu verifizieren. Die durch die Messungen erhaltenen Informationen sind für Empfehlungen an die Busfahrer zur Ladestoppoptimierung zu nutzen. Vergleich des tatsächlich realisierten Energiebedarfs der E-Busse mit Standard-Fahrzyklen (SORT-Zyklen) und Ermittlung der Wirkungsgrade.

- Ermittlung von Aspekten der Stadtentwicklung in Abhängigkeit kommunaler Besonderheiten und deren Berücksichtigung bei der Integration der PRIMOVE-Technik in das Stadtbild. Definition der Schnittstellen zwischen der Kommune und dem Verkehrsbetrieb für die Einführung und den Aufbau der neuen Technologie.
- Erforschung, Entwicklung sowie Evaluation der neuen Technologie des Betriebs eines reinen Elektrobusses unter Einbindung der Bevölkerung unter Alltagsbedingungen. Dabei ist neben der notwendigen Akzeptanz der Bürger vor allem ein Augenmerk auf Aspekte der Sicherheit, Barrierefreiheit, Systemeffizienz und Interoperabilität mit bestehender und sich aus der Anwendung zukünftig ergebender Infrastruktur zu legen.
- Ermittlung der Auswirkungen der neuen Technologie auf den ÖPNV-Betrieb, die Bus- und Straßenbahnwerkstatt sowie die Infrastrukturwerkstatt: Sicherheit, Werkstattorganisation, Fahrerschulungen. Erfassung der erforderlichen Prozessänderungen und Umsetzung, Dokumentation sowie Nachhaltung der angepassten Prozesse.
- Aufstellung eines Businessplans zur Unterstützung einer zügigen Markteinführung vollelektrischer Busse für den Einsatz im städtischen ÖPNV, insbesondere der Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten. Verifizierung des Businessplans anhand der durch das Projekt gewonnenen Erfahrungen. Erstellung eines Handlungsplans unter der Überschrift „100% Elektrobuse für Mannheim bis 2025“, welcher auch für andere rnv-Standorte nutzbar ist.
- Erzielung einer starken Öffentlichkeitswirkung. Durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen soll das Image des öffentlichen Nahverkehrs nachhaltig verbessert und so sein Wettbewerbsvorteil durch eine erhöhte Umweltfreundlichkeit ausgebaut werden.
- Publizierung der Ergebnisse zum Verlauf des Projektes durch Veröffentlichungen und Beiträge bei einschlägigen Konferenzen im wissenschaftlichen Umfeld, im ÖPNV-Bereich und im Rahmen des Mannheimer Stadtmarketings. Vorstellung der Ergebnisse auf der VDV-Plattform Innovative Antriebe Bus und Infrastruktur.
- Untersuchung der Akzeptanz von Elektrobussen bei Fahrgästen und unmittelbaren Linienanwohnern.
- Frühzeitige Einbindung von Fahrgästen und unmittelbaren Anwohnern durch ein schlankes Bürgerbeteiligungsverfahren in den Planungsprozess. Auf diese Weise sollen mögliche Vorbehalte gegen die neue Technik abgebaut werden.
- Verifizierung der Vorteile von Elektrobussen für die Stadt (weniger Emissionen und Lärm, CO<sub>2</sub>-Einsparung).

## 2. Voraussetzungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Pilotanlage Augsburg der kontaktfreien Energieübertragung für Straßenbahnen auf der Anbindungsstrecke von der Linie 3 zur Messe (Messeschleife)“ hat Bombardier den Einsatz der induktiven Ladetechnologie PRIMOVE für Straßenbahnanwendungen bereits erprobt.

Die induktive Ladetechnik wurde im Anschluss vom Projekt Augsburg auf die Busanwendung adaptiert. Hier war der Hauptanpassungspunkt das Prinzip von dynamischer Energieübertragung auf Batterieladen an Haltestellen zu ändern. Die Komponenten wurden dafür neu entwickelt und auch das Kommunikations- und Regelsystem den geänderten Anforderungen entsprechend neu entworfen.

Bombardier hat für Straßenbahnen und Busse eine Lithium-Ionen Batterie entwickelt, die hohe Lade- und Entladeströme bei geringem Gewicht ermöglicht. Eine solche Batterie ist Voraussetzung für Schnellladesysteme wie PRIMOVE 200 kW. Ergänzt wird das Hochspannungs-Elektrosystem um ein von Bombardier entwickeltes Antriebssystem für Elektrobusse. Dabei konnte Bombardier auf seine weitreichende Erfahrung bei Bahnantrieben zurückgreifen.

## **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

### **3.1 Stand der Wissenschaft und Technik**

Bombardier Transportation hat ein kontaktloses Stromübertragungssystem für den oberleitungsfreien Betrieb von elektrisch betriebenen Schienenfahrzeugen entwickelt, dessen Einsatz bei Straßenbahnen Anfang 2009 erfolgreich getestet worden ist. Das unter dem Namen PRIMOVE vermarktete System beruht auf dem Prinzip der induktiven Energieübertragung ähnlich eines Transformators. Durch induktive Energieübertragung betriebene Fahrzeuge werden in anderen Industriebereichen, zum Beispiel für Fördersysteme in Produktionsstätten oder in Reinraum-Umgebungen bei der Halbleiter-Chipfertigung bereits als Serienprodukte eingesetzt. Die Technologie der induktiven Energieübertragung ist beispielsweise auch zur Aufladung von Akkus elektrischer Werkzeuge oder Zahnbürsten eine Standardanwendung.

Das PRIMOVE-Energieübertragungssystem wurde durch Bombardier für die Anwendung zum stationären oder dynamischen Laden elektrischer Straßenfahrzeuge weiterentwickelt und parallel zum Mannheimer Projekt im Rahmen verschiedener weiterer Projekte (E-Bus Braunschweig) erfolgreich getestet sowie in den regulären (Passagier-) Betrieb überführt.

Neben der E-Bus-Anwendung sind induktive Ladesysteme im Pkw-Fahrzeugsegment in der 3,6 kW-Leistungsklasse bereits als Serienprodukte auf dem Markt verfügbar. Systeme mit höheren Ladeleistungen sind in der Entwicklung bzw. Forschungsgegenstand. Neben Themen wie der Spulengeometriewahl, der Reduzierung elektromagnetischer Felder und der Gewährleistung einer einfachen Positioniergenauigkeit sind Fragestellungen zur Reduktion des Luftspalts und damit zur Sicherstellung einer maximalen Effizienz bei der Energieübertragung aktuelle Forschungsthemen in der Wissenschaft und in den Entwicklungsabteilungen von Unternehmen.

### **3.2 Bisherige Arbeiten**

#### **3.2.1 Bombardier Transportation**

PRIMOVE ist die Elektromobilitätsabteilung von Bombardier Transportation, die sich auf die Schaffung marktreifer Lösungen im Bereich der drahtlosen Ladetechnik für alle Arten von elektrischen Schienen- und Straßenfahrzeugen konzentriert.

Die Idee zu PRIMOVE wurde von Bombardier Ingenieuren zum ersten Mal im Jahr 2003 aufgeworfen. Erste Tests wurden wenige Jahre später am Standort Bautzen durchgeführt, und 2010 wurde in Augsburg das erste Pilotprojekt gestartet, bei dem auf einer 800 Meter langen Teststrecke ausführliche Tests mit einer Niederflurstraßenbahn stattfanden.

Als das große Potenzial der PRIMOVE Technologie zutage trat, wurde 2011 ein zweites Pilotprojekt gestartet, in dessen Rahmen weitere Fahrzeuganwendungen untersucht werden sollten. Dieses Mal

---

## PRIMOVE

Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb

---

wurde ein mit PRIMOVE ausgerüsteter Bus verwendet, um die dynamische Aufladung (während der Fahrt) bei verschiedenen Straßenbelägen in Lommel (Belgien) zu testen.

Als Unternehmen, das der Innovation und der kontinuierlichen Weiterentwicklung der PRIMOVE-Technologie verschrieben ist, hat Bombardier in Mannheim ein spezielles Zentrum für Elektromobilität eröffnet.



**Abbildung 1: PRIMOVE Labor in Mannheim**

Dieses Kompetenzzentrum unterstützt Partnerschaften, Projekte und neue Wege in der sich rasant entwickelnden elektrischen Mobilität. Das Kompetenzzentrum beherbergt ein komplettes Energielabor, um sämtliche Anwendungen zu testen, sowie eine Testhalle für Busse. Zudem wurden verschiedene Fahrzeuge – u. a. E-Busse, Straßenbahnen und Minivans – erworben, um sicherzustellen, dass die Tests in einer realen Umgebung durchgeführt werden.

### **3.2.2 Rhein-Neckar-Verkehr-GmbH**

Die Rhein-Neckar-Verkehr GmbH bewegt mehr als 80% ihrer Kunden elektromobil. Vor über 100 Jahren hatten die ersten elektrischen Straßenbahnen an Rhein und Neckar Einzug gehalten, seither wurde nicht nur das Streckennetz kontinuierlich ausgebaut, sondern auch die Fahrzeugtechnik nachhaltig weiterentwickelt. So ist die rnv Vorreiter beim Einsatz innovativer Energiespeichertechnik, indem sie als erstes Verkehrsunternehmen serienmäßig neue Stadtbahnwagen mit dem von Bombardier Transportation entwickelten MITRAC Energy Saver ausrüstet. Herzstück dieser Technik sind Hochleistungskondensatoren, welche die beim Bremsen anfallende Energie speichern und zur Unterstützung des Beschleunigungsvorgangs wieder abgeben. Dadurch lässt sich der Bedarf eines Stadtbahnwagens an Traktionsenergie um bis zu 30 Prozent senken. Darüber hinaus eröffnet der Einsatz von Hochleistungskondensatoren zusätzliche betriebliche Möglichkeiten. Wenn das Fahrzeug auf Teilstrecken seine Energie ausschließlich aus den Kondensatoren bezieht, verringert dies elektromagnetische Felder auf ein Minimum. Dadurch können auch in besonders sensiblen Bereichen, wie im Bereich von Forschungseinrichtungen, Stadtbahntrassen gebaut werden. Für die rnv war dies bei den Planungen für eine neue Stadtbahn durch den Universitätscampus Neuenheimer Feld in Heidelberg von besonderer Bedeutung.

Dem Einsatz des Energy Savers auf rnv-Serienfahrzeugen war ein umfangreicher, fast fünf Jahre währender Probetrieb mit einem Stadtbahnwagen in Mannheim vorausgegangen. Nachdem hierbei die errechneten Werte in der Praxis übertroffen werden konnten, fiel die Entscheidung zugunsten

einer weiteren Beschaffung. Im täglichen Einsatz hat sich der Energy Saver als zuverlässiges System bewährt.

Am Standort Mannheim verfügt die rnv über eine gut ausgebaute Infrastruktur. Hierzu zählen Werkstätten für elektrische Schienenfahrzeuge und Dieselbusse ebenso wie eine Leitstelle mit einem modernen Rechnergestützten Betriebsleitsystem (RBL). Letzteres stellt nicht nur eine wichtige Voraussetzung für die Optimierung des Einsatzes von Elektrobussen auf der Basis von Echtzeit-Informationen dar, sondern bildet vielmehr auch die Grundlage für einen möglichen Ausbau der rnv-Leitstelle hin zu einer regionalen E-Mobilitäts-Drehscheibe. Vor diesem Hintergrund beteiligte sich die rnv an dem Projekt „Intermodales eMobilitätsmanagement“ (leMM), das wiederum Bestandteil des Spitzenclusters Elektromobilität Süd-West war. Gemeinsam mit weiteren Partnern aus der Industrie und mit Forschungseinrichtungen wurde in diesem Projekt ein integrales Mobilitätskonzept entwickelt, indem elektrifizierte und nicht-elektrifizierte Angebote privater und öffentlicher Betreiber intermodal verknüpft werden. Je nach Situation und Verfügbarkeit kann der Nutzer das subjektiv günstigste Angebot an Verkehrsmitteln wählen. Im Gegensatz zur reinen intermodalen Auskunft lag der Schwerpunkt bei leMM darin, das Mobilitätsdienstleistungsangebot des ÖPNV durch Integration einer elektrisch betriebenen Fahrzeugflotte auf weitergehende Bedürfnisse der Kunden auszuweiten. Dies beinhaltete die Entwicklung eines integrierten Buchungs- und Abrechnungssystems, das dem Nutzer einen „One-Stop-Shop“ für seine regionale Mobilität bietet.

Des Weiteren eröffnet die technische Ausstattung und die durchgehende personelle Besetzung der rnv-Leitstelle auch die Möglichkeit, die Funktion der PRIMOVE-Infrastruktur zu überwachen. Wenn die Ladestationen mit einer Internetverbindung ausgerüstet werden, können Störungen innerhalb kürzester Zeit erkannt und behoben werden. Außerdem lassen sich über die Internetverbindung auch die jeweilige Leistung und der Verbrauch einer Ladestation ablesen.

### **3.2.3      Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

Das Teilinstitut für Bahnsystemtechnik am KIT forscht auf dem Gebieten Energiemanagement und induktive Energieübertragung für Schienen- und Straßenfahrzeuge. Hierbei geht es einerseits um die Bremsenergieerückgewinnung bei. Zur Simulation von Gleichstromnetzen für Nahverkehrsanwendungen wurden Programme erstellt, mit denen die Lastflüsse im Netz bei sich stetig ändernden Leistungsanforderungen der Fahrzeuge berechnet werden können. Dabei wird auch berücksichtigt, dass die Fahrzeuge dauernd im Netz ihre Positionen ändern, sodass sich die Lastflüsse nicht nur zeitlich sondern auch räumlich verändern.

Andererseits beschäftigt sich die Forschung am Teilinstitut mit der Auslegung stationärer wie dynamischer induktiver Energieübertragungssysteme. Schwerpunktmäßig geht es hierbei um die Optimierung von Spulen für das induktive Laden mit dem Ziel der Reduzierung der elektromagnetischen Feldausbreitung und der Steigerung der Energieeffizienz beim kontaktlosen Ladevorgang.

### **3.2.4 Stadt Mannheim**

Da Mannheim das Arbeitsplatz- und Ausbildungszentrum der Region ist, pendeln täglich rund 135.000 Menschen zwischen dem Umland und der Stadt. Aus diesem Grund hat Mannheim früh auf den Aufbau eines umfassenden öffentlichen Verkehrsnetzes gesetzt: Mit Bussen, S- und Stadtbahnen sind alle Stadtteile und öffentlichen Einrichtungen schnell und unkompliziert zu erreichen. Pro Tag nutzen rund 220.000 Fahrgäste in Mannheim Bahnen und Busse.

Auf dieser Basis will die Stadt Mannheim auch in Zukunft die individuelle, umweltverträgliche und nachhaltige Mobilität voranbringen und neue Fahrgastpotenziale für den Öffentlichen Personennahverkehr gewinnen. Daher unterstützt die Stadt die Entwicklung und Erprobung neuer Technologien und Systeme.

## **4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Zusammenarbeit der beteiligten Projektpartner erfolgten ohne einen gesellschaftsrechtlichen Zusammenschluss der Unternehmen. Die MVV Energie AG (Netzanschluss), Sax & Klee (Tiefbau), Carosserie HESS AG (Buslieferant), TÜV Süd (Freigabe der Ladenstationen und Busse) und Omnitrend GmbH (Bürgerbefragung) traten als Auftragnehmer im Projekt auf. Darüber hinaus gab es noch zahlreiche weitere Unterlieferanten, die zum Projekterfolg beigetragen haben. Die Partner verpflichteten sich untereinander die fachliche und terminliche Abstimmung zu gewährleisten. Durch die klar voneinander abgegrenzten Arbeitspakete war eine effektive Bearbeitung möglich.

## II      **Eingehende Darstellung**

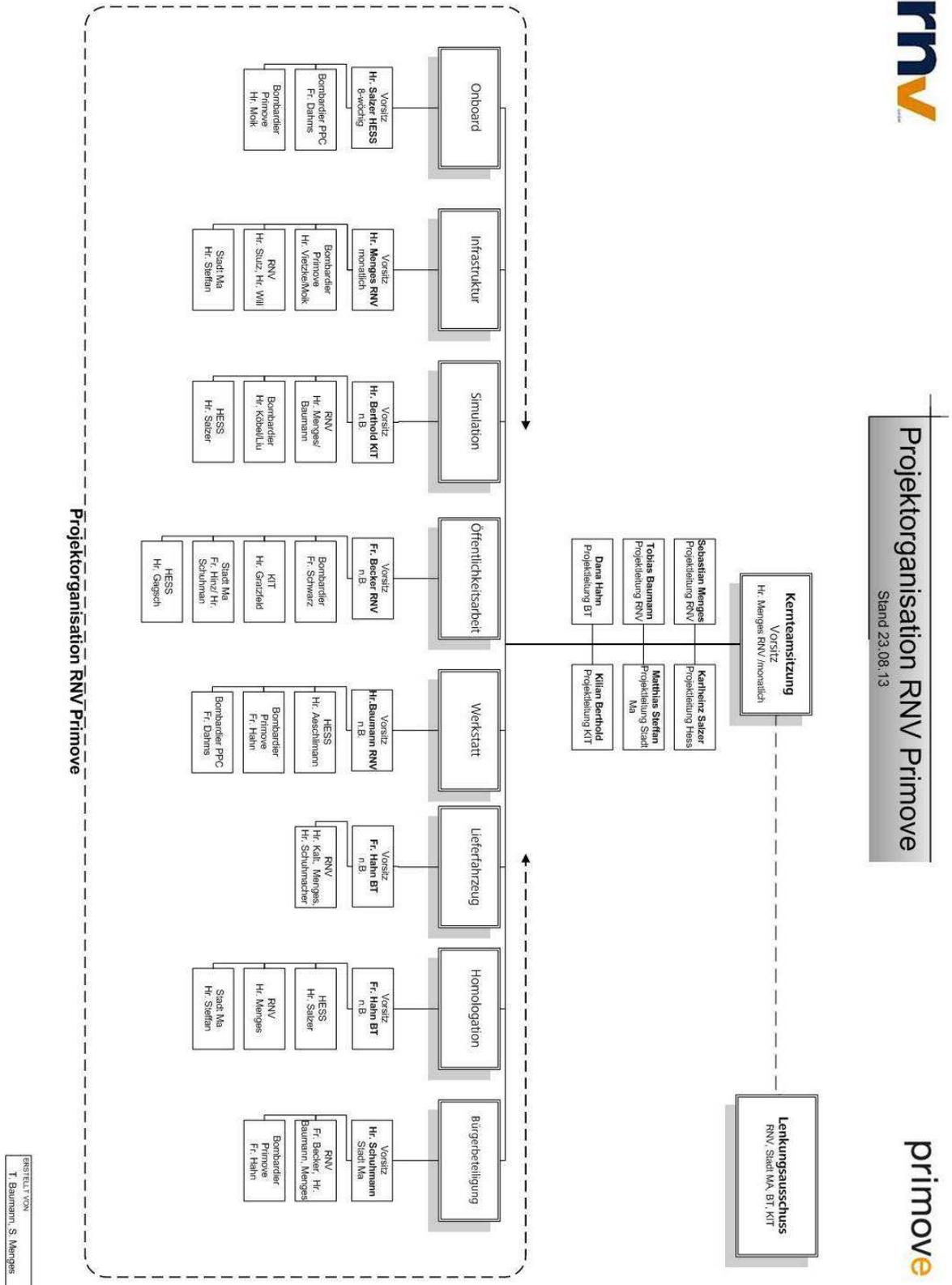
### 1.      **Erzielte Ergebnisse**

#### 1.1     **Arbeitspaket 0 – Projektleitung**

Da es sich bei dem Vorhaben um eine gemeinschaftliche Maßnahme mit insgesamt vier Projektpartnern handelt, war entsprechend bei allen Beteiligten eine Projektorganisation zu etablieren. Aus jedem Hause waren Projektleiter, Teilprojektleiter und Projektmitarbeiter zu benennen und diese waren wiederum in eine Gesamtorganisation einzubinden. Um die firmenübergreifende Zusammenarbeit zu ermöglichen, wurden acht Arbeitskreise eingerichtet, die jeweils mit Vertretern der involvierten Projektpartner besetzt wurden. Darüber hinaus wurde ein Kernteam bestehend aus den Projektleitern aller Projektpartner gebildet. Zusätzlich dazu wurden wichtige Entscheidungen im Lenkungsausschuss getroffen. Die Hauptprojektleitung wurde bei dem Projektpartner mit dem größten Anteil im Projekt, der Rhein Neckar Verkehr GmbH, angesiedelt. Hier lag entsprechend die Verantwortung für die Gesamtheit aller Managementaufgaben im Projekt. Hierzu gehört die Steuerung aller Projektphasen, wie Projektinitiierung, Definition, Planung, Steuerung und Abschluss des Projekts. Da die Projektleitung in der Matrix organisiert wurde, war der Projektleiter den Projektteammitgliedern fachlich weisungsbefugt, disziplinarisch jedoch nicht. Der Projektleiter hatte gegenüber dem Auftraggeber/Geschäftsführer eine Berichtspflicht, der Auftraggeber war dem Projektleiter weisungsbefugt. In der Verantwortung des Projektleiters waren u. a. folgende Tätigkeiten:

- Planung und Koordination des Projektes
- Durchführung und Planung des Kick-offs
- Überwachung und Steuerung des Projektes
- Verantwortung für die Erreichung von Termin-, Kosten- und Inhaltszielen
- Konfliktmanagement
- Transfer zum Auftraggeber und zum Lenkungskreis
- Terminkoordination der Ergebnisse aus den Arbeitspaketen
- Steuerung teilprojekt- bzw. arbeitspaketübergreifender Aufgaben
- Entscheidung über Maßnahmen im vom Lenkungskreis und dem Auftraggeber vorgegebenen Rahmen zur Projektdurchführung und Zielerreichung in den Teilprojekten bzw. Arbeitspaketen
- Projektmarketing
- Koordination und Abstimmung unter den Projektpartnern

Abbildung 2 zeigt die eingerichtete Projektorganisation.



Projektorganisation RNV Primove  
 Stand 23.08.13



**Abbildung 2: Projektorganisation****1.2 Arbeitspaket 1 – Öffentlichkeitsarbeit**

Arbeitspaket 1 umfasste die projektbegleitende Öffentlichkeitsarbeit. Dabei wurden die wichtigen Projektschritte von Beginn an öffentlichkeitswirksam dargestellt. Es wurden zahlreiche Medienberichte und Pressetexte verfasst sowie Vorträge gehalten und Veranstaltungen durchgeführt. Allen Events und Veröffentlichungen war stets eine Abstimmung unter den Projektpartnern vorangegangen.

Kapitel 6 zeigt die wichtigsten Events, bei denen im Projektverlauf eine entsprechende Veranstaltung durchgeführt wurde.

Nach Start des Linienbetriebs gab es insbesondere auch ein reges Interesse unterschiedlicher Besuchergruppen an der neuen Technik. Hier war der Fokus stets das „Miterleben“ des Praxisalltags im Fahrgastbetrieb. Nationalen wie internationalen Besuchergruppen wurde zunächst der theoretische Hintergrund des Förderprojekts gezeigt, bevor dann im Anschluss eine Ladestation vor Ort besichtigt und eine Mitfahrt im E-Bus auf der Linie ermöglicht wurde.

Bei der Marburger Verkehrsgesellschaft war das Interesse bei einer Probefahrt in Mannheim an den eingesetzten E-Bussen so groß, dass im Zeitraum 06. bis 11. April 2016 einer der Mannheimer E-Busse nach Marburg transportiert wurde und dort im Rahmen von öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen für Berg- und Talfahrten erfolgreich eingesetzt wurde.

Neben den Vorstellungen auf Tagungen (siehe Kapitel 6) wurde das Projekt und insbesondere die induktive Ladetechnik auch in verschiedene Fachgremien des VDV eingebracht. So erfolgte die Teilnahme an den folgenden Arbeitsgruppen:

- VDV AG- EBus-Infrastruktur/Ladestellen
- VDV-EBUS-AG "Fahrzeuge"
- Innovative Antriebe Bus
- AG "E-Bus-Rahmenempfehlung/VDV230-1"

Publikationen zum Projekt

- Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug 2015
- Horber Schientage 2015
- Der Nahverkehr 7-8/2015
- Fraunhofer REM 2030 Symposium 2015

---

## 1.3 Arbeitspaket 2 – Bürgerbeteiligung

Mannheim ist die historische Geburtsstadt der modernen individuellen Mobilität: Hier wurden das Fahrrad (1817), das Automobil (1886) und der Traktor (1921) erfunden.

Heute ist Mannheim mit seinen rund 325.000 Einwohnern das Oberzentrum der Europäischen Metropolregion Rhein-Neckar, in der etwa 2,4 Millionen Menschen zu Hause sind.

Da Mannheim das Arbeitsplatz- und Ausbildungszentrum der Region ist, pendeln täglich rund 135.000 Menschen zwischen dem Umland und der Stadt.

Mannheim hat früh auf den Aufbau eines umfassenden öffentlichen Verkehrsnetzes gesetzt: Mit Bussen, S- und Stadtbahnen sind alle Stadtteile und öffentlichen Einrichtungen schnell und unkompliziert zu erreichen. Pro Tag nutzen rund 220.000 Fahrgäste in Mannheim Bahnen und Busse.

Auf dieser Basis will die Stadt Mannheim auch in Zukunft die individuelle, umweltverträgliche und nachhaltige Mobilität voranbringen und neue Fahrgastpotenziale für den Öffentlichen Personennahverkehr gewinnen. Daher unterstützt die Stadt die Entwicklung und Erprobung neuer Technologien und Systeme.

Die Stadt Mannheim legt besonderen Wert auf die Beteiligung ihrer Bürger an weitreichenden kommunalen Entscheidungen: In zahlreiche Projekte wurden bereits Bürgerinnen und Bürger aktiv eingebunden, um die Qualität der Planungen und die Akzeptanz der Vorhaben zu steigern.

Aus mehreren Projekten heraus, bspw. der Erweiterung des Stadtbahnnetzes im Norden der Stadt (Stadtbahn-Nord) verfügt die Stadtverwaltung über umfangreiche Methodenkompetenz und Erfahrungen in der Konzeption und Durchführung von Bürgerbeteiligungsprozessen, die in das Leuchtturmprojekt PRIMOVE Mannheim eingebracht wurden. Innerhalb des Projektes war die Stadt für das Arbeitspaket Bürgerbeteiligung und Öffentlichkeitsarbeit zuständig.

