

Schlussbericht des Verbundes

- öffentlich einsehbar -

ELINA

Einsatz dynamischer Ladeinfrastruktur im ÖPNV

Wenn zur Wahrung berechtigter Interessen des Zuwendungsempfängers (ZE) oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht vertraulich zu behandeln sind (z. B. Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen), so hat der ZE den Zuwendungsgeber (ZG) ausdrücklich darauf hinzuweisen.

Zuwendungsempfänger: EnBW Energie Baden-Württemberg AG Durlacher Allee 93 76131 Karlsruhe	Förderkennzeichen: 01MV21003A
Kontakt Konsortialführer: Dr.-Ing. Maximilian Arnold	Tel.: +4915167726908 Email: m.arnold@enbw.com
Laufzeit des Vorhabens: von: 01.07.2022 bis: 30.06.2025	
Datum Bericht: 19.12.2025	

1.	Kurzdarstellung.....	3
1.1.	Aufgabenstellung.....	7
1.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	8
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	8
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	9
	Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	11
	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	11
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
2.1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	12
2.2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	58
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	58
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	60
2.5.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	62
2.6.	Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen.....	65

1. Kurzdarstellung

Das Forschungsprojekt ELINA verfolgt das übergeordnete Ziel, die Technologie des dynamischen induktiven Ladens (DWPT – Dynamic Wireless Power Transfer) für den Einsatz im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) in Deutschland zu erproben. Diese Technologie ermöglicht das kabellose Laden von Elektrofahrzeugen sowohl im Stand als auch während der Fahrt und bietet damit eine vielversprechende Lösung zur Reduktion von Ladezeiten und zur Erhöhung der Energieeffizienz im ÖPNV.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden mehrere Schwerpunkte verfolgt:

- Entwicklung eines validierten Planungsverfahrens: Es wurde ein softwaregestütztes Verfahren entwickelt, das die wirtschaftlich optimale Planung von DWPT-Infrastruktur für Busnetze ermöglicht. Die Software bildet den Kern eines neuen integrierten Planungsprozesses und wurde anhand der Erkenntnisse aus dem realen Busbetrieb in Balingen validiert.
- Handlungsempfehlungen für Energiesysteme: Für Betreiber wurden Empfehlungen zur Integration induktiver Ladepunkte in bestehende Stromnetze erarbeitet, um eine sichere und effiziente Energieversorgung zu gewährleisten.
- Analyse der Klimawirkungen: Durch Energiesystemmodellierungen wurden die potenziellen Treibhausgaseinsparungen der DWPT-Technologie im Vergleich zu alternativen Ladesystemen quantifiziert.
- Untersuchung der Technologieakzeptanz: Die gesellschaftliche Akzeptanz der DWPT-Technik wurde für verschiedene Nutzergruppen, einschließlich der Besucher der Gartenschau 2023, wissenschaftlich erhoben.
- Praktische Erprobung im Linienbetrieb: In Balingen wurde eine DWPT-Infrastruktur aufgebaut und über einen Zeitraum von mehr als zwölf Monaten im regulären Linienverkehr getestet. Dabei kamen rund ein Kilometer dynamische Ladeinfrastruktur sowie induktive Ladepunkte an Haltestellen zum Einsatz.
- Marktpotenzialanalyse: Das nationale Marktpotenzial für DWPT im ÖPNV wurde ermittelt und Handlungsempfehlungen für die Marktdiffusion abgeleitet.

Die Projektergebnisse umfassen tiefgehendes Know-how für die Kommerzialisierung der Technologie sowie wissenschaftliche Publikationen, die die Attraktivität von DWPT für Verkehrsunternehmen, Netzbetreiber und Entscheidungsträger erhöhen. Damit leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Elektrifizierung des ÖPNV, zur Reduktion von Emissionen im Verkehrssektor und zur Entwicklung innovativer Mobilitätslösungen.

Arbeitspaket 1 – Umfeld- und Technologiepotentialanalyse

Im diesem Arbeitspaket wurde eine umfassende Analyse zur Einführung von DWPT im Verkehrssektor durchgeführt. Die Untersuchung gliederte sich in drei zentrale Bereiche:

1. **Umfeldanalyse:** Betrachtet wurden technische, wirtschaftliche, ökologische, regulatorische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen. DWPT ermöglicht das drahtlose Laden während der Fahrt und bietet potenzielle Vorteile für verschiedene Verkehrsanwendungen.

Gleichzeitig wurden Herausforderungen wie hohe Infrastrukturkosten, Netzbelastung und Standardisierungsbedarf identifiziert.

2. **Technologiepotenzialermittlung:** Es erfolgte eine nationale Analyse des technischen Potenzials von DWPT für Stadtbusse auf Basis umfangreicher Geo- und Fahrplandaten. Dabei wurden verschiedene Szenarien hinsichtlich Streckenlänge und Ladeleistung untersucht, um die mögliche Energieübertragung zu bewerten und wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten zu identifizieren.
3. **Akzeptanzanalyse:** Die gesellschaftliche Perspektive wurde durch eine lokale Befragung im Rahmen des Shuttlebusbetriebes für die Gartenschau Balingen sowie eine bundesweite Onlineumfrage erfasst. Dabei standen Einstellungen, Nutzungsbereitschaft, wahrgenommene Risiken und Informationsbedarfe im Fokus

Arbeitspaket 2 – Entwicklung des Planungstools

Durch die Entwicklung eines Modells zur Platzierung von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Busse im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) wird ein ganzheitlicher Ansatz zur Integration von dynamisch induktiver Ladetechnik verfolgt. Ziel ist es, eine Strategie zu erarbeiten, mit der sowohl die räumliche Verteilung der Ladeinfrastruktur als auch die erforderliche Batteriekapazität der eingesetzten Busse bestimmt werden kann – und das unter Berücksichtigung wirtschaftlicher, energetischer und technischer Gesichtspunkte. Das Modell zielt darauf ab, die über die Lebensdauer entstehenden Gesamtkosten zu minimieren. Diese umfassen die Investitions- und Wartungskosten der Infrastruktur, die Betriebskosten der Energieübertragung sowie die Kosten für Batterieanschaffung und Depotladung.

Ein zentraler methodischer Ansatz des Projekts besteht in der Nutzung frei verfügbarer Geodaten, insbesondere von OpenStreetMap (OSM), zur realitätsnahen Parametrisierung. Durch diese Datenbasis ist es möglich, die entwickelte Methodik auf verschiedene städtische Netze zu übertragen, was einen hohen Grad an Generalisierbarkeit gewährleistet. Ergänzt wird dieser datengetriebene Ansatz durch eine eingehende Literaturrecherche, die zur Bestimmung technischer, betrieblicher und wirtschaftlicher Parameter dient. Die entwickelte Methodik wird im Rahmen einer konkreten Fallstudie in Balingen getestet, um ihre praktische Umsetzbarkeit und die Qualität der Ergebnisse unter realistischen Bedingungen zu prüfen.

Arbeitspakete 3 – Ladeinfrastruktur im ÖPNV

In Balingen wurden Ladestrecken zum induktiven Laden mit einer Gesamtlänge von 980 m und 7 Ladestationen zum stationären induktiven Laden an Bushaltestellen und im Busdepot im Laufe des Projekts aufgebaut und betrieben. Die Ladeinfrastruktur wurde durch das Versuchsfahrzeug (Higer 12 m-Elektrobus) im Shuttleverkehr während der Gartenschau in einem Zeitraum von 5 Monaten und im Anschluss im regulären Linienverkehr in einem Zeitraum von 19 Monaten genutzt. Im laufenden Betrieb wurde unter anderem in Fahrzeug und Infrastruktur die geladene Energie, die Peak- und Durchschnittsleistung sowie die Effizienz der Ladevorgänge und die Positionierung des Fahrzeugs über den Spulen während der Fahrt als auch an verschiedenen Bushaltestellen erhoben und

ausgewertet. Im Laufe des Projekts wurden außerdem verschiedene technische Maßnahmen zur Steigerung der Ladeleistung sowie Maßnahmen zur Verbesserung der Positionierung des Fahrzeugs über den Spulen durchgeführt und ausgewertet.

Im Wesentlichen können die Ergebnisse wie folgt dargestellt werden:

- Planung und Integration der Technik im innerstädtischen Bereich ist komplex und kostenintensiv aufgrund von bestehender Infrastruktur im Straßenkörper, zahlreichen involvierten Stakeholdern und wenig Erfahrung bei Straßenbaufirmen
- Mit der in Balingen verbauten Technik lässt sich der für die Überfahrt der Ladestrecke aufgewendete Traktionsverbrauch im regulären Busbetrieb decken
- Kontaktlose Energieübertragung während der Fahrt & an der Haltestelle kann mit einer Effizienz von über 90 % durchgeführt werden
- Das volle technische Potential wird im Betrieb aktuell nicht ausgeschöpft, da das System eine eingeschränkte Nutzerfreundlichkeit aufweist. Die örtlichen Umstände erlauben keinen durchgehenden Betrieb in idealen Bedingungen. Deshalb wird empfohlen, für zukünftige Systeme eine größere Versatz-Toleranz vorzusehen.
- Bei Überfahrt der Ladestrecke wurde der für eine optimale Energieübertragung maximal zulässige Versatz von Fahrzeug zu Bodenspulen trotz visueller Positionierungshilfen und der Einführung eines absoluten Halteverbots vorwiegend überschritten
- Beim Laden an der Haltestelle wurde der für eine optimale Energieübertragung maximal zulässige Versatz von Fahrzeug zu Bodenspulen trotz visueller Positionierungshilfen vorwiegend überschritten
- Für eine kommerzielle Perspektive der Ladetechnik bedarf es einer deutlichen Steigerung der Ladeleistung, einer Verbesserung der Nutzerfreundlichkeit, sowie der Entwicklung einer Lösung zur eichrechtskonformen Messung und Abrechnung der geladenen Energie. Aus anderen Projekten mit dieser Technologie werden höhere Leistungen berichtet, zudem findet das Projekt EMADI zur prototypischen Entwicklung von Messsystemen für spätere Abrechnungszwecke statt, was beides die kommerzielle Perspektive verbessern würde.

Arbeitspakete 4 – Busbetrieb

In Balingen wurde im Rahmen des Arbeitspakets 4 der sichere und zuverlässige Betrieb des induktiv ladenden Elektrobusses erprobt. Der Demonstrationsbetrieb fand zunächst im Shuttleverkehr während der Landesgartenschau 2023 und anschließend im regulären Linienverkehr statt. Ziel war es, neben dem Fahrbetrieb auch die öffentliche Akzeptanz sowie organisatorische Abläufe zu bewerten. Grundlage bildeten der beschaffte Elektrobus und die einsatzbereite Ladeinfrastruktur.

Im Wesentlichen können die Ergebnisse wie folgt dargestellt werden:

- Der Betrieb verlief reibungslos und wurde von Fahrgästen und Öffentlichkeit weitgehend akzeptiert.
- Die Stadtwerke Balingen konnten umfangreiche Betriebserfahrungen sammeln, die eine fundierte Bewertung des künftigen Einsatzes der DWPT-Technik ermöglichen.
- Betriebsprozesse, Fahrplankonzepte und Schulungsprogramme für das Fahrpersonal wurden erfolgreich entwickelt und umgesetzt.

- Während des laufenden Betriebs wurden GPS-Monitoring, Messkampagnen (z. B. Fahrgastzahlen, Ladezustand, Fahrzeiten, Temperaturen) sowie regelmäßige Wartungsarbeiten durchgeführt.
- Bei Bedarf erfolgten Fahrplananpassungen, um den Betrieb flexibel an aktuelle Bedingungen anzupassen.
- Informationsmaßnahmen begleiteten das Projekt und trugen zur Transparenz und Akzeptanz bei.

Arbeitspaket 5 – Validierung und Weiterentwicklung Planungstool

Das Arbeitspaket 5 baut direkt auf den Ergebnissen von Arbeitspaket 2 auf, in dem ein Modell zur optimalen Platzierung von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Busse im ÖPNV entwickelt wurde. Dieses Modell verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz, der sowohl die räumliche Verteilung der Ladepunkte als auch die erforderliche Batteriekapazität der Fahrzeuge unter Berücksichtigung wirtschaftlicher, energetischer und technischer Kriterien bestimmt

Die Validierung erfolgt anhand realer Betriebsdaten aus dem Testbetrieb in Balingen, in dem dynamische induktive Ladeinfrastruktur über einen Zeitraum von mehr als zwölf Monaten im Linienverkehr eingesetzt wurde. Dabei werden die modellbasierten Planungsergebnisse mit den tatsächlichen Betriebsdaten verglichen, um Annahmen zu überprüfen, Abweichungen zu analysieren und Optimierungspotenziale zu identifizieren. Dieser Schritt stellt sicher, dass das Tool nicht nur theoretisch fundiert, sondern auch praxistauglich ist.

Die Weiterentwicklung des Tools umfasst mehrere Dimensionen:

- Algorithmische Optimierung: Verbesserung der Lösungsgüte für multikriterielle Optimierungsprobleme, um eine noch genauere und effizientere Planung zu ermöglichen.
- Erweiterung der Funktionalitäten: Integration zusätzlicher Module, z. B. für die Bewertung von Netzurückwirkungen, die Analyse von Klimawirkungen und die detaillierte Kostenbetrachtung über den gesamten Lebenszyklus.
- Benutzerfreundlichkeit und Automatisierung: Erhöhung des Automatisierungsgrades und Verbesserung der Bedienoberfläche, um die Anwendung für Verkehrsunternehmen und Netzbetreiber zu erleichtern.
- Generalisierbarkeit: Sicherstellung, dass das Tool auf Basis frei verfügbarer Geodaten (z. B. OpenStreetMap) für unterschiedliche städtische Netze anwendbar ist.

Das Ergebnis von Arbeitspaket 5 ist ein validiertes, praxisorientiertes Planungstool, das als zentrale Komponente für die wirtschaftliche und nachhaltige Einführung von DWPT-Systemen im ÖPNV dient. Es unterstützt Entscheidungsträger bei der strategischen Infrastrukturplanung, reduziert Investitions- und Betriebskosten und trägt zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors bei.

Arbeitspaket 6 – Klima- und Energiesystemrückwirkungen

Im Rahmen des Arbeitspakets 6 wurde das Emissionsreduktionspotenzial der dynamischen induktiven Ladetechnologie im Vergleich zum konduktiven Übernachten im Depot untersucht. Ziel war es, die Auswirkungen des Ladens während der Fahrt – insbesondere tagsüber – auf die Nutzung von Solarstrom, die CO₂-Bilanz sowie auf das Energiesystem zu analysieren.

Die Untersuchung basiert auf der deutschlandweiten Potenzialanalyse unter der Annahme eines vollständig elektrifizierten Busverkehrs mit einem durchschnittlichen Energieverbrauch von 1,15 kWh/km. Zwei Ladeszenarien wurden betrachtet: das Laden während der Fahrt über eine 1000 m lange Wireless Charging Lane (WCL) mit 36 kW sowie das Laden über alle wirtschaftlich sinnvollen Streckenabschnitte innerhalb einer Gemeinde. Als Vergleichsszenario diente das konduktive Laden im Depot in der Nacht zwischen 22 und 6 Uhr.

Zur Berechnung der Emissionen wurden stündlich aufgelöste CO₂-Intensitäten des deutschen Strommixes verwendet, basierend auf dem Green Grid Compass für das Jahr 2024 sowie auf dem FfE-Trendszenario für die Jahre 2035 und 2045. Ergänzend wurden Rückwirkungen auf das Energiesystem analysiert, unter anderem anhand einer Fallstudie in Balingen, die die Auswirkungen von DWPT auf die Spitzenlast im Depot und die Batteriekapazität der Fahrzeuge untersuchte.

Darüber hinaus wurden Power-Quality-Messungen durch EnBW am Busdepot durchgeführt, um mögliche Netzzrückwirkungen durch induktives Laden zu bewerten. Während beim statischen Laden keine kritischen Rückwirkungen festgestellt wurden, wurden potenzielle Herausforderungen bei hoher Auslastung im dynamischen Betrieb identifiziert und entsprechende technische Lösungsansätze diskutiert.

Arbeitspaket 7 – Projektkoordination

Übliche Projektkoordination mit Videokonferenzen und räumlichen Treffen, Häufigkeit in Abhängigkeit der aktuellen Projektdynamik (bei hoher Dynamik monatlich, teilweise alle zwei oder drei Monate). Bereitstellung der zentralen Datenplattform über Microsoft Teams. Koordination der Berichte und gemeinsamer Veröffentlichungen (Pressemitteilungen, wissenschaftliche Veröffentlichungen).

1.1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung gliederte sich in sechs Teilaufgaben, im Folgenden kurz benannt und mittels der geplanten Ergebnisse charakterisiert:

- 1. Entwicklung eines validierten, softwaregestützten Planungsverfahrens für DWPT-Ladeinfrastruktur für den ÖPNV**
Zielerreichung ist messbar durch: Planungsverfahren (einschließlich der Validierung mit Erkenntnissen aus dem Busbetrieb in Balingen) ist detailliert beschrieben (in Projektberichten und ggf. in ergänzenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen), das Planungsverfahren unterstützende Software liegt vor
- 2. Formulierung von Handlungsempfehlungen für die Energiesystemplanung**
Zielerreichung ist messbar durch: Handlungsempfehlungen sind in Projektberichten aufgeführt
- 3. Bestimmung von möglichen Klimawirkungen durch den DWPT-Einsatz im ÖPNV**
Zielerreichung ist messbar durch: Die qualitativen und quantitativen Ergebnisse der Betrachtung der Klimawirkungen, insbesondere das Potential zur Reduktion von Treibhausgasen, sind in Projektberichten beschrieben.

4. Ermittlung der Akzeptanz der DWPT-Technik für den ÖPNV

Zielerreichung ist messbar durch: Für verschiedene, noch zu definierende Personengruppen (insb. Gäste der Gartenschau 2023) wurden verschiedene Aspekte der Akzeptanz in einer wissenschaftlichen Vorgehensweise erhoben, die qualitativen und quantitativen Ergebnisse liegen in Projektberichten vor

5. Praktische Erprobung der DWPT-Technik im ÖPNV, Aufbau von Know-how für eine spätere Kommerzialisierung

Zielerreichung ist messbar durch: Die Technik wurde aufgebaut und über einen Zeitraum von mindestens 12 Monaten im regulären Linienverkehr betrieben, die Betriebserfahrungen sind in Projektberichten beschrieben.

6. Ermittlung des Marktpotentials der DWPT-Technik in Deutschland

Zielerreichung ist messbar durch: Das Marktpotential für Anwendungen im Verkehrssektor ist qualitativ dokumentiert und für den Einsatz im ÖPNV quantifiziert.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

S. 1.4, keine weiteren nennenswerten Voraussetzungen (außerhalb des wissenschaftlich/technischen Standes).

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Nachfolgende **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** fasst die Inhalte der Projektmeilensteine sowie die Soll-Daten aus der ursprünglichen Planung zu Projektbeginn, und die letztendlichen Ist-Daten zusammen.