### 1.3.1 Informationsveranstaltung für die Bürgerschaft

Am 13. Februar 2014 wurde in diesem Rahmen eine Bürgerinformationsveranstaltung durchgeführt: Die Stadt Mannheim hat gemeinsam mit den Projektpartnern rnv, Bombardier und KIT alle interessierten Bürgerinnen und Bürger direkt über das bauliche Vorhaben informiert und die Neuerungen der induktiven Ladetechnik erläutert. Die neue Technik hat bei den Bürgerinnen und Bürgern durchweg positiven Anklang gefunden, wobei auch kritische Rückfragen nicht zu kurz gekommen sind.

Die Bürgerinformationsveranstaltung rief in der lokalen Presse ein positives Presseecho hervor:

#### **So geht Beteiligung!**

##### **Von Thorsten Langscheid über die Einführung des neuen Elektrobusses**

*Offene Gesprächsatmosphäre, ein freundliches, keiner Frage ausweichendes Expertenpodium, Öffentlichkeit - Erster Bürgermeister Specht weiß, wie Bürgerbeteiligung geht. Nun sind die neuen Elektrobusse zumindest auf den ersten Blick gar nicht umstritten, im Gegenteil, vielen Bürgern geht es mit der Einführung noch nicht schnell genug.*

*Doch bei genauem Hinsehen zeigt sich, dass da schon auch Fragen sind, vor allem für die Anwohner und täglichen Nutzer der Fahrzeuge. Elektromog und Lärmbelästigung mögen vernachlässigbar gering sein, und doch tun Specht und PRIMOVE-Manager Desjardins gut daran, die Sorgen der*

Betroffenen absolut ernst zu nehmen. Specht sagte sogar zu, mit den Anwohnern auch im Einzelgespräch abzuklären, wo genau die Ladestationen installiert werden.

Denn wenn sich die Technik als alltagstauglich erweist, könnte sie schon bald für Busse, Bahnen und Lieferwagen eingesetzt werden. Das wäre dann ein echter Schritt in die Zukunft, für den die Stadt die größtmögliche Unterstützung ihrer Bürger braucht.

© Mannheimer Morgen, Samstag, 15.02.2014

### **Bürgerbeteiligung: Pro und Contra Induktionsantrieb auf der Linie 63 / Kämmerer Specht lässt beim PRIMOVE-Versuch keine Anwohner-Fragen offen**

#### **Kabelloser Elektrobus startet in den Alltagstest**

Für einen Teilnehmer blieb am Ende nur noch eine Frage: "Wann nehmen Sie den letzten Dieselbus außer Betrieb?" Erster Bürgermeister Christian Specht (CDU) und Martin in der Beek von den Rhein-Neckar-Verkehrsbetrieben (rnv) mussten bei der Bürgerbeteiligung zur neuen, induktionsgeladenen Elektrolinie 63 in der Aula der Hochschule an der Windeckstraße die Begeisterung der meisten Zuhörer fast bremsen. "Jetzt wollen wir erst einmal die beiden Fahrzeuge erproben", erklärten sie zusammen mit Jeremie Desjardins und Dana Hahn vom Hersteller Bombardier, der in Mannheim die PRIMOVE-Lade- und Antriebstechnik entwickelt. Geliefert werden die Busse von der Schweizer Firma Hess.

Das technische Prinzip der kabellosen Energie-Übertragung ist simpel, bei der elektrischen Zahnbürste wird es längst millionenfach im Alltag angewendet. Um einen großen, gut zwölf Tonnen schweren Bus zuverlässig und sicher für Fahrgäste und andere Verkehrsteilnehmer zu betreiben, mussten allerdings einige technische Probleme gelöst werden: "Unser Bus wird funktionieren", gaben sich Desjardins und Hahn optimistisch. Specht ergänzte: "Wir gehen mit dem Test dahin, wo's wehtut, wenn es schiefeht!" In der Innenstadt, zwischen Hauptbahnhof und Diakonissenkrankenhaus, sollen die beiden neuen Wagen pendeln. Für den Fahrgast, so seine Botschaft an die Bürger, ändert sich gar nichts - auch nicht der Ticket-Preis. Die Technik wird an den Haltestellen unter der Fahrbahn eingebaut. Ein Kühlaggregat, das während der sekundenlangen Lade-Vorgänge anspringt, wird an den Wartehäuschen zu sehen und zu hören sein.

Die meisten Bürger-Fragen bezogen sich zwar auf die technische Funktionsweise der Busse, aber einige Anwohner der Haltestellen wollten doch wissen, wie sicher die elektromagnetische Strahlung abgeschirmt sein wird und ob die Ladeschleifen nicht ähnlich wie ein Induktionsherd starke Hitze entwickeln. Als Fahrgast oder Fußgänger, so versicherte Desjardins, sei man "zu keinem Zeitpunkt einem Elektromog ausgesetzt". Die Fahrzeuge seien abgeschirmt, Strom fließe nur, wenn tatsächlich ein Bus auf der Induktionsplatte - ein etwa fünf Meter langes und 25 Zentimeter starkes Betonbauteil - stehe. Die Fahrzeuge würden durch ein digital verschlüsseltes Signal erkannt, so dass auch kein Unbefugter an einer der Bushaltestellen "tanken" könne. Gefahren etwa für Menschen mit Herzschrittmacher beständen ebenso wenig wie beispielsweise das Risiko, dass elektrisch betriebene Rollstühle Schaden nehmen könnten. Auch die Lautstärke der Kühlaggregate sei deutlich geringer als der Lärm der Diesel-Busse beim Anfahren.

Sein System, so erklärte Desjardins, sei auf zehn Jahre gerechnet "nur" zehn Prozent teurer als ein Diesel-Bus. Bei steigenden Treibstoffkosten und sinkenden Batteriepreisen hoffe man, auch wirtschaftlich sehr schnell die Nase vorn zu haben. Experimente mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen, wie beispielsweise in Stuttgart, beobachte man dabei sehr genau. Der einjährige, im September

## PRIMOVE

Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb

*beginnende Versuch kostet 3,3 Millionen Euro, die das Bundesverkehrsministerium finanziert. Die Umbauarbeiten an den Haltestellen beginnen demnächst, die Busse werden im März ausgeliefert. lang*

© Mannheimer Morgen, Samstag, 15.02.2014

### 1.3.2 Informationsflyer

Der Flyer wurde in Abstimmung mit der rnv GmbH, Bombardier und der städtischen Pressestelle inhaltlich erarbeitet und in einer Auflage von 2.500 Stück gedruckt.



Abbildung 3: Informationsflyer zum rnv-Primove Projekt

### 1.3.3 Website

Die Internetseite wurde auf der Grundlage eines aus dem Flyer ergebenden zusätzlichen Informationsbedarfs der Anwohner und der Bürgerschaft erstellt. Neben allen Informationen zur Teststrecke, können alle Publikationen von dieser heruntergeladen werden. Für Kinder wurde eigens im Rahmen einer hausinternen Lösung eine Grafikserie erarbeitet. Eine Freischaltung erfolgte unter [www.mannheim.de](http://www.mannheim.de), rechtzeitig vor einer Verteilung der Flyer und als Backup zur Informationsveranstaltung für die Bürgerschaft.

Des Weiteren wurden als filmische Begleitung die von Bombardier in englischer Sprache produzierten Kurzfilme „The Challenge“ und „Kantinenfahrt“ von der Firma Bewegtbild GmbH ins Deutsche übersetzt, um den Bedürfnissen der Mannheimer Bürger gerecht zu werden.

<https://www.mannheim.de/PRIMOVE>



Abbildung 4: Internetseite zum Projekt

### 1.3.4 Fahrgastbefragung

Omnitrend führte für die Stadt Mannheim im Rahmen der Umstellung der Buslinie 63 auf Elektrobetrieb Befragungen durch, um die Wahrnehmung und Einstellung zur neuen Technologie zu messen. Die persönliche Befragung der Fahrgäste in der Buslinie 63 fand in zwei Wellen jeweils im Januar und Februar 2015 bzw. 2016 statt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Fahrgastbefragung auszugsweise vorgestellt. Bei der Interpretation der folgenden Ergebnisse ist zu beachten, dass weniger positive Bewertungen im Vergleich zu den alten Fahrzeugen verschiedene Ursachen haben können: Höhere Aufmerksamkeit bezüglich bisher nicht wahrgenommener Merkmale, höhere Ansprüche bzw. unerfüllte Erwartungen, negative Bewertungen durch Umgewöhnungseffekte und schließlich tatsächliche und objektive Verschlechterungen.

#### a) Bewertung der Buslinie 63

69% der Fahrgäste empfinden die Fahrgeräusche der neuen Busse für die Umgebung und 87% die Fahrgeräusche im Inneren der Busse als gar nicht störend bzw. eher nicht störend. Diese Einschätzungen haben sich im Vergleich zur Befragung vor Einführung der neuen Busse verschlechtert: Damals gaben jeweils 93% der Fahrgäste an, dass die Geräusche für die Umgebung und im Inneren der Busse nicht störend sind.

Das Anfahren und Bremsen der neuen Fahrzeuge an den Haltestellen wird von 61% der Fahrgäste als sanft empfunden. 35% empfinden es als eher ruppig und 2% als sehr ruppig. Auch hier gab es eine Verschlechterung im Vergleich zur Vorherbefragung. Bei den alten Fahrzeugen kritisierten nur 20% das Anfahren und Bremsen.

Die Bewertung der Pünktlichkeit der Buslinie 63 fällt nach Einführung der neuen Busse deutlich besser aus als zur Vorherbefragung (vorher: 63%, nachher: 74% sehr bzw. eher zufrieden). Allerdings sind 37% der täglichen Nutzer mit der Pünktlichkeit eher oder sehr unzufrieden.

Den Fahrkomfort schätzen 98% der Fahrgäste positiv ein. Vor allem der Anteil der sehr Zufriedenen ist von 2% auf 21% sehr deutlich gestiegen.

#### **b) Bekanntheit des Projektes PRIMOVE**

Die Bekanntheit des Projektes PRIMOVE hat sich von 50% vorher auf 80% nachher erhöht.

19% der Fahrgäste erinnern sich, Informationen zu diesem Projekt in Form von Flyer oder Broschüren erhalten zu haben. 13% haben die Printmedien gelesen oder zumindest überflogen. Vor Einführung der neuen Busse gaben mit 43% deutlich mehr Fahrgäste an, Informationen zum Projekt bekommen zu haben.

Auf die Frage, wie die Busse aufgeladen werden, haben 46% der Fahrgäste die richtige Antwort gegeben. Damit hat sich der Kenntnisstand seit Einführung der Busse verdoppelt.

#### **c) Wahrgenommene Veränderungen auf der Buslinie 63**

Nach der Umstellung auf Elektrobetrieb empfinden 77% der Fahrgäste die Fahrgeräusche der Busse für die Umgebung bzw. 75% im Inneren der Fahrzeuge weniger störend. Die Erwartung der Fahrgäste vor Einführung der neuen Busse waren sogar höher (Umgebung: 86%, im Inneren 88% weniger störend).

Das Anfahren und Bremsen der Busse an den Haltestellen bewerten 19% der Fahrgäste als sanfter, 69% als unverändert und 3% als ruppiger (Rest: weiß nicht). Diese Wahrnehmung liegt über den Erwartungen der Vorherbefragung (9% sanfter).

Die Pünktlichkeit hat sich nach Ansicht von 15% der Fahrgäste verschlechtert (erwartet haben dies nur 7%). 7% empfinden eine Verbesserung.

Nur 7% der Fahrgäste erwarteten durch die neuen Fahrzeuge eine Verbesserung des Fahrkomforts. Nach Einführung empfindet jeder Fünfte eine positive Entwicklung. Jedoch geben auch 5% an, der Fahrkomfort hätte sich verschlechtert.

#### **d) Meinung zum Thema Elektromobilität und zum PRIMOVE-System**

8% der Fahrgäste stimmen der Aussage zu: „Elektromagnetische Felder beim Ladevorgang können für Anwohner, Passanten oder Fahrgäste gefährlich sein“

(Vorher: 2%). Andererseits wird die Aussage jetzt von 31% komplett und von 37% eher abgelehnt. Bei der Vorher-Untersuchung lagen diese Werte noch deutlich niedriger. Der Weiß-nicht-Anteil sank von 78% auf 24%.

Die Aussage „Elektrische Busse sind gut für die Umwelt, da sie weniger Lärm und Abgase verursachen“ wird von 92% der Fahrgäste bestätigt. Der Anteil „stimme sehr zu“ hat sich von 7% vorher auf 58% nachher stark erhöht.

Ob das PRIMOVE-System zu teuer sei, konnten 64% der Fahrgäste nicht einschätzen (vorher 89%). 12% finden das System (eher) zu teuer. Dieser Anteil hat sich im Vergleich zur Vorherbefragung kaum geändert (vorher: 10%). Hingegen geben nach Einführung der neuen Busse 23% der Fahrgäste an, das System wäre nicht zu teuer (vorher: 2%).

Die generelle Bewertung des Projektes fällt nach Einführung der neuen Busse besser aus. 81% der Fahrgäste bewerten das Projekt positiv, zur Vorherbefragung waren es 75%.

#### **e) Fazit**

Die Fahrgäste sind dem Projekt PRIMOVE auch nach Einführung der neuen Busse ganz überwiegend positiv eingestellt. Die Einstellungen und Bewertungen haben sich größtenteils zugunsten der neuen Technik entwickelt.

Nur bei den Fahrgeräuschen und dem Anfahren und Bremsen ist teilweise eine negative Entwicklung zu erkennen. Insgesamt sind die Fahrgäste aber mit dem Fahrkomfort zufrieden.

### **1.3.5 Anwohnerbefragung**

Zusätzlich zur Fahrgastbefragung ist die Firma Omnitrend auch mit der Befragung der Anwohner entlang der Buslinie 63 beauftragt worden. Ebenso wie die Fahrgastbefragung war auch die Befragung der Anwohner in zwei Wellen geplant. Die erste Welle fand im April 2015 schriftlich und online statt. Hierbei sei bemerkt, dass die Befragung vom Dezember 2014 aufgrund von Bauarbeiten auf den April 2015 verlegt wurde. Die Durchführung der zweiten Welle fand aufgrund des Abschlusses des Projektes Ende 2015 und der engen zeitlichen Nähe zur ersten Befragungswelle nicht statt. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse des Zwischenberichtes nach der ersten Befragungswelle vorgestellt.

#### **a) Nutzungshäufigkeit**

Für die erste Welle wurden 501 Anwohner befragt. Ein Drittel der Befragten gab an, die Linie 63 wöchentlich bis täglich zu nutzen. Die öffentlichen Verkehrsmittel Mannheims generell nutzen ca. 30% der Anwohner an 5-7 Tagen die Woche.

#### **b) Bewertung der Buslinie 63**

Jeder vierte Anwohner nimmt die Fahrgeräusche für die Umgebung eher bzw. sehr negativ wahr. Mit der Pünktlichkeit der Buslinie 63 sind 62% der Anwohner sehr bzw. eher zufrieden und 10% sind (eher) unzufrieden. Jeder vierte kann dazu keine Aussage machen.

#### **c) Bekanntheit des Projektes PRIMOVE**

Knapp zwei Drittel der Anwohner kennen das Projekt PRIMOVE. Ein Drittel haben die Informationen zu dem Projekt gelesen, 18% zumindest überflogen. Auf die Frage, wie die Busse aufgeladen werden, haben 53% der Anwohner die richtige Antwort gegeben.

#### **d) Meinung zum Thema Elektromobilität und zum PRIMOVE-System**

Der Aussage „Elektromagnetische Felder beim Ladevorgang können für Anwohner, Passanten oder Fahrgäste gefährlich sein“ stimmen 5% sehr und 11% eher zu.

Die Aussage „Elektrische Busse sind gut für die Umwelt, da sie weniger Lärm und Abgase verursachen“ wird von rund 90% der Befragten bestätigt.

„Das PRIMOVE-System ist zu teuer“ konnten 68% der Anwohner nicht einschätzen. 14% der Anwohner finden das System zu teuer, 18% sind jedoch gegenteiliger Meinung.

72% der Anwohner bewerten das Projekt generell sehr bzw. eher positiv. Nur wenige finden PRIMOVE schlecht.

#### **e) Fazit**

Die Anwohner sind dem Projekt ganz überwiegend positiv eingestellt. Die meisten Befragten versprechen sich positive Effekte für die Umwelt. Bedenken bezüglich elektromagnetischer Felder werden nur von Wenigen getragen.

## **1.4 Arbeitspaket 3 – Wissenschaftliche Begleitung**

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Projektes wurden zwei verschiedene Themengebiete untersucht. Einerseits wurde das induktive Energieübertragungssystem in der elektromagnetischen und elektrischen Modellierung umgesetzt, um hiermit verschiedene Ladesegment-Topologien zu untersuchen. Dies geschah in Vorbereitung auf einen möglichen interoperablen Einsatz der gleichen Ladeinfrastruktur sowohl für den E-Bus als auch für den E-Van. Andererseits wurde eine Softwareumgebung zur möglichst realitätsnahen Abbildung des Gesamtsystems E-Bus aufgebaut. Zur Validierung des Softwaremodells wurden abschließend Messungen im Betrieb mit dem Elektrobus vorgenommen.

### **1.4.1 Untersuchung verschiedener Ladesegment-Topologien**

Bei der Analyse unterschiedlicher Ladesegment-Topologien, wird die elektrische Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Infrastruktur näher betrachtet. Im Besonderen soll hier eine Anpassung erforscht werden, mit der ein Lieferfahrzeug / Van auf den induktiven Ladesegmenten des Busses geladen werden kann. Durch die äußeren Abmessungen der Fahrzeuge ergeben sich unterschiedliche Abmessungen der Spulen. Entsprechend ist das für den Bus vorgesehene Spulensystem noch nicht für die Kompatibilität mit einem Lieferfahrzeug abgestimmt. Durch die elektromagnetische und elektrische Modellierung des induktiven Energieübertragungssystems können somit verschiedene Ladesegment-Topologien und Schaltungsanordnungen auf ihre Kompatibilitätsmöglichkeiten hin untersucht werden. Ziel ist es, das bestehende System durch eine möglichst kleine Anzahl an Änderungen für einen kompatiblen Betrieb zwischen Bus und Lieferfahrzeug umzurüsten.

Die Ladeinfrastruktur des Busses ist auf einer wesentlich größeren Grundfläche realisiert als diejenige des Kleintransporters, wodurch beim Kleintransporter, aufgrund der unzureichenden Überdeckung der streckenseitigen Wicklung durch den Fahrzeugunterboden, eine Verletzung der gültigen EMV-Richtlinien zu erwarten ist. Dies betrifft insbesondere die Dimension der bestehenden Wicklung in

---

Längsrichtung. Eine kleinere „aktive“ Fläche beim Kleintransporter und der aufgrund fehlender Absenkung der fahrzeugseitigen Wicklung deutlich größere Luftspalt zwischen Primär- und Sekundärseite bringt zusätzlich die Herausforderung mit sich, die in der fahrzeugseitigen Wicklung induzierte Spannung ausreichend hoch zu halten. Aktuelle Entwicklungen im PKW-Bereich mit ähnlich großen Luftspalten wirken der niedrigeren induzierten Spannung mit deutlich höheren Betriebsfrequenzen entgegen. Bei der Linienbus-Anwendung ist diese aufgrund der erforderlichen Leistung technisch viel stärker begrenzt und mit 20 kHz vorgegeben, während für Anwendungen im PKW-Bereich bei deutlich kleineren Leistungen Frequenzen zwischen 80 kHz und 140 kHz üblich sind. Daher ist auch der Aspekt Betriebsfrequenz als relevant im Rahmen der Untersuchungen zu betrachten. Ein letzter zentraler Punkt bei den Untersuchungen ist die möglichst gering zu haltende konstruktive Änderung der streckenseitigen Wicklung, sowie dem speisenden Stromrichtersystem. Die drei Punkte „aktive Länge (Fläche)“, „Betriebsfrequenz“ und „Änderungs- bzw. Erweiterungsaufwand“ stellen somit die Hauptaspekte der Untersuchungen dar.

Unter Berücksichtigung dieser drei Aspekte wurden Konzepte ausgearbeitet, die sich einerseits in einer angepassten streckenseitigen Wicklung und andererseits in einer angepassten Speiseeinheit vom bestehenden Primärsystem unterscheiden, um das gewünschte Ziel der Interoperabilität zu erreichen.

Tabelle 1 enthält als Ergebnis der angestellten Untersuchungen eine Auflistung diverser Konzeptvarianten für Ladesegment-Topologien, die in Form einer Nutzwertanalyse gegenübergestellt werden. Hierbei sind die Werte der letzten Spalte (Gesamtbewertung) auf das Intervall von 0 (sehr hoher Aufwand zur Herstellung der Interoperabilität) bis 1 (volle Interoperabilität ohne Zusatzaufwand) normiert. Die grün markierten Zeilen heben diejenigen Konzeptvarianten hervor, welche die größte Kompatibilität zwischen E-Bus- und E-Fahrzeug-Ladeinfrastruktur ermöglichen.

Konzeptvariante	Betriebsfrequenz. (0=fest, 1=frei anpassbar)	Größe Zusatzwicklung (0=fest, 1=frei anpassbar)	Zusatzaufwand Spule (0=viel, 1=wenig)	Zusätzliche ohmsche Verluste (0=viel, 1=wenig)	Zusatzaufwand Stromrichter (0=viel, 1=wenig)	Gesamtbewertung (Gewichtung siehe letzte Zeile)
<i>Einphasige, bifilar ausgeführte Zusatzwicklung mit fester Länge als Rahmenspule, Stromrichter-Umschaltung</i>	0	0	1	0	0,8	<b>0,294</b>
<i>Einphasige, bifilar ausgeführte Zusatzwicklung mit fester Länge als DD-Spule, Stromrichter-Umschaltung</i>	0	0	0,7	0	0,8	<b>0,241</b>
<i>Einphasige, bifilar ausgeführte Zusatzwicklung mit individueller Länge als Rahmenspule, Stromrichter-Umschaltung</i>	0	1	0,7	0	0,8	<b>0,476</b>
<i>Einphasige, bifilar ausgeführte Zusatzwicklung mit individueller Länge als DD-Spule, Stromrichter-Umschaltung</i>	0	1	0,4	0	0,8	<b>0,424</b>



Die Interoperabilität muss gemäß der Norm zwischen den einzelnen Leistungsklassen sichergestellt werden. Wünschenswert ist eine Interoperabilität zwischen Leistungsklasse 1 und 2. Die Interoperabilität zwischen den anderen Leistungsklassen ist noch in der Diskussion.

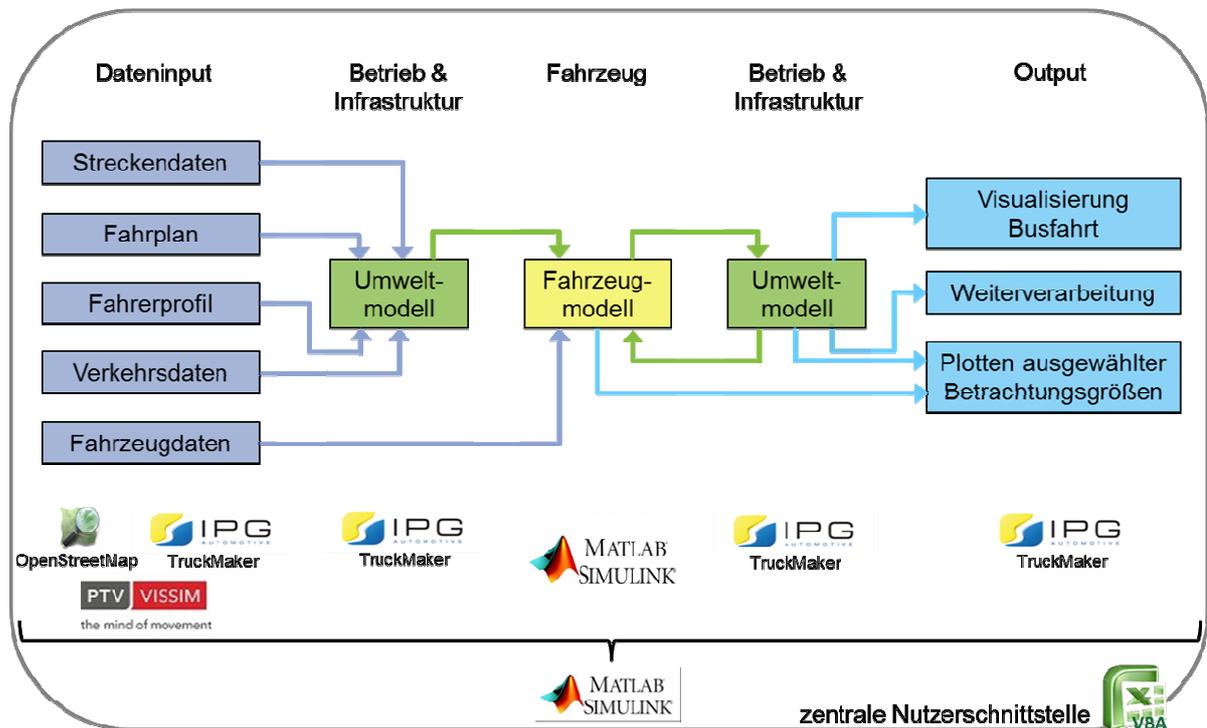
#### **1.4.2 Erstellung eines Simulationsmodell des Gesamtsystems samt Validierung**

Der Schwerpunkt der projektbegleitenden Forschungsarbeiten durch das KIT liegt in der Softwaremodellierung zur Erstellung eines virtuellen Simulationsmodells des E-Bus-Betriebs. Hierfür wurde in einem ersten Schritt das Gesamtsystem E-Bus analysiert und in die drei Teilsysteme Fahrzeug, Betrieb und Infrastruktur aufgeteilt. Diese Teilsysteme werden als komplementär betrachtet. Entsprechend wurde eine modulare Simulationsumgebung aufgebaut, welche die genannten Subsysteme gleichermaßen widerspiegelt. Die zentrale Zielsetzung ist hierbei die Abbildung sämtlicher Energieflüsse sowie deren Wirkungsgrade. Hierauf baut die zukünftige Optimierung des Energiemanagements sowie der Wirtschaftlichkeit auf. Mit Hilfe der generierten Simulationsergebnisse lassen sich dann Aussagen über die Elektrifizierbarkeit einzelner Buslinien sowie gesamter städtischer Busliniennetze treffen. Hierzu gehören diverse Fragestellungen wie beispielsweise Netzanschlusses, Netzbelastung, Ladeleistung, Ladetechnologie (konduktiv vs. induktiv), Ladepunktverteilung und im Besonderen die Suche nach einem gesamthaften Kostenoptimum auf Total Cost of Ownership-Basis.

Der Betrieb eines Stadtbusses hängt direkt von den Umweltbedingungen ab, innerhalb derer er sich bewegt. Entsprechend lassen sich die technischen Teilsysteme sowie das Gesamtfahrzeug nur dann detailliert untersuchen und optimieren, wenn es gelingt, die sie von außen beeinflussenden Faktoren möglichst realitätsnah abzubilden. Dies erfordert neben der Modellierung des Fahrzeugs auch eine tiefgreifende Modellierung des dazugehörigen Betriebs und der Infrastruktur. Hierbei wird das Ziel verfolgt, für die Modellbildung eines jeden der drei Teilsysteme, die jeweils am besten geeignete Softwarelösung zu wählen und das Gesamtsystem als Co-Simulation zu simulieren. Nachfolgende Visualisierung veranschaulicht den modellierten Zusammenhang der Inputparameter mit den drei Teilsystemen und nennt die zur jeweiligen Modellierung eingesetzten Softwaretools.

## PRIMOVE

Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb

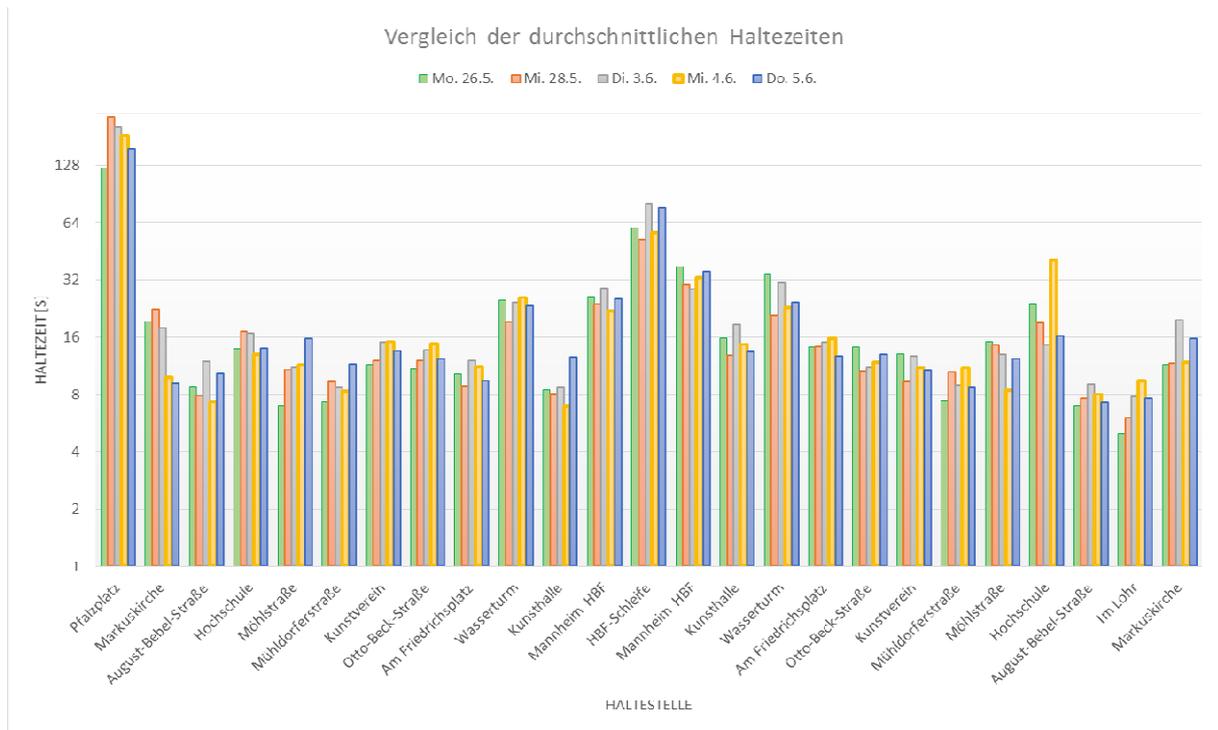


**Abbildung 5: Gesamtstruktur Softwaremodell**

Als wesentliche Inputgröße für die Simulation ist der Fahrzyklus (Geschwindigkeit über der Zeit) einer Buslinie anzusehen, der entweder durch GPS-Messungen aufgenommen werden kann oder sich, beispielsweise für die Untersuchung zukünftiger Strecken, mit der Verkehrssimulationssoftware Vissim der Firma PTV generisch erzeugen lässt. Nachfolgend ist beispielhaft das Ergebnis einer durch das KIT durchgeführten GPS-Messung auf einem Bus der Linie 63 aus dem Sommer 2014 aufgeführt. Hierfür wurde die durchschnittliche Haltezeit je Haltestellen über verschiedene Betriebstage ausgewertet.

## PRIMOVE

Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb

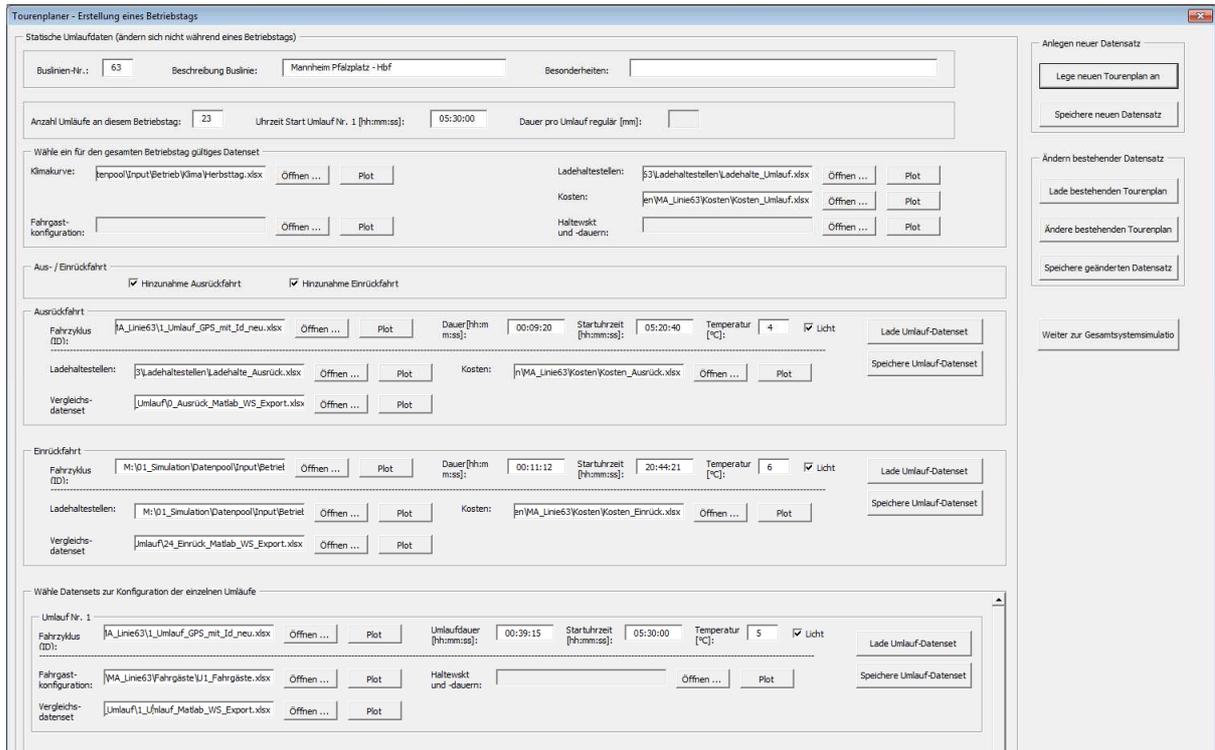


**Abbildung 6: Logarithmisch skalierte Untersuchung der Haltestellenstandzeiten aus dem Jahr 2014, Linie 63**

Für die vereinfachte Bedienung der gesamten Simulationsumgebung, inklusive ihrer Teilprogramme, wurde eine grafische Benutzerschnittstelle aufgebaut. Diese ermöglicht es, Datensätze anzulegen und Simulationen unter Parametervariationen durchzuführen, ohne hierfür einzelne Daten- und Befehlseingaben in den jeweiligen Softwaretools vorzunehmen bzw. sich mit diesen im Detail auszukennen.

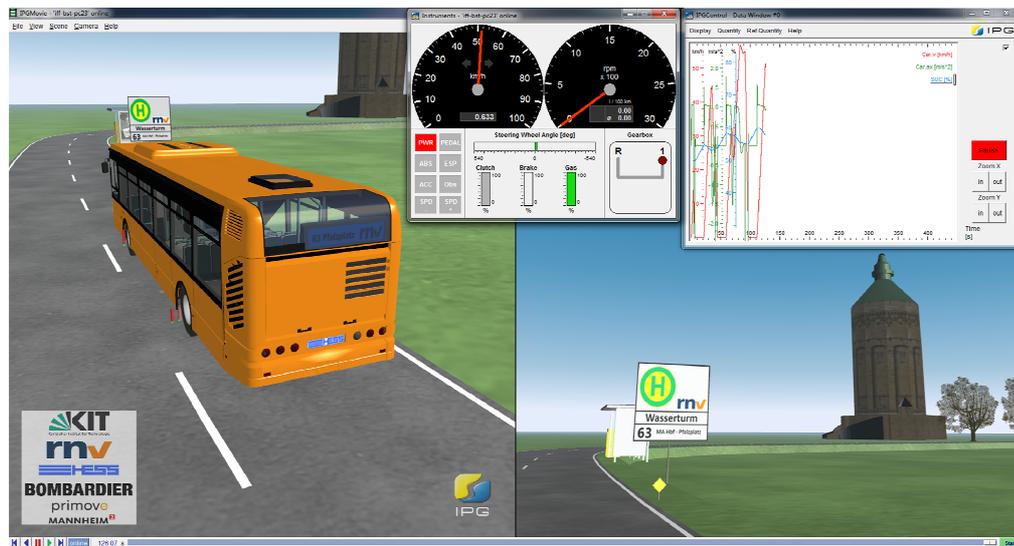
## PRIMOVE

Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb



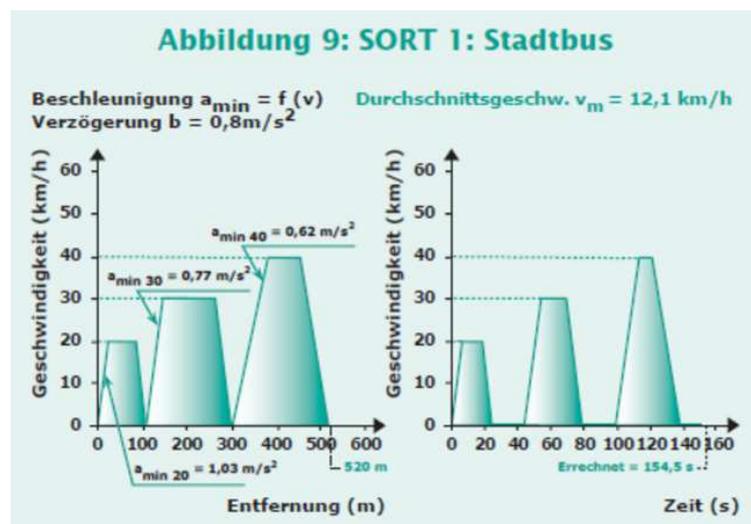
**Abbildung 7: Graphische Benutzeroberfläche zur Konfiguration eines zu simulierenden Betriebstages**

Die Visualisierung der Simulation erfolgt durch eine 3D-simulierte Animation der Busfahrt mit der Software IPG TruckMaker.



**Abbildung 8: Visualisierung E-Bus-Simulation**

Unter Hauptverantwortung des KIT wurden am 27. Januar 2016 generische Fahrversuche mit einem der beiden E-Busse durchgeführt. Diese hatten zum Ziel, den Standardfahrzyklus für Linienbusse (SORT-Zyklus, siehe Abbildung 9) nachzuvollziehen. Hierbei stellt der SORT 1-Fahrzyklus den Referenzzyklus für den mit der Linie 63 vergleichbaren Stadtbuseinsatz dar.



**Abbildung 9: Charakteristika SORT 1 Fahrzyklus (Quelle: UITP-Projekt „SORT“, Standardisierte Zyklen für Straßentests, 2. Auflage, 2009)**

Neben Messeinrichtungen des KIT wurden parallel die CAN-Signale des Fahrzeugs von Bombardier mitgeschrieben. Hierdurch wurde ein Vergleich der Messwerte aus unterschiedlichen Aufnahmesystemen ermöglicht und so die Aussagekraft der jeweiligen Messungen verifiziert. Die Ergebnisse der Energiemessungen des KIT und von Bombardier waren nahezu identisch, wie unten stehender Grafik zu entnehmen ist. Entsprechend den KIT-Messresultaten ist für den Mannheimer E-Bus für das Fahren des angenäherten SORT 1-Zyklus mit einem Energiebedarf von ca. 0,6 kWh zu rechnen. Dies ergibt einen Energiebedarf pro Kilometer von rund 1,15 kWh. Es ist zu berücksichtigen, dass für die Messfahrten des SORT 1-Zyklus der E-Bus nur mit vier Personen besetzt war und keine Temperierung des Innenraums stattfand.



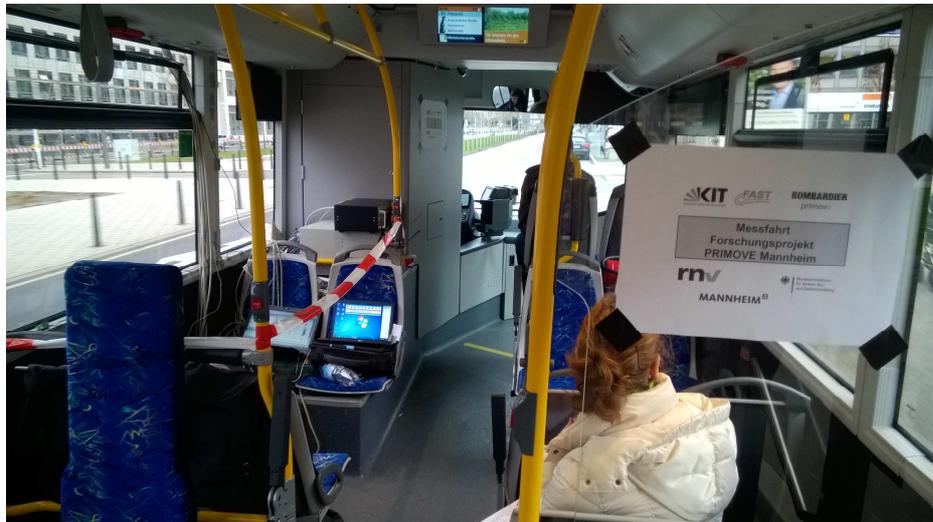
**Abbildung 10: Energiebedarf E-Bus Mannheim für den angenäherten SORT 1 Fahrzyklus, links KIT-Messergebnisse, rechts die parallelen Bombardier-Messergebnisse**

Ergänzt wurden die generischen Messfahrten durch Messungen eines kompletten Betriebstags mit 19 aufeinanderfolgenden Umläufen (am 28. Januar 2016) eines Mannheimer E-Busses im normalen Linien- und Passagierbetrieb. Aufgrund einer der Jahreszeit entsprechenden

PRIMOVE

Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb

Tagesdurchschnittstemperatur von 10,68 °C wurde der Innenraum währenddessen temporär beheizt. Bei der Analyse der ermittelten Messergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sich die Durchführung der Messungen auf einen Betriebstag beschränkte. Die Gesamttagessicht, der Passagierbetrieb sowie die erfolgte Beheizung erklären im Wesentlichen die Unterschiede zwischen den Messergebnissen des Betriebstages zu den oben gezeigten SORT-1-Ergebnissen.



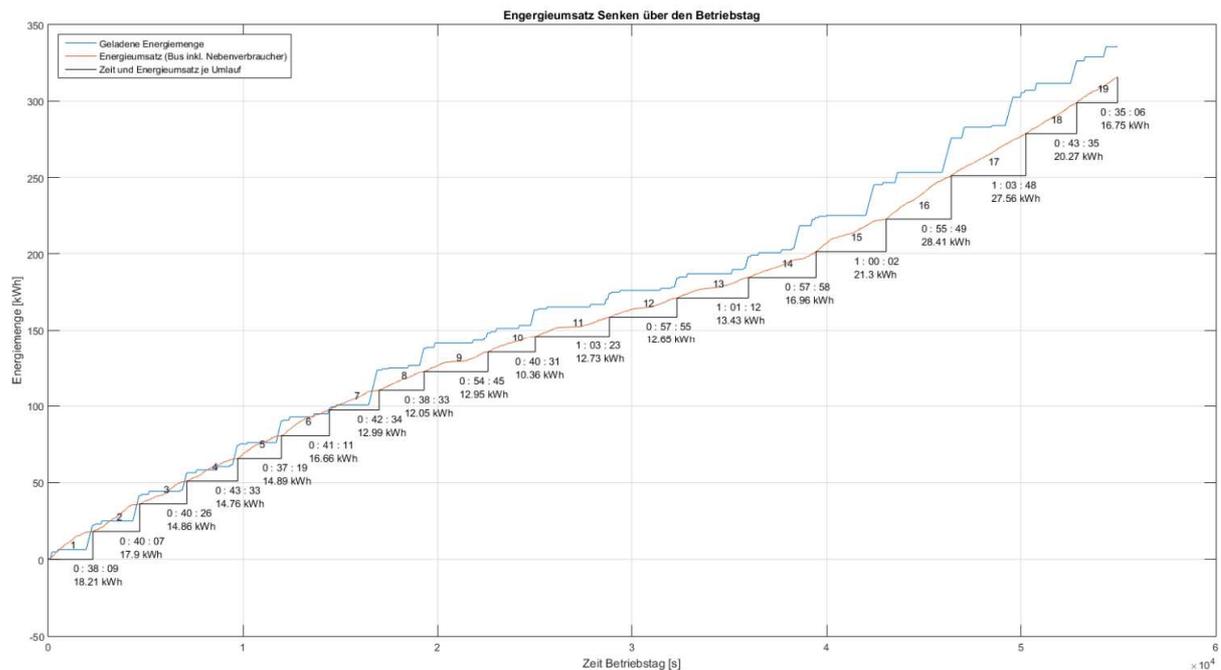
**Abbildung 11: Eindruck von der Messfahrt unter Passagierbetrieb am 28. Januar 2016**

Im Rahmen der Messungen wurden umfangreiche Daten zu den Energieflüssen in den Fahrzeugen und im Zusammenspiel mit den Ladestationen aufgezeichnet. Durch die Auswertung und Analyse dieser Daten konnten verschiedene Aussagen zum Energiebedarf bzw. –umsatz im Linienbetrieb aufgestellt werden, welche sich zusammengefasst und auf die wesentlichen Kenngrößen konzentriert in unten stehender Tabelle wiederfinden.

		Value	Unit	Duration	Unit	Ratio	Unit
Trip Distance		178,68	km				
Average Temperature		10,68	°C				
PRIMOVE consumed energy (grid)		372,84	kWh	01:56:10	h:min:sek	2,09	kWh/km
PRIMOVE charged energy total (bus)		335,55	kWh			1,88	kWh/km
	Aux. consumption during charging	25,44	kWh				
Bus consumed energy total		290,59	kWh	13:19:46	h:min:sek	1,63	kWh/km
Driving		239,27	kWh	08:31:41	h:min:sek	1,34	kWh/km
	Traction-Propulsion Energy	222,71	kWh	04:09:51	h:min:sek		
	Traction-Recuperation Energy	-83,46	kWh	04:21:50	h:min:sek	37,47	%
	Auxiliary Energy	100,02	kWh				
Standstill		51,32	kWh	04:48:05	h:min:sek		

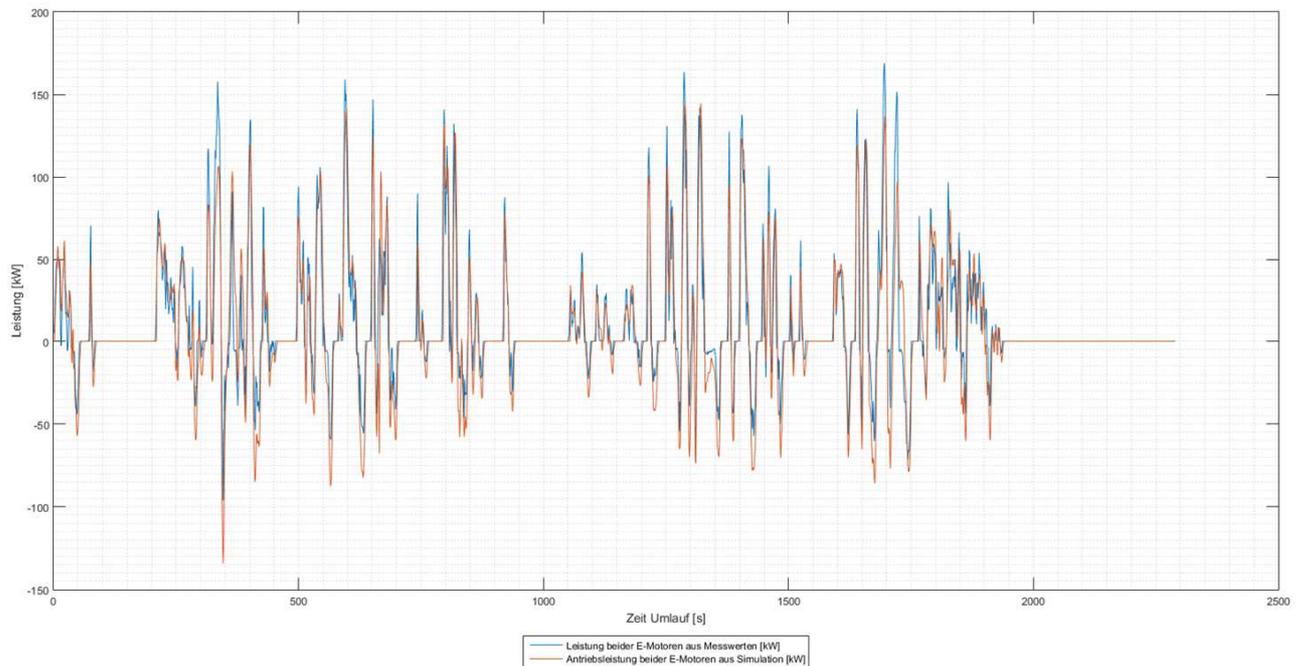
**Tabelle 2: Energetische Kennzahlen E-Bus Mannheim für einen exemplarischen Betriebstag (28. Januar 2016)**

Eine genauere grafische Auflösung der zentralen Messwerte für die Betriebstagsmessung liefert nachfolgendes Diagramm. Hier werden alle 19 gefahrenen Umläufe nach der jeweiligen Dauer und dem jeweiligen Energiebedarf aufgeschlüsselt.



**Abbildung 12: Dauer und Energiebedarf pro Umlauf des Betriebstags 28. Januar 2016**

Neben der Datenauswertung der Energieflüsse hatten die Messungen zum Ziel das eingangs vorgestellte Softwaremodell zu validieren. Liefert das Softwaremodell identische Outputdaten wie die Messdaten aus dem Praxisbetrieb, so ist die Übertragbarkeit des Softwaremodells auf andere Anwendungsfälle gesichert. Nachfolgende Darstellung zeigt die gemessene Motorleistung beider E-Motoren des Mannheimer E-Busses im Vergleich zur simulierten E-Motorleistung aus der Softwareumwelt. Es wird deutlich, dass die virtuelle Abbildung weitestgehend mit dem realen Betrieb übereinstimmt und das Softwaremodell daher als validiert bezeichnet werden kann.



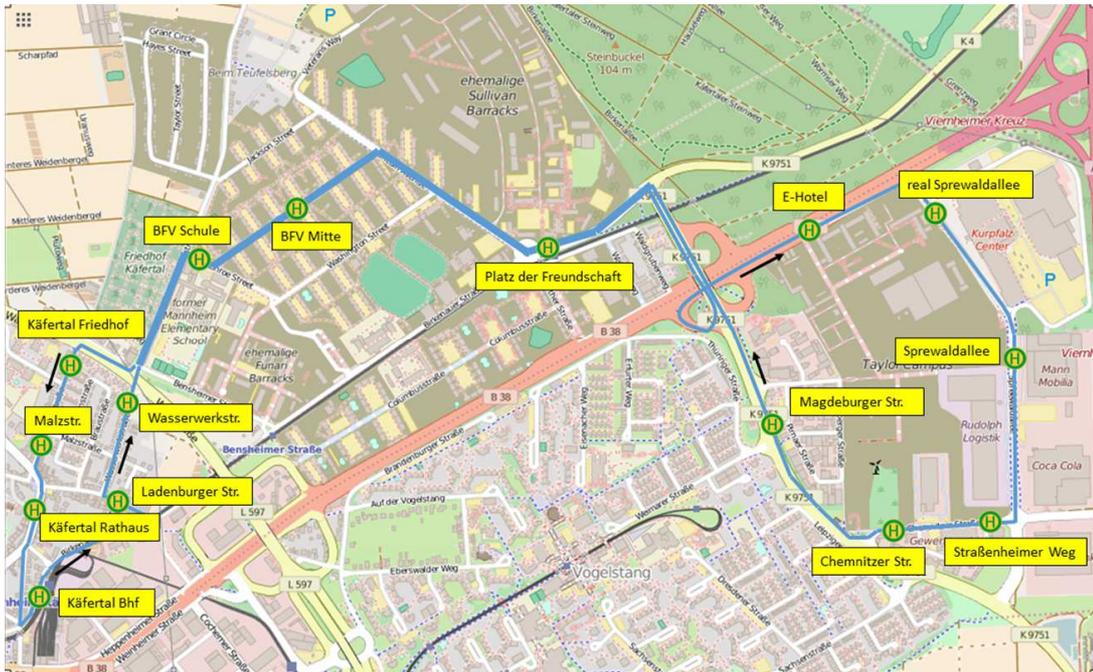
**Abbildung 13: Validierung des Softwaremodells anhand des Vergleichs der simulierten mit der gemessenen Motorleistung**

Die im Rahmen des PRIMOVE Mannheim Projektes durch das KIT entwickelte Softwareumgebung zur Simulation des E-Busbetriebs ermöglicht nicht nur die weitere Optimierung des E-Busbetriebs auf der Linie 63 sondern auch Untersuchungen über die mögliche Elektrifizierbarkeit weiterer Buslinien.