Tabelle 1 - Projektmeilensteine

Meilenstein Nr.	Erreichung im Monat Soll/Ist	Ziel/Benennung	Verantwortliche/r Partner	Bewertung/ Erläuterung/ Messbar durch
1	07.2023 / 08.2024	Nationales DWPT-Technologiepotential für den Einsatz im ÖPNV bestimmt	FfE	Kurz-/mittelfristiges und langfristiges Marktpotential für ÖPNV (u.a. Anzahl geeigneter Routen, Distanz in km, Streckenverläufe) quantifiziert und publiziert
2	09.2024 / 02.2025	Ausprägung von Akzeptanzaspekten und Handlungsfelder in Bezug auf Technologieakzeptanz dargelegt	FfE	Befragung ist statistisch ausgewertet und daraus abgeleitete Handlungsfelder sowie Einflussfaktoren auf die Technologieakzeptanz sind identifiziert und dokumentiert
3	12.2022 / 12.2022	Planungstool aufgebaut und erste Detailplanung für die Buslinien abgeschlossen	KIT	Detaillierte, mit ersten Simulationsergebnissen unterlegte Umlaufpläne für den Busverkehr liegen vor
4	06.2023 / 06.2023	Integrierte softwaregestützte Planung einzelner Buslinien möglich	KIT	Software ist funktional, Ergebnisse für reale und synthetische Planungsaufgaben liegen vor

5a	03.2023 / 05.2023	Bauabschnitt 1 in Betrieb	EnBW	Inbetriebnahmeprotokolle liegen vor
5b	09.2023 / 03.2024	Bauabschnitt 2 in Betrieb	EnBW	Inbetriebnahmeprotokolle liegen vor
5c	09.2024 / 03.2025	Bauabschnitt 3 in Betrieb	EnBW	Inbetriebnahmeprotokolle liegen vor
6	03.2024 / 06.2024	Evaluation Infrastrukturbetrieb: Verbesserungen festgelegt. Wenn noch kein zuverlässiger Busbetrieb mit der Infrastruktur möglich sein sollte, werden die Projektpartner das weitere Vorgehen abstimmen. Ein Projektabbruch wird ausgeschlossen.	EnBW	Beurteilung des Betriebs durch die Projektpartner und gemeinsame Entscheidung zu möglichen Maßnahmen protokolliert
7	06.2025 / 06.2025	Busbetrieb im Rahmen des Projektes abgeschlossen	EnBW	Vollständiges Fahrtenbuch und Betriebsprotokoll der induktiven Ladetechnik liegen vor
8	12.2023 / 12.2023	Validierung des Planungstools abgeschlossen	KIT	Abgleich des Energiebedarfs der Simulation mit Messdaten aus dem realen Busbetrieb in Balingen ist erfolgt
9	09.2024 / 12.2024	Validierung des Planungstools abgeschlossen	KIT	Abgleich des Energiebedarfs der Simulation mit Messdaten aus dem realen Busbetrieb in Balingen ist erfolgt.
10	03.2025 / 05.2025	Automatisierte, optimierte softwarege-stützte Planung von Busnetzen durch entwickeltes Tool abgeschlossen	KIT	Planungstool kann teilautomatisiert zur Infrastrukturplanung von Busnetzen eingesetzt werden
11	07.2024 / 11.2024	THG-Einsparpotenzial durch induktives Laden quantifiziert	FfE	THG-Reduktionen in der Betriebsphase für induktives Laden im Vergleich zu alternativen Ladetechnologien und - steuerungsarten quan-tifiziert (in kg CO ₂ -Äquivalenten)
12	01.2025 / 05.2025	Auswirkungen auf den Netzbetrieb und Anpassungen im Planungsprozess auf Verteilnetzebene qualitativ dargestellt	FfE	Technische Anforderungen und notwendige Anpassungen von Netzbetriebsparametern zur DWPT- Integration ins Verteilnetz qualitativ erhoben und dokumentiert
13	06.2025 / 06.2025	Ergebnisse der Energiesystemrückwir- kungen sind validiert und visuell aufbereitet	FfE	Publikation zu Ergebnissen der Energiesystemrückwirkungen je Ladetechnologie ist veröffentlicht

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

In den vergangenen Jahren wurden DWPT-Systeme in unterschiedlichen Konfigurationen auf Teststrecken und auf öffentlichen Straßen getestet, meist getrennt nach den Anwendungsfeldern Pkw und ÖPNV. Im Folgenden werden ausgewählte Prototypentests umrissen.

Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST): OLEV (seit 2010). In Südkorea wird DWPT mit Bussen im ÖPNV in Seoul und weiteren Städten getestet. Es werden Strecken von bis zu 38 km im Batteriebetrieb zurückgelegt, mit Ladestrecken von 2 % - 15 % der jeweiligen Route. Die Ladeleistung beträgt 100 kW bei einer Frequenz von 20 kHz.¹ OLEV ist laut Aussage des Anbieters das bislang einzige marktreife DWPT-System.

Bombardier PRIMOVE: PRIMOVE Mannheim (2013-2016). Auf einer Mannheimer Innenstadtlinie wurden zwei Dieselbusse durch zwei induktiv im Betrieb nachladende E-Busse ersetzt. Das Konsortium aus der Rhein-Neckar-Verkehr GmbH und der Bombardier Transportation GmbH, unterstützt durch die Stadt Mannheim und das Karlsruher Institut für Technologie, erprobte im vom BMVI geförderten Projekt die Praxistauglichkeit der neuen Technologie. Dabei wurden ausgewählte Haltestellen mit induktiver Ladetechnik ausgerüstet, die eine Aufladung des Energiespeichers mit bis zu 200 kW erlaubte.² Im Gegensatz zu den anderen dargestellten Projekten und ELINA konnte nicht während der Fahrt, sondern nur im Stand an Haltestellen geladen werden.

Centre of Research for Energy Resource and Consumption (CIRCE): Victoria (2016-2017). Im spanischen Málaga wurde ein E-Bus auf einer DWPT-Ladestrecke von 100 m auf einer öffentlichen Straße getestet. Die Ladeleistung betrug 50 kW bei einer Frequenz von 23,8 kHz. Die Empfängerspulen des Systems waren erstmals länger als die Sendespule um die Ladeleistung zu erhöhen. Der Prototyp wurde bei Geschwindigkeiten bis 10 km/h getestet.³

Electreon AB: Smart Road Gotland (seit 2020). Der israelische DWPT-Anbieter Electreon Wireless testet auf der schwedischen Insel Gotland mit einer Ladestrecke von 1,6 km sein DWPT-System an einem E-Lkw und einem E-Bus. Der Lkw ist mit fünf Empfängerspulen mit je 20 kW ausgestattet und wurde erfolgreich bei Geschwindigkeiten bis 80 km/h getestet. 2021 wurde der Betrieb des öffentlichen Verkehrs zwischen Flughafen und Stadt aufgenommen.⁴

TU Braunschweig et al.: eCharge (seit 2021). Hauptziel dieses Projekts, bei dem ebenfalls die DWPT-Technik von Electreon Wireless zum Einsatz kommen wird, ist die Analyse der unterschiedlichen Fahrbahnbeläge und die Entwicklung eines optimierten Belags für den DWPT-Einsatz. Ab diesem Jahr soll ein kleines Testsystem in Köln auf der Teststrecke „duraBAST“ der Bundesanstalt für Straßenwesen aufgebaut werden.^{5 6 7}

Bergische Universität Wuppertal et al.: MILAS (seit 2021). In diesem Projekt soll ein DWPT-System neu entwickelt und auf einer Teststrecke von rund 200 m in Bad Staffelstein mit selbstfahrenden Kleinbussen erprobt werden.⁸

Bezeichnende Gemeinsamkeit der oben aufgeführten Projekte ist, dass meist die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der DWPT-Übertragung erprobt wurde/wird. ELINA setzt dagegen auf erprobte Technik auf und untersucht erstmals gezielt übergeordnete Systemzusammenhänge. Zusätzlich werden auch Leistungssteigerungen angestrebt, um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen.

¹ <https://pdfs.semanticscholar.org/6a48/7b0d298d6c777c97a1ca46960a85bb13a787.pdf>

² <https://www.now-gmbh.de/de/bundesfoerderung-elektromobilitaet-vor-ort/projektfinder/modellregionen/weitere-regionen/primove-mann>

³ [http://greentechlatvia.eu/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/1-8_Project_Victoria_\(Bludzuweit\)_8.pdf](http://greentechlatvia.eu/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/1-8_Project_Victoria_(Bludzuweit)_8.pdf)

⁴ <https://www.smartroadgotland.co>

⁵ <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/013-ferlemann-beruehrungsloses-laden-e-fahrzeuge.ht>

⁶ <https://magazin.tu-braunschweig.de/pi-post/keine-kabel-kein-warten-e-auto-laden-beim-fahr>

⁷ <https://www.prnewswire.com/il/news-releases/electreon-gewinnt-eine-ausschreibung-fur-die-bereitstellung-von-strassenladetechnik-fur-ein-von-der-deutschen-regierung-finanziertes-projekt-866250886.ht>

⁸ <https://ees.uni-wuppertal.de/de/forschung/aktuelle-forschungsprojekte/milas.ht>

Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Der Hersteller der im Projekt eingesetzten DWPT-Technik versichert, dass er über sämtliche Schutzrechte verfügt, damit Kunden die Technik in Deutschland bestimmungsgemäß einsetzen können.

Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Die wichtigsten verwendeten Quellen sind nachfolgend einschließlich einer kurzen Erläuterung zur Verwendung aufgeführt:

- A. K. Berthold, „Techno-ökonomische Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung urbaner Busnetze“, 2019, doi: 10.5445/KSP/1000097162.
→ Dissertation bietet Grundlage für die gewählten Forschungsansätze.
- B. W. Kunith, Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. doi: 10.1007/978-3-658-19347-8.
→ Bietet umfassende Analyse der Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs, einschließlich technischer, wirtschaftlicher und organisatorischer Aspekte, die als Grundlage für die Bewertung und Integration dynamischer Ladeinfrastruktur im ÖPNV dienen.
- C. OSMF, OpenStreetMap und Mitwirkende (2024): OpenStreetMap - Deutschland. Daten mit OpenDatabase-Lizenz veröffentlicht unter: <http://www.openstreetmap.org>;
→ Dient als Kartengrundlage und Informationspool für öffentlich verfügbare Daten.
- D. Z. Bai, L. Yang, C. Fu, Z. Liu, Z. He, und N. Zhu, „A robust approach to integrated wireless charging infrastructure design and bus fleet size optimization“, Comput. Ind. Eng., Bd. 168, S. 108046, Juni 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108046.
→ Bietet ein integriertes Modell zur Kombination von Ladeinfrastrukturdesign und Flottenoptimierung, was für die ganzheitliche Systemplanung entscheidend ist.
- E. Google Transit (2024): GTFS Static – Überblick | Static Transit | Google for Developers (Abgerufen am 11.06.2024)
→ Dient als Grundlage für die Busfahrpläne und -strecken für die Potenzial- und Emissionsbewertung
- F. Chargepoint (2022): Electric Bus Performance Report, Electric Bus Performance Report | ChargePoint (Abgerufen am 17.12.2024).
→ Dient als Grundlage für den Verbrauch von Elektrobussen für die Potenzial- und Emissionsbewertung

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Stadt Balingen, darunter Ordnungsamt (Absperren und Verkehrsführung bei Bauarbeiten), Tiefbauamt (Genehmigungen), Amt für Familie und Verkehr (Fahrpläne) und Bauhof (Markierungen)

Bundesnetzagentur: Die induktive Ladetechnik wird von der BNetzA als Versuchsfunk-Anlage gewertet, wofür von EnBW jeweils jährliche Genehmigungen eingeholt wurden und werden. Laut BNetzA ist eine Änderung der internen Vorschriften geplant, wodurch die Bewertung von induktiver Ladetechnik als Versuchsfunk angesichts der erwarteten Verbreitung entfallen soll.

2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Tabelle 2.1.1: Verwendung Teilvorhaben Konsortialführer EnBW

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
<p>Arbeitspaket 1: Umfeld- und Technologiepotentialanalyse</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mögliche Use Cases, Geschäftsmodelle, Ökosysteme aus Perspektive eines potentiellen Betreibers von DWPT-Infrastruktur, allgemeine Problematiken bei der vollständigen Elektrifizierung des Verkehrs • Aufzeigen von Potenzialen zur Leistungssteigerung und Kostenreduktion mit Entwicklungspfaden 	<p>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus Betreibersicht</p> <p>Für den Aufbau und Betrieb der Ladestrecke in der Wilhelmstraße wurde ein Business-Case aus Betreibersicht gerechnet.</p> <p>Hierbei wurden unter anderem die Messdaten aus dem Betrieb der Ladeinfrastruktur in der Wilhelmstraße, sowie die real angefallenen Baukosten zu Grunde gelegt. Folgende Eingangsgrößen wurden berücksichtigt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugaufkommen Balinger Stadtbuslinien auf Strecke • Gemessene durchschnittliche Ladeleistung • Gemessene Durchschnittsgeschwindigkeit • Gemessene Effizienz von Netzanschluss bis Batterie • System- und Straßenbaukosten • Strom-, Betriebs-, und Wartungskosten • Nutzungsdauer • Kalkulationszinssatz <p>Aufgrund einer unbekanntenen Zahlungsbereitschaft der Kunden wurde auf den Energiepreis mit der Vorgabe einer intern angesetzten Eigenkapitalverzinsung (Kalkulationszinssatz) aufgelöst. Bei einem in der Berechnung erzielten Energiepreis unter den zum Zeitpunkt der Berechnung üblichen Energiepreisen für konduktives Laden an DC-Schnellladestationen wird der Betrieb der Ladeinfrastruktur im Rahmen dieser Betrachtung als profitabel eingestuft.</p> <p>Zusätzlich wurde der Business-Case für 1 Zukunftsszenario berechnet. Hierbei wurde eine Ladeleistung von 150 kW und eine Effizienz von 85 % unterstellt und auf eine benötigte Auslastung der Ladeinfrastruktur aufgelöst, die für einen profitablen Betrieb erreicht werden muss. Dies entspricht, nach den Erfahrungen aus dem Betrieb der Technik sowie Angaben des Herstellers der perspektivisch maximal erreichbaren Leistungsfähigkeit des Systems. Hierbei wird bei Überfahrt der Ladestrecke eine durchgehend optimale Positionierung des Busses unterstellt. Dies ist zukünftig nur durch aktive Spurhaltesysteme zu erreichen. Weiterhin wurden für die Integrationskosten nur die Baumehrkosten bei der Installation in einer ohnehin sanierungsbedürftigen Straße, sowie Systemkosten von 1 Mio. €/km angesetzt.</p> <p>Ergebnis: Mit den Messdaten aus dem Betrieb der Technik und den tatsächlich entstandenen Kosten ist der Betrieb der Ladetechnik für</p>

	<p>den betrachteten Anwendungsfall „ÖPNV in Balingen“ als nicht-profitabel einzustufen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass im bisherigen Betrieb das volle Potential der Ladetechnik nicht ausgeschöpft werden kann, da die Busfahrer im Betrieb die Ladestrecke vorwiegend mit Versatz befahren. Weiterhin fallen hohe Straßenbaukosten aufgrund fehlender Erfahrung und mangelndem Wettbewerb ins Gewicht.</p> <p>Im Zukunftsszenario konnte ein profitabler Betrieb der Ladeinfrastruktur ab einer Auslastung von 180.000 Überfahrten der Ladestrecke pro Jahr erreicht werden. Dazu wäre die Einbindung des allgemeinen Pkw-Verkehrs erforderlich, was im Rahmen des Projekts nicht untersucht wurde.</p> <p>Implikationen: Eine kommerzielle Perspektive für induktives Laden während der Fahrt ergibt sich nur auf hoch ausgelasteten Strecken mit einer deutlich gesteigerten Ladeleistung und verbesserten Nutzerfreundlichkeit verglichen zum Status Quo der Technik. Eine Übersicht über Streckenabschnitte in Deutschland, die diesen Kriterien entsprechen, sind den Ergebnissen der Potentialanalyse aus dem Teilvorhaben der FfE zu entnehmen.</p>
<p>Arbeitspaket 3: Ladeinfrastruktur im ÖPNV</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Infrastruktur wurde geplant, installiert und in Betrieb genommen • Die Infrastruktur ist über den gesamten Zeitraum des Busbetriebs zuverlässig in Betrieb und hat sich als geeignet für das geplante Busbetriebskonzept erwiesen 	<p>Planung WPT-Ladestrecken</p> <p>Die Standortwahl der Ladestrecke wird von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeit auf Streckenabschnitt • Anzahl Überfahrten/Buslinien auf Streckenabschnitt • Kurvenradien • Parkende Autos • Platz neben der Straße für Schaltschränke • Entfernung/Größe Netzanschluss • Vorhandene zivile Infrastruktur (Gasleitungen etc.) • Vorhandene Vegetation (Bäume etc.) <p>Das KIT hat hierfür im Projekt ein Planungstool entwickelt, welches nach mehreren dieser Kriterien optimiert. Allerdings können Daten zu Platzverhältnissen neben der Straße, der unterirdischen Infrastruktur oder der Größe und Entfernung des Netzanschlusses nicht mit einem vertretbaren Aufwand durch ein Softwaretool verarbeitet werden. Hierbei sind manueller Planungsaufwand und ein hohes Maß an Abstimmung mit den involvierten Stakeholdern gefordert.</p> <p>Die Standorte der Ladestrecken im Projekt wurden in erster Linie so gewählt, dass Erkenntnisse zu unterschiedlichen Umgebungen und Streckenprofilen gesammelt werden konnten. Weiterhin mussten alle berücksichtigten Teilstrecken in einem bereits vorhandenen Fahrzeugumlauf des regulären Linienverkehrs abgefahren werden. Während der Planung zeigte sich im Rahmen von Standortbegehungen, dass neben der Straße teilweise nicht</p>

	<p>ausreichend Platz für die Schaltschränke vorhanden war. Hierdurch wurde die Standortwahl insbesondere im zweiten Bauabschnitt eingeschränkt.</p> <p>Planung WPT-Ladesysteme an der Haltestelle Die Standortplanung von WPT-Ladesystemen an der Bushaltestelle richtet sich in erster Linie nach der Häufigkeit und Dauer der Haltevorgänge. Aus dem Fahrplan lassen sich diese Informationen nur eingeschränkt gewinnen, da viele Haltestellen insbesondere im ländlichen Raum und kleineren Städten nur auf Bedarf angefahren werden. In Balingen wurde daher im Zuge der Standortplanung der WPT-Haltestellen für den Linienverkehr eine GPS-Messung der Haltevorgänge durchgeführt. Im Ergebnis dieser Messungen zeigte sich, dass abgesehen von der Start- und Endhaltestelle Busbahnhof die Haltehäufigkeiten und Haltezeiten ungeeignet für den Aufbau von Ladeinfrastruktur für Gelegenheitsladen sind.</p> <p>Installation der Ladetechnik Der Aufbau der Ladetechnik in Balingen erfolgte in einem mehrstufigen Prozess:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Vorbereitende Arbeiten <ol style="list-style-type: none"> 1.1 Aufbau der Schaltschrankfundamente 1.2 Verlegung der Stromleitungen zur Anbindung an das Niederspannungsnetz (400 V) 1.3 Verlegung der Glasfaserleitung zur Internetanbindung 1.4 Installation der Messwandler-Schränke 2 Straßenbau & Installation Ladetechnik <ol style="list-style-type: none"> 2.1 Straßenbelag Abfräsen & Einbau Tragschicht: Im Ergebnis sind die Spulen 10 cm unter Oberkante der Asphaltdecke einzubringen. Ein Abfräsen der Fahrbahnoberfläche von nur 10 cm kam nicht in Frage, da die verbleibende Asphaltdecke den straßenbaulichen Anforderungen nicht genügt. Für den ersten Bauschritt wurde im Projekt ELINA daher eine Frästiefe von 20 cm gewählt. Hierdurch wurden ein erhöhter Materialabtrag und der zusätzliche Einbau einer neuen Asphalttragschicht notwendig. 2.2 Erstellung des Kabelgrabens: Für die Herstellung des Kabelgrabens kann eine Grabenfräse verwendet werden, deren Einsatz im deutschen Straßenbau allerdings unüblich ist. Aufgrund mangelnder Verfügbarkeit dieses Baugeräts wurden die Kabelgräben mit einem Bagger ausgehoben. Dies führte zu einer größeren Grabenbreite und erhöhten Bauzeit (ca. 1 Tag pro 100 m Strecke). Der Unterschied in den Grabendimensionen ist in Abbildung 1 dargestellt.
--	--



Abbildung 1: Kabelgraben in Balingen mit Bagger erstellt (links), in Detroit mit Grabenfräse erstellt (rechts)

- 2.3 Installation der Management-Units:
Die Management-Units wurden mit einem Kran aufgestellt und ans Strom- sowie Glasfasernetz angeschlossen (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Aufstellen der Management-Unit per Kran

- 2.4 Verlegung, Fixierung & Anschluss der Spulen:
Die Spulen wurden parallel zur MU-Installation verlegt und über Kabel mit den Hochfrequenzumrichtern verbunden. Zur Vermeidung von Lageveränderungen beim Asphalteinbau wurden die Spulen mit Konstruktionsklebstoff fixiert (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Verlegen & Verkleben der Spulen auf Asphalttragschicht

- 2.5 Verfüllung des Kabelgrabens:
Der Kabelgraben wurde mit Beton bis zur Oberkante der Tragschicht verfüllt.
- 2.6 Aufbringen der Ausgleichsschicht:
Ein feinkörniger Asphalt wurde aufgetragen, um den Höhenunterschied zwischen Spule und Untergrund auszugleichen (siehe Abbildung 4)



Abbildung 4: Aufbringen von feinkörnigem Asphalt zur anschließenden gleichmäßigen Verdichtung v. Binder- und Deckschicht

- 2.7 Straßenwiederherstellung:
Binder- und Deckschicht werden mit einem Asphaltfertiger aufgebracht – analog zum konventionellen Straßenbau.