Um diese Übertragbarkeit des validierten Softwaremodells für zukünftige Linienuntersuchungen im Kontext der Elektrifizierung von Buslinien zu demonstrieren, wurde für eine mögliche zukünftige E-Buslinie eine Simulation des Energiebedarfs durchgeführt. Grundlage hierfür bildet eine Beispielstrecke einer noch nicht existenten Buslinie durch ehemalige Kasernenflächen in Mannheim (Benjamin Franklin Village und Taylor Gelände), die aktuell in Wohn- und Gewerbegebiete transformiert werden und konkret durch eine E-Bus-Linie an den übrigen städtischen ÖPNV angeschlossen werden sollen. Der Verlauf dieser Beispielstrecke kann Abbildung 14 entnommen werden.

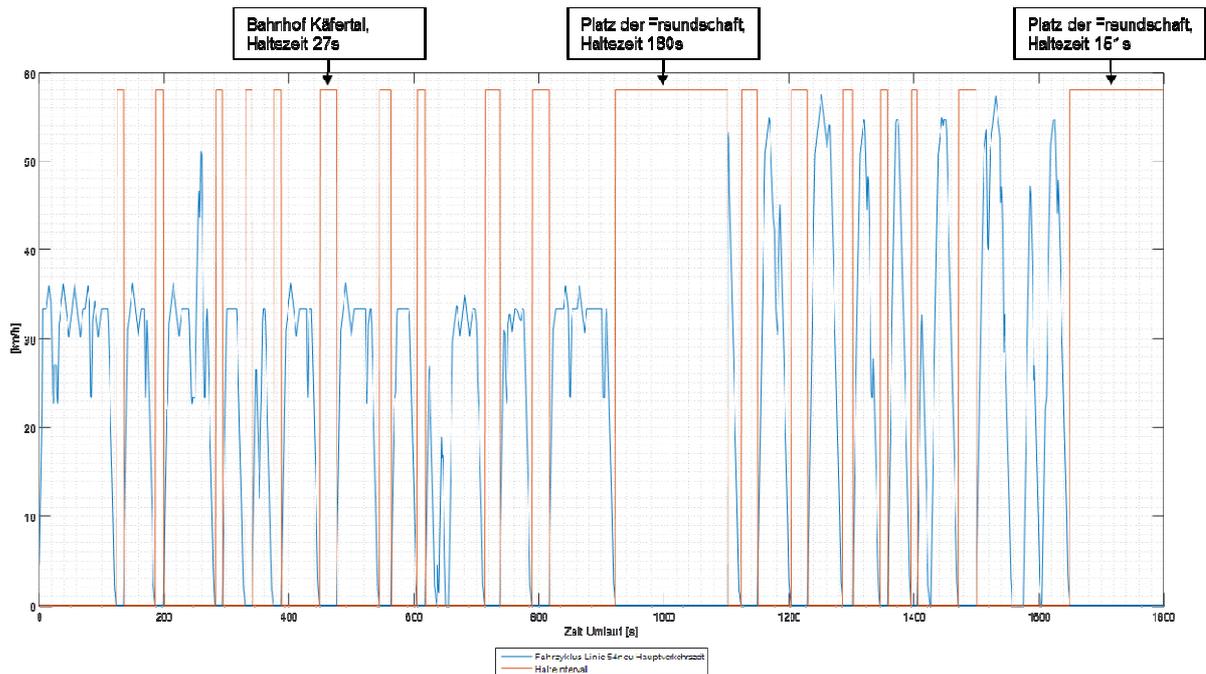
## PRIMOVE

Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb



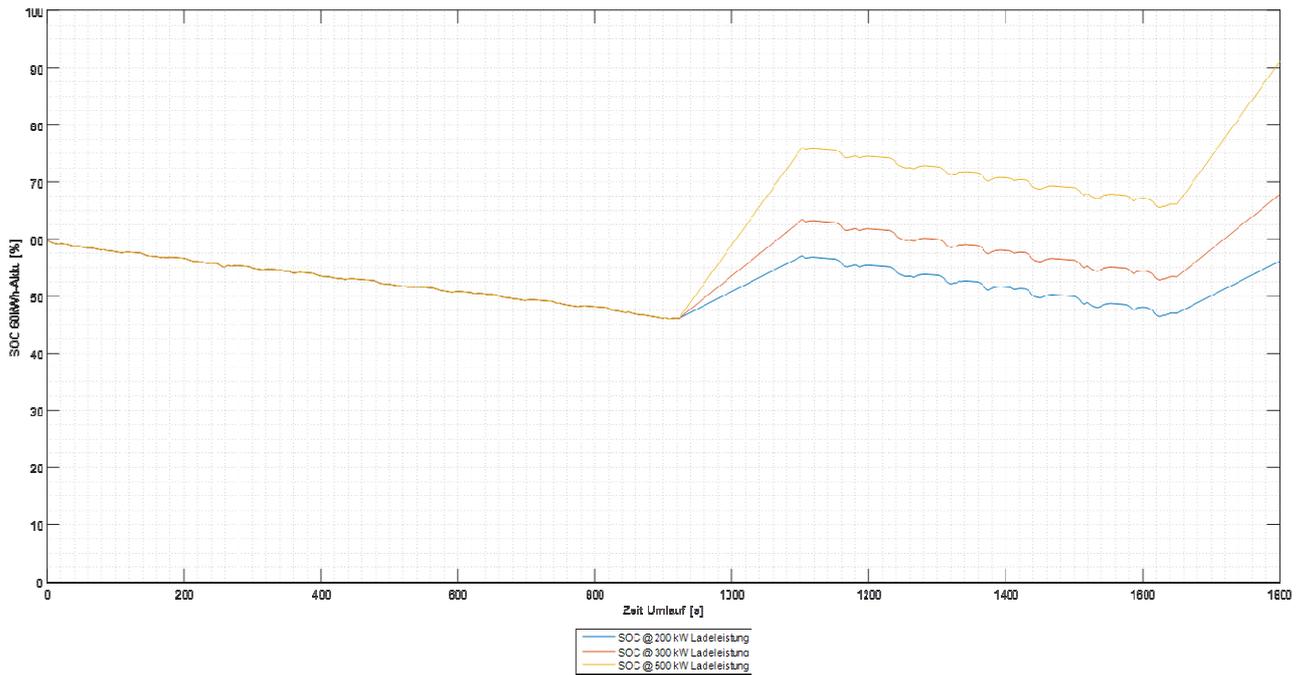
**Abbildung 14: Möglicher Linienverlauf einer E-Bus-Linie durch die Mannheimer Konversionsflächen Franklin- und Taylor-Village (blaue Markierung)**

Da auf der gezeigten zukünftigen Buslinie noch kein Busverkehr stattfindet und ein Teil der zu befahrenden Route noch nicht für den Straßenverkehr erschlossen ist, bestand für die Projektierung der neuen E-Buslinie keine Möglichkeit zur Gewinnung von Fahrzyklusdaten über GPS-Messungen. Aus diesem Grund wurde mit Hilfe verkehrswissenschaftlicher Methoden und Software (PTV Vissim) der für die Buslinie zu erwartende Verkehrsfluss modelliert. Der resultierende Bus-Fahrzyklus mit der Markierung von drei potenziellen Ladehaltestellen wird nachfolgend gezeigt. Der Umlauf startet an der Haltestelle Platz der Freundschaft und folgt zuerst der nördlichen Routenführung in Richtung Käferthal Bhf.



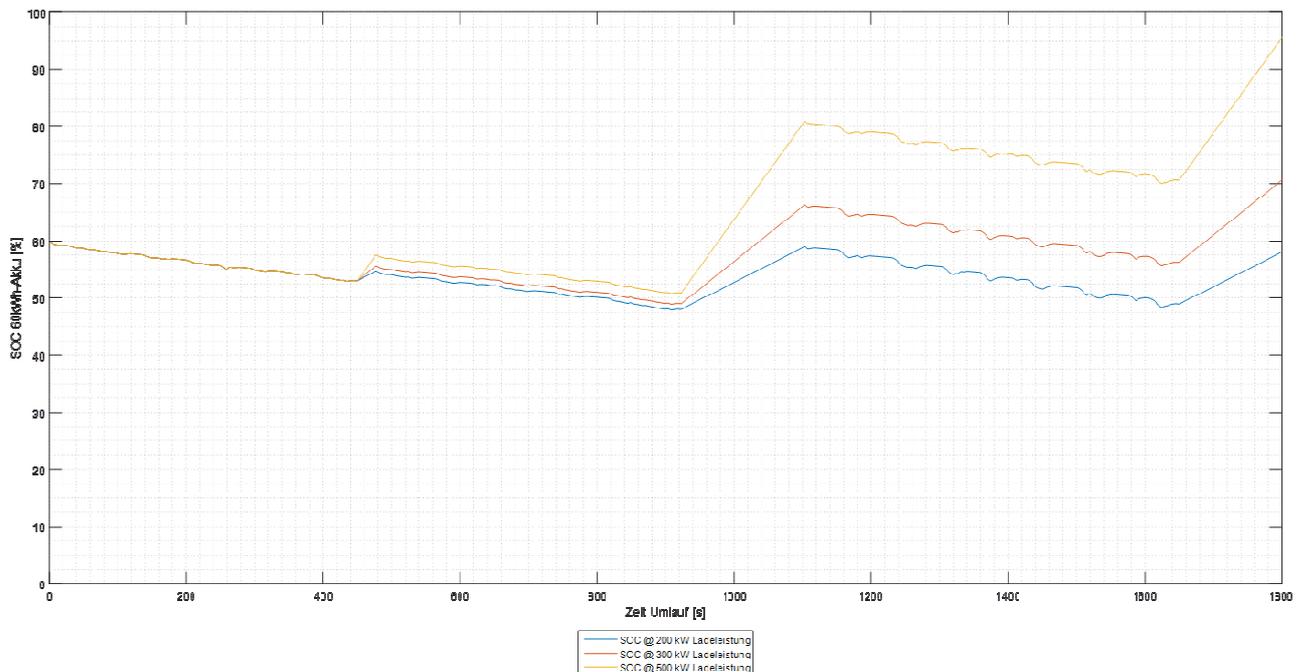
**Abbildung 15: Generischer Fahrzyklus für neue E-Buslinie durch die Mannheimer Konversionsflächen mit Markierung der Haltestellen**

Der generische Fahrzyklus stellt die zentrale Input-Datengröße zur Simulation der zukünftigen, beispielhaften E-Bus-Linie dar. Der SOC als wichtige Outputgröße der Energieflusssimulation für die neue Buslinie wird in den nächsten beiden Grafiken dargestellt. Es wird von einem Ladezustand von 60 % zu Beginn der Umlauffahrt gemäß des oben gezeigten Fahrzyklus ausgegangen. Unter vereinfachenden Parameterannahmen für die Fahrzeugkonfiguration (12-Meter-Bus, Batteriekapazität 60 kWh, 100 % Wirkungsgrad der Ladeleistung, konstante Leistung der Nebenverbraucher von 25 kW), zeigt Abbildung 16 den Ladezustandsverlauf für die Ausrüstung der Strecke mit Ladestationen verschiedener Ladeleistungen der jeweiligen Richtungshaltestellen am Platz der Freundschaft.



**Abbildung 16: SOC-Verlauf für die Simulation eines E-Bus-Umlaufs gemäß des in Abbildung 12 gezeigten Fahrzyklus mit einer Ladehaltestelle je Richtung am Platz der Freundschaft**

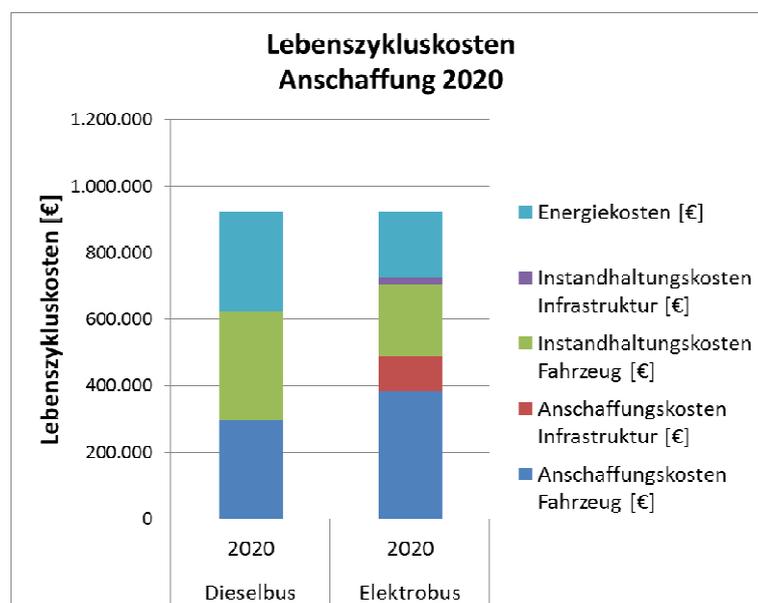
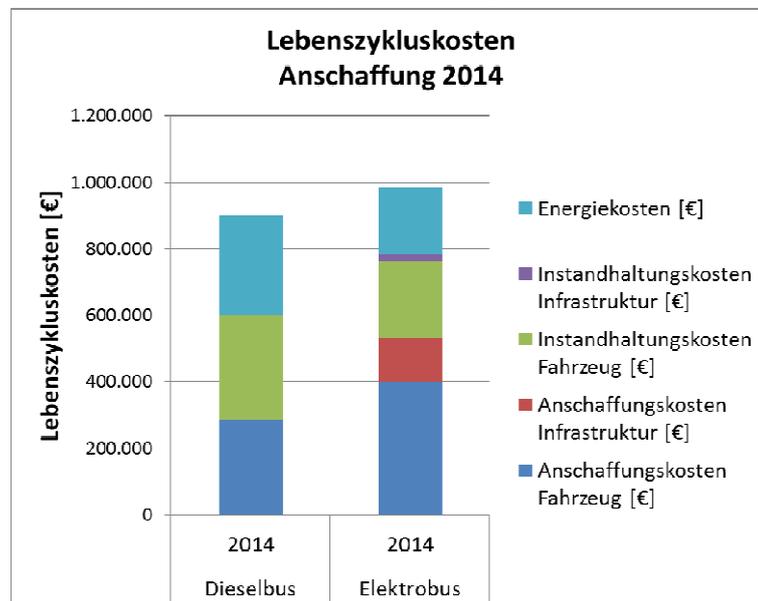
Alternativ dazu wurde die Simulation unter gleichen Parametereinstellungen, aber unter Hinzunahme einer weiteren Ladehaltestelle am Bahnhof Käfental erneut durchgeführt. Der Effekt der Integration der zusätzlichen Ladehaltestelle, für den speziellen Fahrzyklus gemäß Abbildung 15, ist Abbildung 15 zu entnehmen.



**Abbildung 17: Ladezustandsverlauf unter den gleichen Rahmenbedingungen wie in Abbildung 13, allerdings unter Hinzunahme einer weiteren Ladestation am Bahnhof Käfertal**

Das Fallbeispiel der Energieflusssimulation für die zukünftige E-Bus-Linie durch die Mannheimer Konversionsflächen zeigt, dass die Übertragbarkeit der Softwaremodellierung für die Linie 63 auf andere Anwendungsfälle übertragbar ist.

Neben dem Aufbau des Simulationsmodell wurden auch Modelle zur Berechnung der Total Cost of Ownership (TCO) eines E-Busses im Vergleich zu einem Diesibus unter verschiedenen Szenarien und bis ins Jahr 2030 projiziert aufgebaut. Hierbei standen das Modell und die grundlegende Strukturierung aller Kostenfaktoren im Vordergrund. Aus diesem Grund haben die gewählten Kosten-Parametersets auch keinen direkten Bezug zum zu Grunde liegenden Projekt, sondern basieren auf anderweitig recherchierten Werten. Als Ergebnis des TCO-Modells lassen sich, je nach gewähltem Inputdatenset beispielsweise Ergebnisse wie in



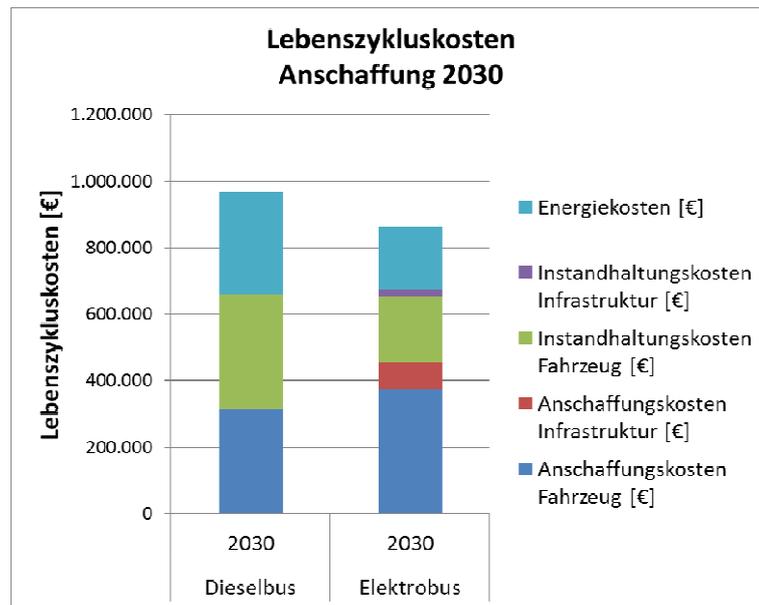
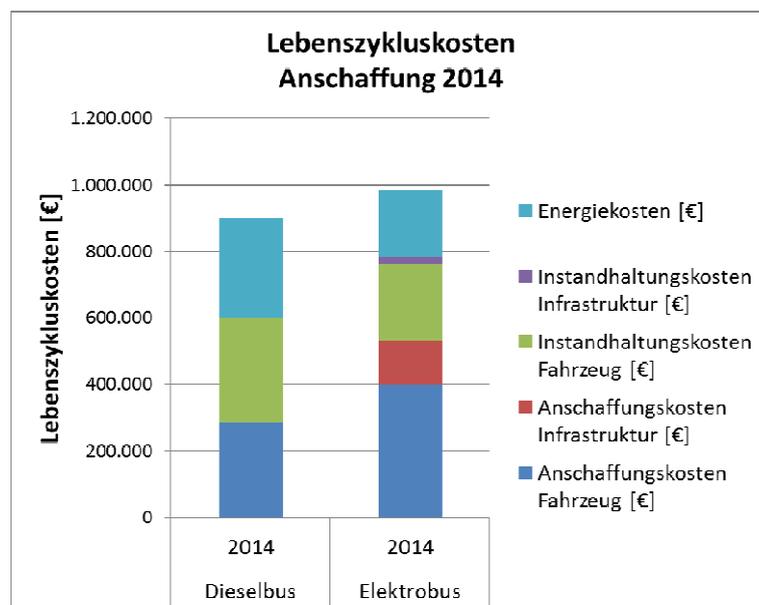
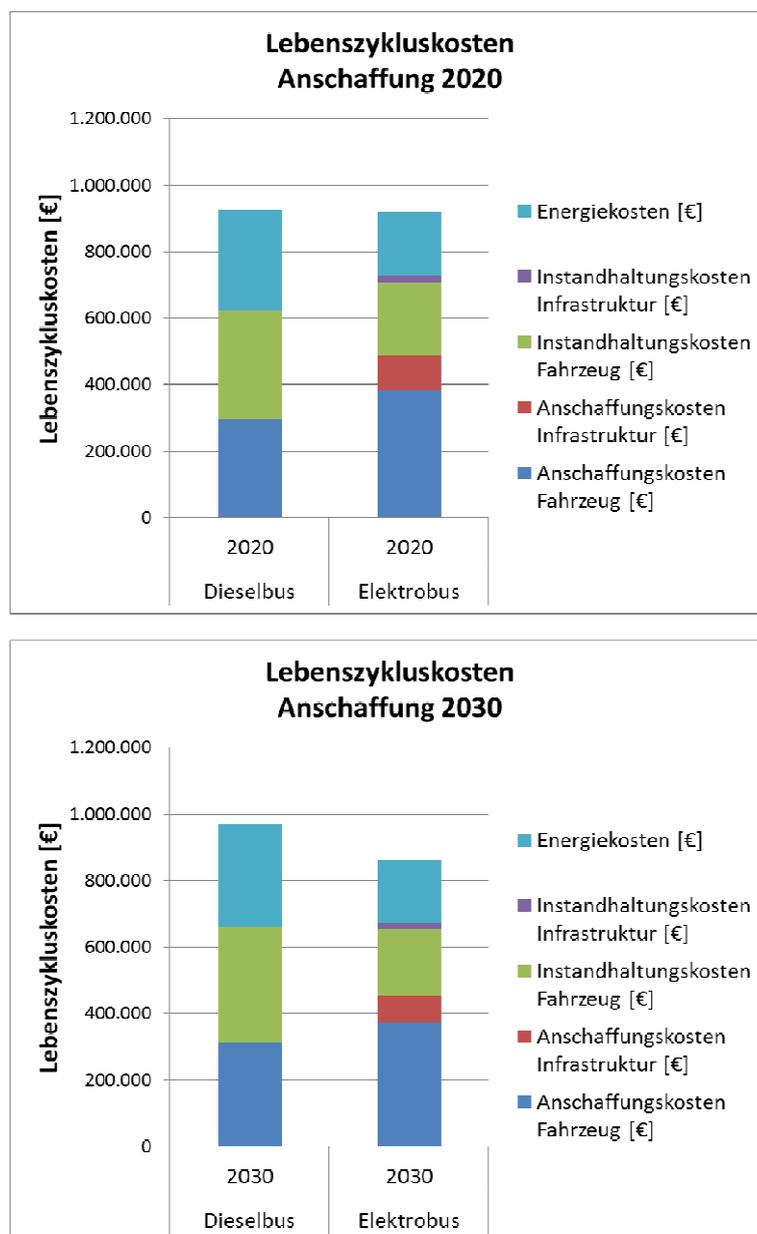


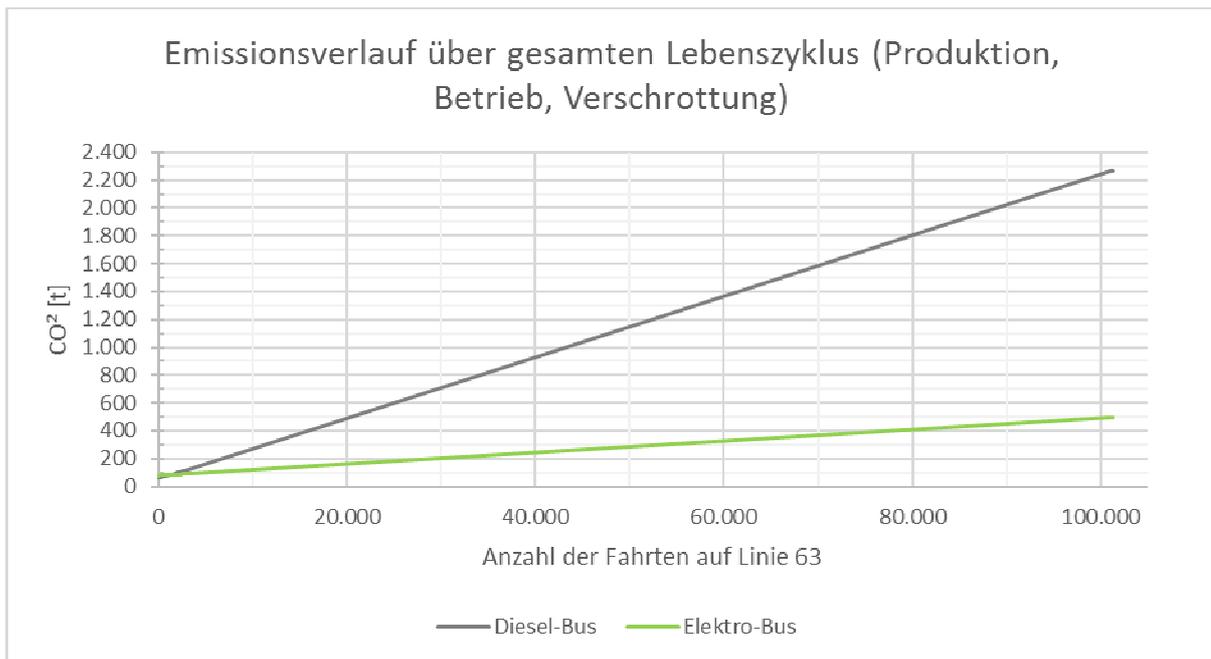
Abbildung 18 zeigt, generieren. Hier wird der E-Bus, unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und der gewählten Parameter, bezüglich der Lebenszykluskosten im Jahr 2020 in etwa gleichauf mit dem Dieselbus liegen. Für das Jahr 2030 wird der Betrieb eines E-Busses niedrigere Kosten nach sich ziehen wie die eines Dieselbusses. Die Simulationsergebnisse der gezeigten Gesamtsystemsimulation können als Inputgrößen für die dargestellten Kostenbetrachtungen herangezogen werden. So verschmilzt die technische mit der betriebswirtschaftlichen Simulation. Dieser Aspekt ist für die Planung zukünftiger Buslinien auch von hoher Praxisrelevanz. Das Thema der TCO konkret auf das Projekt PRIMOVE Mannheim bezogen, wird in Kapitel 1.13.4 dargestellt und analysiert.





**Abbildung 18: Ergebnisse zum TCO-Vergleich Diesel- vs. E-Bus für die Jahre 2014, 2020 und 2030**

Die Ergebnisse der E-Bus-Simulation lassen sich weiterhin als Inputgröße für die Berechnung der Emissionen nutzen. Hierfür wurde ebenfalls ein Modell entwickelt, das neben den Emissionen im Betrieb auch die entstehenden Emissionen bei der Produktion und Verschrottung eines Busses offen legt und somit den gesamten Lebenszyklus nach der Methodik des Life Cycle Assessment (LCA) berücksichtigt. Beispielhaft zeigt die nachfolgende Abbildung den Emissionsverlauf für einen Dieselbus im Vergleich zu einem E-Bus für den Einsatz auf der Linie 63. Es wird deutlich, dass die Emissionsergebnisse sich für den E-Bus als immer vorteilhafter erweisen, je länger die Nutzungsdauer gewählt wird.



**Abbildung 19: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus für einen E-Bus im Gegensatz zu einem Dieselsbus für den Betrieb auf der Mannheimer Linie 63**

Durch die vorgestellte Simulationsumgebung samt ihrer Erweiterungen wurde durch das KIT im Rahmen des Leuchtturmprojektes PRIMOVE Mannheim ein systemübergreifender sowie interdisziplinärer Ansatz zur Entwicklung, Analyse und Optimierung urbaner Bus- sowie Nutzfahrzeugverkehre möglich. Die geschaffene Softwareumgebung stellt verschiedenen Interessensgruppen (Betreiber, Fahrzeugentwickler, Komponentenhersteller, Forscher diverser Fachrichtungen) eine modular beliebig erweiter- sowie detaillierbare Entwicklungs- und Simulationsumgebung für ihre jeweiligen speziellen Fragestellungen im Rahmen eines Model-in-the-Loop Ansatzes zur Verfügung. Sie ist durch die gewählte Softwarestruktur auch einfach erweiterbar zur Nutzung im Rahmen eines Hardware-in-the-Loop Ansatzes. Hierdurch können unter realitätsnahen, reproduzierbaren und im großen Umfang frei parametrisierbaren Bedingungen diverse Fragestellungen unterschiedlicher Fachbereiche (z. B. Entwicklungsingenieure, Verkehrsplaner, Betriebswirtschaftler) eingehend untersucht werden.

Im Rahmen virtueller Dauertests lassen sich verschiedene Topologien, variierende Temperaturen, Ladedauern, Lastkurven des Energieversorgungsnetzes, Alterungseffekte der Batterie, Regelungsstrategien für Nebenverbraucher, Auswirkungen von Streckenänderungen, unterschiedlichen Verkehrszuständen oder Fahrereigenschaften testen. Mit den hieraus gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich vielfältige Optimierungsansätze auf Komponenten-, Fahrzeug-, Infrastruktur- oder Betriebsebene mit dem Ziel eines verbesserten Energiemanagements. So lassen sich die Treiber des Energiebedarfs identifizieren und daraus abgeleitet zukünftig etwa Nebenverbraucher energieeffizienter ansteuern. Auch wird die Dimensionierung des Akkus vereinfacht. Ermöglicht werden des Weiteren Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Energiefluss- und Emissionsvergleiche verschiedener Antriebskonzepte (verbrennungsmotorisch, elektrisch, hybrid). Wenn zusätzlich eine Verkehrssimulationssoftware eingebunden wird, lässt sich die Interaktion des Busses und dessen Fahrer mit dem Straßenverkehr sowie der Verkehrsleittechnik, im Sinne der

Energie- und Zeiteffizienz, durch Ansätze wie Bus-to-X-Kommunikation oder aktives Fahrercoaching optimieren.

Über den zeitlichen Horizont des Leuchtturmprojektes PRIMOVE Mannheim hinaus ist die Verwendung der erstellten Simulationstools zur Auslegung einer Buslinie oder eines gesamten städtischen Busnetzes für elektrisches Fahren von grundlegender Bedeutung. So ist der hiermit in verschiedenen Szenarien ermittelte durchschnittliche Energiebedarf auf der Fahrt zwischen den einzelnen Haltestellen eine wesentliche Inputgröße für die kostenminimale Konfiguration des Baus von Ladepunkten in einem stadtweiten Busnetz und für die E-Fahrzeugkonfiguration. Durch die Übertragbarkeit der Simulation auf diverse Ladetechnologien und andere Fahrzeuggattungen lässt sich beispielsweise auch die Mitnutzung der Bus-Ladeinfrastruktur durch weitere urbane Nutzfahrzeuge wie Kehrmaschinen, Lieferlastwagen oder Müllfahrzeuge untersuchen.

## **1.5          Arbeitspaket 4 – Systemdefinition**

Die Systemdefinition umfasst die Auslegung der Batteriegröße je Bus, die Anzahl der Ladestationen, sowie eine Validierung auf Basis von Messdaten im Linienbetrieb.

Hierzu wurden Streckendaten und RBL (Rechnergesteuertes Betriebsleitsystem) Informationen der rnv, des Busherstellers Hess, sowie selbst erhobene Daten verwendet.

Folgende Informationen zur Strecke sind bekannt:

- Die Länge eines Umlaufs beträgt 9,2km (Hin- und Rückfahrt)
- 12 Haltestellen je Richtung (inkl. Endhaltestelle)
- Die Fahrzeit für einen Umlauf inkl. Zwischenhalte beträgt 33 min, die Haltezeit am Pfalzplatz beträgt 3 min und die Haltezeit am Hauptbahnhof beträgt 4 min. Daraus ergibt sich eine Umlaufzeit von 40 min.
- Der Linientakt beträgt werktags 20 min und am Wochenende 30 min
- Typischerweise werden 2 Busse und zu Stoßzeiten 3 Busse eingesetzt
- Tägliche Betriebszeit 16 Stunden (werktags)

## PRIMOVE

Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb



**Abbildung 20: GPS Streckenaufzeichnung**

Basierend auf den Angaben des Fahrzeugherstellers Hess zu den Nebenverbräuchen und unter Berücksichtigung der Systemeigenschaften von Antriebsstrang, Batterie und Ladesystem erfolgte eine Simulation der Strecke. Basierend auf dem errechneten Energiebedarf wurde der durchschnittliche Bedarf pro Kilometer inkl. Nebenverbraucher bestimmt. Dieser lag im Schnitt bei 1,48 kWh/km und im Worst Case Szenario (u.a. hohe Heizleistung) bei 2,15 kWh/km (vgl. Abbildung 21). Resultierend aus den bekannten Standzeiten wurden auf Basis der Haltestellenstandzeit potentielle Nachladestellen definiert. Anschließend erfolgte eine Grobabschätzung bzgl. der potentiellen Nachladestellen. Daraus resultierend wurde der DoD (Depth of Discharge) der Batterie bestimmt und die Lebensdauer der Batterie errechnet. Basierend auf den Daten erfolgte die Auswahl einer 60kWh Batterie.

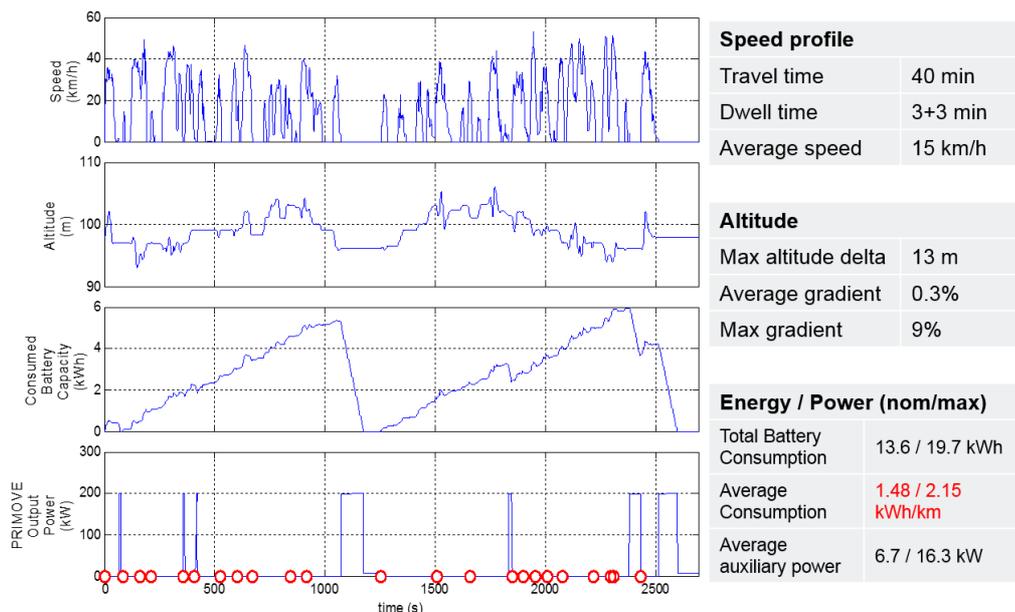
Parallel dazu wurde an den potentiellen Haltestellen die Netzanbindung geprüft, sowie eine prinzipielle Installationsmöglichkeit. Für die Überprüfung wurden die Infrastrukturabteilung der rnv und der örtliche Versorger MVV eingebunden. Anschließend wurden weitere Haltestellen neben den Endhalten Pfalzplatz und Hauptbahnhof ausgewählt. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die ausgewählten Haltestellen.

Haltestelle	Netzanbindung	Ladestationstyp
Hauptbahnhof	750VDC	Endhaltestelle
Friedrichsplatz	400VAC	Zwischenhaltestelle
Markuskirche stadtauswärts	750VDC	Zwischenhaltestelle
Pfalzplatz	400VAC	Endhaltestelle
Markuskirche stadteinwärts	750VDC	Zwischenhaltestelle
Möhlstraße	750VDC	Zwischenhaltestelle
Mühdorferstraße	400VDC	Zwischenhaltestelle
Depot Möhlstraße	750VDC	Betriebshof

**Tabelle 3: Übersicht der ausgewählten Haltestellen**

Die Herausforderung in diesem Projekt ist es, dass die Haltestellen nur bedarfsweise angefahren werden, wenn Fahrgäste ein- oder aussteigen wollen. Dies macht es erforderlich die Infrastruktur an mehreren Haltestellen zu installieren, um im Schnitt immer ausreichend Nachladezeit zur Verfügung zu haben. Nach Festlegung der Haltestellen erfolgte eine abschließende Simulation, um den Betrieb auf Basis der gewählten Konfiguration abzusichern.

Während der Bauplanung stellte sich heraus, dass die Haltestelle Möhlstraße nicht realisiert werden konnte (siehe Kapitel 1.5). Daraufhin wurden die Simulationsdaten noch einmal überprüft und entsprechend angepasst. Die resultierende Simulation zeigt auf, dass ein zuverlässiger Betrieb auch bei Verzicht auf die Ladestation an der Möhlstraße möglich ist.



### **Abbildung 21: Streckensimulation der Linie 63**

Die aufgezeigten Daten wurden nach mehrmonatigem Betrieb validiert. Es erfolgte ein Abgleich zwischen der Simulation und den Ist-Werten auf der Linie. Hierbei konnte bestätigt werden, dass der nominale Verbrauch bei ca. 1,4kWh/km liegt. Die Auswertung hat zudem ergeben, dass die reine Fahrzeit länger als angenommen ist. Die Quote der genutzten Ladestation ist geringer als angenommen, um die aus Verspätungen resultierende geringere Ladezeit an den Endhalttestellen auszugleichen. Damit konnten die vorausgesagten Ladezeiten nicht eingehalten werden.

Zur Datenerhebung erfolgte der Ladestart durch manuelle Aktivierung durch den Fahrer. Nach der Analyse wurde die Metallerkennung als Schlüsselkomponente für das automatische Laden eingebaut und damit verbunden das automatische Laden in Betrieb genommen.

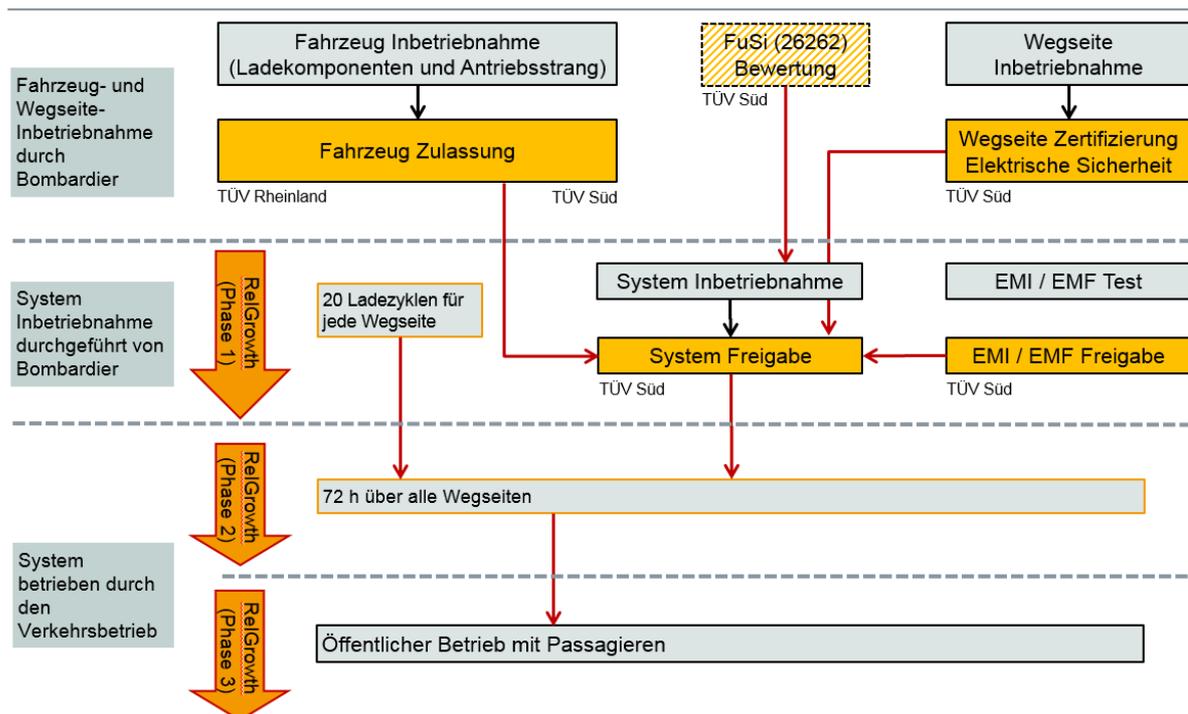
Die Umsetzung des automatischen Ladens führt zu einer Erhöhung der Ladequote an den Zwischenhalttestellen und somit der nachgeladenen Energie an den Zwischenhalten. Damit kann der geringeren Energieaufnahme an den Endhalten durch Verspätung deutlich entgegengewirkt werden. Zudem entlastet es den Fahrer, da keine Fahreraktion zum Start des Ladevorgangs notwendig ist.

## **1.6 Arbeitspaket 5 – Genehmigung Bus / Infrastruktur**

### **1.6.1 Genehmigungsprozess**

Die Genehmigung bzw. Zulassung des PRIMOVE Ladesystems lässt sich in drei Bereiche einteilen.

1. Zulassung des Fahrzeugs
2. Zulassung der Wegseite
3. Zulassung des Gesamtsystems (bestehend aus Wegseite und Fahrzeug)



**Abbildung 22: Zulassungsprozess**

### 1.6.2 Fahrzeug

Die Zulassung des Fahrzeugs setzt voraus, dass der Fahrzeughersteller bereits eine Zulassung für den Bus ohne Ladesystem erhalten hat. Anschließend erfolgt eine Erweiterungszulassung (Deltazulassung) für das Ladesystem und für alle verbauten zusätzlichen Komponenten des Ladesystems. Hierzu erfolgt eine Abnahme durch den TÜV Süd. Die unter anderem für die Abnahme erforderlichen Nachweise zur Erfüllung der ECE-R100 und ECE-R13 wurden dem TÜV für das jeweilige Fahrzeug zur Verfügung gestellt. Hierzu wurde ein internes Abnahmeprotokoll erstellt und dem TÜV vorgelegt. Zusätzlich erfolgte eine Sichtprüfung durch den TÜV direkt am Fahrzeug. Darüber hinaus hat der TÜV im Vorfeld die Entwicklung begleitet, damit das System zulassungsfähig entwickelt wurde. Nach der erfolgreichen Abnahme, erfolgte die Eintragung in den Fahrzeugbrief. Hierdurch wurde sichergestellt, dass der Bus fortan im Straßenverkehr mit PRIMOVE Ladesystem teilnehmen darf. Die Zulassung zur Energieübertragung ist hiermit noch nicht erteilt und wird in den folgenden Absätzen beschrieben.

Die Zulassung der Wegseite lässt sich aufteilen in die Genehmigung für die Errichtung und den Betrieb der Wegseite als elektrische Anlage. Eine besondere Herausforderung im Projekt war die Genehmigung zur Errichtung der Anlage.

### 1.6.3 Ladeinfrastruktur

Ein großes Thema war zunächst unklar: Wer genehmigt den Ausbau der Haltestellen zu PRIMOVE-Ladestationen? Es gab hierbei insgesamt vier Behörden, die in Frage kamen. Die technische Aufsichtsbehörde, das Regierungspräsidium Karlsruhe, der Straßenbaulastträger und die örtliche Kommune. Es gab keine eindeutige Zuständigkeit dieser Behörden für die Genehmigung von

Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum. Die Wichtigkeit dieser Fragestellung ergibt sich aus dem Einfluss der entsprechenden Behörde auf das Projekt. Sowohl, ob die Ladeinfrastruktur errichtet werden darf, als auch wann mit einer entsprechenden Baugenehmigung zu rechnen ist, liegt im Ermessen der jeweiligen Behörde. Nach entsprechenden Abstimmungsterminen bei den genannten Behörden wurde klar, dass die Zuständigkeit hierfür beim Straßenbaulastträger liegt. Da es sich bei der Linie 63 um eine Buslinie in der Mannheimer Innenstadt handelt, war die genehmigende Behörde die Stadt Mannheim. Dort mussten zur Erlangung der Baugenehmigung betroffene Ämter wie etwa das Bauamt, das Grünflächenamt, die örtlichen Rettungsdienste eingebunden werden und entsprechende Anträge zur Aufgrabungsgenehmigung durchlaufen werden.

Des Weiteren war die Zustimmung der Eigentümer von Bestandsleitungen im Baufeld einzuholen. Dies erfolgte über sogenannte Leitungsanfragen. Unter anderem wurde dabei die MVV Energie als örtlicher Energieversorger angefragt. Sie wurde um Stellungnahme zum Verlauf bestehender Gas-, Wasser- und Stromleitungen gebeten. Da es sich bei der Ladeinfrastruktur um drei Komponenten (Ladepad, Wegseite, Kühlungseinheit) handelt, bei deren Maximal- bzw. Minimalabständen zueinander nur wenig Spielraum besteht, konnte eine Überbauung von Bestandsleitungen nicht an jeder Haltestelle vermieden werden. Hierdurch kam es zu Schwierigkeiten: Die MVV Energie lehnte die Überbauung von Gashochdruckleitungen kategorisch ab und auch bei der Überbauung von Gasniederdruck-, Wasser- und Fernwärmeleitungen forderte sie entsprechende Schutzrohre im überbauten Bereich. Die Projektpartner mussten diese Forderung erfüllen sodass es zu zeit- und kostenintensiven Änderungen im Infrastrukturausbau kam. Im Ergebnis wurde die Errichtung der Ladestation an der Haltestelle Möhlstraße wegen einer Gashochdruckleitung im Baufeld gänzlich gestrichen, sodass die Mehrkosten durch Schutzrohre an anderen Haltestellen ein Stück weit ausgeglichen werden konnten (siehe Zwischenbericht rnv vom 11.08.2014).

Im Nachhinein gesehen kann festgehalten werden, dass bei diesem Projektinhalt (Überbauung der Bestandleitungen mit einer Ladeplatte) eine frühzeitigere Einbindung an anderer Hierarchieebene bei der MVV Energie sinnvoller gewesen wäre.

Nach erfolgreicher Errichtung der Ladestationen erfolgten die Installation der elektrischen Komponenten und die Inbetriebsetzung der Anlage. Hierzu wurden Nachweise zur elektrischen Sicherheit der Anlage erbracht und beim TÜV eingereicht. Zudem erfolgte eine Sichtprüfung der elektrischen Anlage durch den TÜV.

#### **1.6.4 Systeminbetriebnahme**

Nach erfolgreicher Inbetriebsetzung der Anlage musste noch eine Systeminbetriebnahme erfolgen, um die Sicherheit des Systems während der Leistungsübertragung zu gewährleisten. Hierzu wurden Sicherheitstests, wie die Überprüfung der Parktoleranzen durchgeführt, zudem erfolgten Messungen, um die elektromagnetische Verträglichkeit zu gewährleisten. Sämtliche Ergebnisse der Inbetriebnahme wurden dem TÜV zur Bewertung zur Verfügung gestellt. Nach erfolgreicher Prüfung wurde eine Inbetriebsetzung der Anlage durch den TÜV zugestimmt. Die Inbetriebsetzung wurde wiederum stufenweise mit anschließender Prüfung durch den TÜV vollzogen.

Die Stufen der Inbetriebsetzung wurden wie folgt definiert und durchgeführt:

1. Nachweis von fehlerfreien Ladevorgängen durch unterwiesene Bombardier-Mitarbeiter ohne Passagiere

2. Nachweis von fehlerfreien Ladevorgängen durch geschulte Fahrer der rnv ohne Passagiere
3. Nachweis von fehlerfreien Ladevorgängen durch geschulte Fahrer mit Passagieren.

Alle Nachweisfahrten mussten auf der Linie erfolgen, nach erfolgreicher Absolvierung stimmte der TÜV einem Linienbetrieb der Busse mit PRIMOVE Ladesystem zu.

18.06.2015	Reliability growth status overview	
<b>Phase 1</b>	<b>Installation</b>	<b>Achieved</b>
20 Charging cycles for each wayside needed	10013: MA Depot	44
	10034: MA Hauptbahnhof	178
	10054: MA Markuskirche SAW	57
	10064: MA Markuskirche SEW	72
	10024: MA Pfalzplatz	148
	10044: MA Mühldorfer Straße	35
	10084: MA Friedrichplatz	11
<b>Phase 2</b>	<b>Hours achieved</b>	<b>% achieved</b>
27 hours operation needed	33.04	122.36%
	<b>DC Installations</b>	<b>AC Installations</b>
Both wayside types (AC/DC) shall at least cover 40% of total operation time required (10,8 h)	21.88	11.15

**Abbildung 23: Darstellung der Ergebnisse der stufenweisen Inbetriebnahme**

## 1.7 Arbeitspaket 6 – Bus

### Beschreibung:

Um die innovative Ladetechnik im Praxisbetrieb erproben zu können bedarf es entsprechender Fahrzeuge. Da die Linie 63 wegen ihrer kurzen Wendezeiten einen echten Härtetest für die Ladetechnik darstellt, wurde sie für das Pilotprojekt ausgewählt. Die Linie wurde bisher mit zwei konventionellen Dieselfahrzeugen betrieben, entsprechend sollte es möglich sein, die Linie mit den beiden im Projekt zu beschaffenden Elektrobussen vollständig zu elektrifizieren. Im Zuge der Busentwicklung und -beschaffung sollten zwei vollelektrische Kraftomnibusse mit der induktiven Nachladetechnik „PRIMOVE“ ausgestattet werden. Die Anforderungen waren hinsichtlich Ladetechnik, Gewichtsverteilung, Ausstattung etc. zu definieren und eine preisoptimierte Vergabe durchzuführen.

### Entwicklungsziel:

Ziel ist die bedarfsgerechte Fahrzeugbereitstellung, sodass ein Einsatz auf der Mannheimer Buslinie 63 ermöglicht werden kann. Es waren die Fahrzeuganforderungen mit Busherstellern näher zu spezifizieren und technisch zu klären. Es war eine preisoptimierte Vergabe vorgesehen, indem in den Vergabevorgang der rnv-Einkauf als Verhandlungspartner mit einbezogen wurde. Die beiden im Rahmen dieses Projekts zu beschaffenden PRIMOVE-Elektrobuse gelten als

Experimentalfahrzeuge. Neben den elektrischen Antriebskomponenten verfügen sie über folgende ladeinfrastrukturspezifische Komponenten:

- Pick-up: Der Pick-up besteht aus zwei Hauptkomponenten, dem Aufnehmer (Wicklung, Ferritplatte, Aluminiumkühler) sowie dem Block der Kompensationskondensatoren. Er bildet eine Einheit, welche unter dem Wagenkasten montiert wird.
- Gleichrichter: Der dem Pick-Up nachgeschaltete wassergekühlte Gleichrichter wandelt die dreiphasige, hochfrequente Wechselfrequenz in eine Gleichspannung zur Versorgung des Antriebs sowie diverser Zusatzaggregate (z.B. Klimaanlage).
- Hebevorrichtung: Die Hebevorrichtung bildet das mechanische Interface zwischen Pick-Up und Fahrzeug. Sie ermöglicht eine Positionierung des Pick-Up in eine Park- bzw. eine Betriebsstellung.
- PRIMOVE Controller: Der PRIMOVE Controller überwacht den sicheren Betrieb des Pick-Ups. Es verarbeitet die Signale der Pick-Up- und Gleichrichterüberwachung (Spannungssymmetrie, Temperaturen, Über-/ Unterspannung, etc.) und kommuniziert mit den Wechselrichtern, um ggf. bei Fehlfunktion die primärseitige Energieversorgung zu unterbrechen.
- Antennen: Um die gültigen EMV-spezifischen Richtlinien zu erfüllen, wird die induktive Energieübertragung nur in den Segmenten aktiviert sein, in denen sich das Fahrzeug befindet. Zur Segmenterkennung und der jeweiligen Ein- und Ausschaltung werden Antennen und Sender verwendet (VDSC).