Bauzeit

Die Bauzeit der ersten 400 m Ladestrecke im ersten Bauabschnitt betrug 7 Wochen. Der zweite Bauabschnitt von 580 m Länge wurde in 8 Wochen fertiggestellt.

Neben dem zuvor beschriebenen mehrstufigen Prozess zahlten noch weitere Faktoren auf die Bauzeit ein: Erstens wurde eine Aufteilung in mehrere Baufelder unternommen, die zum Großteil

nicht parallel bearbeitet werden konnten. Dies folgte aus Vorgaben durch die Stadt zur Minderung der Verkehrseinschränkungen während der Bauphase. Zweitens wurden zusätzliche Arbeiten, wie das Verlegen von Hauanschlüssen mit den Straßenbauarbeiten zur Integration der ersten 400 m Ladestrecke zusammengelegt. Hierdurch entstanden weitere Verzögerungen, weshalb davon beim restlichen Aufbau abgesehen wurde. Eine deutliche Lernkurve war beim Verlegen, Verkabeln und Testen der Spulen festzustellen. Diese Prozessschritte sind von den restlichen Arbeiten abzugrenzen, da an diesen Bau-Tagen neben der Straßenbaukolonne auch Elektrofachkräfte vor Ort sein müssen. Mit zunehmender Erfahrung konnte das Team 60 Spulen (100 m Ladestrecke) inkl. dem Einbetonieren der Kabel in einem Tag Bauzeit installieren.

Übersicht WPT-Ladeinfrastruktur in Balingen

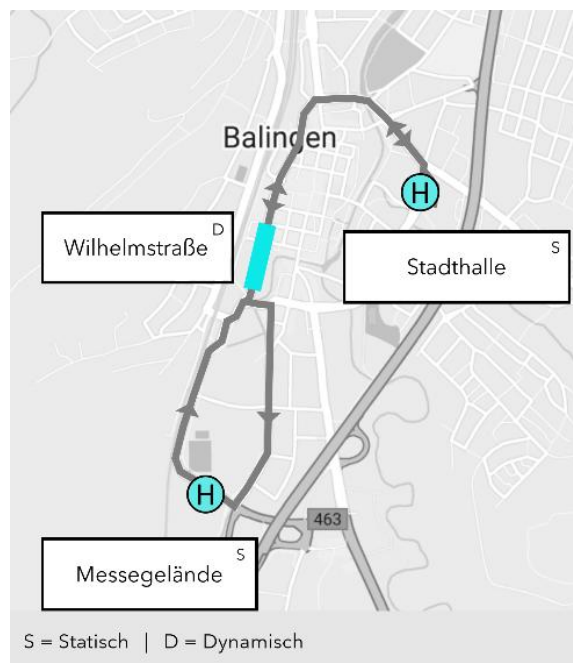


Abbildung 5: WPT-Ladeinfrastruktur zur Gartenschau (05.05.2023 - 24.09.2023)

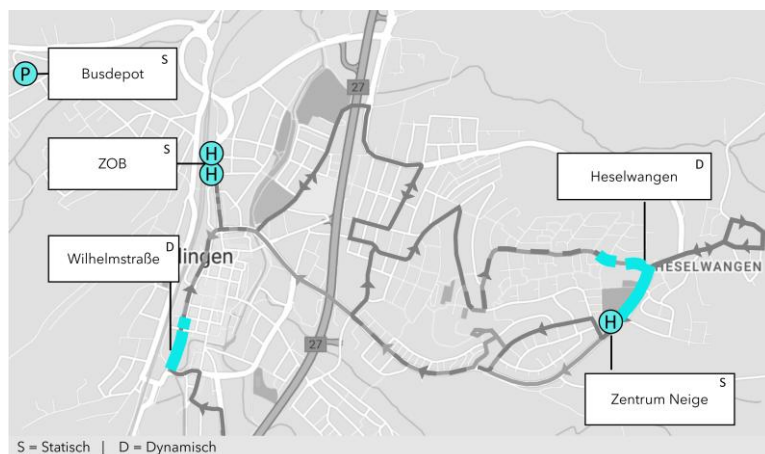


Abbildung 6: WPT-Ladeinfrastruktur für den Linienverkehr (19.02.2024 - 30.06.2025)

Betrieb WPT-Ladeinfrastruktur

Definitionen

Zur Unterscheidung zwischen Ladevorgängen während der Fahrt und Ladevorgängen im Stand wird der Index d (dynamisch) bzw. Index s (statisch) eingeführt. Im Folgenden werden die Definitionen für Ladevorgänge während der Fahrt aufgeführt, die sich lediglich durch den Index d von den Definitionen für Ladevorgänge im Stand unterscheiden.

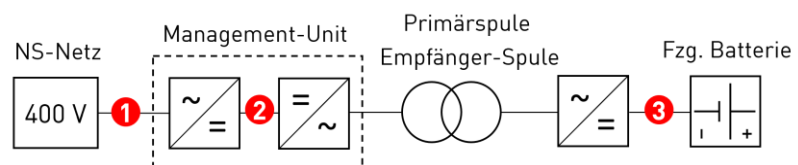
$P^d(t_i)$ beschreibt die Leistung zum Zeitpunkt t_i . Die Momentanleistung $P_{inst}^d(t)$ wird nach (1) als Durchschnitt über 1 Sekunde aller mit einer Abtastrate von 1 ms gemessenen Spannungen und Ströme definiert. $P_{avg}^d(t_i, t_j)$ beschreibt nach (2) die durchschnittliche Ladeleistung in einem Zeitintervall. Die Energie pro Zeitintervall ergibt sich durch (3).

$$P_{inst}^d(t) = \frac{1}{1000} \sum_{i=\lfloor \frac{t}{1000} \rfloor * 1000 - 999}^{\lfloor \frac{t}{1000} \rfloor * 1000} P^d(t_i) \quad (1)$$

$$P_{avg}^d(t_i, t_j) = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_j} P_{inst}^d(t)}{\sum_{t=t_i}^{t_j} t} \quad (2)$$

$$E^d(t_i, t_j) = \sum_{t=t_i}^{t_j} P_{inst}^d(t) \quad (3)$$

Weiterhin werden folgende Messpunkte und entsprechend zugehörige Indizes definiert:



Momentanleistung an Messpunkt 1: $P_{inst,Grid}^d(t)$

Momentanleistung an Messpunkt 2: $P_{inst,MU}^d(t)$

Momentanleistung an Messpunkt 3: $P_{inst,VU}^d(t)$

Für $P_{avg}^d(t_i, t_j)$, sowie $E^d(t_i, t_j)$ ist weiterhin zu definieren ab welchem Schwellenwert gemessener Leistung, kontaktlos Energie übertragen wird. Der Schwellenwert in der VU wird nach Sichtung der Daten auf **100 W** festgelegt.

Die durchschnittliche Ladeleistung im Fahrzeug ergibt sich somit nach Formel (4). Die aufgenommene Energie ergibt sich nach Formel (5).

$$P_{avg,VU}^d(t_i, t_j) = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_j} P_{inst,VU}^d(t) * \chi\{P_{inst,VU}^d(t) > 100\}}{\sum_{t=t_i}^{t_j} t * \chi\{P_{inst,VU}^d(t) > 100\}} \quad (4)$$

$$E_{VU}^d(t_i, t_j) = \sum_{t=t_i}^{t_j} P_{inst}^d(t) * \chi\{P_{inst,VU}^d(t) > 100\} \quad (5)$$

Die Effizienz wird nach (6) & (7) definiert.

$$\eta_{AC,DC}^d(t_i, t_j) = \frac{E_{VU}^d(t_i, t_j)}{E_{Grid}^d(t_i, t_j)} \quad (6)$$

$$\eta_{DC,DC}^d(t_i, t_j) = \frac{E_{VU}^d(t_i, t_j)}{E_{MU}^d(t_i, t_j)} \quad (7)$$

Betriebs-Analysen der Ladestrecken

Abbildung 7 zeigt die Ladevorgänge und den SOC-Verlauf an einem Betriebstag während der Gartenschau. Hieraus wird ersichtlich, dass die Ladeinfrastruktur des Bauabschnitts CS 1 ausreicht, um den täglichen Energiebedarf im Shuttlebetrieb zu decken. Der Bus kehrt am Ende des Betriebstages sogar mit einem erhöhten Ladestand ins Depot zurück.

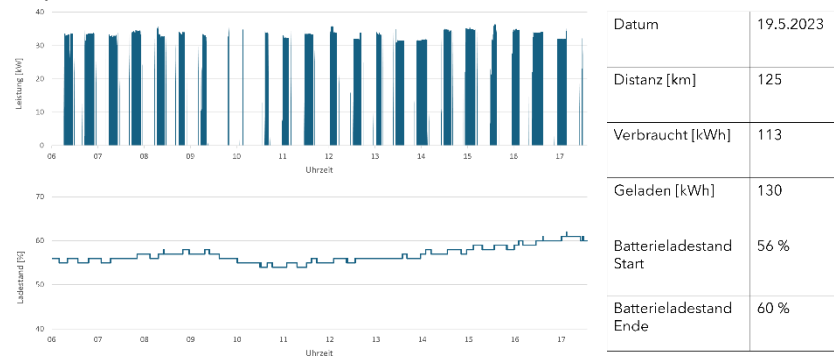


Abbildung 7: Ladevorgänge & SOC-Verlauf an Betriebstag während Gartenschau

Abbildung 8 zeigt die geladene Energie skaliert auf 1 km überfahrene Induktionsstrecke für 12 ausgewählte Betriebstage im Linienbetrieb Q1/Q2 2024. Hierbei wurden für die Berechnung die gesamten 200 m Streckenlänge pro Fahrtrichtung berücksichtigt, sobald der Schwellenwert von 100 W einmal auf der Ladestrecke überschritten wurde. Zusätzlich ist der Verbrauch des Elektrobusses mit und ohne Heizlast dargestellt. Der hier dargestellte Verbrauch entspricht dem Gesamtverbrauch über die gesamte Betriebsstrecke und wurde nicht spezifisch für die Überfahrt der Ladestrecke bestimmt.

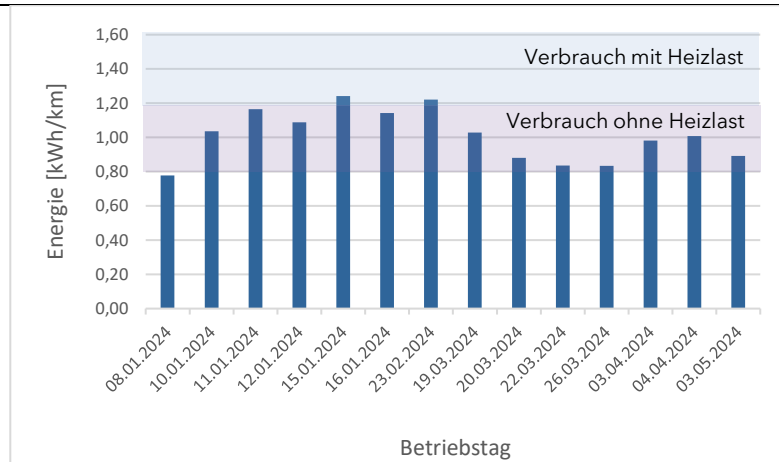


Abbildung 8: Geladene Energie pro km im Linienverkehr auf Wilhelmstraße

Aus Abbildung 8 wird ersichtlich, dass die geladene Energie auf der Ladestrecke an den zur Überfahrt der Ladestrecke aufgewendete Traktionsverbrauch heranreicht.

Maßnahmen zur Leistungssteigerung

1) Einstellung des Kommunikationssignals

Die Boden-Spulen werden über ein Kommunikationssignal (Com-Signal) angesteuert. Dabei sendet der Empfänger im Fahrzeug mithilfe der Com-Spule ein Funksignal mit einer bestimmten Frequenz im Megahertz-Bereich, das von der Boden-Spule empfangen wird. Für einen optimalen Betrieb gibt es zwei Möglichkeiten das Com-Signal anzupassen: Entweder kann das Signal am Receiver verstärkt oder der Empfangswert an der Boden-Spule angepasst werden. Wird das Signal jedoch zu stark verstärkt oder der Grenzwert zu niedrig gesetzt, kann es dazu führen, dass zwei Spulen gleichzeitig angesprochen werden. Dadurch gibt die zweite Boden-Spule Energie ab, die der Receiver nicht aufnehmen kann, was wiederum die Effizienz verringert.

2) Einstellung der Zielleistung und DC-Spannung

Dynamische Energieübertragung unter Zuhilfenahme von Einzelspulen basiert auf einem System mit sich kontinuierlich verändernder magnetischer Kopplung. Diese Veränderung führt zu einer variablen Gegeninduktivität zwischen den beiden Spulen, was sich elektrisch als ein dynamischer Lastwiderstand darstellt. Dieser Lastwiderstand kann vereinfacht als variabler Widerstand in einer Schaltung mit einer Spannungsquelle modelliert werden, sodass die übertragene Leistung näherungsweise gemäß der Beziehung $P = U^2/R$ beschrieben werden kann.

Um die Ausgangsleistung zu kontrollieren, wird die Übertragungsfrequenz gezielt variiert. Dabei wird das System bewusst aus der Resonanz gebracht, wodurch gezielt Reaktanzen eingebaut werden, um virtuell die DC-Spannung zu reduzieren. Die virtuelle Reduktion der DC-Spannung bedeutet, dass die tatsächlich anliegende DC-Spannung nicht direkt verändert wird, sondern dass ihre Auswirkung auf die Leistung durch gezielte Änderung der

Frequenz nachgebildet wird. Somit gibt die tatsächlich eingestellte DC-Spannung den maximalen Betriebspunkt vor und die Zielleistung den Zielparameter für die Leistungsregelung per Frequenz.

3) Messergebnisse aus Busbetrieb

Um den Effekt der Maßnahmen zur Leistungssteigerung auf die gemessene Leistung im Fahrzeug zu bewerten, wurden Kennlinienausschnitte mit der höchsten durchschnittlichen Ladeleistung aus einer Vielzahl analysierter Überfahrten ausgewählt. Mit diesem Vorgehen wurden repräsentative Ausschnitte von jeweils 6 Ladepulsen für eine gute Positionierung von Empfänger- zu Sendespulen näherungsweise bestimmt.

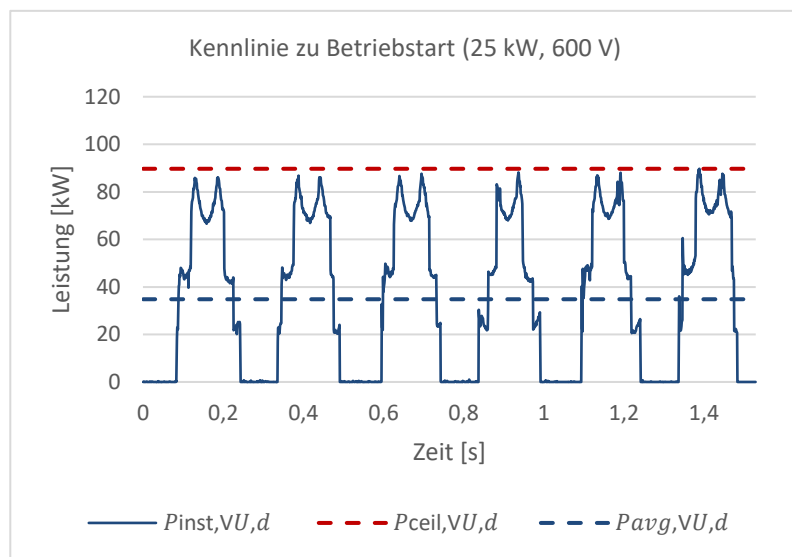


Abbildung 9: Kennlinie DMU 2, 18.5.2023, 08:28:34

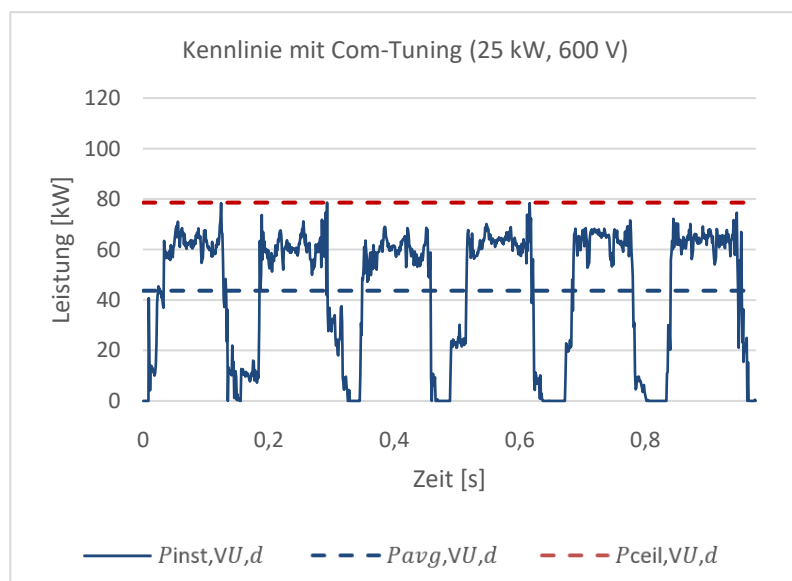


Abbildung 10: Kennlinie DMU 2, 6.12.2023, 15:48:32

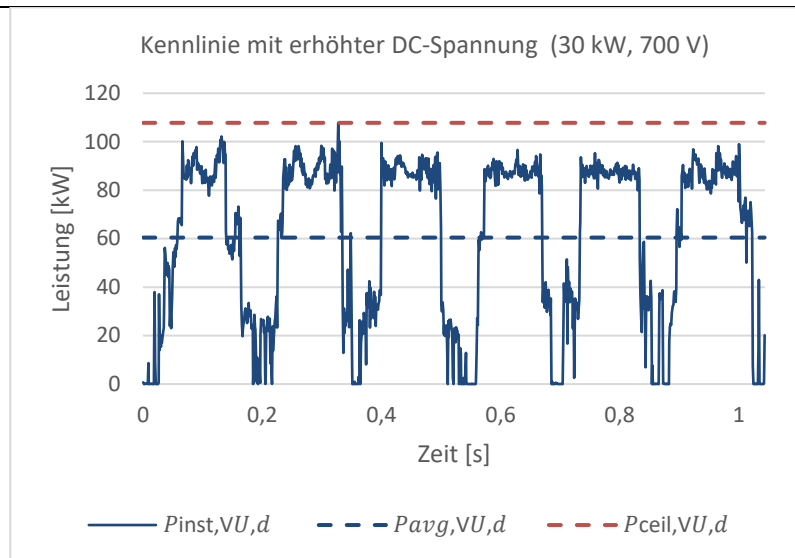


Abbildung 11: Kennlinie DMU2, 12.9.2024, 10:35:01

Maßnahmen zur verbesserten Positionierung

1) Zusammenhang von Positionierung & magnetischer Kopplung

Abbildung 12 zeigt die magnetische Kopplung zwischen Sende- und Empfängerspule in Abhängigkeit von lateralem und longitudinalem Versatz zwischen den Spulen. Ab einer Kopplung von 8% lässt sich induktives Laden unter Berücksichtigung der benötigten Strom- und Feldstärken sinnvoll durchführen.⁹ Je höher der laterale Versatz, desto kleiner ist der zulässige Bereich an longitudinalem Versatz, in dem die kontaktlose Energieübertragung funktioniert. Bei einer Überfahrt mehrerer aufeinanderfolgender Spulen verringert sich infolgedessen bei zunehmendem lateralem Versatz und gleichbleibender Geschwindigkeit die Ladepulsdauer wodurch $P_{avg,VU}^d$ und E_{VU}^d sinkt.