### **Ergebnis:**

Um die gesteckten Ziele im AP 6 Busentwicklung und -beschaffung zu erreichen, waren insbesondere die rnv und Bombardier Transportation gefordert. Zum Zeitpunkt der Beschaffung gab es in Deutschland nur vereinzelte Prototypen von vollelektrischen 12-Meter-Bussen. Sowohl die Batterietechnologie als auch die potentiellen Nachladesysteme befanden sich noch nicht auf einem serienreifen Niveau. Entsprechend musste ein Partner gesucht werden, der Interesse daran hatte, das Produkt zu entwickeln, zu genehmigen und in Einsatz zu bringen. Zunächst wurden die Anforderungen formuliert, die sich einerseits aus der Ladetechnik und andererseits aus dem Betrieb bei der rnv ergaben. Die Ergebnisse dieser Anforderungen wurden in einem Lastenheft festgehalten. Auf Grundlage des Lastenhefts konnten dann in einem nächsten Schritt potentielle Bushersteller angefragt werden. Dabei war die Ladetechnik des E-Busses gesetzt, während ein Partner für den restlichen Anteil des Busses gesucht wurde. Das Konzept der Gelegenheitsladung war somit gesetzt und dies wiederum stellte Anforderungen an die Batterietechnik. Diese musste in kurzer Zeit eine hohe Energiemenge aufnehmen können. Im Gegenzug dazu musste sie nicht allzu groß (60 kWh) dimensioniert sein, da das Fahrzeug auf der Strecke nachgeladen wird.

Auf Anfrage hin signalisierten fünf Hersteller ihr Interesse und es kam zu vier fristgerecht eingereichten Angeboten. Um eine Vergleichbarkeit der vorliegenden Angebote zu erhalten, wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Hierbei wurden geeignete Kriterien definiert und das Angebot jeweils einer gemeinschaftlichen Bewertung der einzelnen Kriterien unterzogen. Im Ergebnis entstand eine Punktzahl je Hersteller. Die Firma HESS Carrosserie AG schnitt bei dieser Bewertung am besten ab, da sie insbesondere bei den Themen Service, Know-how, technischer Wert und Erfüllung des wirtschaftlichen Rahmens das beste Ergebnis erzielte und zugleich großes Interesse an der neuen

---

## PRIMOVE

Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb

---

Technik signalisierte. Daher wurde der Schweizer Busersteller beauftragt und stieg ins Projekt ein. Der Produktionsort von HESS liegt in Bellach. Entsprechend wurden die Komponenten der Ladetechnik als Beistellteile in die Schweiz geliefert, sodass die Integration der Ladetechnik schon in einem frühen Stadium der Busproduktion erfolgen konnte. Zwar kam es im Verlauf des Produktionsprozesses mehrfach zu Verzögerungen, aber letztendlich konnten die beiden Fahrzeuge am 01.06.2015 an die rnv übergeben werden. Abbildung 24 zeigt einen der beiden E-Busse mit PRIMOVE Ladetechnik.



**Abbildung 24: PRIMOVE-Hess Bus**

## 1.8 Arbeitspaket 7 – Elektro-Lieferfahrzeug / Van

Projekthalt war, die PRIMOVE Technologie für die nächst kleinere Fahrzeugeinheit anzupassen und im Alltag einzusetzen. Dazu gehörte:

- die Entwicklung und Optimierung von Leistung und Größe von Fahrzeugkomponenten und Ladestation für ein Lieferfahrzeug / Van
- Umbau eines Vans mit Dieselantrieb zum Elektrofahrzeug
- Integration des neuentwickelten induktiven Ladesystems in den E-Van
- Einsatz im Arbeitsalltag

### 1.8.1 Fahrzeugseitige Komponenten

Das PRIMOVE Energieabnahmesystem auf dem Fahrzeug wandelt das Magnetfeld der wegseitigen Primärwicklung in eine mit dem Batteriesystem kompatible Gleichspannung. Das System umfasst Sekundärspule und Gleichrichter. Die Entwicklungsziele und Ergebnisse sind in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

#### 1.8.1.1 Pick-up und Gleichrichter

##### **Beschreibung:**

Der Pick-up ist der Sekundärteil des PRIMOVE Transformators. Er besteht aus einem Magnetkreis, einer Wicklung, Kompensationskondensatoren und einer Trägerkonstruktion. Den dreiphasigen hochfrequenten Wechselstrom wandelt ein Gleichrichter in Gleichspannung zum Laden der Fahrzeugbatterie um.

##### **Entwicklungsziel:**

Die Komponenten am Fahrzeug sollten neben den allgemeinen Umweltbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Salzeinwirkung auch mechanischen Belastungen wie Vibrationen stand halten.

Für den täglichen Einsatz mit hohen Kilometerleistungen ist eine große Fahrzeugbatterie notwendig. Um diese wieder über Nacht für den nächsten Arbeitstag aufzuladen ist eine Ladeleistung zwischen 15 – 22 kW optimal. Die wesentlich kleineren Abmessungen und Gewichtsreserven eines Vans erfordern ein kompaktes, gewichtsoptimiertes Design.

##### **Ergebnis:**

In dem rnv Projekt wurden bei PRIMOVE erstmalig der Pick-up und ein Gleichrichter in einer Komponente integriert. Dieses neue Gerät wird im folgenden Text ORU (Onboard Receiving Unit) genannt. Der Gleichrichter der ORU ist mit MOSFET (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor) Halbleitern aufgebaut. Es konnte damit eine Elektronikplatine mit Leistungselektronik und Steuerung entwickelt werden, die minimalen Bauraum erfordert. Um weiteren Bauraum zu sparen wurde die Übertragungsfrequenz vom induktiven Ladesystem erhöht. Mit den erreichten äußeren Abmessungen von etwa 75 x 61 x 7 cm bildet die ORU eine kompakte Einheit, welche problemlos unter dem Fahrzeugunterboden des Vans montiert werden konnte. In umfangreichen Tests wurden Dichtigkeit,

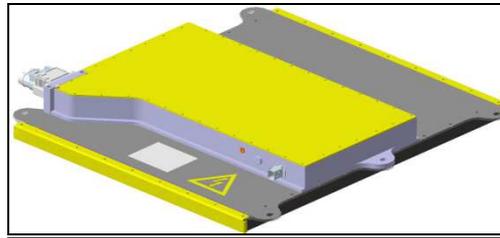
---

## PRIMOVE

Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb

---

sowie die Schwing- und Schockfestigkeit verifiziert. Im Alltagsbetrieb erwies sich die Konstruktion als widerstandsfähig und auch den widrigen Umweltbedingungen auf Straßen gewachsen.



**Abbildung 25: ORU**

### **1.8.1.2 PRIMOVE Controller**

#### **Beschreibung:**

Der PRIMOVE Controller dient der Überwachung bzw. dem sicheren Betrieb der ORU. Er verarbeitet die Signale der ORU und kommuniziert mit dem Wechselrichter, um ggf. bei Fehlfunktion die primärseitige Energieübertragung zu unterbrechen.

#### **Entwicklungsziel:**

Anpassung der Schnittstellen und Software von den im Bus verwendeten Komponenten.

#### **Ergebnis:**

Die Technik der beiden Steuergeräte Wayside Control Unit (WCU) und PRIMOVE Control Unit (PCU) konnte von der Bus-Anwendung übernommen werden. Die Software der Steuergeräte wurde den geänderten Anforderungen angepasst. Die PRIMOVE-Steuerung ist zusätzlich um einen Berührungsbildschirm zur Überwachung und Steuerung des PRIMOVE-Systems im Fahrzeug erweitert worden.

## 1.8.2 Ladestation

Die fahrwegseitigen Komponenten bilden die Primärseite des PRIMOVE-Transformators. Die Komponenten umfassen die Energieversorgung, Wechselrichter, Primärwicklung, sowie die Fahrzeugerkennung.

### 1.8.2.1 Energieversorgung

#### **Beschreibung:**

Das PRIMOVE-System wird über die Unterverteilung auf dem rnv-Gelände mit 400 V Wechselstrom versorgt.

#### **Entwicklungsziel:**

Der grundsätzliche Aufbau des PRIMOVE Systems für den Van wurde vom Bussystem übernommen. Von der Energieversorgung wird zunächst die Wechselspannung in eine variable Gleichspannung gewandelt, die als Versorgung der Wechselrichter dient. Über die variable Gleichspannung lässt sich der Batterieladestrom vom PRIMOVE System regeln. Das Hauptziel liegt in der Anpassung der Leistungsgröße auf 22 kW Eingangsleistung.

#### **Ergebnis:**

Die Versorgungskomponenten sind in einer zentralen Ladesäule untergebracht. Neben der Steuerung sind hier zwei Active Front Ends (AFE) untergebracht, die aus der netzseitigen Wechselspannung eine geregelte Gleichspannung erzeugen. Bei den beiden parallel geschalteten Geräten mit einer Leistung von jeweils 11 kW handelt es sich um eine Neuentwicklung. Der Focus lag dabei auf einem hohen Wirkungsgrad. Insgesamt konnte damit ein Gesamtwirkungsgrad bis zur Fahrzeugbatterie von 90% erreicht werden.



**Abbildung 26: Ladesäule**

### 1.8.2.2 Wechselrichter und Primärwindung

#### **Beschreibung:**

Der Wechselrichter generiert den hochfrequenten Strom, der notwendig ist, um das Magnetfeld in der Primärwindung zu erzeugen. Die Primärwindung besteht aus einer Drei-Phasen-Wicklung, die in einer bestimmten Reihenfolge zusammengesetzt wird.

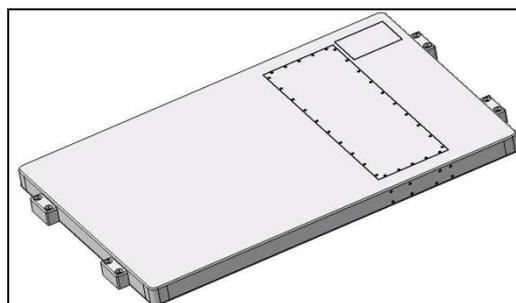
#### **Entwicklungsziel:**

Wechselrichter und Primärwindung sind für die Anforderungen eines Elektrovens neu zu entwickeln. Ziel ist eine einfache Montage und Abmessungen, die den Anforderungen eines Vans entsprechen.

#### **Ergebnis:**

Für den Wechselrichter konnte die Elektronikplatine vom ORU Gleichrichter weiter verwendet werden. Diese Gleichteilestrategie kann sich für eine spätere Serienanwendung positiv auf die Stückzahl und somit auf die Herstellungskosten auswirken. Mit der im Vergleich zum Bussystem hohen Übertragungsfrequenz von 140 kHz ist auch die Primärwindung kompakter geworden. Wechselrichter und Primärwindung sind ähnlich dem Konzept wie bei der ORU im Fahrzeug in einer Komponente zusammengefasst. Dies hat Vorteile bei der Installation, da keine geschirmte Verlegung notwendig ist. In den Versuchen zeigte sich, dass die elektrischen Verluste im Ladepad durch Verwendung neuer Technologien signifikant reduziert werden können. Darauf basierend wurden verschiedene neue innovative Kühlungskonzepte erarbeitet und am Ende eine Lösung implementiert, die sowohl technisch als auch für den Kunden den größten Nutzen hat.

Es ist ein Ladepad entstanden, das kompakt und hoch integriert ist mit den Maßen 1780 x 1140 x 80 mm. Die Installation ist einfach. Das Pad wird per Kran auf eine ebene Betonfläche gesetzt und mit Schrauben und Dübeln befestigt. Die Spannungsversorgung von der Ladesäule erfolgt über ein im Leerrohr verlegtes Kabel. Die Installation insgesamt dauert nur wenige Stunden.



**Abbildung 27: Ladepad**

### 1.8.2.3 Fahrzeugerkennung

#### **Beschreibung:**

Die Fahrzeugerkennung erfolgt durch eine separate Empfangsschleife in der Ladestation. Über einen Sender im Fahrzeug wird das Ladesystem aktiviert.

---

**Entwicklungsziel:**

Die Fahrzeugerkennung des Bussystems ist den Anforderungen eines Vans anzupassen.

**Ergebnis:**

Das standardmäßig im PRIMOVE Bus verwendete Design für das wegseitige Fahrzeugerkennungssystem konnte nicht verwendet werden, da sich die Geometrie der beiden Fahrzeugtypen zu stark unterscheidet und nicht mit der geplanten Konstruktion für das Charging Pad übereinstimmt. Ein neues Antennendesign wurde ausgearbeitet und in das Ladepad integriert. Hauptunterschied ist die verkürzte Länge der Antennenschleife. Das zuverlässige Ein- und Ausschalten des Ladesegments konnte nachgewiesen werden.

**1.8.3 Umbau eines Vans mit Dieselantrieb zum Elektrofahrzeug**

Bereits vor Projektbeginn wurde die Anzahl der Fahrzeuge von zwei auf eins aus Kostengründen reduziert. Als Fahrzeug für den Van wurde ein Mercedes-Benz Vito mit Dieselantrieb ausgewählt. Für die Umrüstung und Ausstattung mit PRIMOVE wurde eine spezialisierte Firma beauftragt. Die Firma baute den Dieselmotor, Tank, Abgasanlage aus und ersetzte diese durch einen Elektroantrieb versorgt durch eine Lithium-Ionen-Batterie. Das Fahrzeug wurde vom TÜV für den Elektrobetrieb zugelassen.

**1.8.4 Integration des neuentwickelten induktiven Ladesystems in den E-Van**

**Beschreibung:**

Integration des neu entwickelten PRIMOVE Ladesystems in den Van.

**Entwicklungsziel:**

Mechanische, elektrische und funktionale Integration des Ladesystems in das Fahrzeug. Das installierte Ladesystem soll durch Bombardier in Betrieb genommen werden und eine Straßenzulassung zusammen mit dem Van erhalten.

**Ergebnis:**

Die Schnittstellen am Fahrzeug wurden definiert. Dies beinhaltet sowohl die mechanischen Schnittstellen zur Montage der ORU als auch die elektrischen Schnittstellen zur Integration des PRIMOVE-Systems in die Fahrzeugelektrik. Eine Ablaufsequenz für den Betriebsfall PRIMOVE-Laden wurde erstellt und notwendige elektrische Änderungen am Fahrzeug implementiert. Die Montage der fahrzeugseitigen Komponenten erfolgte zusammen mit einem Fahrzeug-Umrüster. Dabei musste insbesondere auf die korrekte Lage der Sekundärspule und des Sendesystems zur Datenkommunikation geachtet werden.

Das Fahrzeug erhielt mit dem Ladesystem eine Zulassung vom TÜV Süd für den Straßenverkehr.



**Abbildung 28: e-Vito**

### **1.8.5 Einsatz des Vans im Arbeitsalltag**

#### **Beschreibung:**

Im täglichen Einsatz sollen möglichst verschiedenartige Anforderungen an den Betrieb gestellt werden, um die induktive Ladetechnologie auf „Herz und Nieren“ testen.

#### **Entwicklungsziel:**

Es sind zwei Einsatzgebiete geplant. Einsatzgebiet des ersten Vans ist bei der Stadt Mannheim als Material- und Mannschaftstransporter der Berufsfeuerwehr oder als Transportfahrzeug bei FnF gGmbH. Der zweite Vito soll bei der rnv als Postauto und später in der als Verkehrsmeisterfahrzeug zum Einsatz kommen.

#### **Ergebnis:**

Da schon vor Projektbeginn die Anzahl der Fahrzeug auf eines reduziert worden ist, ist nur ein Betrieb bei der rnv vorgesehen.

Durch die umfangreiche und komplexe Neuentwicklung kam es im Laufe des Projektes immer wieder zu Verzögerungen. Die Entwicklung konnte mit der erfolgreichen Abnahme durch den TÜV abgeschlossen werden und der Probetrieb als Postauto beginnen. Anfangs kam es zu gehäuft auftretenden Fehlern, denen jedoch durch Softwareanpassungen begegnet werden konnte. Die Leistung des Systems wurde schrittweise von 15 kW auf 21 kW angehoben und erreichte am Ende eine hohe Zuverlässigkeit. Die Anforderungen für einen Einsatz als Verkehrsmeisterfahrzeug, welches hohe Verfügbar- und Zuverlässigkeit erfordert, waren am Ende gegeben.

## 1.9 Arbeitspaket 8 – Infrastruktur-Ausbau

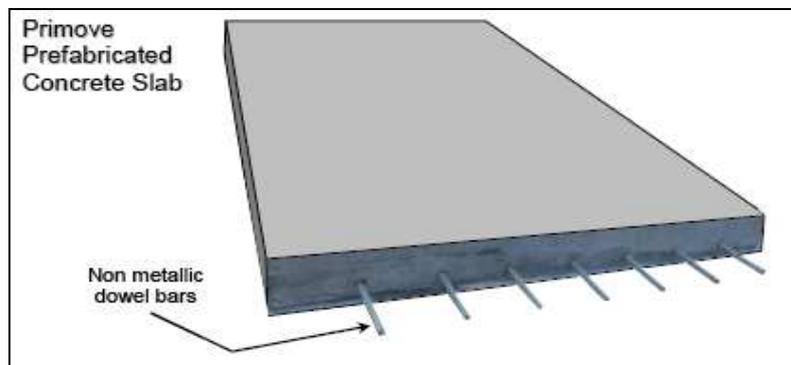
### Beschreibung:

Zum Einsatz der innovativen Ladetechnik ist eine entsprechende Ladeinfrastruktur erforderlich. Diese setzt sich aus den fahrzeugseitigen Komponenten sowie den Wegseiten-Komponenten zusammen. Erst wenn diese beiden Komponenten übereinander stehen, beginnt der Ladeprozess. Entsprechend sind die Standzeiten der Fahrzeuge von großer Bedeutung. Da beim Konzept der Gelegenheitsladung die Fahrzeuge auf der Strecke im täglichen Umlauf nachgeladen werden, sind ausgewählte Haltestellen mit der Technik auszurüsten.

### Entwicklungsziel:

Um den erforderlichen Energiebedarf zu decken, sind diejenigen Haltestellen auszurüsten, an denen die Busse einen längeren Aufenthalt haben und dadurch ausreichend Ladezeit zur Verfügung steht. Ziel ist die möglichst unauffällige Integration der PRIMOVE Komponenten in die bestehende Haltestelleninfrastruktur. Dazu sind geeignete Haltestellen auszuwählen und die folgenden drei Komponenten zu integrieren:

#### 1.9.1 Ladepad



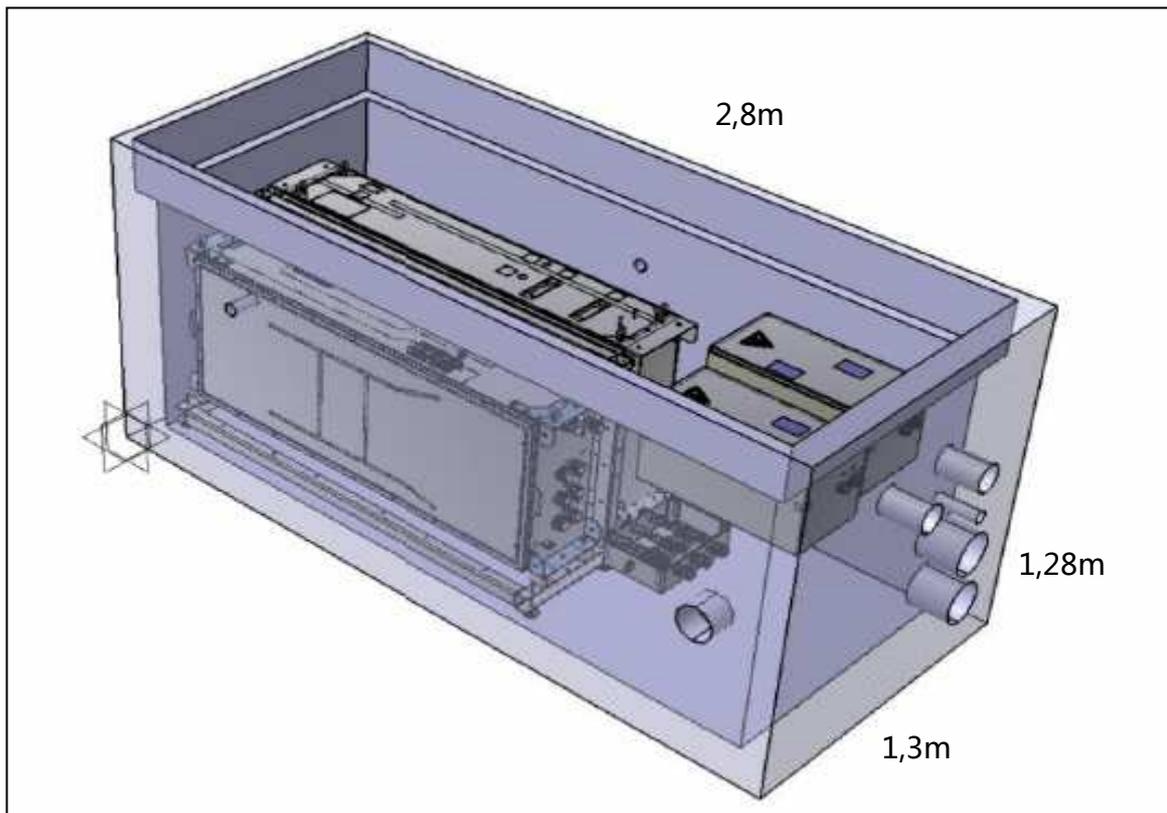
**Abbildung 29: Ladepad**

Das Ladepad stellt die Primärwicklung der Ladestationen dar und dient der Leistungsübertragung zum Fahrzeug. Es wird im Bereich der Bushaltestelle als Betonfertigteile in den Fahrbahnbereich eingelassen. Die Installation ist bündig mit der Straßenoberfläche auszuführen, sodass keine überstehenden Teile den Verkehr gefährden können und eine unauffällige Optik erzielt wird. Die Bauteile sind begehbar und auch für Schwerlastverkehr befahrbar ausulegen. Die Systemkomponenten und Kabel sind elektrisch isoliert. Zur Einhaltung der EMV-Richtlinien werden die Kabelträgerelemente in einer Sandwichbauweise mit Zwischenlagen aus verschiedenen abschirmenden Materialien hergestellt.

Um im Betrieb eine effiziente Ladung zu ermöglichen, müssen die Fahrzeuge exakt auf der Ladeinheit positioniert werden. So ist schon bei Erstellung der Planunterlagen eine optische Unterstützung für das Fahrpersonal zu berücksichtigen. Beispielsweise lässt sich dies durch Ausrichtung am Blindenleitsystem oder durch eine geeignete Beschilderung realisieren. Da es sich

um ein Betonfertigteile mit erheblichem Gewicht handelt, ist für die Anlieferung und den Einbau schweres Gerät erforderlich. Um den Dauerbetrieb insbesondere auch mit überfahrendem Schwerlastverkehr zu ermöglichen, ist es sinnvoll beim Einbau Dehnungsfugen vorzusehen. Da die Ladeinheit in die Fahrbahn eingelassen wird, muss man während der Bauzeit mit Beeinträchtigung des Individualverkehrs rechnen. Die Ausrüstung einer Haltestelle zur Induktionsladestation dauert rund drei Wochen. Entsprechende Verkehrslenkungsmaßnahmen während der Bauzeit sind zu berücksichtigen.

### 1.9.2 Versorgungseinheit



**Abbildung 30: Versorgungseinheit**

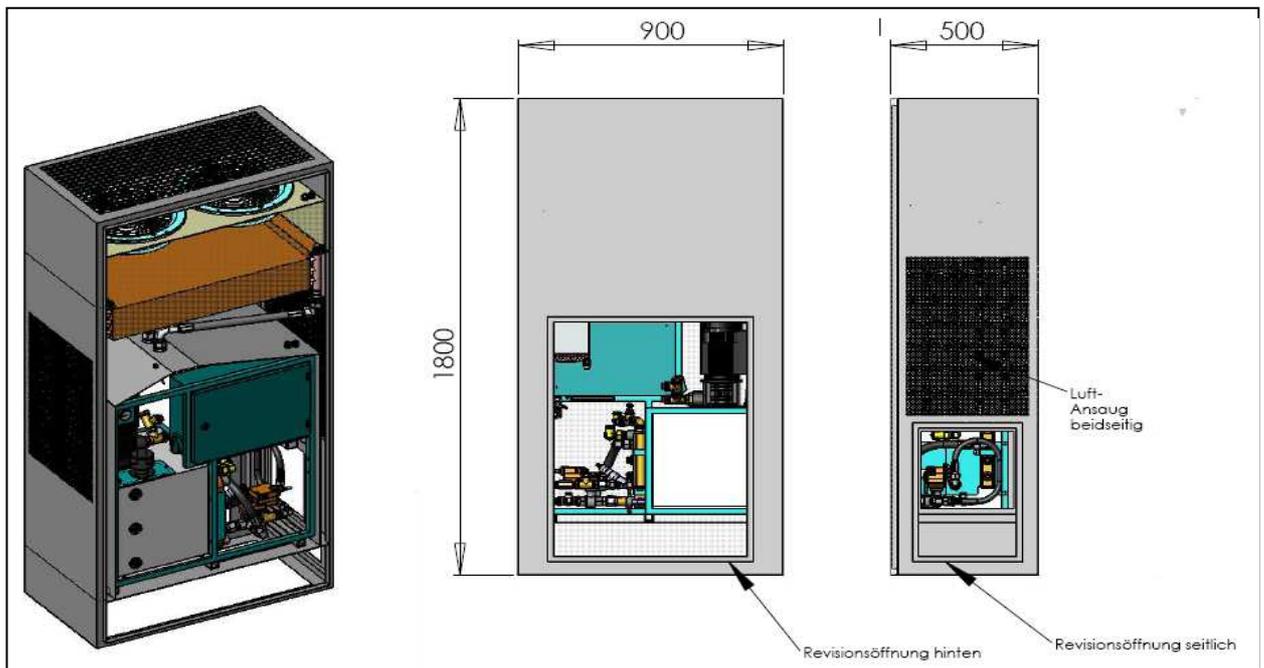
Zur Energieversorgung des Ladesegments an den Haltestellen werden Wechselrichter in Schachtbauwerke mit wasserdichten Gehäusen an geeigneter Stelle beispielsweise im Gehwegbereich eingebaut. Ein Wechselrichter dient zur Energieversorgung von mindestens einem Ladesegment.

Aufgrund ihrer Dimensionen stellt die Versorgungseinheit gewisse Herausforderungen an den Tiefbau. Bei einer Einbautiefe von mindestens 1,3 m besteht Kollisionsgefahr mit vorhandenen Leitungen oder Wurzelwerk. Zusätzlich sind entsprechende Kabelkanäle zur Verbindung der Komponenten untereinander vorzusehen. Je nach Lage und Abstand der vorhandenen Leitungen ist eine Abschirmung erforderlich, um die elektromagnetische Verträglichkeit zu gewährleisten. Zur Netzanbindung der Versorgungseinheit dient ein Übergabeschränk, welcher zugleich die Schnittstelle zwischen Energieversorger und Betreiber bildet. Je nach vorhandener Netzinfrastruktur kann das System an 400 V AC oder an 600/ 750 V DC angeschlossen werden.

Weiterhin müssen folgende Anforderungen berücksichtigt werden, um einen sicheren Dauerbetrieb zu gewährleisten:

- Zugangsmöglichkeit für Instandhaltung
- Vandalismussicherheit
- Überfahrbarkeit durch Schwerlastverkehr

### 1.9.3 Kühleinheit



**Abbildung 31: Kühleinheit**

Bei der induktiven Energieübertragung fallen Verluste an, die den Einsatz einer Kühleinheit erfordern. Das System ist auf Extrembedingungen auszulegen, so dass die Kühleinheit auch bei hohen Außentemperaturen einen sicheren Betrieb ermöglicht. Eine Kühleinheit ist in Abbildung 29 schematisch dargestellt. Die Kühleinheit stellt eine oberirdische Komponente des Systems dar. Hier spielen insbesondere stadtgestalterische Aspekte eine Rolle, denn die Dimensionen der Kühleinheit überschreitet die Größe üblicher Schaltschränke deutlich. Zudem ist im Betrieb mit Geräuschentwicklung zu rechnen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Abluftführung weder Fußgänger noch wartende Fahrgäste noch Anlieger beeinträchtigt. Die Kühleinheit lässt sich als zusätzlicher Informations- oder Werbeträger nutzen.

#### **Ergebnis:**

In Mannheim wurden entlang der Linie 63 die in Abbildung 32 markierten Haltestellen mit der Ladeinfrastruktur ausgerüstet. Dabei befinden sich sechs Ladestationen unmittelbar auf der Strecke und eine im Betriebshof der rnv (Möhlstraße).



**Abbildung 32: Streckenverlauf der Linie 63**

Die Auswahl dieser sechs Haltestellen erwies sich als größere Herausforderung. Eine Vielzahl an Kriterien spielte dabei eine Rolle. Im Wesentlichen wurde die Auswahl auf Basis folgender Kriterien getroffen:

- Haltezeiten der Fahrzeuge
  - GPS Messungen
  - RBL Daten
- Rahmenbedingungen Tiefbau
  - Platzbedarf für Komponenten
  - Verlauf bestehender Leitungen
- Möglichkeiten zur Netzanbindung
  - DC-Anbindung
  - AC-Anbindung
- Abstimmung städtische Ämter
  - Grünflächenamt
  - Stadtgestaltung

## PRIMOVE

Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb

---

Die eigentliche Haltestellenausrüstung stellte eine klassische Tiefbaumaßnahme dar, welche nach den HOAI Leistungsphasen unterteilt wird. Mit der Planung und Vergabe wurden Ingenieurbüros und mit der Ausführung Baufirmen beauftragt. Insbesondere in der Planungsphase kam es häufig zu Veränderungen an der Systemkonfiguration. Diese resultierten beispielsweise aus zwischenzeitlich im Labor gewonnenen Erkenntnissen, technischer Realisierbarkeit in der Praxis oder zusätzlichen Auflagen im Zulassungsprozess. Auch bestanden beim Infrastrukturausbau starke Abhängigkeiten zwischen dem Ladesystem in sich, dem übergelagerten Netz sowie dem Energieübergabepunkt. Je nach Ort und Anschlussart (750 VDC oder 400 VAC) mussten Anforderungen für neue Bauteile definiert und Systemanpassungen durchgeführt werden. Entsprechend musste die Planung häufig geändert werden, was eine lange und kostenintensive Planungsphase nach sich zog. Die Bauphase erstreckte sich pro Haltestelle etwa auf 3 Wochen. Abbildung 33 zeigt die ausgerüstete Haltestelle Pfalzplatz. Die Komponenten sind unauffällig in die bestehende Infrastruktur eingebracht.



**Abbildung 33: Haltestelle Pfalzplatz mit dem installierten PRIMOVE-System**

### **1.10      Arbeitspaket 9 – Vorbereitung rnv-Betrieb und –Werkstatt**

#### **Beschreibung:**

Als Nahverkehrsunternehmen betreibt die rnv Busse und Bahnen in der Metropolregion Rhein Neckar. Während die Bahnen schon seit über 100 Jahren für elektrische Mobilität sorgen, ist dies im Busbereich noch Neuland. Alle der eingesetzten 180 Busse werden von konventionellen Dieselmotoren angetrieben. Daher verfügt die rnv bisher noch über keinerlei Erfahrungen mit Elektrobussen. Um eine E-Buslinie erfolgreich einzuführen, muss das Know-how beim Fahr-Werkstatt- und Wartungspersonal aufgebaut werden.

#### **Entwicklungsziel:**

Die Einführung von Elektrobussen bedeutet nun völlig neue Abläufe, die zunächst definiert werden müssen. Von einem E-Bus mit geladener Batterie gehen neue, für die Mitarbeiter bisher unbekannte

---

Gefahren aus. Für das Fahrpersonal stellen die E-Busse eine Neuheit dar. Entsprechende Programme sind aufzusetzen und die Mitarbeiter umfassend zu schulen. Insbesondere das Nachladen sollte dabei von allen selbst ausprobiert werden.

Auf Seiten der Werkstätten sind Schnittstellen zwischen mechanischen und elektrischen Bauteilen ebenso wie das Handling der Batterien zu definieren. Damit diese Abläufe reibungslos funktionieren, sind umfangreichere Untersuchungen der Abläufe und daran anschließende Schulungen für das Werkstattpersonal erforderlich.

Bisher war im Busbereich lediglich eine einfache Haltestelleninfrastruktur üblich. Mit Einführung des E-Bus-Systems wird die Haltestelleninfrastruktur maßgeblich erweitert. Es wird eine hochkomplexe Technik unterirdisch an Bushaltestellen integriert. Entsprechend sind hier Sicherheitsvorkehrungen zu treffen und Schulungen durchzuführen.

### **Ergebnis**

Die rnv beschäftigt ca. 1.100 Personen im Fahrbetrieb, davon wird knapp die Hälfte im Busbereich eingesetzt. Im Zuge des Projekts wurden nicht alle Busfahrer im E-Bus ausgebildet sondern ein Fahrerpool von anfangs 36, später dann 46 Fahrer ausgebildet. Dabei wurde das Prinzip „train the trainer“ angewendet. Der Bushersteller schulte gemeinsam mit Bombardier die Fahrlehrer der rnv. Diese wiederum gaben ihrerseits das E-Bus-Wissen an die ausgewählten Fahrer weiter. Mit diesem Stamm an ausgebildetem Personal lässt sich die Linie 63 gut elektrisch betreiben. Da an dem Ladesystem im Projektverlauf noch verschiedene Optimierungsmaßnahmen durchgeführt wurden, entstand häufiger auch der Bedarf an Nachschulungen. Diese wurden wiederum von der rnv-Fahrschule durchgeführt.

Das Werkstattpersonal erhielt ebenfalls zu Beginn des Testbetriebs Schulungen. Thema war insbesondere die speziellen Gefahren von Elektrobussen, aber auch Fragen, wie beispielsweise was als „normaler“ Werkstattmitarbeiter erlaubt ist und wofür eine Elektrofachkraft HV benötigt wird. Für den Fehlerfall waren weitergehend die Abläufe und Prozesse zu definieren und mit allen Beteiligten zu schulen. Die Meldewege waren auch unter den Projektpartnern abzustimmen, sodass möglichst kurze Stillstandzeiten im Störfall des Fahrzeuges oder der Ladeinfrastruktur entstehen.

Da die an den Haltestellen eingebaute PRIMOVE Technik hochkomplex ist, beschränkte sich das Wartungspersonal der rnv auf die Weitergabe von Störungsmeldungen an die eigens dafür von Bombardier eingerichtete Hotline.

## **1.11 Arbeitspaket 10 – Testbetrieb**

### **Beschreibung:**

Nach Abschluss der Inbetriebnahme sowie der Tests im Labor und auf der Teststrecke sollte ein Probetrieb auf der Linie stattfinden und in mehreren Stufen erfolgen. Dabei sollte der Zustand der Fahrzeuge regelmäßig geprüft werden.

In der ersten Stufe sollten Bombardier Mitarbeiter die Busfahrten übernehmen und ausserhalb der Betriebszeiten nachts ohne Passagiere fahren. Jede Ladestation sollte mindestens 20 erfolgreiche Ladevorgänge absolviert haben.

Mit der zweiten Stufe sollten von Bombardier geschulte rnv-Fahrer die Testfahrten übernehmen – ohne Linienbetrieb. Ziel war der Betrieb mit mindestens 27 Stunden Einsatzzeit.

In Stufe 3 sollte der Bus mit geschulten rnv-Fahrern und Passagieren in den planmäßigen Zeiten der Linie 63 fahren. Der Testbetrieb sollte solange aufrecht erhalten werden, bis rnv und Bombardier eine ausreichende Zuverlässigkeit nachgewiesen haben.

In der letzten Stufe 4 sollte die neu entwickelte Metallerkennung zum Einsatz kommen. In einem mindestens zweiwöchigen Testzeitraum sollte unter normalen Linienbetriebsbedingungen erfolgreich automatisches Laden gezeigt werden.

#### **Entwicklungsziel:**

Der Testbetrieb diente dazu:

- die Sicherheit und die Zuverlässigkeit der kontaktlosen Energieübertragung nachzuweisen
- Vertrauen beim Betreiber in die Technologie zu schaffen
- Einen Sicherheitsnachweis für den TÜV zu erstellen
- Erprobung des Diagonenseystems
- Den Betreiber zu schulen

#### **Ergebnis:**

Der Testbetrieb fand über den Zeitraum von März 2015 bis Juni 2016 statt. Während des Testbetriebs wurden mit dem Openmatic-System Daten erfasst, um Ladezeiten und Fehler zu nachzuweisen.

Der Test wurde in Abstimmung mit dem TÜV in verschiedene Stufen eingeteilt. Die ersten beiden Stufen fanden ohne Passagiere statt und dienten dem Nachweis der Zuverlässigkeit des Systems (vgl. auch Systeminbetriebnahme 1.6.4).

In der Stufe 1 konnten insgesamt 545 erfolgreiche Ladevorgänge nachgewiesen werden. Auch in der Stufe 2 sind zum 18.6.2015 mit 33 Stunden Betrieb die Anforderungen erfüllt worden. In der Stufe 3 fuhr der Bus bis Juni 2016 mit immer größerer Zuverlässigkeit im Linienbetrieb. Die letzte Stufe 4 konnte im Juni 2016 mit Fertigstellung der Metallerkennung begonnen werden. Die Metallerkennung zeigte zum Projektabschluss, dass sie Metall auf dem Ladepad erkennen kann und dadurch ein automatisches Laden prinzipiell möglich ist. Noch fehlende Feinabstimmung vom automatischen Ladesystem und Metallerkennung verhinderten den Abschluss der Stufe 4 zum Förderprojektende.

## 1.12 Arbeitspaket 11 – Dauerbetrieb im Fahrgasteinsatz auf der Linie 63

### **Beschreibung:**

Damit das gesteckte Ziel: „Überprüfung der Alltagstauglichkeit der innovativen Ladetechnik“ erreicht werden kann, sind zum einen Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur zu schaffen und zu genehmigen, zum anderen aber auch diese Technik im Dauerbetrieb mit Fahrgästen einzusetzen. Diese Einsatzzeit sollte unbedingt zu allen Witterungsbedingungen erfolgen. Hintergrund dafür ist, dass E-Busse einen wesentlichen Anteil an Energie für die Nebenaggregate verbrauchen. Dabei fallen die Klimatisierung im Sommer und vor allem die Heizleistung im Winter am schwersten ins Gewicht. Der Energiebedarf für den Antrieb im kalten Winter beträgt lediglich ein Drittel des gesamten Energiebedarfs. Die restlichen zwei Drittel werden von den Nebenaggregaten gefordert. Erst wenn sich die Fahrzeuge in diesem „worst-case“ weiterhin betreiben lassen, kann man von Alltagstauglichkeit sprechen.

### **Entwicklungsziel:**

Im Zuge des Arbeitspakets 11 sollten die Fahrzeuge in der Dauerbetriebsphase ein volles Jahr im Fahrgastbetrieb eingesetzt werden. Daraus sollen entsprechende Schlüsse gezogen werden, die eine Aussage über die Praxistauglichkeit der PRIMOVE Technologie erlauben. Da die Linie 63 mit ihrem Fahrweg, Fahrplan, Wendezeiten und Linienführung einen echten Härte-test darstellt, kann folgende These aufgestellt werden: Wenn die Ladetechnik auf der Linie 63 erfolgreich eingesetzt werden kann, dann kann sie auch auf allen anderen Linien eingesetzt werden.

### **Ergebnis:**

Das Festhalten an dem Ziel eines vollen Jahres im Dauerbetrieb bedeutete, dass das Projekt mehrfach verlängert wurde. Da die Auslieferung der Fahrzeuge sich verzögerte, konnte ein volles Jahr im Dauerbetrieb nur durch kostenneutrale Projektverlängerungen erreicht werden. Die Gründe für den Verzug waren vielfältig. Es gab beispielsweise hohe Unsicherheiten, ob die innovative Ladetechnik fristgerecht entwickelt, gefertigt, erprobt und zugelassen werden kann. Bei der Fahrzeugzulassung wurden durch die genehmigende Behörde Nachforderungen gestellt und die Software für die Antriebssteuerung wurde neu programmiert.

Seit dem 22.06.15 befinden sich die Elektrobusse im Fahrgastbetrieb. Die Inbetriebnahme der E-Bus-Linie erfolgte mit zwei elektrischen Fahrzeugen. Jedoch konnte aufgrund von Verspätungen der Betrieb mit zwei Elektrobussen nicht dauerhaft aufrechterhalten werden. Die Gründe hierfür waren unter anderem:

- Noch nicht alle Ladestationen in Betrieb
- Gewöhnungsphase für Fahrpersonal noch nicht abgeschlossen
- Ladeleistung noch gedrosselt

Zur Abhilfe wurde ein Dieselbus als zusätzlicher Verstärker auf die Linie gebracht. Somit ergab sich für die E-Busse mehrfach am Tag die Gelegenheit, den Batteriespeicher voll zu laden. Seither ist ein stabiler Betrieb möglich und die Einsatzzeit des dritten Fahrzeugs wurde schrittweise reduziert. Ziel war jedoch weiterhin der Betrieb mit ausschließlich zwei Elektrobussen und somit die Elektrifizierung

---

der gesamten Linie. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden folgende Optimierungsmaßnahmen definiert:

- Betrieb mit voller Ladeleistung
- Erweiterung des Toleranzbereichs in Querrichtung
- Absenkung der Temperatur im Fahrgastinnenraum von 21 °C auf 18 °C
- Verschiebung Abfahrtszeiten der Linie 63 um drei Minuten, um Trassenkonflikte mit den Stadtbahnlinien zu minimieren
- Betrieb mit automatischem Laden
- Erhöhung der nutzbaren Batteriekapazität

Aufgrund dieser Maßnahmen konnte auf den zusätzlichen Verdichter verzichtet werden. Seit dem Fahrplanwechsel (12.06.16) wird die Linie 63 nun vollständig elektrisch betrieben.

## **1.13      Arbeitspaket 12 – Evaluation**

### **1.13.1 Praxistauglichkeit**

Um das Elektrobussystem auf Praxistauglichkeit zu überprüfen, wurden folgende Schritte durchgeführt:

1. Einsatz im realen Praxisalltag
2. Einsatz zu allen Witterungsbedingungen
3. Auswertung der Einsätze hinsichtlich Gesamtsystemverfügbarkeit

Zu 1.)

Seit dem 22.06.15 wurden die beiden Busse auf der Linie 63 in der Mannheimer Innenstadt eingesetzt. Zu Beginn sind die (erwarteten) Kinderkrankheiten aufgetreten. Die Fahrzeuge stellten noch keinen vollwertigen Ersatz zu einem Dieselbus dar. Wegen erforderlicher Standzeiten zum Nachladen entstanden im Praxisbetrieb Verspätungen. Um diesen Verspätungen entgegenzuwirken, mussten einzelne Umläufe durch zusätzliche Dieselbusse übernommen werden. Im Laufe der Zeit konnten jedoch die Mehrzahl an Schwierigkeiten behoben werden. Die definierten Maßnahmen (siehe Kapitel 1.12) zeigten Wirkung und die verspätungsanfällige Situation auf der Linie 63 konnte etwas entspannt werden.

Zu 2.)

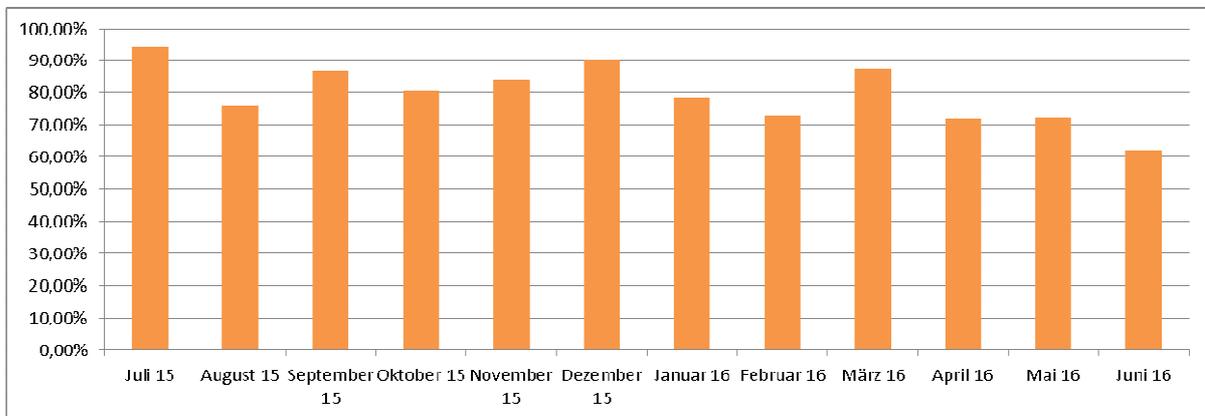
Da es sich bei den Elektrobussen um vollelektrische Fahrzeuge handelt, sind neben den Batterien keine weiteren Energiespeicher an Bord. Entsprechend beziehen sowohl der Antrieb als auch alle Nebenaggregate ihre Energie ausschließlich aus der Batterie. Hinsichtlich des Energiebedarfs stellt insbesondere die Heizleistung im Winter eine große Herausforderung dar. Dieser „worst-case“ ist bei der Überprüfung auf Alltagstauglichkeit von größter Bedeutung. Der Winter innerhalb der Projektlaufzeit war jedoch nicht sehr kalt. Die Temperaturen lagen selten unter dem Gefrierpunkt.

---

Dennoch war bereits in diesem milden Winter ein wesentlich höherer Energiebedarf festzustellen (siehe Kapitel 1.13.2).

Zu 3.)

Das Elektrobussystem setzt sich aus den Fahrzeugen und deren Ladeinfrastruktur zusammen. Um die Verfügbarkeit des Systems auszuwerten, sind beide Einzelsysteme zu einer Gesamtverfügbarkeit zusammenzufassen. Während des Dauerbetriebs stellte sich heraus, dass sowohl die Fahrzeuge allein betrachtet als auch die Ladestationen auf der Strecke allein betrachtet sehr selten störungsbedingt ausfielen. Die häufigsten Ausfälle entstanden an der Ladeinfrastruktur am Fahrzeug. Meist zeigte das Fahrzeug eine Störung der Ladung an. Alle Ausfälle und Störungen wurden überwacht und in einer zentralen Liste eingefügt. Hierbei wurden die Ist-Betriebsstunden den Plan-Betriebsstunden gegenübergestellt. Abbildung 32 zeigt die Gesamtsystemverfügbarkeit über das volle Jahr im Dauerbetrieb.

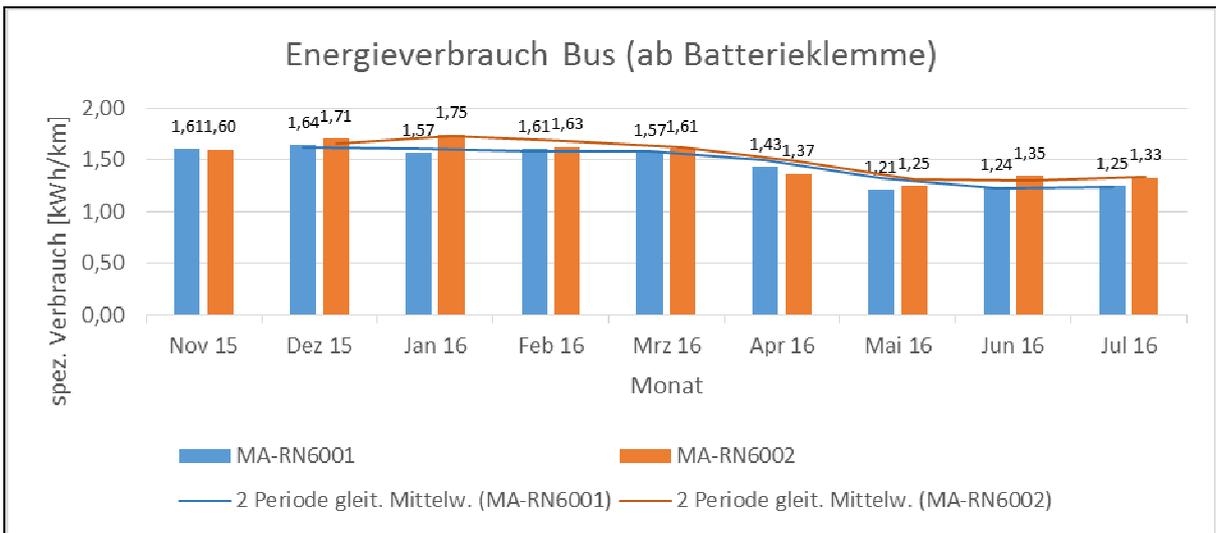


**Abbildung 34: Gesamtsystemverfügbarkeit im Dauerbetrieb auf der Linie 63**

Mit einer durchschnittlichen Verfügbarkeit von 81,3 % liegt PRIMOVE Mannheim deutlich über anderen E-Bussystemen. Die Projektpartner sind mit den Einsatzzeiten und Betriebsparametern zufrieden. Insgesamt konnten mit den beiden Fahrzeugen innerhalb dieses Jahres 80.000 km elektrisch gefahren werden. Nichtsdestotrotz liegt die Verfügbarkeit des Systems noch deutlich unter den Werten von Dieselnbussen.

### 1.13.2 Energieverbrauch

Zu Beginn des Projektes wurde im Rahmen der Systemdefinition der Energieverbrauch der Strecke 63 simuliert. In Abbildung 19 sind die Ergebnisse dieser Simulation dargestellt: der Energieverbrauch der Strecke wurde mit 1,48 kWh/km im Durchschnitt (normaler Verbrauch) bzw. 2,15 kWh/km (maximaler Verbrauch) kalkuliert. Nach einem Jahr Betrieb konnte folgender Energieverbrauch über die Monate (Mittelwert pro Monat) festgestellt werden:



**Abbildung 35: Energieverbrauch der Busse**

Der Energieverbrauch ist bei niedrigen Temperaturen höher, da die Busheizung einen maßgeblichen Verbrauchseinfluss hat. Der spezifische Busverbrauch schwankt zwischen 1,2 und 2,1 kWh/km. An kalten Tagen kann der Energieverbrauch bis 2,1 kWh/km betragen. Über den kältesten Monat gemittelt, ergab sich ein Monatsverbrauch von 1,75 kWh/km. Der durchschnittliche Energieverbrauch für beide Busse über das Jahr lag bei 1,48 kWh/km.

Im Normalbetrieb werden bis zu 200 km pro Bus pro Tag zurückgelegt.

### 1.13.3 Ökologischer Effekt

Die Fahrzeuge verfügen über keine Heizung/Klimatisierung, die auf fossilen Brennstoffen basiert. Entsprechend handelt es sich um vollwertige „Zero-Emission“ Fahrzeuge, bei denen keinerlei Emissionen entstehen. Über die Laufleistung der Fahrzeuge lässt sich das realisierte Einsparpotential berechnen. Hierbei wird als Vergleichsgröße ein Dieselbus mit EURO 5 Norm herangezogen.

Parameter	Bus 1	Bus 2
Zurückgelegte Kilometer:	41.372 km	38.654 km
Verfügbarkeit:	83,62%	76,95%
Energieverbrauch:	1,48 kWh/km	
Bisher eingespartes CO <sub>2</sub>	39.799 kg Co2	37.185 kg Co2

**Abbildung 36: Realisierte CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch E- Busse im Jahr des Dauerbetriebs**

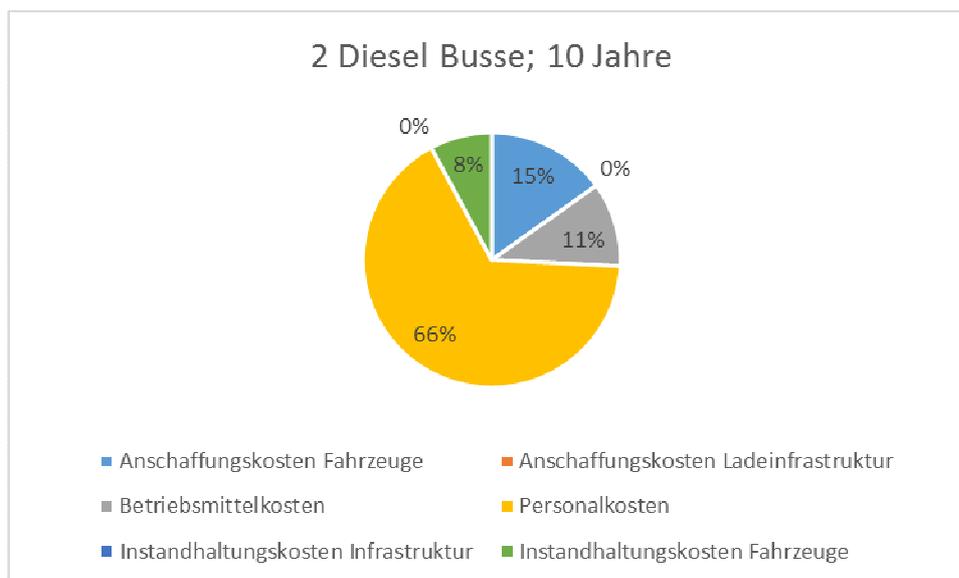
Der Betrieb der beiden Fahrzeuge trägt zum Erreichen des Klimaziels der rnv bei. Je höher die Verfügbarkeit, desto größer die Einsparungen. Bisher konnten im Zeitraum vom 01.07.15 bis 30.06.16 bereits ca. 77 Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden.