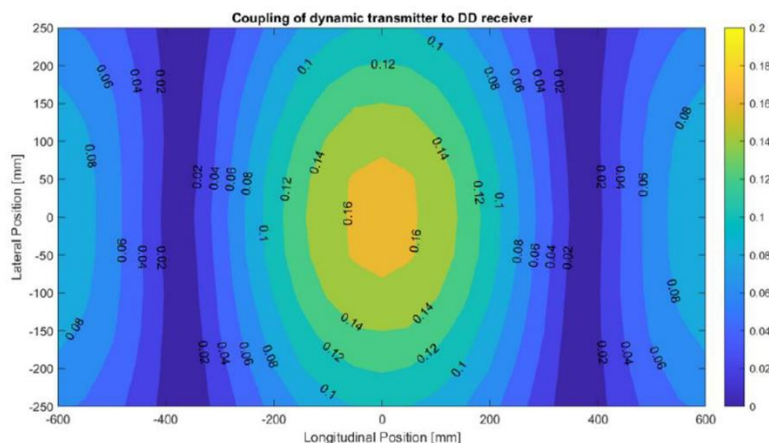


Abbildung 12: Magnetische Kopplung von D-WPT Bodenspule zu DD-Empfängerspule

Auch die Effizienz verändert sich in Abhängigkeit der magnetischen Kopplung bzw. des Versatzes von Empfänger- zu Senderspule. In Abbildung 13 ist basierend auf Formel (8) und (9) der Zusammenhang zwischen Kopplung und Effizienz dargestellt. In einem Bereich von 8 – 16 % magnetischer Kopplung verändert sich

die Effizienz nach diesem Formelzusammenhang um 2 %. Unberücksichtigt bleiben hier erhöhte Verluste in den Wechselrichtern, die durch die frequenzgeregelte Strombegrenzung entstehen.

$$U = k * \sqrt{Q1 * Q2} \quad (8)$$

$$\frac{U^2}{(1 + \sqrt{1 + U^2})^2} \quad (9)$$

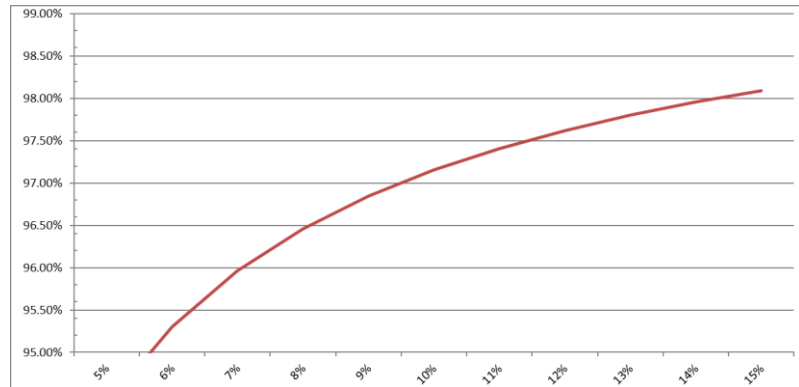


Abbildung 13: Effizienz in Abhängigkeit der magnetischen Kopplung

2) Maßnahme 1: Absolutes Halteverbot

Mehrere Testfahrten und Besichtigungen der Ladestrecke bestätigen ein vermehrtes Halten am Fahrbahnrand was zu einer abschnittsweise verschlechterten Positionierung bzw. zum vollständigen Verlassen der Ladestrecke führt (siehe Abbildung 14) Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..



Abbildung 14: Parkende Autos auf Wilhelmstraße

Vor diesem Hintergrund wurde im Zeitraum vom 2.9.24 bis 31.10.24 ein absolutes Halteverbot in der Wilhelmstraße eingeführt und durch die Stadt mit vermehrten Kontrollen durchgesetzt.

3) Maßnahme 2: LED-Positionierungsanzeige

Zur Erfassung der relativen Position von Empfänger- zu Senderspule sind im Empfänger zusätzlich 7 Spulen (Pos-Spulen) integriert (Abbildung 15). Diese Signale werden als analoge Werte über CAN

⁹ Quelle: Dr. Andreas Wendt, 2025

an ein Steuergerät gesendet, das mithilfe eines Algorithmus die genaue Position berechnet.

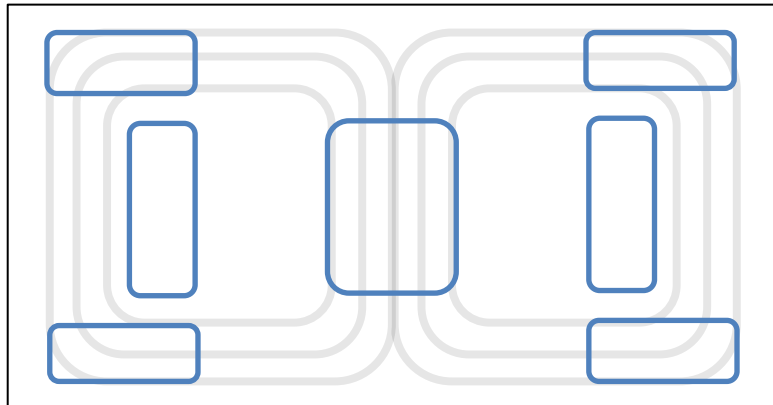


Abbildung 15: Pos-Spulen in Empfänger

Um die Busfahrer bei der optimalen Positionierung über den Spulen während der Fahrt zu unterstützen, wurde eine LED-Anzeige zur Übermittlung der Positionsdaten im Cockpit über dem Lenkrad integriert (Abbildung 16). Diese zeigt den lateralen Versatz zu den Boden-Spulen während des Fahrens an. Befindet sich der Bus optimal über den Boden-Spulen, leuchten grüne LEDs in der Mitte des Bandes. Liegt der Bus leicht links versetzt, erscheinen gelbe LEDs weiter rechts. Ein starker Linksversatz führt dazu, dass rote LEDs am rechten Ende des LED-Bands aufleuchten. So erhält der Fahrer eine visuelle Orientierung, um sich innerhalb des optimalen Korridors über den dynamischen Spulen zu bewegen. Das Konzept wurde vom KIT entwickelt und von Electreon Germany technisch umgesetzt.



Abbildung 16: LED-Positionierungsanzeige

4) Maßnahme 3: Fahrbahnmarkierungen

Um die Busfahrer bei der Positionierung während der Fahrt zu unterstützen, wurden in einem Parallelprojekt in Karlsruhe auf dem Firmengelände der EnBW, Fahrbahnmarkierungen aufgebracht. Um den Markierungen auf der Fahrbahn folgen zu können und dabei die optimale Position zwischen Empfänger- und Sendespule zu treffen

wurden als Gegenstück im Fahrzeug mittig und auf Höhe des Lenkrads Markierungen an der Windschutzscheibe aufgebracht. Nachdem die Fahrbahnmarkierungen im Karlsruher Pilotprojekt zu einer signifikanten Verbesserung der übertragenen Energie geführt haben, wurde das Konzept ebenfalls für das Projekt in Balingen und der Anwendung auf öffentlicher Straße übernommen und getestet. Die Ausgestaltung mit durchgezogenen Linien wurde allerdings vom Verkehrsministerium Baden-Württemberg abgelehnt. Stattdessen wurden Punkte mit einem Durchmesser von 10 cm in einem Abstand von 1,5 m genehmigt (siehe Abbildung 17 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

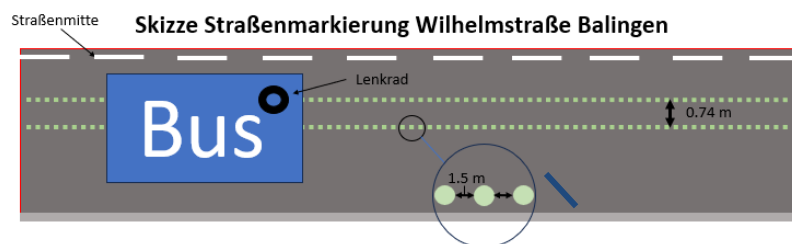


Abbildung 17: Skizze Fahrbahnmarkierung Wilhelmstraße

Einfluss der Maßnahmen auf Leistung & Energie

Ergebnisse Wilhelmstraße

In der folgenden Tabelle werden alle durchgeführten DWPT-Maßnahmen auf dem Streckenabschnitt Wilhelmstraße dargestellt. Für die Auswertung werden dabei nur Betriebstage berücksichtigt, an denen alle MUs auf der Wilhelmstraße aktiv waren. Ziel der Stichprobengröße ist 2220 Sekunden. Im folgenden Diagramm sind die Ergebnisse und damit die durchschnittliche Ladeleistung und die übertragene Energie pro km für alle Maßnahmen dargestellt.

Maßnahme	Ausgewertete Tage im Zeitraum	Stichprobengröße
Linienverkehr Q1Q2 2024 vor Empfängertausch	11.01.2024 - 14.04.2024	3316 Sekunden
Empfängertausch 1	19.04.2025	-
Linienverkehr Q2Q3 2024 nach Empfängertausch	23.04.2024 - 08.08.2024	3336 Sekunden
LED-Anzeige vor Empfängertausch	25.11.2024 - 20.02.2025	3338 Sekunden
Empfängertausch 2	27.02.2025	-
LED-Anzeige nach Empfängertausch mit TDM-Feature	12.04.2025 - 20.04.2025	121 Sekunden
LED-Anzeige nach Empfängertausch ohne TDM-Feature	03.03.2025 - 05.04.2025 und	3343 Sekunden

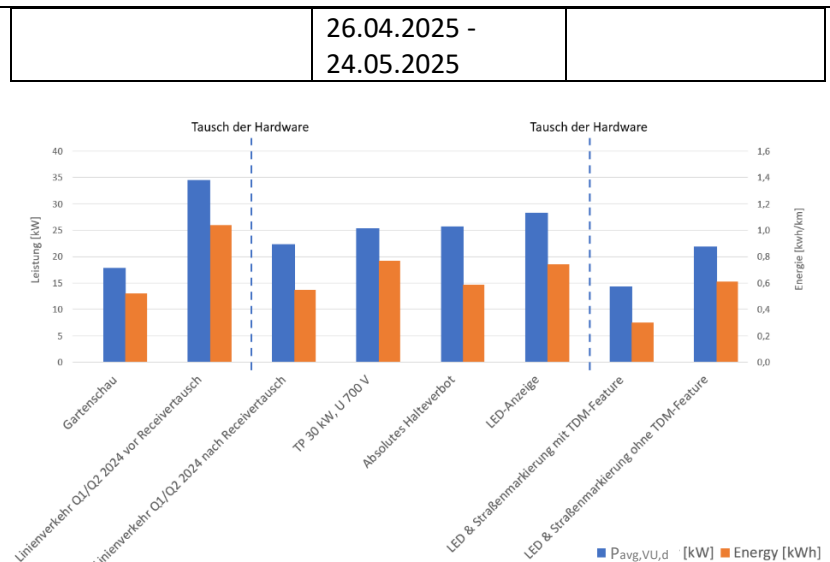


Abbildung 18: Einfluss der Maßnahmen auf Leistung & Energie in CS 1

Ergebnisse Heselwangen

In der folgenden Tabelle werden alle durchgeführten DWPT-Maßnahmen auf dem Streckenabschnitt Heselwangen dargestellt. Für die Auswertung werden dabei nur Betriebstage berücksichtigt, an denen alle Management-Units in Heselwangen aktiv waren. Ziel der Stichprobengröße ist 3300 Sekunden. Die größere Stichprobe im Bereich Heselwangen wird aufgrund der höheren Streckenlänge im Vergleich zur Ladestrecke Wilhelmstraße benötigt. Im folgenden Diagramm sind die Ergebnisse und damit die durchschnittliche Ladeleistung und die übertragene Energie pro km für alle Maßnahmen dargestellt.

Maßnahme	Ausgewertete Tage im Zeitraum	Stichprobengröße
Linienverkehr Q1Q2 2024 vor Empfängertausch	11.01.2024 - 14.04.2024	3316 Sekunden
Empfängertausch 1	19.04.2025	-
Linienverkehr Q2Q3 2024 nach Empfängertausch	23.04.2024 - 08.08.2024	3336 Sekunden
LED-Anzeige vor Empfängertausch	25.11.2024 - 20.02.2025	3338 Sekunden
Empfängertausch 2	27.02.2025	-
LED-Anzeige nach Empfängertausch mit TDM-Feature	12.04.2025 - 20.04.2025	121 Sekunden
LED-Anzeige nach Empfängertausch ohne TDM-Feature	03.03.2025 - 05.04.2025 und 26.04.2025 - 24.05.2025	3343 Sekunden

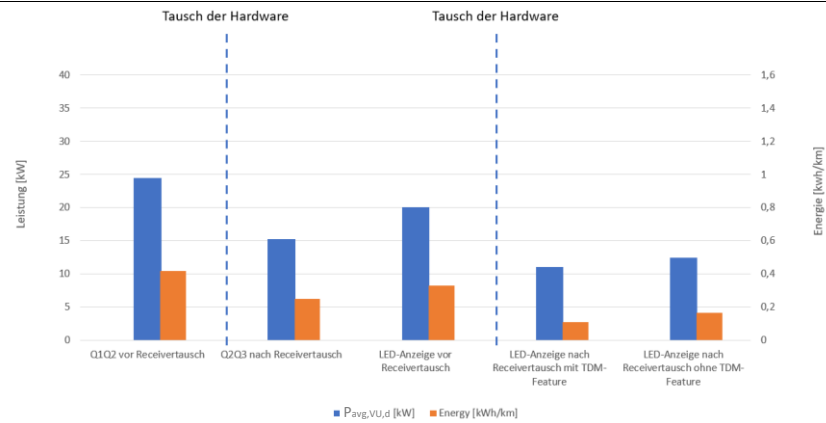
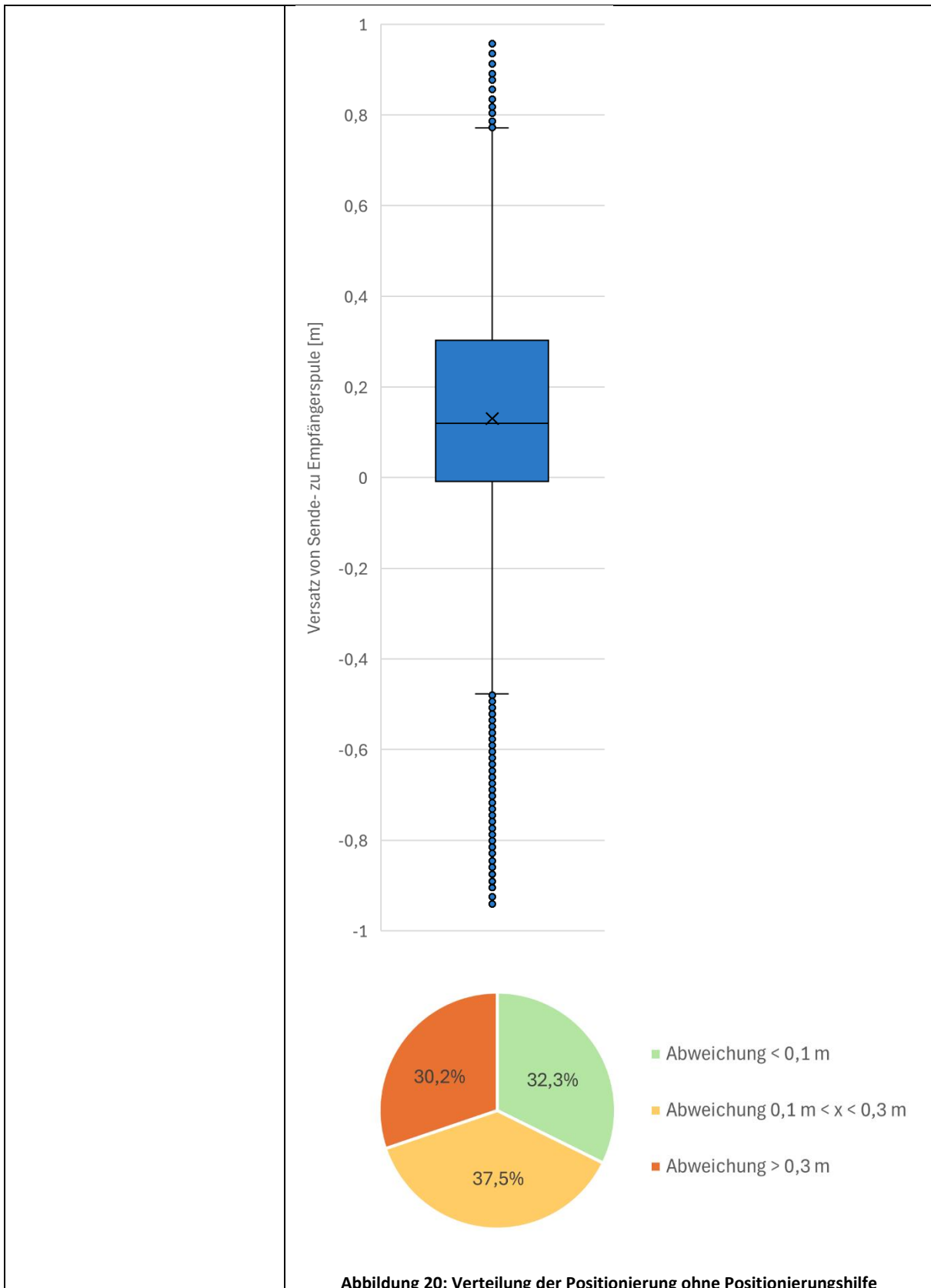


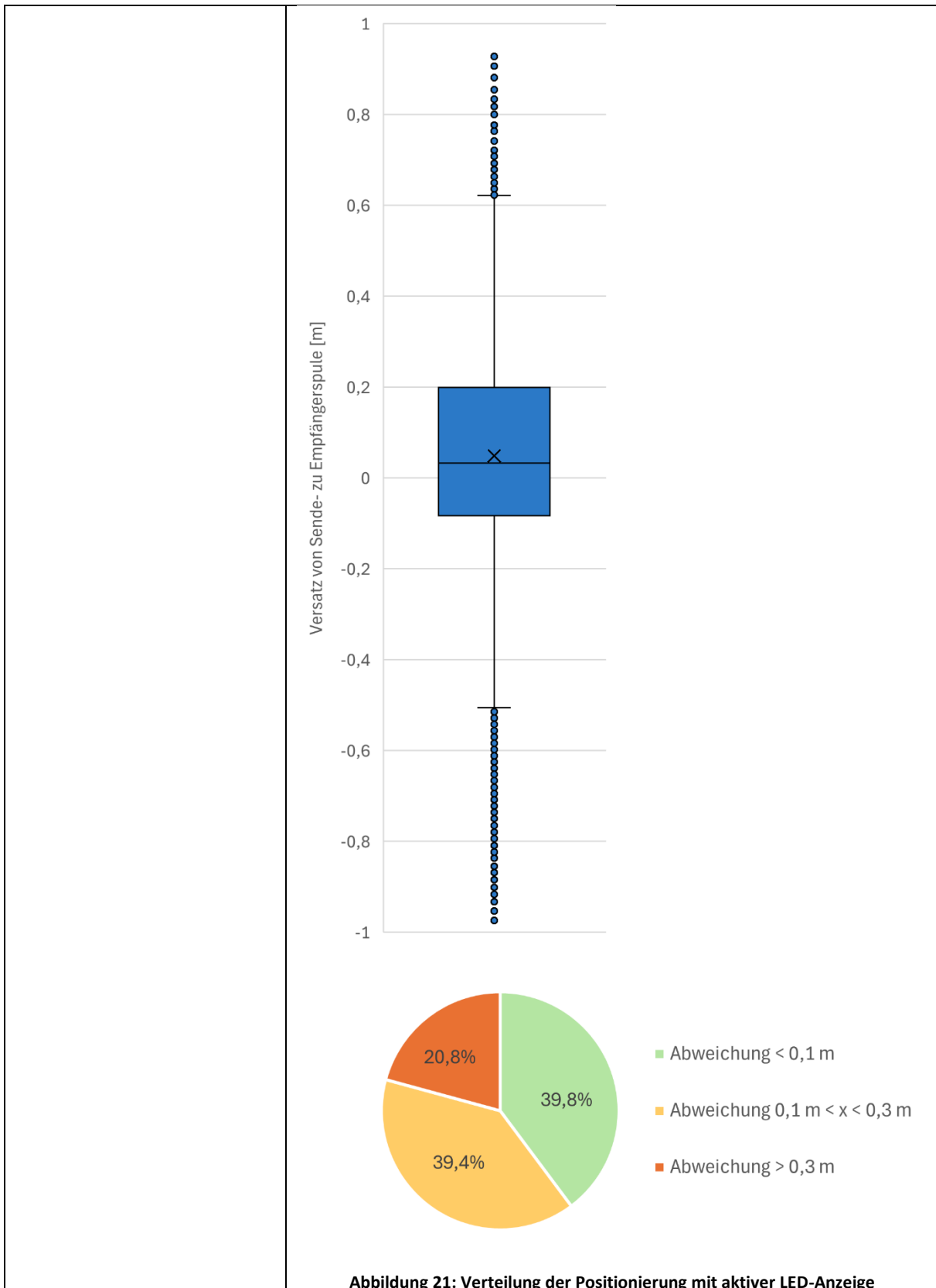
Abbildung 19: Einfluss der Maßnahmen auf Leistung & Energie in CS 2

Aus Abbildung 18 und Abbildung 19 wird ersichtlich, dass der Tausch der fahrzeugseitigen Empfangstechnik in beiden Fällen zu deutlichen Einbußen in der Leistungsfähigkeit geführt hat. Der erste Tausch wurde aufgrund eines Isolationsfehlers im Empfänger durchgeführt. Der zweite Tausch hatte zum Ziel die Effizienz des statischen Ladevorgangs am Busbahnhof durch eine zeitlich versetzte Aktivierung der Segmente (TDM-Feature) zu verbessern. Die Ursache für die Leistungseinbußen sind zum Zeitpunkt der Berichtserstellung nicht bekannt. Seitens des Lieferanten werden hier weitere Nachforschungen angestellt. Weiterhin wird ersichtlich, dass das Halteverbot zwar einen positiven Effekt auf die Leistung allerdings einen negativen Effekt auf die übertragene Energiemenge hat. Das liegt daran, dass aufgrund der verringerten Anzahl an parkenden Autos am Straßenrand, der Bus die Ladestecke mit einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit befährt. Weiterhin ist ein positiver Einfluss der LED-Anzeige auf Leistung und Energie erkennbar.

Einfluss der Maßnahmen auf Positionierung

Im Folgenden wird die Veränderung der Positionierung des Elektrobusses über der Ladeinfrastruktur in Abhängigkeit verschiedener Positionierungsmaßnahmen auf der Wilhelmstraße aufgezeigt. Dabei werden folgende Maßnahmen unterschieden: Keine Positionierungshilfe, aktive LED-Anzeige, Straßenmarkierungen in der Wilhelmstraße und die Kombination aus LED-Anzeige und Straßenmarkierungen. Je Maßnahme wurden dafür 14 bzw. 15 vollständige Tag ausgewertet. Dies entspricht einer Ladezeit von durchschnittlich 7978 Sekunden (ca. 133 Minuten pro Betrachtungszeitraum. Bei positiven Werten liegt ein Versatz von Empfänger zu Sendespule in Richtung Straßenmitte vor, bei negativen Werten ein Versatz in Richtung Bordstein.





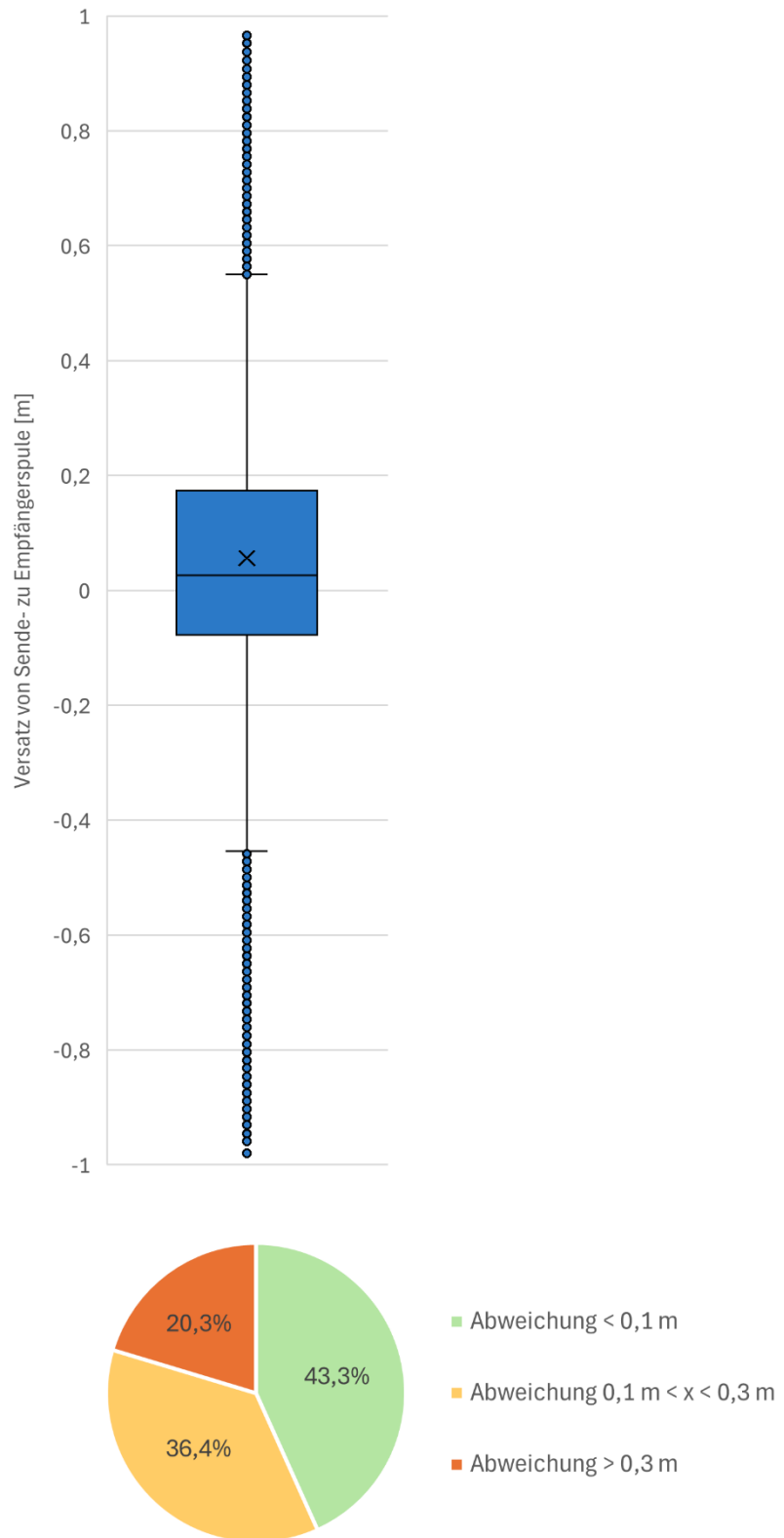


Abbildung 22: Verteilung der Positionierung mit Straßenmarkierung

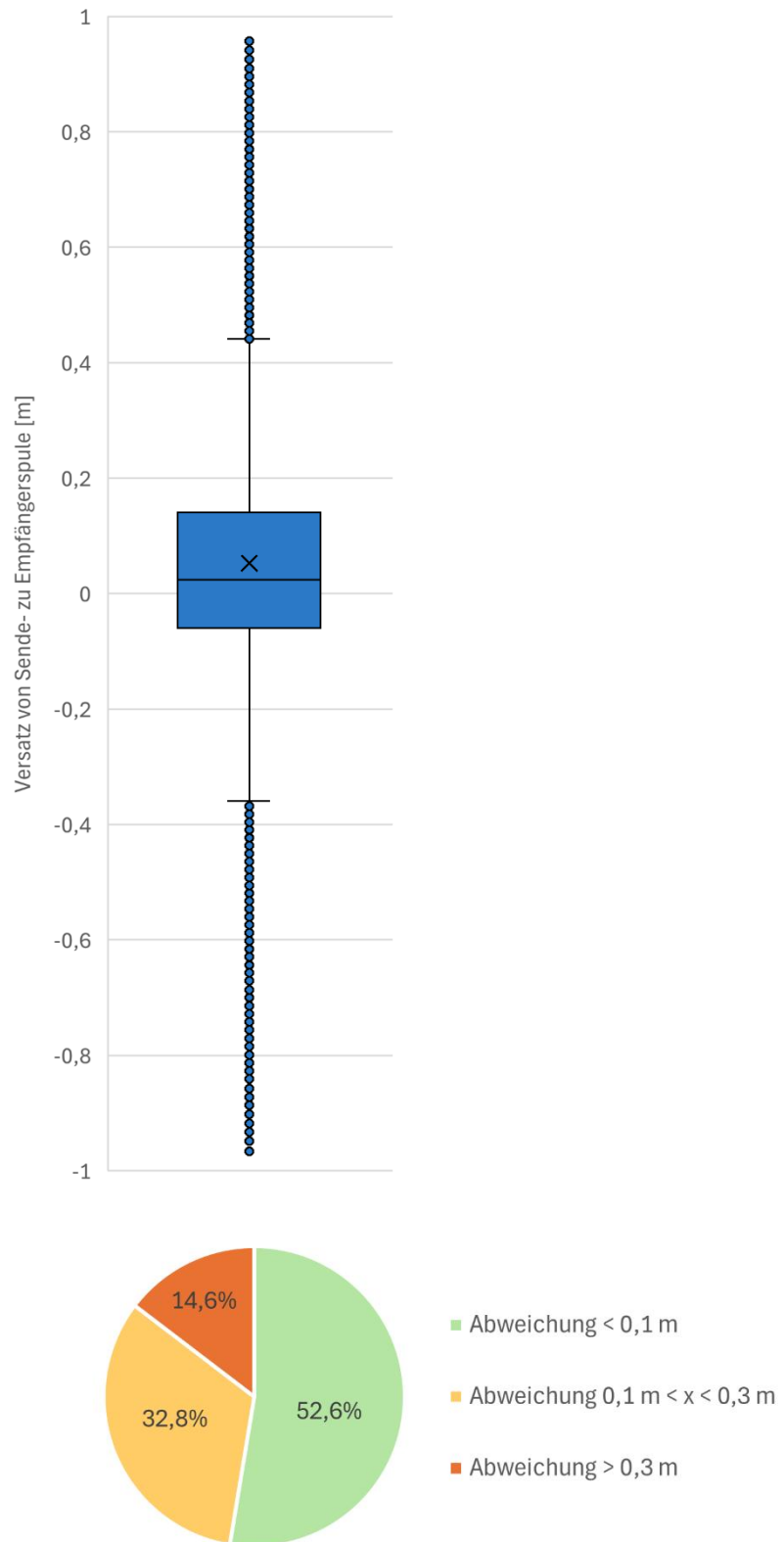


Abbildung 23: Verteilung Positionierung mit aktiver LED-Anzeige und Straßenmarkierung

Die Resultate aus Abbildung 20 bis Abbildung 23 deuten darauf hin, dass sowohl die LED-Anzeige als auch die Straßenmarkierung einzeln positive Effekte auf das Fahrverhalten haben. Die Kombination beider Maßnahmen zeigte den stärksten Effekt und

fürte zu einer signifikanten Steigerung des Anteils im grünen Bereich um über 20 Prozentpunkte im Vergleich zur Kontrollbedingung ohne Hilfen.

Effizienz

1) Effizienz über gesamten Betriebstag

Für die Effizienzmessung wurde am Netzanschlusspunkt VHS (MU 1 + MU 2) eine Netzanalyse vom Modell PQ-Box 300 installiert. Mit der Netzanalyse wurde $P_{inst,Grid}^d(t)$ mit einer Auflösung von 1 Hz gemessen. Die Messung wurde um $t_i = 09:00:21$ gestartet und um $t_j = 21:00:01$ beendet. In diesem Zeitraum wurde eine Ladezeit von insgesamt 739 Sekunden aufgezeichnet.

Tabelle 2: Effizienzmessung über 1 Betriebstag (Laden beim Fahren)

Messgröße	Beschreibung	Wert
$E_{VU}^d(t_i, t_j)$	Summe der geladenen Energie in Fzg. über alle Ladevorgänge	2,66 kWh
$E_{Grid}^d(t_i, t_j)$	Summe der gemessenen Energie an Netzanschluss über alle Ladevorgänge	3,97 kWh
$E_{Base}^d(t_i, t_j)$	Summe aller Sockelverbräuche während Ladevorgang	0,46 kWh
$E_{Grid\ total}^d(t_i, t_j)$	Gesamte gemessene Energie an Netzanschluss an Betriebstag j.	30,83 kWh
$\eta_{AC,DC}^d(t_i, t_j)$	Effizienz von Netzanschlusspunkt bis Batterie	67 %
$\frac{E_{VU}^d(t_i, t_j)}{E_{Grid}^d(t_i, t_j) - E_{Base}^d(t_i, t_j)}$	Effizienz von Netzanschlusspunkt bis Batterie ohne MU-Sockelverbrauch	76 %

Aus Tabelle 2 wird ersichtlich, dass die MU über den Betriebstag hinweg einen hohen Standby-Verbrauch aufweist. Um eine bessere Gesamteffizienz zu erzielen, befindet sich eine Abschaltung der Leistungselektronik während der Totzeiten beim Hersteller in Entwicklung. Eine weitere Verbesserung der Gesamteffizienz würde bei einem kommerziellen Einsatz der Technik durch eine höhere Auslastung mit mehr Fahrzeugen erreicht werden. Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurde noch keine Leistungsmessung in der MU $P_{inst,MU}^d(t)$ aufgezeichnet. Effizienz von Netzanschlusspunkt bis Batterie ohne MU-Sockelverbrauch entspricht näherungsweise der DC-DC Effizienz. $\eta_{AC,DC}^d(t_i, t_j)$ beinhaltet alle Verluste, die durch Nebenaggregate in der MU und in den Kabeln von der MU zum Netzanschlusspunkt auftreten. Durch die Messung über den gesamten Betriebstag wird die Effizienz außerdem von einer suboptimalen Positionierung des Fahrzeugs über der Ladestrecke

negativ beeinflusst. Ein Versatz von Empfängerspulen zur Ladestrecke tritt durch außermittiges Fahren auf der Fahrbahn auf, das durch das normale Lenkverhalten beim Geradeausfahren, sowie durch Ausweichmanöver aufgrund parkender Autos am Straßenrand zu erklären ist. Weiterhin ist anzumerken, dass die Effizienzmessung im Betrieb v, or der Feinabstimmung der Kommunikation stattfand, die in Labormessungen eine Effizienzsteigerung zeigte.

2) Effizienz einzelner Überfahrten

Insgesamt wurden 8 zufällig ausgewählte Überfahrten nach Feinabstimmung der Kommunikation mit einer DC-Spannung von 600 V und Zielleistung von 25 kW und 8 Überfahrten mit einer DC-Spannung von 700 V und Zielleistung von 25 kW betrachtet. Aus den Ergebnissen in Tabelle 3 wird ersichtlich, dass eine Erhöhung der DC-Spannung von 600 auf 700 V und die Erhöhung der Zielleistung von 25 auf 30 W - und somit über den erlaubten Betriebsbereich hinaus - nicht erfolgreich war, weil sie zu einer Effizienzminderung um 28 % geführt hat.

Tabelle 3: Effizienzmessung Überfahrten Wilhelmstraße

Kommunikation abgestimmt P = 25 kW U = 600 V									
Datum	6.12. 2023	8.12. 2023	15.12. 2023	15.12. 2023	15.12. 2023	3.1. 2024	3.1. 2024	3.1. 2024	Ø
$\eta_{DC,DC}^d$	89,6	90,1	88,5	87	92,4	89,4	93,5	91,7	90,2
Kommunikation abgestimmt P = 30 kW U = 700 V									
Datum	26.8. 2024	29.8. 2024	10.9. 2024	12.11. 2024	12.11. 2024	12.11. 2024	17.2. 2024	17.2. 2024	Ø
$\eta_{DC,DC}^d$	63,5	58,3	63,5	66	72,9	65,6	70,8	60,6	65,2

Ausfallrate der Technik

Zur Inbetriebnahme der Technik wurde jede installierte Bodenspule inklusive zugehörigem Hochfrequenzumrichter mit einer Empfängerspule getestet hinsichtlich Kommunikationsfähigkeit und Energieübertragung. Dieser Test wurde kurz vor Projektende am 16.05.2025 wiederholt. Die Ergebnisse sind Tabelle 4 zu entnehmen. Die Gründe der deutlich erhöhten Ausfallrate in CS 2 sind zum Zeitpunkt der Berichtserstellung unklar. Die deutliche Abweichung zwischen den 2 Ladestrecken deutet auf einen Produktionsfehler beim Hersteller der Spulen hin. Zur abschließenden Beurteilung bedarf es hier weiterer Untersuchungen. Weiterhin ist festzustellen, dass die Bodenspulen der stationären Ladesysteme (Haltestelle, Busdepot), die von einem anderen Hersteller gefertigt wurden, keine Ausfälle im Rahmen der Projektlaufzeit zu verzeichnen hatten.

Tabelle 4: Ausfallrate Spulen Ladestrecken

Ladestrecke	Anzahl verbaute Spulen	Anzahl betriebsfähige Spulen zu Inbetriebnahme	Anzahl betriebsfähige Spulen zu Projektende	Ausfallrate
Wilhelmstr. (CS 1)	239	234	213	11 %
Heselwangen (CS 2)	348	332	208	39 %

Kontaktloses Laden im Stand

1) Leistung & Effizienz bei optimaler Positionierung

Für die Effizienzmessung wurde am Netzanschlusspunkt an der Haltestelle Charlottenstraße eine Netzanalyse vom Modell PQ-Box 300 installiert. Das Versuchsfahrzeug wurde entsprechend der Abbildung 24 auf der Haltestelle positioniert. Diese Position des Busses wurde anhand der Planungsunterlagen und durch Abgleich der gemessenen DC-DC Effizienz aus der Electreon-Cloud vor Ort ermittelt.

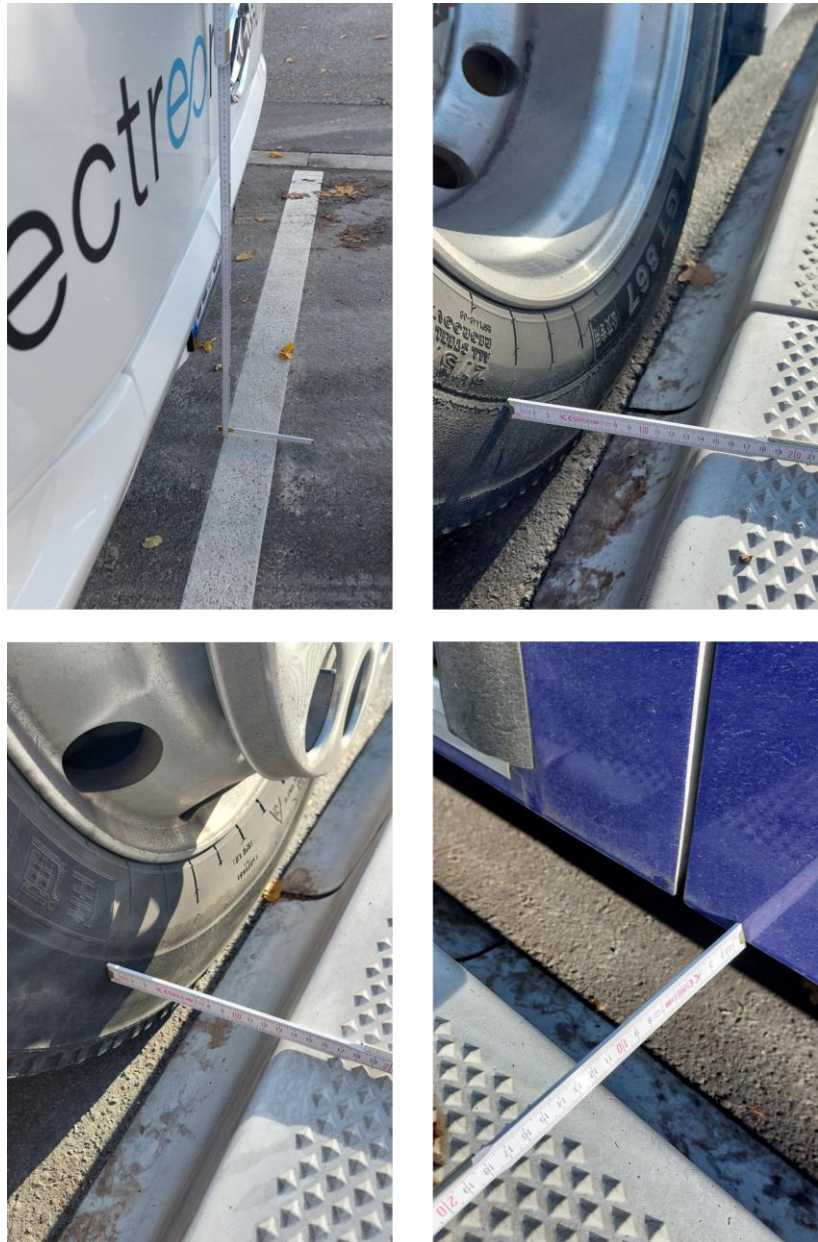
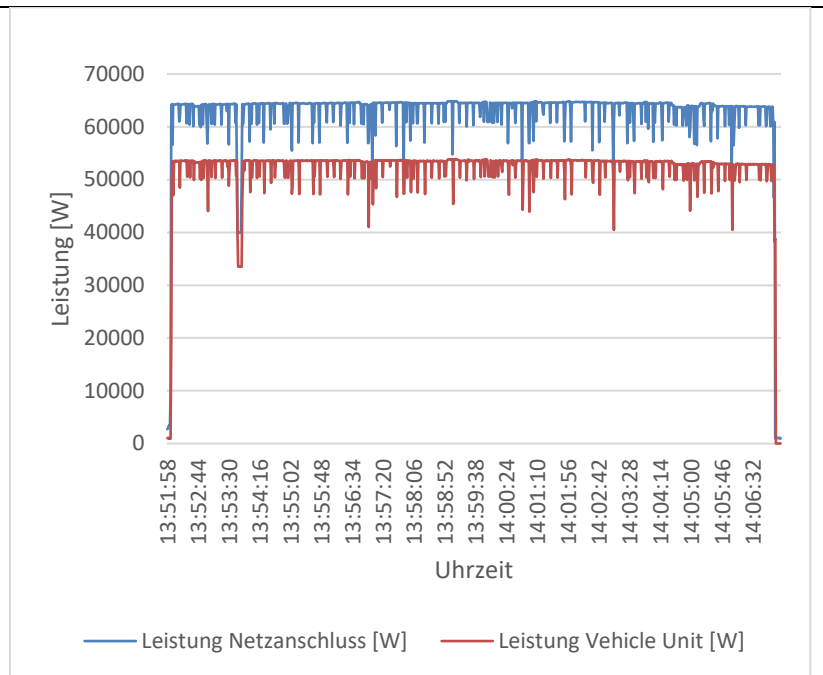


Abbildung 24: Position an Haltestelle Charlottenstraße für Leistungs- und Effizienzmessung

Für die Messung wurde der Bus am über einen Zeitraum von 15 Minuten zwischen $t_1 = 13:51:58 \text{ Uhr}$ und $t_2 = 14:06:57 \text{ Uhr}$ geladen.