#### 1.13.4 TCO

Die Kosten für die Elektrifizierung einer Buslinie können wie folgt gruppiert werden:

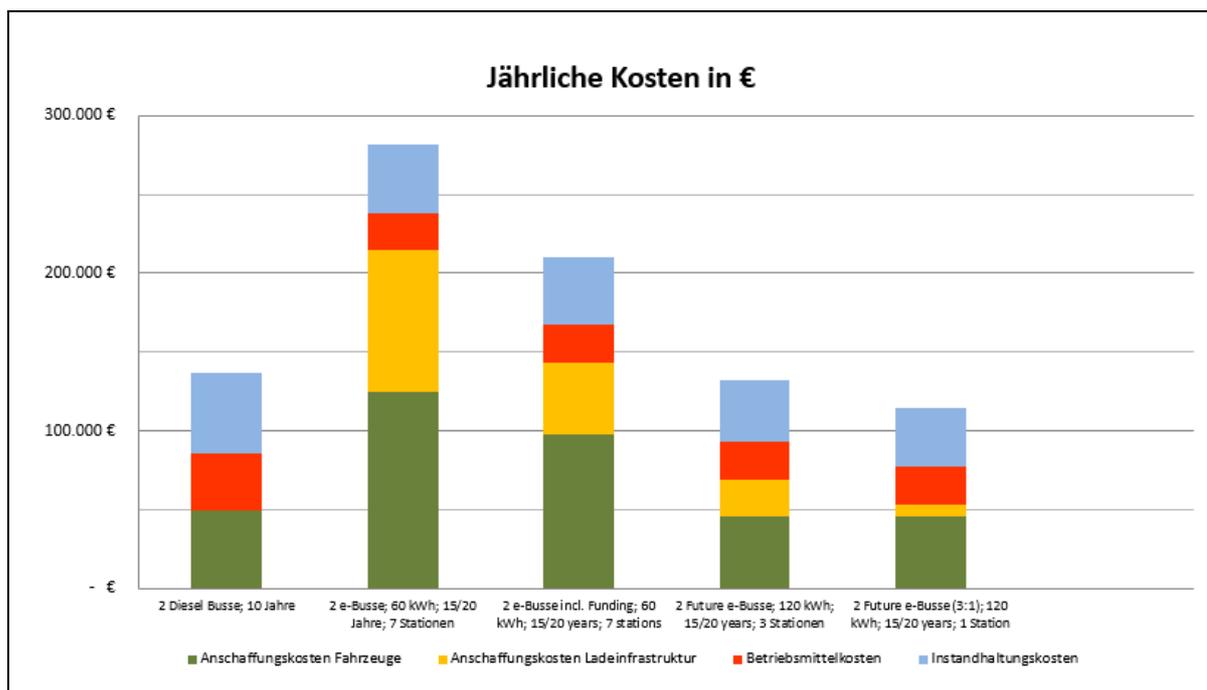
- Anschaffungskosten
  - Fahrzeuge
  - Infrastruktur
- Instandhaltungskosten
  - Fahrzeuge
  - Infrastruktur
- Betriebsmittelkosten
- Personalkosten

Den höchsten Kostenanteil machen hierbei die Personalkosten über den gesamten Lebenszyklus des Busses aus. Exemplarisch ist dies in Abbildung 37 für den Betrieb von 2 Dieselnissen über einen Zeitraum von 10 Jahren dargestellt. Die Personalkosten machen ungefähr 2/3 der Gesamtkosten aus.



**Abbildung 37: Kostenverteilung über 10 Jahre für zwei Dieselnisse**

Im Betrieb der rnv konnte festgestellt werden, dass die E-Busse im täglichen Betrieb keinen höheren Personaleinsatz erfordern. Im Gegenteil, das tägliche Tanken entfällt, wodurch Personalkosten in diesem Bereich eingespart werden können. Wenn man diese Kosten aus der Betrachtung rausnimmt und die restlichen Kosten betrachtet, sind die jährlichen TCO-Kosten ohne Förderung ca. doppelt so hoch wie bei einem herkömmlichen Bus. Mit der Förderung konnten die Mehrkosten um ca. 50% gesenkt werden (siehe Abbildung 38).



**Abbildung 38: Jährliche TCO-Kosten im Vergleich**

Im Ergebnis der Kostenuntersuchung können wir feststellen, dass die E-Busse das Preisniveau der Dieselmotoren erst mit weiter sinkenden Preisen für die Fahrzeuge als auch für die Ladeinfrastruktur erreichen werden. Des Weiteren sollte ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Ladeinfrastruktur und Bussen angestrebt werden. Dies wird erst durch die Elektrifizierung mehrerer Buslinien, die die gleiche Ladeinfrastruktur nutzen, zu erreichen sein.

### 1.13.5 Akzeptanz

Mit der Inbetriebnahme einer neuen Technik, wie der induktiven Ladetechnik, macht es Sinn auch die damit verbundenen Auswirkungen zu betrachten. Im Wesentlichen sind die drei Gruppen Fahrpersonal, Fahrgäste und Anwohner dabei betroffen. Während die Betroffenheit der Anwohner sich auf die Bauzeit der Haltestellen beschränkt, sind Fahrpersonal und Fahrgäste dauerhaft betroffen. Um mögliche Störgefühle im Zusammenhang mit der Ladetechnik entgegenzuwirken, wurden innerhalb der Projekts entsprechende Maßnahmen mit dem Ziel der Information und Aufklärung definiert (siehe Kapitel 1.3).

Durch Befragungen vor und nach der Inbetriebnahme der Linie konnte die Akzeptanz gegenüber der Technik bei Fahrgästen und Anwohnern festgestellt werden. Darüber hinaus wurde Rückmeldung aus dem Kreis des Fahrpersonals aufgenommen. Beim Fahrpersonal sind die Fahrzeuge insbesondere wegen dem Geräuschpegel sehr beliebt. Auch wird das Beschleunigen und das Fahrverhalten als sehr positiv beschrieben. Zu Beginn wurde der Ladevorgang als aufwändig eingestuft. Im Projektverlauf jedoch konnte das automatische Laden realisiert werden, sodass hier kein Mehraufwand für das Fahrpersonal mehr entsteht.

Zu Beginn war das Einhalten des Fahrplans aufgrund der erforderlichen Ladezeit sehr schwierig. Schritt für Schritt konnten hier Verbesserungen herbeigeführt werden. Die Beschwerden bzgl.

Pünktlichkeit hielten sich in Grenzen, sodass insgesamt von einem positiven Feedback bei Fahrgästen, Fahrpersonal und Anwohnern gesprochen werden kann.

#### **1.13.6 Ausblick: Elektrifizierung Mannheimer Buslinien**

Die im Rahmen des Forschungsprojektes PRIMOVE Mannheim gewonnenen Erkenntnisse bei der Elektrifizierung einer Dieselbuslinie bieten die zentrale Grundlage für die schrittweise Ausweitung des E-Bus-Betriebs auf das komplette Mannheimer Busnetz.

Die bereits elektrifizierte 4,7 Kilometer lange Linie 63 stellt hierfür als Innenstadtlinie mit Verknüpfung und Überschneidung zur Buslinie 60 (10,4 km Linienlänge) eine ausgezeichnete Startgrundlage dar. Während die Linie 63 den Mannheimer Süden erschließt, erstreckt sich die Linie 60 über den Mannheimer Westen bis in den nördlichen Rand der Innenstadt. Die Linie 60 ihrerseits besitzt wiederum eine Überschneidung mit der Linie 53, welche mit 17,5 km Linienlänge die zweitlängste Buslinie im Mannheimer ÖPNV-Netz darstellt. Die Linie 53 erschließt den Norden und den Osten der Stadt. Insbesondere nutzt die Buslinie 53 den im Nordosten gelegenen Umsteigepunkt Bahnhof Käfertal, welcher von drei weiteren Buslinien angefahren wird. Nordöstlich des Bahnhofs Käfertal entsteht aktuell auf ehemaligen Kasernengeländen der amerikanischen Streitkräfte der neue Stadtteil Benjamin Franklin Village, welcher durch eine weitere E-Bus-Linie erschlossen werden soll, welche, je nach genauer Linienführung, zukünftig auch an den Bahnhof Käfertal angebunden werden soll.

Es wird deutlich, dass ausgehend von der bereits etablierten, südlich gelegenen E-Buslinie 63 und der nordöstlich liegenden zukünftigen E-Buslinie durch das neue Stadtquartier Benjamin Franklin, die Elektrifizierung des Mannheimer Busnetzes durch die Verknüpfung mit zwei weiteren Buslinien (Linie 60 und 53) in alle Himmelsrichtungen ausgeweitet werden kann. Im Ergebnis ergibt sich ein um das Mannheimer Stadtzentrum führender Ring von vier E-Buslinien, an welche in nachfolgenden Schritten die verbleibenden 29 der 33 Mannheimer Buslinien sukzessive eingeflochten werden können. Bei einer derartigen Ausweitung des Mannheimer E-Busnetzes würde Wert auf die gemeinsame Nutzung von Ladeinfrastruktur gelegt werden. Auch bietet sich an vielen Stellen, so z. B. auch am bereits genannten Bahnhof Käfertal, die Möglichkeit die Energieversorgung der Ladepunkte über vorhandene Überschneidungen mit dem Straßenbahn-Stromnetz darzustellen.

Durch die im Rahmen der Umsetzung der Elektrifizierung der Linie 63 gewonnenen Erfahrungen bzgl. Genehmigungen, Bürgerbeteiligung, Energieversorgungsnetze, Bauplanung und –umsetzung, Beschaffung sowie technische Konfiguration, v. a. seitens der Verkehrsbetriebe und der Stadt, lassen sich zukünftige Elektrifizierungsvorhaben zügiger und unbürokratischer umsetzen.

## 2. Nachweis der wichtigsten Positionen des zahlenmässigen Nachweises

### 2.1 Kosten

Für das Projekt wurden Zuwendungen in Höhe von 3,3 Mio € genehmigt. Die Gesamtkosten gliedern sich wie folgt auf die einzelnen Partner auf:

- rnv – 4.600.000 €
- Bombardier – 1.554.000 €
- KIT - 361.000 €
- Stadt Mannheim – 100.000 €

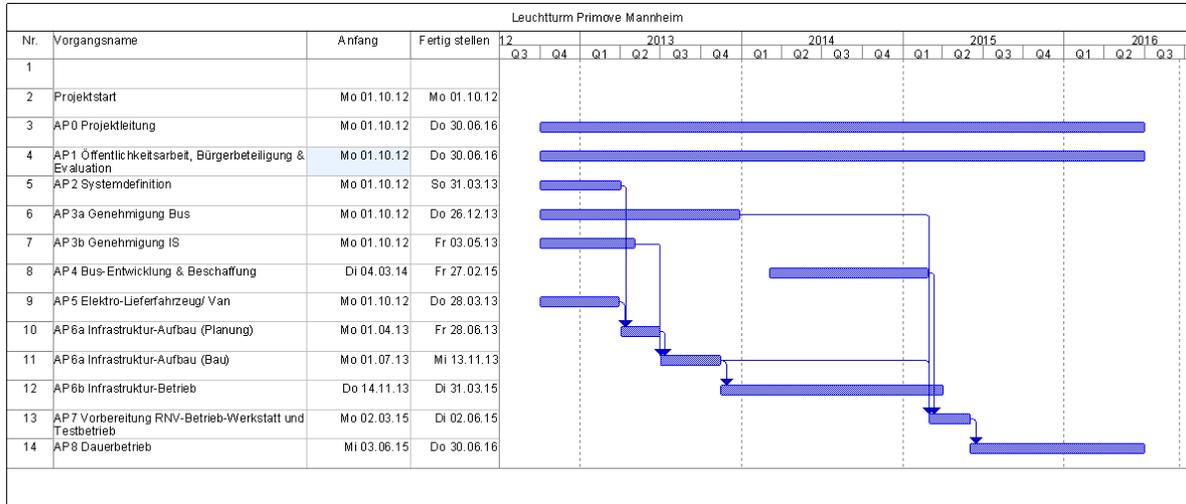
Tabelle 4 gibt einen Überblick wie sich die Kosten auf die einzelnen Positionen des Verwendungsnachweises aufteilen:

		Pos. 0813	Pos. 0837	Pos. 0838	vorhabensspezifische Abschreibungen	sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	Summe
		Materialkosten	Personalkosten	Reisekosten			
<b>Rnv</b>	Soll	6.818 €	819.104 €	68.985 €	3.612.000 €	94.182 €	<b>4.601.089 €</b>
	Ist	46.873 €	285.150 €	12.334 €	3.817.046 €	6.015 €	<b>4.167.419 €</b>
<b>Bombardier</b>	Soll	345.000 €	1.201.320 €	7.800 €		0 €	<b>1.554.120 €</b>
	Ist	262.184 €	1.304.466 €	15.691 €		0 €	<b>1.582.341 €</b>

		Pos. 0812	Pos. 0843	Pos. 0846	Pos. 0850	Summe
		Personalausgaben	Sonstige allgem. Verwaltungsausgaben	Dienstreisen	Gegenstände > 410 Euro	
<b>KIT</b>	Soll	246.860,00 €	46.650,00 €	10.350,00 €	57.350,00 €	368.210,00 €
	Ist	279.880,25 €	17.460,98 €	7.715,84 €	56.086,64 €	361.143,71 €
<b>Stadt Mannheim</b>	Soll	50.000,00 €	50.000,00 €			100.000,00 €
	Ist	36.943,08 €	49.427,39 €	21,70 €		86.392,17 €

**Tabelle 4: Kostenübersicht**

## 2.2 Zeitablauf



### **3. Nachweis der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Das Projekt hatte zwei Ziele. Einerseits den vollumfänglichen Ersatz des Einsatzes von Dieselnissen auf einer nach SORT I zu klassifizierenden Innenstadtlinie durch rein elektrisch fahrende E-Busse ohne Änderungen im Betriebsablauf unter Beweis zu stellen. Und andererseits Lieferfahrzeuge zu elektrifizieren und im Alltagsbetrieb z. B. im Verkehrsunternehmen einzusetzen. Umgesetzt wurde dies mithilfe der PRIMOVE-Ladetechnologie, die das induktive Hochleistungsladen während des Betriebs des Linienverkehrs an ausgewählten Haltestellen ermöglicht. Hierfür mussten sowohl fahrzeug- wie auch wegseitige technische Komponenten projektiert, entwickelt, aufgebaut, getestet, TÜV-zertifiziert und in Betrieb genommen werden. Weiterhin musste die konkrete Ausrüstung der Buslinie mit Ladepunkten geplant und umgesetzt werden sowie diverse betriebliche Abläufe an die neue Technologie angepasst werden. Es sind im Projekt zwei Leistungsklassen des induktiven Schnellladesystems zum Einsatz gekommen. Für die Elektrobusse ist es ein 200 kW Ladesystem und für den e-Vito ein 22 kW Ladesystem.

Im Rahmen der Projektlaufzeit konnte sowohl die Entwicklung als auch die Umsetzung des Vorhabens erfolgreich abgeschlossen werden. Im Ergebnis wurde durch einen einjährigen Praxisbetrieb nachgewiesen, dass sich der Busbetrieb auf der Linie 63 mit der gewählten technischen Konfiguration sowie unter verschiedenen klimatischen Rahmenbedingungen rein elektrisch angetrieben darstellen lässt. Weiterhin wurde gezeigt, dass ein bisher verbrennungsmotorisch betriebenes Lieferfahrzeug der Verkehrsbetriebe durch ein rein elektrisch fahrendes, ebenfalls induktiv nachladendes Fahrzeug ersetzt werden kann.

Es konnte nachgewiesen werden, dass der Busbetrieb auf einer stark befahrenen und dicht bewohnten Innenstadtlinie lokal emissionsfrei durchführbar ist. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass das induktive Hochleistungsladen mit Ladeleistungen von bis zu 200 kW in Bezug auf die Ausbreitung gesundheitsgefährdender elektromagnetischer Felder als unbedenklich einzustufen ist. Im Rahmen einer Bürgerbeteiligung und –befragung sowie bei der Durchführung von verschiedenen Informationsveranstaltungen konnte das Interesse, die Aufgeschlossenheit sowie die positive Einstellung der Bevölkerung der neuen Technologie gegenüber nachgewiesen werden.

Auf Seiten der Forschung konnten im Rahmen des Projekts umfassende Simulationsmodelle erstellt sowie umfangreiche Untersuchungen und Messungen vorgenommen werden. Durch eine Vielzahl studentischer Abschlussarbeiten zum Themenkomplex E-Bus sowie durch verschiedene Veröffentlichungen konnte die neue Technologie sowohl in die Lehre integriert wie auch interessierten Fachkreisen zugänglich gemacht werden.

Alle getätigten Maßnahmen im Zuge der Umsetzung des Projekts haben bei allen Projektpartnern zu einem deutlichen Zugewinn an Know-how bzgl. der Elektrifizierung von Stadtbussen und E-Vans sowie den damit einhergehenden technischen, betrieblichen, regulatorischen sowie bürokratischen Fragestellungen geführt. Dieser Erkenntnisgewinn sowie die tatsächlich nutzbaren technischen Einrichtungen lassen sich für die weitere Elektrifizierung weiterer Buslinien in Mannheim und auch darüber hinaus sehr gut nutzen und an andere Interessierte weitergeben.

---

## **4. Nachweis des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

### **4.1 Nutzen für die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten**

Durch die Elektrifizierung der Linie 63 konnte gezeigt werden, dass ein E-Bus-System und die damit verbundene Ladeinfrastruktur auch im urbanen Innenstadtbereich zur Anwendung gebracht werden kann. Dazu bedarf es der partnerschaftlichen Zusammenarbeit verschiedener Parteien, sodass Themen wie die Genehmigung, Bürgerbeteiligung, Energieversorgungsnetze, Bauplanung und – umsetzung, Beschaffung sowie technische Konfiguration effizient abgewickelt werden können. Die gewonnenen Erfahrungen mit der Elektrifizierung der Linie 63 sollen nun in zukünftige Elektrifizierungsvorhaben einfließen, sodass sich eine zügigere und unbürokratischere Umsetzung realisieren lässt.

Durch die Entwicklung des Ladesystems für den Vito konnte Bombardier zeigen, dass das System auch für kleinere Fahrzeugklassen einsetzbar ist. Die innovativen Ideen, die dort eingeflossen sind, stellen einen erheblichen Fortschritt in der induktiven Ladetechnik dar. Hervorzuheben sind die höhere Systemfrequenz, Integration der Leistungselektronik in die Spulensysteme und die optimierte Größe und Formgebung für eine bessere Fahrzeugintegration.

Die Ergebnisse sind in die Entwicklung für das PRIMOVE 3,6 kW System eingeflossen und dort weiter optimiert worden. Das 3,6 kW-System befindet sich in der Serienentwicklung und soll demnächst einem weiten Kundenkreis über einen führenden Automobilhersteller zur Verfügung stehen.

### **4.2 Nutzen für wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichte**

Im Busbereich zeigt sich die Größe des Pick-ups als ein Hindernis bei der Fahrzeugintegration und damit als ein Hemmnis Elektrobusse mit PRIMOVE auszurüsten. Die Längsträger des Busses müssen für den Einbau verlegt werden, was ein erheblicher Mehraufwand ist. Hier gibt die Entwicklung des 22 kW Systems für den Vito Lösungsansätze, die in der Zukunft auch für den Leistungsbereich 200 kW anwendbar sind.

Ein im Pick-up integrierter Gleichrichter und eine sehr flache Formgebung, die sich in die Unterbodenstruktur des Busses fügt, sind hier als Beispiele zu nennen. Diese Konzeptänderung soll es zukünftig erlauben, deutlich einfacher den Pick-up in das Fahrzeug zu installieren und die Verwertung der Entwicklung zu gewährleisten. Die Erkenntnis und somit die Änderung des Systems resultiert in die Entwicklung einer neuen Generation von induktiven Ladesystemen für Busse innerhalb Bombardiers. Diese Neuentwicklung ist nicht Teil dieses Projektes und wird durch interne Mittel finanziert.

## **5. Nachweis des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Die Technologie der induktiven Energieübertragung hat im Bereich PKW die größten Fortschritte in der Entwicklung genommen. Seitens der Industrie gibt es hier Bestrebungen die Ladetechnik zu standardisieren. Der Leistungsbereich ist im ersten Schritt 3,6 kW für den Schwerpunkt Hybridfahrzeuge. Größere Leistungen von 7,2 kW – 11 kW sind in Vorbereitung. Bei den Standardisierungsdiskussionen hat sich die Frequenz von 85 kHz als Standard herauskristallisiert. Bombardier hat hier erfolgreich die Lösung des Z-Movers vorgestellt, der auch in den geplanten Normentwurf mit aufgenommen wurde.

Die Standardisierungsaktivitäten im Busbereich umfassen die induktive und konduktive Ladetechnik. Hier ist eine einheitliche Fahrzeugschnittstelle ab Pick-up bzw. Pantograph vorgesehen. Eine standardisierte Kommunikation zwischen fahrzeug- und wegseitiger Ladetechnik ist ein weiteres Ziel.

Auf internationaler Ebene ist bei der induktiven Energieübertragung die Firma ZTE in China zu erwähnen, die ähnlich dem PRIMOVE-System ein induktives System hat. Die Anwendung beschränkt sich derzeit auf Leistungen von 60 kW pro System im Bereich Bus. Für den PKW Bereich mit 3,6 kW tritt die Firma Brusa als Konkurrent zu Bombardier auf.

Hauptkonkurrenz in Deutschland und Europa sind für PRIMOVE Schnellladesysteme, die konduktiv mit einem Pantographen laden. Ähnlich wie PRIMOVE laden sie an Endhaltestellen oder Zwischenhaltestellen die Batterie nach und ermöglichen so den Einsatz des Busses über den Tag. Hervorzuheben sind die Systeme von Siemens mit Volvo Bussen im Einsatz in Hamburg und die Firma Schunk mit einem Ladesystem von bis zu 450 kW.

Fallende Batteriepreise werden in Zukunft auch Elektrobusse mit größeren Batterien wie die in Mannheim zum Einsatz kommen wirtschaftlicher machen. Diese Busse werden entweder komplett über Nacht geladen oder soweit an Endhaltestellen wieder geladen, dass sie bis zum Betriebsende am Abend auf der Linie bleiben können. Auch für diese Betriebskonzepte werden induktive Ladesysteme in der Zukunft neben den herkömmlichen Ladesystemen mit Stecker eine Rolle spielen. Automatisches Laden und Integration in die Straße oder Depotstandfläche bieten einfache Anwendung und geringen Platzverbrauch.

## 6. Nachweis der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses

Über das Projekt PRIMOVE Mannheim wurde während der gesamten Projektphase ausführlich in den Medien berichtet. Nicht nur lokal und regional, auch Fach und internationale Presse haben über das Projekt geschrieben und gesendet.

Der Großteil der Medien berichtete im Anschluss an verschiedene Presseveranstaltungen, die die einzelnen Phasen des Projektes begleiteten. Hier sind zum Beispiel die erste Präsentation der mit PRIMOVE ausgestatteten Elektrobusse auf dem Mannheimer Maimarkt Ende April 2015, die Übergabe der Fahrzeuge an den Betreiber Rhein-Neckar-Verkehr GmbH im Mai 2015 sowie der Beginn des Passagierbetriebes im Juni 2015 zu nennen. Besonders Letzteres wurde von großem Medieninteresse begleitet.

Die Veranstaltungen wurden auch auf den Sozialen Medien geteilt und haben so zusätzliche Reichweite erhalten.

Darüber hinaus wurden auch Kundenveranstaltungen, wie beispielsweise das oben bereits erwähnte Ausleihen eines der Mannheimer E-Busse an die Stadt Marburg, medial begleitet und haben für eine kontinuierliche Medienpräsenz gesorgt.

Zudem wurde das Projekt PRIMOVE Mannheim auf Fachtagungen, Messen und Konferenzen präsentiert. Die wichtigsten werden in der folgenden Liste zusammengefasst:

- Innotrans 2014, Berlin
- E-Mobility Summit in Berlin
- Nahverkehrstagung 2014 Koblenz
- E-Mobilitätskonferenz 2014, Freiburg
- UITP 2015 in Mailand
- Busworld Kortrijk 2015
- Arab Future City Summit 2015, Dubai
- Maimarkt 2015, Mannheim
- Innovationstag 2015, Dresden
- AG innovative Antriebe 2015, Stuttgart
- Middle East Rail 2016, Dubai
- Salon D'AMIF 2016, Paris
- Trolleybus Days Luzern, 2016
- Transport Public 2016, Paris

## PRIMOVE

Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb

---

- Intermodal Event 2016, Nottingham
- Verkehrsfachtagung Imove - Zukunft der Mobilität 2016, Kaiserslautern
- NOW Konferenz Elektromobilität vor Ort 2016, Aachen
- Innovationstag 2016 Lobbach
- Regionalkonferenz Energie & Umwelt 2016, Ludwigshafen
- VDE Veranstaltung 2016, Mannheim
- VDV Elekbu 2016, Berlin

Weiterhin wurden unterstützend nicht nur Fotoaufnahmen vom E-Bus, sondern auch Videomaterial und Publikationen zum Projekt erstellt, welche auf Messen und Veranstaltungen gezeigt und verteilt sowie online verfügbar gemacht wurden. Hierzu gehört nicht nur der Film „PRIMOVE presents: e-buses in operations“ der die E-Busse in Mannheim, neben den anderen mit PRIMOVE ausgestatteten E-Bussen, im Passagierbetrieb zeigt, sondern auch ein Produktdatenblatt mit allen Projektdetails sowie entsprechende Datenblätter zu den entsprechenden technischen Komponenten des PRIMOVE Komplettpakets, bestehend aus Ladesystem, Antrieb und Batterien.

Schlussendlich bieten alle Projektpartner auf den jeweiligen Internetseiten ausführliche Informationen für die interessierte Öffentlichkeit.