$P_{avg,Grid}^s(t_1, t_2)$	62,40 kW
$P_{avg,MU}^s(t_1, t_2)$	58,05 kW
$P_{avg,VU}^d(t_1, t_2)$	51,79 kW
$\eta_{DC,DC}^s(t_1, t_2)$	89,22 %
$\eta_{AC,DC}^s(t_1, t_2)$	83,0 %

Abbildung 25: Leistungs- und Effizienzmessung an Haltestelle Charlottenstraße
15.11.2023

2) Positionierung an der Haltestelle

An der Haltestelle Charlottenstraße wurde ein Lidarsensor installiert, um die Positionierung des Busses an der Haltestelle aufzuzeichnen. Es wurden 351 Haltevorgänge an der Haltestelle Charlottenstraße im Zeitraum vom 4.9.2023 bis 24.9.2023 aufgezeichnet. Zur Positionierungshilfe für die Busfahrer wurde eine Haltelinie auf die Haltestelle aufgebracht, an der sie den Bus in Fahrrichtung über den rechten Außenspiegel ausrichten können.

Nur 13 % der Haltevorgänge wiesen einen Versatz zur Referenzposition in x- **UND** y-Richtung von < 100 mm auf. Am häufigsten wurde der Ladekorridor (+/- 100 mm Versatz zu Referenzposition) in x-Richtung (Fahrrichtung) verfehlt. Nur bei 28 % der Haltevorgängen wurde die Haltemarkierung beachtet und in x-Richtung im Ladekorridor angehalten.



Abbildung 26: Bushaltestelle Charlottenstraße: Lidarsensor und Haltelinie

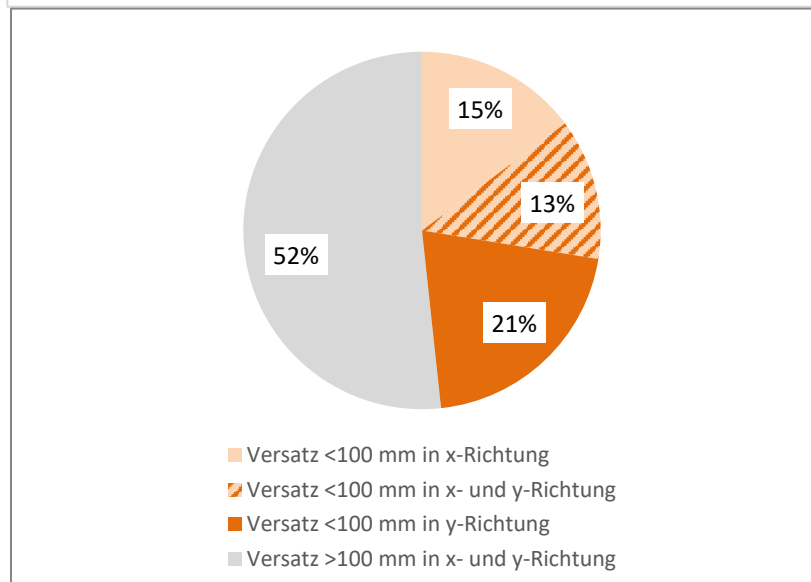
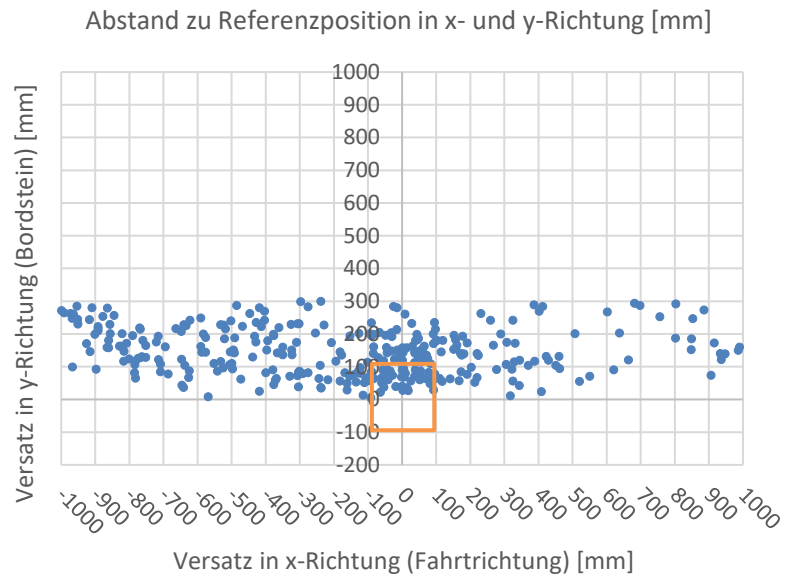


Abbildung 27: Häufigkeitsverteilung Haltevorgänge Charlottenstraße

An der Haltestelle Zentrum Neige wurde ein Lidarsensor installiert, um die Positionierung des Buses an der Haltestelle aufzuzeichnen. Es wurden 335 Haltevorgänge an der Haltestelle Zentrum Neige im Zeitraum vom 9.9.2024 – 19.11.2024 aufgezeichnet. Als Positionierungshilfe für die Busfahrer wurde neben der Linie auf der Fahrbahn auch eine Linie auf der Haltestelle und als Gegenstück eine Linie im Einstiegsbereich des Buses aufgebracht. Befinden sich beide Linien in der Flucht, ist der Bus optimal in Fahrtrichtung ausgerichtet.



Abbildung 28: Bushaltestelle Zentrum Neige: Lidarsensor und Haltelinie

Nur 4 % der Haltevorgänge wiesen einen Versatz zur Referenzposition in x- UND y-Richtung von < 100 mm auf. Am häufigsten wurde der Ladekorridor (+/- 100 mm Versatz zu Referenzposition) in x-Richtung (Fahrtrichtung) verfehlt. Nur bei 22 % der Haltevorgängen wurde die Haltemarkierung beachtet und in x-Richtung im Ladekorridor angehalten. Die zusätzliche Positionierungslinie in der Tür hat somit zu keiner Verbesserung hinsichtlich Positionierung über den Spulen geführt.

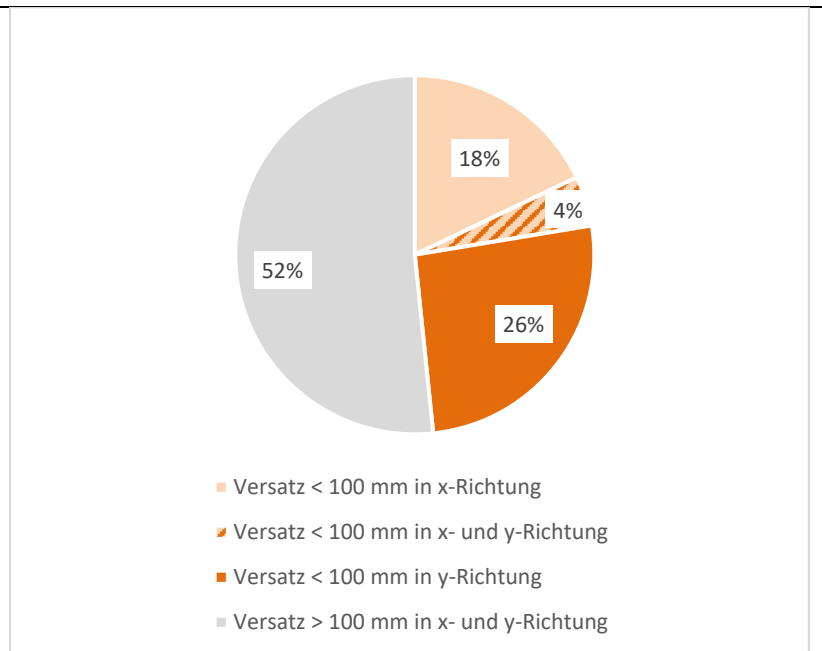


Abbildung 29: Häufigkeitsverteilung Haltevorgänge Zentrum Neige

Regulatorik

Die induktive Ladetechnik wird von der BNetzA derzeit als Versuchsfunk-Anlage gewertet, wofür von EnBW jeweils jährliche Genehmigungen eingeholt wurden und werden. Laut BNetzA ist eine Änderung der internen Vorschriften geplant, womit die Bewertung von induktiver Ladetechnik als Versuchsfunk angesichts der erwarteten Verbreitung dann später entfallen könnte. Die Bundesnetzagentur (BNetzA) schloss eine letztendlich endgültige mögliche Einstufung des betrachteten WPT-Systems in Balingen als induktive Funkanwendung im Sinne des geltenden Frequenzplans (FreqP) Stand März 2022 Teil 7 – Sonstige Funkanwendungen und andere Anwendungen elektromagnetischer Wellen – nicht aus. Gemäß § 91 des Telekommunikationsgesetzes (TKG) wäre im Frequenzbereich von 8,3 kHz bis 3000 GHz eine Frequenzzuteilung damit dann verpflichtend. Eine Nutzung bestehender Allgemeinzuteilungen – wie etwa für induktive Funkanwendungen (Vfg. 109/2021) oder ISM-Anwendungen (Vfg. 76/2003) – sei für das WPT-System nicht möglich, da die darin definierten Grenzwerte für die zulässige magnetische Feldstärke (72 dB μ A/m in 10 m Entfernung) überschritten würden bzw. die Betriebsfrequenz von 85 kHz nicht durch entsprechende Grenzwerte abgedeckt sei. Um die Erprobung des Regelverkehrs in Balingen nicht zu gefährden, wurde den Vorgaben der BNetzA ohne weitere Prüfung der Rechtslage entsprochen. Obwohl die Norm IEC 61980-1 (VDE 0122-10-1) auf den Grenzwerten der CISPR 11 (EN 55011) basiert, welche deutlich höhere Feldstärken (bis zu 102,8 dB μ A/m in 10 m Entfernung) zulassen, beziehen sich diese wohl lediglich auf ungewollte Aussendungen. Das TKG hingegen fordert Grenzwerte für gewollte Aussendungen. Nach Auffassung der BNetzA ist die CISPR-Norm hier vorgeprescht – ihre Einhaltung ermögliche zwar die Vermarktung, nicht jedoch den anschließenden rechtskonformen Betrieb des Systems. Aus Sicht der BNetzA ist die

	<p>Einhaltung der in der VDE-Norm festgelegten Grenzwerte daher nicht ausreichend. Ohne eine offizielle Frequenzuteilung wäre der Betrieb des WPT-Systems in Balingen als Verstoß gegen das TKG zu werten und folglich als Ordnungswidrigkeit zu ahnden. Aktuell ist daher ein Antrag auf Versuchsfunk erforderlich, um den Betrieb gemäß den Vorgaben der BNetzA durchführen zu können. Parallel dazu laufen technische Verträglichkeitsstudien durch das CEPT Project Team SE 24, mit dem Ziel, zukünftig akzeptierte Grenzwerte zu definieren, die Grundlage für eine Allgemeinuteilung für WPT-Systeme bilden könnten. Im Rahmen des Projekts wurde daher ein entsprechender Antrag auf Versuchsfunk gestellt.</p> <p>Störungen im Betrieb</p> <p>Im Betrieb der Technik traten verschiedene Störungen und Fehlerbilder auf. Ein Großteil dieser anfänglichen Störungen konnte im Laufe des Betriebs dauerhaft behoben werden. So kam es bereits beim Einbau zu Beschädigungen einzelner Spulen, und auch nach dem Einbau fielen weitere Spulen aus. In den Schaltschränken wurden Temperaturprobleme festgestellt, insbesondere erwies sich das verwendete APFC-System als ungeeignet für längere Ladezeiten, was mit dem Einsatz von Brückengleichrichtern (die eine geringere Abwärme aufweisen) behoben werden konnte. Zusätzlich war das mobile Internet häufig instabil, wodurch ein Remote-Neustart der Systeme teilweise nicht möglich war; der Einsatz von leitungsgebundenem Internet löste dieses Problem vollständig. Zwei Receiver zeigten Isolationsfehler (durch Tausch behoben), zudem traten vereinzelt Überstromereignisse auf (durch Softwareupdates behoben). Am Busbahnhof wurde eine auffällig schlechte Effizienz des Systems festgestellt, für die bislang keine technische Erklärung gefunden werden konnte. Auch Untersuchungen von Bohrkernproben an mehreren Haltestellen lieferten keine Hinweise auf Ursachen für die reduzierte Effizienz. Insbesondere konnten keine Unterschiede in der Materialzusammensetzung des Asphalts festgestellt werden; ein erhöhter Anteil metallischer Komponenten konnte ausgeschlossen werden. Ohne die genaue Ursache benennen zu können, kann die noch geringe Erfahrung einzelner Baufirmen mit WPT-Technik als mitursächlich vermutet werden.</p> <p>Betriebsstrategie</p> <p>Der Bus wurde nach Beendigung der Gartenschau und dem damit verbundenen Shuttlebetrieb auf 2 Buslinien im Wechsel beinahe täglich eingesetzt. Im Linienbetrieb erreichte der Bus Tagesfahrleistungen von über 300 km. Die benötigte Energie konnte hierbei zum Großteil über die stationären WPT-Ladesysteme an Haltestellen und im Busdepot sowie über die Ladestrecken gedeckt werden. Für zwischenzeitliche Ladevorgänge zur Mittagszeit wurde im Busdepot allerdings gelegentlich nach wie vor per Kabel geladen, da die Ladeleistung von 50 kW des Induktivsystems in den Wintermonaten nicht ausreichte, um die benötigte Energie in der kurzen Fahrzeitunterbrechung für den restlichen Betriebstag bereitzustellen.</p>
--	--

	<p>Abschlussfazit & Ausblick</p> <p>In Balingen wurde im Rahmen des Vorhabens ELINA ein WPT-System zum Laden während der Fahrt und an der Haltestelle installiert und ist seit Mai 2023 erfolgreich in Betrieb. Auch wenn die Planungs- und Installationsprozesse von Wireless Electric Road Systems (wERS) noch Verbesserungspotenziale aufweisen, bleiben die Rahmenbedingungen für den ausgedehnten Aufbau von induktiven Ladestrecken im städtischen Raum schwierig. Die Installationskosten lassen sich vornehmlich durch Prozessoptimierungen und den Wettbewerb zwischen Straßenbauunternehmen senken. Außerdem sollte der Sanierungsbedarf städtischer Straßen bei der Planung von induktiver Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden. Um den hohen Straßenbaukosten zu begegnen, ist auch die ausschließliche Elektrifizierung von Haltepunkten denkbar. Hierbei ist allerdings zu bedenken, dass die Infrastruktur dann perspektivisch nicht von anderen Fahrzeugklassen mitgenutzt werden kann, sondern dem ÖPNV vorbehalten ist. Das technisch mögliche Potential des kontaktlosen Ladens wird in der Praxis momentan noch nicht ausgeschöpft, da die ideale Positionierung von Fahrzeug zur Ladeinfrastruktur häufig nicht erreicht wird. Bei Überfahrt der Ladestrecke wurde der für eine optimale Energieübertragung maximal zulässige Versatz von Fahrzeug zu Bodenspulen trotz visueller Positionierungshilfen und der Einführung eines absoluten Halteverbots vorwiegend überschritten. Hier wäre eine weitergehende Schulung und Sensibilisierung des Fahrpersonals zielführend, was aber während des Projekts bewusst nicht durchgeführt wurde, um die Akzeptanz und Wirksamkeit der genutzten Hilfsmittel möglichst unbeeinflusst beurteilen zu können.</p> <p>Für eine kommerzielle Perspektive der Ladetechnik bedarf es einer deutlichen Steigerung der Ladeleistung (wie sie bereits von anderen Projekten berichtet wird), einer Verbesserung der Nutzerfreundlichkeit, sowie der Entwicklung einer Lösung zur eichrechtskonformen Messung und Abrechnung der geladenen Energie. Letzteres wird im Anschlussprojekt EMADI unter Nutzung der bereits bestehenden Ladeinfrastruktur in Balingen entwickelt.</p>
<p>Arbeitspaket 6: Klima- und Energiesystemrückwirkungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aufbereitete Lastgängen (aus Infrastrukturbetrieb in Elina, WINNER 1, herkömmliche Schnellladeinfrastruktur) • Gemeinschaftliche Bewertung der Netzbelastung mit Experten von EnBW und Tochterunternehmen 	<p>Netzurückwirkungen</p> <p>Am stationären induktiven Ladesystem im Busdepot der Firma Maas Reisen wurde aufgrund der dort auftretenden langen Ladezeiten eine Anpassung der Ladetechnik vorgenommen. Im Unterschied zu den weiteren Ladeeinrichtungen entlang der Ladestrecken und an Haltestellen, bei denen Active Power Factor Correction (APFC) zum Einsatz kommt, wurde im Busdepot ein Brückengleichrichter installiert. Diese Entscheidung wurde getroffen, da APFC-Systeme bei langen Ladezeiten von über 15 Minuten temperaturbedingt an ihre Grenzen stoßen und nicht zuverlässig betrieben werden können. Der Einsatz eines Brückengleichrichters bringt jedoch potenzielle Herausforderungen mit sich, insbesondere in Bezug auf mögliche Netzurückwirkungen. Um diese Risiken zu bewerten, wurde eine umfassende Power-Quality-Messung (PQ-Messung) über einen Zeitraum von zwölf Wochen am Busdepot durchgeführt. Ziel dieser</p>

Netze BW, der Stadt Balingen und der FfE

Untersuchung war es, mögliche Störungen im Netz durch den Betrieb des Brückengleichrichters zu identifizieren. Aus Abbildung 30 wird ersichtlich, dass die Netzurückwirkungen im Rahmen der Norm EN 50160 liegen und somit unbedenklich sind. In Abbildung 31 ist exemplarisch die detaillierte Auswertung einer Woche innerhalb des Betrachtungszeitraums dargestellt.

Datensatz		2.KW. 2025	3.KW. 2025	4.KW. 2025	5.KW. 2025	6.KW. 2025	7.KW. 2025	8.KW. 2025	9.KW. 2025
ELINA_1/ NSP	Erfüllt	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Überspg.	0	0	0	0	0	0	0	0
	Unterspg.	0	0	0	0	0	0	0	0

Datensatz		10.KW. 2025	11.KW. 2025	12.KW. 2025	13.KW. 2025
ELINA_1/ NSP	Erfüllt	✓	✓	✓	✓
	Überspg.	0	0	0	0
	Unterspg.	0	0	0	0

Abbildung 30: Ergebnis Netzanalyse im Busdepot

	Messpunkte	Bedingungen nach EN50160	Konformität [%]	Erfüllt
Frequenz 1	60480	100% der Messpunkte in einer Woche $47\text{Hz} < f < 52\text{Hz}$	100,00	Ja
Frequenz 2	60480	99,5% der Messpunkte in einer Woche $49,5\text{Hz} < f < 50,5\text{Hz}$	100,00	Ja
Spannung 1	Phase 1 1008	95% der Messpunkte in einer Woche $90\% < U_n < 110\%$	100,00	Ja
	Phase 2 1008		100,00	Ja
	Phase 3 1008		100,00	Ja
Spannung 2	Phase 1 1008	100% der Messpunkte in einer Woche $85\% < U_n < 110\%$	100,00	Ja
	Phase 2 1008		100,00	Ja
	Phase 3 1008		100,00	Ja
Unsymmetrie	1008	95% der Messpunkte in einer Woche $u_{nb} < 2\%$	100,00	Ja
Harmonische-spannung	Phase 1 1008	Tabellen "Harmonische Grenzwerte"	97,91	Ja
	Phase 2 1008		100,00	Ja
	Phase 3 1008		100,00	Ja
THD	Phase 1 1008	95% der Messpunkte in einer Woche $\text{THD} < 8\%$	100,00	Ja
	Phase 2 1008		100,00	Ja
	Phase 3 1008		100,00	Ja
Plt	Phase 1 1008	95% der Messpunkte in einer Woche $\text{PLT} < 1$	100,00	Ja
	Phase 2 1008		100,00	Ja
	Phase 3 1008		100,00	Ja

Harmonische Grenzwerte Phase 1

Ungerade Harmonische						Gerade Harmonische		
Kein Vielfaches von 3			Vielfaches von 3					
H #	Grenze *	Konformität [%]	H #	Grenze *	Konformität [%]	H #	Grenze *	Konformität [%]
5	6,0 %	100,00	3	5,0 %	100,00	2	2,0 %	100,00
7	5,0 %	100,00	9	1,5 %	100,00	4	1,0 %	100,00
11	3,5 %	100,00	15	1,0 %	100,00	6	0,5 %	100,00
13	3,0 %	100,00	21	0,75 %	97,91	8	0,5 %	100,00
17	2,0 %	100,00				10	0,5 %	100,00
19	1,5 %	100,00				12	0,5 %	100,00
23	1,5 %	100,00				14	0,5 %	100,00
25	1,5 %	100,00				16	0,5 %	100,00

Harmonische Grenzwerte Phase 2

Ungerade Harmonische						Gerade Harmonische		
Kein Vielfaches von 3			Vielfaches von 3					
H #	Grenze *	Konformität [%]	H #	Grenze *	Konformität [%]	H #	Grenze *	Konformität [%]
5	6,0 %	100,00	3	5,0 %	100,00	2	2,0 %	100,00
7	5,0 %	100,00	9	1,5 %	100,00	4	1,0 %	100,00
11	3,5 %	100,00	15	1,0 %	100,00	6	0,5 %	100,00
13	3,0 %	100,00	21	0,75 %	100,00	8	0,5 %	100,00
17	2,0 %	100,00				10	0,5 %	100,00
19	1,5 %	100,00				12	0,5 %	100,00
23	1,5 %	100,00				14	0,5 %	100,00
25	1,5 %	100,00				16	0,5 %	100,00

Harmonische Grenzwerte Phase 3

Ungerade Harmonische						Gerade Harmonische		
Kein Vielfaches von 3			Vielfaches von 3					
H #	Grenze *	Konformität [%]	H #	Grenze *	Konformität [%]	H #	Grenze *	Konformität [%]
5	6,0 %	100,00	3	5,0 %	100,00	2	2,0 %	100,00
7	5,0 %	100,00	9	1,5 %	100,00	4	1,0 %	100,00
11	3,5 %	100,00	15	1,0 %	100,00	6	0,5 %	100,00
13	3,0 %	100,00	21	0,75 %	100,00	8	0,5 %	100,00
17	2,0 %	100,00				10	0,5 %	100,00
19	1,5 %	100,00				12	0,5 %	100,00
23	1,5 %	100,00				14	0,5 %	100,00
25	1,5 %	100,00				16	0,5 %	100,00

* Grenze(95% der Messpunkte in einer Woche)

Spannungseignisse: Es wurden keine Ereignisse gefunden.

Abbildung 31: Auszug Netzanalyse 03.03.2025 - 09.03.2025

<p>Arbeitspaket 7: Projektkoordination</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliche Planung, Steuerung und Kontrolle des Projektverlaufs • Öffentlichkeitsarbeit: Veröffentlichungen, Interviews, Präsentationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Veröffentlichungen (siehe Kapitel 2.6) • 2 Pressemitteilungen (u.a. aufgenommen in electrive, Auto Motor und Sport,..) • Bericht in ZDF • Bericht in regionalem Format „im Ländle“ • Zahlreiche Beiträge in Lokalpresse
---	---

Tabelle 2.1.2: Verwendung Teilvorhaben Stadtwerke Balingen

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
<p>Arbeitspaket 4: Betrieb von Bus- und Stromnetz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der DWPT-Busbetrieb ist sicher und zuverlässig erfolgt • Die Stadt Balingen hat umfangreiche Betriebserfahrungen, die zur Beurteilung des zukünftigen Einsatzes der DWPT-Technik und zum ggf. erfolgenden Weiterbetrieb der bestehenden Technik nach Projektende genutzt werden können 	<p>Das Arbeitspaket 4 befasste sich mit der praktischen Durchführung des Busbetriebs unter realen Bedingungen im Stadtgebiet Balingen. Ziel war es, die Einbindung des induktiv ladenden Elektrobusses in den regulären ÖPNV zu testen, organisatorische Abläufe zu bewerten und Rückschlüsse auf die Akzeptanz des Systems bei Fahrern und Fahrgästen zu ziehen.</p> <p>Ein wichtiger Schritt vor der Inbetriebnahme war die Schulung des Fahrpersonals. Hierbei wurden die Fahrer in die Funktionsweise des induktiven Ladesystems, die erforderliche Genauigkeit beim Anfahren der Ladepunkte sowie in sicherheitsrelevante Aspekte eingewiesen. Zu Beginn des Betriebs standen jedoch noch keine technischen Assistenzsysteme zur Verfügung, sodass die Positionierung ausschließlich auf Grundlage der Schulung und der Aufmerksamkeit der Fahrer erfolgen musste. In der Praxis erwies sich dies als herausfordernd: Während einige Fahrer die Vorgaben konsequent umsetzten, zeigten andere nur eine geringe Motivation. Dies führte zu wiederholten Abweichungen und damit zu eingeschränkter Ladeeffizienz.</p> <p>Die praktische Umsetzung gliederte sich in zwei Phasen. In der ersten Phase während der Landesgartenschau 2023 (05. Mai – 24. September) wurde der Bus im Shuttleverkehr eingesetzt. Die Route verband die Haltestellen an der Charlottenstraße und am Messengelände und führte dabei über die in der Wilhelmstraße installierte Ladeachse. Der Betrieb erfolgte an allen Veranstaltungstagen in den Kernzeiten zwischen Vormittag und frühem Abend. Die Streckenführung ist in Abbildung 32 dargestellt.</p>

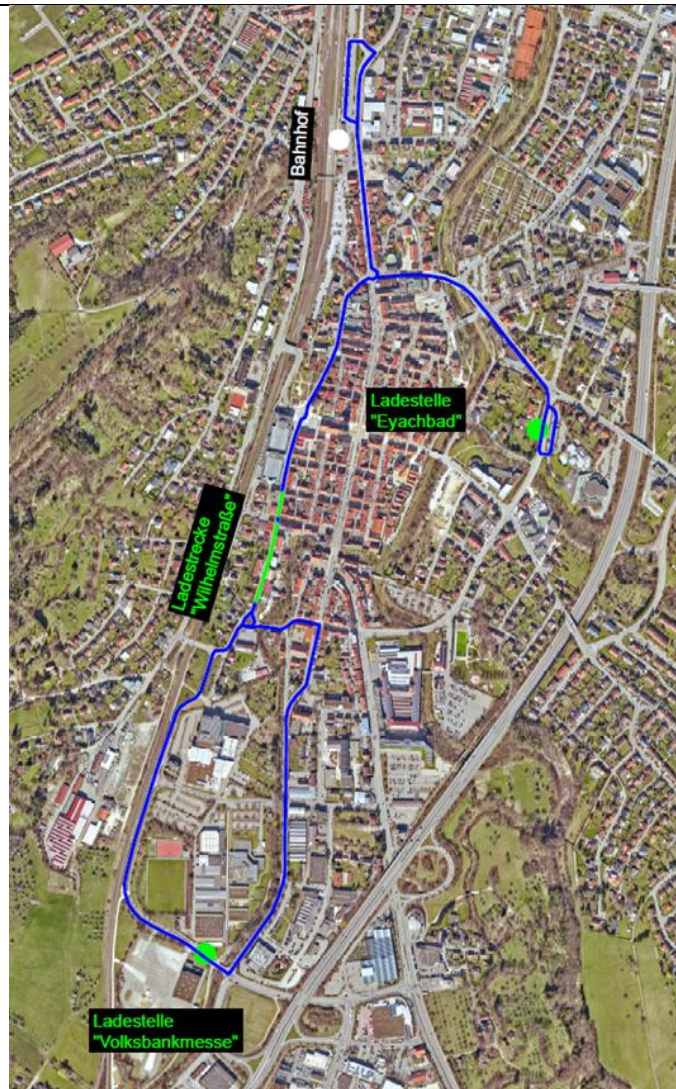
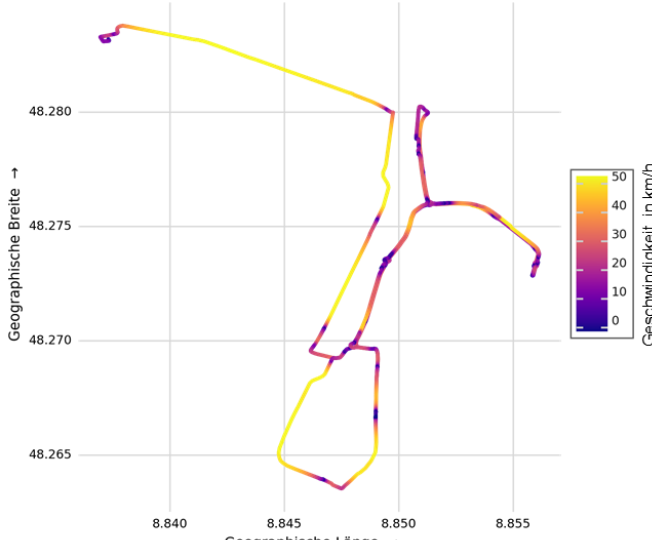


Abbildung 32: Shuttle-Route des Elektrobusses während der Landesgartenschau 2023 mit Haltestellen Charlottenstraße und Messegelände sowie der Ladeachse in der Wilhelmstraße

Nach Abschluss der Landesgartenschau begann die zweite Phase, in der der Bus in den regulären Linienverkehr integriert wurde. Dabei wurde das Fahrzeug auf den Linien 14 und 24 eingesetzt. Die Linie 14 verbindet den Zentralen Omnibusbahnhof (ZOB) Balingen mit den südwestlichen Stadtteilen Weilstetten und Endingen. Auf ihrem Verlauf durchquert sie die Innenstadt und bedient dabei zentrale Haltestellen wie die Charlottenstraße (unmittelbar am Gartenschau Gelände), die Wilhelmstraße mit der installierten Ladeachse, sowie Einrichtungen wie Stadthalle, Krankenhaus und Rathaus. Damit deckt die Linie wesentliche innerstädtische Linien ab und weist eine hohe Fahrgastfrequenz auf. Während der Landesgartenschau wurde dieser Abschnitt in verkürzter

	<p>Form als Shuttleverkehr zwischen Charlottenstraße und Messegelände betrieben.</p> <p>Die Linie 24 stellt die Verbindung vom ZOB Balingen in den nordöstlich gelegenen Stadtteil Heselwangen her. Sie verläuft dabei ebenfalls über die Innenstadtachsen Charlottenstraße und Wilhelmstraße, sodass eine enge Verzahnung mit der Linie 14 besteht. Dadurch konnte der induktiv ladende Bus im Rahmen des Projekts sowohl innerstädtische Linie 14 als auch eine stadtauswärts führende Linie 24 bedienen.</p> <p>Am ZOB wechselte das Fahrzeug zwischen den Linien 14 und 24, wodurch ein durchgehender Umlauf entstand. Zusätzlich wurden auf beiden Linien Schulfahrten bedient, die insbesondere in den Morgenstunden und am Nachmittag ein realistisches Lastprofil mit hoher Auslastung erzeugten. Der Einsatz erfolgte vor allem in den morgendlichen und nachmittäglichen Spitzenzeiten (ca. 6:00–9:00 Uhr sowie 15:00–20:00 Uhr) und bildete damit ein realistisches Fahrprofil mit hoher Auslastung ab. Nach Betriebsschluss wurde das Fahrzeug im Busdepot der Firma Maas Reisen abgestellt und dort geladen. Ergänzende technische Details zur Ladeweise sind in den technischen Arbeitspaketen dokumentiert.</p> <p>Während des Betriebs traten vereinzelt Rückmeldungen von Fahrgästen und Anwohnern auf, die sich insbesondere auf die Lautstärke der Lüfter der Management Units sowie auf mögliche Beeinträchtigungen durch magnetische Strahlung bezogen. Diese Hinweise wurden im Rahmen von AP4 aufgenommen und geprüft. Durch technische Nachweise konnte gezeigt werden, dass die geltenden Grenzwerte jederzeit eingehalten wurden und von den Systemen keine Gefährdung ausging. Auch die Geräuschentwicklung erwies sich nach objektiver Messung als unkritisch, wurde jedoch von einzelnen sensiblen Personen aus der Bevölkerung zu Beginn als leicht störend beschrieben. Durch gezielte Information und Kommunikation konnten die Beschwerden entkräftet und eine Akzeptanz im weiteren Betrieb erreicht werden.</p> <p>Die Ergebnisse des Arbeitspakets zeigen somit, dass der Betrieb sowohl im Shuttle- als auch im Linienverkehr technisch möglich und grundsätzlich funktionsfähig ist.</p>
--	--

Tabelle 2.1.3: Verwendung Teilvorhaben KIT

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
<p>Arbeitspaket 2: Entwicklung des Planungstools</p> <ul style="list-style-type: none"> • Planungstool zur Auslegung von DWPT-elektrischen Buslinien • Im Modell ist das Gesamtsystem aus Fahrzeug, Betrieb und Infrastruktur abgebildet • Durch die Berechnungen des Planungstools ist selbst unter Worst-Case Bedingungen ein effizienter und ökonomischer Betrieb mit einer langen Batterielebensdauer möglich 	<p>Datengrundlage und Vorverarbeitung</p> <p>Ein zentraler methodischer Ansatz des Projekts besteht in der Nutzung frei verfügbarer Geodaten, insbesondere von OpenStreetMap (OSM), zur realitätsnahen Parametrisierung. Durch diese Datenbasis ist es möglich, die entwickelte Methodik auf verschiedene städtische Netze zu übertragen, was einen hohen Grad an Generalisierbarkeit gewährleistet. Ergänzt wird dieser datengetriebene Ansatz durch eine eingehende Literaturrecherche, die zur Bestimmung technischer, betrieblicher und wirtschaftlicher Parameter dient.</p> <p>Den Ausgangspunkt der Modellbildung bildete eine umfassende Analyse existierender wissenschaftlicher Arbeiten und technischer Studien. Ziel war es, alle relevanten Randbedingungen für die Installation induktiver Ladeinfrastruktur zu identifizieren. Diese umfassen insbesondere infrastrukturelle Voraussetzungen wie ausreichende Fahrbahnbreiten, Mindestkurvenradien und geeignete Untergründe für die Integration von Spulensystemen in die Straße. Aber auch betriebliche Aspekte wie die durchschnittliche Geschwindigkeit der Busse, die Häufigkeit und Dauer von Haltestellenaufhalten sowie das Verkehrsaufkommen wurden berücksichtigt. Abbildung 34 zeigt den theoretisch bestimmten Geschwindigkeitsverlauf für eine Ausrückfahrt vom Busdepot zum Ausgangspunkt ZOB Balingen mit anschließendem Shuttleumlauf.</p>  <p>Abbildung 34: Auf Basis von öffentlich verfügbaren Daten wird ein Geschwindigkeitsprofil für den Shuttlebetrieb vom Busdepot bis zum ZOB Balingen und anschließendem Shuttlekurs erstellt</p> <p>Zusätzlich flossen technische Parameter wie Wirkungsgrade der Energieübertragung,</p>

Leistungsdichten der Spulen und die elektrische Infrastruktur in die Analyse ein. Nach der theoretischen Fundierung erfolgte die praktische Datenbeschaffung über OSM. Mithilfe automatisierter Abfragen wurden zunächst die Streckennetze der relevanten Buslinien extrahiert. Die Datensätze enthielten nicht nur die Streckengeometrien, sondern auch Zusatzinformationen wie Standorte von Bushaltestellen, Ampeln, Straßentypen und Richtungsangaben. Diese Informationen wurden gezielt gefiltert, um ausschließlich die Linien und Streckenabschnitte zu erhalten, die im Fokus der Fallstudie stehen. In der anschließenden Aufbereitung wurden die Rohdaten in ein strukturiertes Format überführt, das eine systematische Auswertung und Weiterverarbeitung ermöglicht.

Streckenbewertung und Priorisierung

Die qualitative Bewertung der Streckenabschnitte diente dazu, jene Bereiche zu identifizieren, die sich besonders für die Installation dynamischer Ladeinfrastruktur eignen. Dazu wurde für jeden Abschnitt untersucht, ob er regelmäßig von einer oder mehreren Buslinien befahren wird, welche durchschnittlichen Geschwindigkeiten dort herrschen und ob häufige Halte oder Ampelphasen die Aufenthaltsdauer der Busse erhöhen. Eine hohe Frequentierung durch mehrere Linien erhöht die betriebliche Effizienz der Ladeeinheiten, da so ein größerer Teil der Busflotte davon profitiert. Zudem bieten Abschnitte mit niedriger Geschwindigkeit oder Stillstand besonders günstige Voraussetzungen für eine effektive Energieübertragung.

Abbildung 35 zeigt die Bewertungsmethode der einzelnen Streckenabschnitte, wodurch sich dieses miteinander vergleichen lassen.

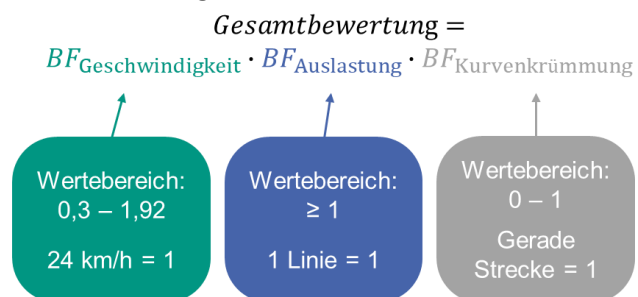


Abbildung 35: Die Gesamtbewertung einer Strecke ergibt sich aus der Multiplikation der Bewertungsfaktoren (BF) Geschwindigkeit, Auslastung und Kurvenkrümmung

Auf Basis dieser Bewertung wurde eine Priorisierung vorgenommen, bei der Streckenabschnitte mit hoher technischer Eignung und hohem Nutzenpotenzial

bevorzugt wurden. Diese Prioritäten bildeten anschließend die Grundlage für die mathematische Optimierung, in der entschieden wurde, an welchen Orten tatsächlich Ladeeinheiten installiert werden sollen.



Abbildung 36: Ergebnis der Streckenbewertung am Beispiel der KVV Linie 50 in Karlsruhe

Abbildung 36 zeigt das Ergebnis der Streckenbewertung am Beispiel der KVV Linie 50 in Karlsruhe. Die Eignung der einzelnen Streckenabschnitte ist durch eine farbige Markierung von Rot (Keine Eignung) bis Dunkelgrün (Sehr gute Eignung) dargestellt. Hellblau bis Schwarz berücksichtigen dabei auch noch einen Auslastungsbonus. Dieser wird gewährt, wenn mehrere Buslinien den selben Streckenabschnitt nutzen.

Modellbildung und Zielfunktion

Das Herzstück des Projekts bildet ein mathematisches Optimierungsmodell, das darauf ausgelegt ist, die jährlichen Gesamtkosten des Systems zu minimieren.

Die Gesamtkosten setzen sich aus drei zentralen Komponenten zusammen:

1. Infrastrukturkosten, die Investitionen in den Bau und die Installation der induktiven Spulen sowie die erforderlichen Umrichter umfassen. Diese Kosten beinhalten auch laufende Wartungsaufwendungen, die über die Lebensdauer der Anlagen anfallen.
2. Energiekosten, die den Preis für die durch die induktive Infrastruktur übertragene elektrische Energie abbilden. Hierbei wird auch der energetische Wirkungsgrad der Übertragung berücksichtigt.
3. Batteriekosten, bestehend aus den Investitionen in die jeweilige Batteriekapazität und den Kosten für das Laden im Depot, falls eine vollständige Versorgung über die Spuleninfrastruktur nicht gewährleistet werden kann.

Mathematisch wird das Optimierungsproblem durch eine Zielfunktion beschrieben, welche die Gesamtkosten, bestehend aus Infrastrukturkosten, Batteriekosten und Energiekosten minimiert.

Infrastrukturkosten umfassen Bau, Umrichterinstallation und Wartung, Energiekosten resultieren aus der übertragenen Energie, während die

Batteriekosten sowohl die Anschaffung als auch Depotladekosten umfassen. Die Kostenkomponenten werden in der Zielfunktion zu einer Gesamtkostenkennzahl zusammengeführt. Diese wird unter Berücksichtigung realistischer Betriebsparameter minimiert. Alle Investitionen werden in jährliche Annuitäten umgerechnet, wodurch unterschiedliche Kostenarten vergleichbar gemacht werden. Der zugrundeliegende Zinssatz ermöglicht zudem die Abbildung wirtschaftlicher Realität durch Kapitalverzinsung.

Abbildung 37 zeigt den pfadbasierten Ansatz bei der Modellierung. Für jedes Segment werden in mehreren Iterationsschleifen die Gesamtkosten berechnet um anhand der Streckenbewertung und des aktuellen Batterieladezustands des co-simulierten Fahrzeugmodells zu entscheiden, ob Ladeinfrastruktur platziert wird oder nicht.

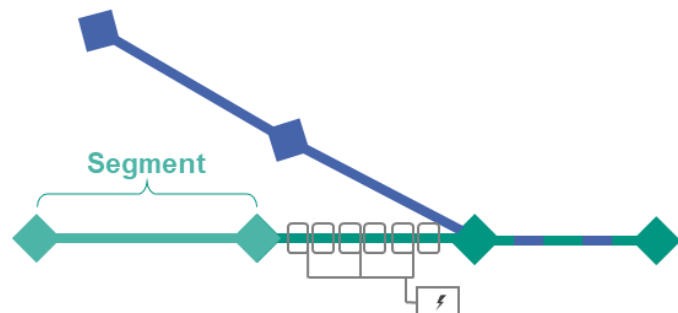


Abbildung 37: Segmentweise Betrachtung der Linien zur Bestimmung der Ladeinfrastruktur

Gelöst wird das Modell über eine API-Anbindung an den kommerziellen Optimierer Gurobi. Es wurden keine spezifischen Algorithmen vorgegeben, sodass Gurobi auf Basis des Modells selbständig den effizientesten Lösungsweg wählt. Die Entscheidung, ob und wo eine Ladespule installiert wird, sowie die Auswahl einer geeigneten Batteriekapazität für die eingesetzten Busse werden dabei simultan getroffen.

Vor der Durchführung der Simulation werden zentrale Betriebsparameter festgelegt, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung des Busbetriebs zu gewährleisten. Dazu zählen insbesondere die Auswahl der zu betrachtenden Strecken, die Anzahl der auf diesen Strecken eingesetzten Fahrzeuge sowie die Anzahl der täglichen Umläufe pro Fahrzeug. Diese Parametrierung ermöglicht es, die Simulation flexibel an unterschiedliche Betriebsszenarien anzupassen und verschiedene Netzkonfigurationen zu testen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Ergebnisse der Simulation eine hohe Aussagekraft besitzen und die spezifischen Gegebenheiten der untersuchten Fallstudie berücksichtigen.

<p>Arbeitspaket 5: Validierung und Weiterentwicklung Planungstool</p> <ul style="list-style-type: none"> • Validiertes Planungstool zur Auslegung von DWPT-elektrischen Buslinien • Die Erweiterung des Tools ist in der Lage, die systematische, softwaregestützte Planung von Busnetzten unter Einbezug von Synergieeffekten zwischen einzelnen Linien durchzuführen • Tool ist in der Lage die fahrzeugtechnische, betriebliche und infrastrukturelle Planung für ein gesamtes Busnetz automatisiert und optimiert durchzuführen 	<p>Simulation des Betriebs</p> <p>Nach der Modelllösung wurde die betriebliche Wirksamkeit der vorgeschlagenen Infrastrukturkonfiguration in einer Simulation überprüft. Dabei kamen zwei unterschiedliche Ansätze zum Einsatz, die unterschiedliche Aspekte des Busbetriebs abbilden. Im ersten Ansatz wurden reale Umläufe einzelner Fahrzeuge über den gesamten Tagesverlauf simuliert. Dies ermöglichte eine präzise Abbildung der tatsächlichen Belastung einzelner Streckenabschnitte und berücksichtigte die wiederholte Nutzung gemeinsamer Trassen durch unterschiedliche Linien. So konnte ermittelt werden, wie stark bestimmte Abschnitte frequentiert werden und welchen Einfluss dies auf den Ladezustand der Fahrzeuge hat. Der Nachteil dieses Ansatzes besteht darin, dass komplexe Umlaufstrukturen nicht vollständig berücksichtigt werden können, insbesondere wenn Busse mit unterschiedlichen Umläufen auf derselben Linie verkehren.</p> <p>Der zweite Ansatz verfolgt eine linienbasierte Betrachtung, bei der für jede Buslinie individuell simuliert wird, wie viele Fahrzeuge sie täglich befahren. Hierbei werden die Fahrten aggregiert, ohne Rücksicht auf konkrete Umläufe. Dadurch entfällt das Problem der Umlaufzuordnung, was die Simulation vereinfacht und skalierbarer macht. Allerdings werden dabei gemeinsame Abschnitte von verschiedenen Linien nicht korrekt aggregiert. Da diese jedoch ohnehin häufig für die Installation von Ladeinfrastruktur priorisiert wurden, wurde diese Methode als geeignet und praktikabel bewertet.</p> <p>Herausforderungen</p> <p>Im Verlauf des Projekts traten mehrere Herausforderungen auf, die die Umsetzung erschwerten oder zusätzliche Arbeitsschritte erforderlich machten. Die bedeutendste Schwierigkeit betraf die Datenverfügbarkeit. Für eine präzise und realistische Simulation der Busverläufe sowie für die Optimierung der Infrastrukturplatzierung sind detaillierte Informationen über Fahrpläne, Umläufe und Fahrzeugeinsätze notwendig. Solche Umlaufpläne sind jedoch bei vielen Verkehrsunternehmen entweder nicht</p>
---	---

öffentlich zugänglich oder werden nur auf Anfrage und unter bestimmten Bedingungen bereitgestellt. Die fehlende Transparenz und eingeschränkte Datenverfügbarkeit erschwerten somit eine valide Abbildung des tatsächlichen Linienbetriebs. Dies zwang dazu, mit Annahmen oder Näherungen zu arbeiten, was potenzielle Ungenauigkeiten in der Simulation zur Folge haben kann.

Anhand von Messungen aus dem realen Betrieb werden die Simulation validiert. Abbildung 38 zeigt dabei die Abweichung zwischen Simulations- und Betriebsdaten am Beispiel eines Streckenverlaufs.

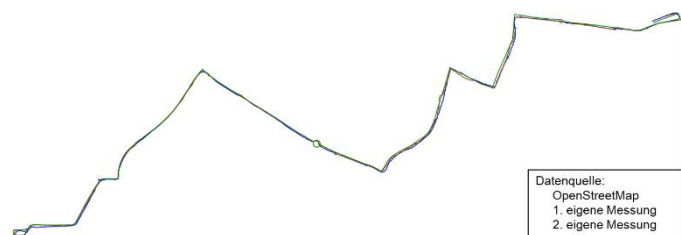


Abbildung 38: Anhand von GPS- Messungen wird die Abweichung zwischen der realen Position und dem OpenStreetMap Verlauf bestimmt

Ein noch gravierenderes Problem bestand in der Qualität und Vollständigkeit der Daten aus OpenStreetMap (OSM). Obwohl OSM prinzipiell eine sehr umfangreiche und gut gepflegte Datenbasis für Geoinformationen bietet, zeigte sich in der konkreten Anwendung, dass viele Buslinien nicht oder nur unvollständig eingetragen waren. Dies betraf insbesondere Linienverläufe, Haltestellenpositionen oder Kennzeichnungen spezifischer Streckenmerkmale wie Ampeln oder Einspurigkeiten. Da diese Informationen eine zentrale Grundlage für die Streckenbewertung und die spätere Optimierung darstellten, war es erforderlich, erhebliche manuelle Nacharbeiten durchzuführen. In einem aufwändigen Prozess mussten daher fehlende Buslinien inklusive ihrer Verläufe, Haltestellen und relevanter Streckenabschnitte direkt in OSM ergänzt werden. Dies erforderte nicht nur eine sorgfältige Recherche anhand von Fahrplänen und Liniennetzplänen, sondern auch eine Einarbeitung in die OSM-Datenstruktur sowie die entsprechenden Editierwerkzeuge. Die Nachpflege der Daten war zeitintensiv und bedeutete einen hohen manuellen Aufwand, der ursprünglich nicht in diesem

	<p>Umfang eingeplant war. Zusätzlich war die Standardisierung der OSM-Daten herausfordernd, da sich je nach Region, Datenstand oder Beitragenden Unterschiede in der Strukturierung und Benennung von Elementen zeigten. Für eine automatisierte Weiterverarbeitung mussten diese zunächst vereinheitlicht und normalisiert werden, um sie konsistent in das Modell integrieren zu können.</p> <p>Diese Herausforderungen verdeutlichen, dass zwar offene Geodaten eine wertvolle Grundlage für wissenschaftliche Arbeiten und Planungsvorhaben darstellen, ihre Nutzung jedoch mit einem erheblichen Aufwand in der Datenaufbereitung verbunden sein kann. Sie unterstreichen zudem die Notwendigkeit, Schnittstellen zu Verkehrsunternehmen und lokalen Datenhaltern zu stärken, um zukünftig effizienter auf betrieblich relevante Informationen zugreifen zu können.</p> <p>Ergebnisse und Ausblick</p> <p>Die Anwendung des Modells in der Fallstudie zeigte, dass eine systematische Platzierung induktiver Ladeinfrastruktur unter Berücksichtigung realer Streckendaten und wirtschaftlicher Parameter möglich ist. Die Optimierung lieferte konkrete Vorschläge für die Positionierung von Ladeeinheiten sowie Empfehlungen zur Batteriegröße. Die anschließende Simulation bestätigte die Praktikabilität der Lösung.</p> <p>Visualisierungen des Ladezustandsverlaufes über den Tagesbetrieb sowie die Berechnung der jährlich übertragenen Energie und der resultierenden Gesamtkosten untermauerten die Effizienz der vorgeschlagenen Maßnahmen.</p> <p>Durch die hinterlegten Positionsdaten der OpenStreetMap-Wegstrecken lässt sich das erhaltene Resultat anschaulich in Abbildung 39 auf einer Karte darstellen. Eine grüne Färbung hebt dabei Segmente hervor, in denen im Ergebnis der Optimierung der Bau von DWPT vorgesehen wird. Insbesondere der Anfangsbereich der Linie 14 (oberer Abschnitt der nach Süden verlaufende Strecke) wird durch seine gute Eignung in großen Teilen zum Ausbau empfohlen. Grund sind geringe Verluste durch gerade Abschnitte bei gleichzeitig niedrigen</p>
--	--

Durchschnittsgeschwindigkeiten, wodurch die übertragbare Energiemenge bei gleichbleibenden Investitionskosten steigt.

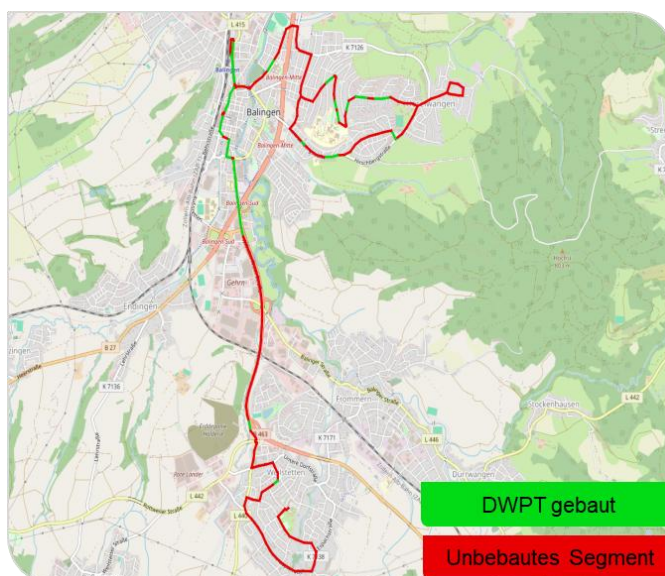


Abbildung 39: Kartendarstellung der Linien 24 und 14 in Balingen (Grün = DWPT verbaut)

Das Projekt demonstriert, dass eine Kombination aus offenen Geodaten, systematischer Streckenevaluation, mathematischer Optimierung und betrieblicher Simulation eine fundierte Entscheidungsgrundlage für Investitionen in dynamische Ladeinfrastruktur bietet.

Für zukünftige Arbeiten wäre die Einbindung von Echtzeitdaten, z.B. zur Fahrzeugposition oder zur Netzbelastung, ein logischer nächster Schritt. Ebenso sinnvoll wären Sensitivitätsanalysen, die untersuchen, wie stark sich Änderungen in Energiepreisen, Batteriekosten oder technologischen Parametern auf die Modelllösung auswirken. Ein weiteres Entwicklungspotenzial liegt in der Weiterentwicklung der Optimierung unter Einbezug ökologischer Kriterien wie CO₂-Vermeidung oder Lebenszyklusanalyse. Insgesamt liefert das Projekt somit nicht nur einen methodischen Beitrag zur Infrastrukturplanung im ÖPNV, sondern bietet auch ein belastbares Werkzeug für zukünftige Anwendungsfälle in urbanen Mobilitätsstrategien.

Tabelle 2.1.4: Verwendung FfE

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Arbeitspaket 1: Umfeld- und Technologiepotentialanalyse	Im ersten Arbeitspaket des Projekts wurde eine umfassende Analyse zur Einführung dynamischer induktiver Ladetechnologien (DWPT) im Verkehrssektor durchgeführt. Die Analyse gliederte sich in drei zentrale

<ul style="list-style-type: none"> • Use-Cases zum DWPT-Einsatz im Verkehrssektor und erforderlicher Rahmenbedingungen • Kurz-/mittel-/langfristiges nationales Technologiepotentiale für den Einsatz im ÖPNV <p>Gesellschaftliche Aspekte der Nutzer und daraus abgeleitete Handlungsfelder zur Gestaltung der Rahmenbedingungen und zur Behebung möglicher gesellschaftlicher Zielkonflikte</p>	<p>Bereiche: Umfeldanalyse, Technologiepotenzialermittlung und Akzeptanzanalyse.</p> <p>Die Umfeldanalyse betrachtete neben technischen auch wirtschaftliche, ökologische, regulatorische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen. DWPT ermöglicht das drahtlose Laden während der Fahrt und eignet sich besonders für Anwendungen mit planbaren Fahrprofilen – etwa im ÖPNV, innerstädtischen Lieferverkehr, Fernverkehr auf Autobahnen sowie perspektivisch im Individualverkehr. Die Technologie bietet Vorteile wie die Reduktion der Batteriegröße, geringere Ladepausen und eine bessere Nutzung von Solarstrom. Gleichzeitig sind hohe Investitionskosten für die Infrastruktur, offene Fragen zur Netzbelastung und zur Standardisierung sowie Informationsbedarfe in der Bevölkerung zu berücksichtigen. Gesundheitliche Risiken durch elektromagnetische Felder gelten nach aktuellem Stand als unbedenklich.</p> <p>Im Rahmen der Technologiepotenzialermittlung wurde erstmals das technische Potenzial von DWPT für Stadtbusse in Deutschland auf nationaler Ebene untersucht. Grundlage waren Geo- und Fahrplandaten von 696 Städten mit über 20.000 Einwohner:innen. Mithilfe der FREM-Datenbank wurden potenzielle Wireless Charging Lanes (WCL) mit Längen von 1000, 2000 und 5000 Metern analysiert. Je nach Ladeleistung (36, 72 oder 101 kW) könnten wöchentlich zwischen 1,75 und 12,48 GWh Energie übertragen werden – bei einem Gesamtverbrauch von rund 58 GWh. Besonders hohe Potenziale wurden in Städten wie Wiesbaden und Aachen identifiziert, vor allem dort, wo zentrale Busnetze ohne alternative Schieneninfrastruktur bestehen. Laut den Auswertungen von EnBW im Rahmen von AP1 gilt ein Streckenabschnitt als wirtschaftlich, sobald eine jährliche Energieübertragung von mindestens 900 kWh pro Meter erreicht wird. Auf Basis dieses Schwellenwerts lassen sich lediglich in 106 Gemeinden Streckenabschnitte identifizieren, die für einen Betreiber wirtschaftlich tragfähig wären. DWPT könnte insbesondere im ÖPNV als Ankeranwendung dienen und durch Co-Nutzung mit Individual- und Güterverkehr weiter an Bedeutung gewinnen.</p> <p>Die Akzeptanzanalyse umfasste eine lokale Befragung im Rahmen eines Feldversuchs in Balingen sowie eine deutschlandweite Onlineumfrage. In Balingen zeigten sich sehr hohe Zustimmungswerte: 95 % der Befragten befürworteten den Einsatz von DWPT-Bussen, 86 % würden diese auch im Alltag nutzen. Die wahrgenommenen Risiken waren gering, jedoch</p>
---	---

	<p>bestand ein hoher Informationsbedarf (64 %). Die bundesweite Befragung ergab ein differenzierteres Bild: 48 % äußerten eine positive Grundeinstellung, 19 % lehnten die Technologie ab. Die Nutzungsbereitschaft war vorhanden, jedoch abhängig von einer ausgereiften Infrastruktur. Technische Risiken wie elektromagnetische Felder wurden von einem Drittel als problematisch eingestuft. Die Zahlungsbereitschaft für höhere Preise war gering, und das Vertrauen in die Technologie ausbaufähig.</p> <p>Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass DWPT ein ergänzender Baustein für die Elektrifizierung des Verkehrs sein kann – insbesondere im ÖPNV. Für eine breite Umsetzung sind jedoch weitere Forschung, technologische Entwicklung, Standardisierung und gezielte Informationsmaßnahmen erforderlich. Für die Realisierbarkeit der Technologie braucht es vor allem bezahlbare und wirtschaftlich tragfähige Lösungen.</p>
<p>Arbeitspaket 6: Klima- und Energiesystemrückwirkungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modell der Energiesystemrückwirkungen • Untersuchung des Beitrags zur Klimawirkung sowie Emissionseinsparungen verschiedener Use-Cases induktiven Ladens im Vergleich zu alternativen Ladetechnologien und -steuerungen • Technische Anforderungen und notwendige Anpassungen von Netzbetriebsparametern zur Integration induktiver Ladepunkte ins Verteilnetz 	<p>Im Rahmen des Arbeitspakets 6 wurde das Emissionsreduktionspotenzial der dynamischen induktiven Ladetechnologie (DWPT) im Vergleich zum konduktiven Übernachten im Depot untersucht. Ziel war es, die Auswirkungen des Ladens während der Fahrt – insbesondere tagsüber – auf die Nutzung von Solarstrom sowie auf das Energiesystem und die CO₂-Bilanz zu analysieren.</p> <p>Die Analyse basiert auf den Ergebnissen der deutschlandweiten Potenzialanalyse und geht davon aus, dass alle Busse elektrisch betrieben werden und einen durchschnittlichen Energieverbrauch von 1,15 kWh/km aufweisen. Zwei Ladeszenarien wurden betrachtet: das Laden während der Fahrt über eine 1000 m lange Wireless Charging Lane (WCL) mit 36 kW sowie das Laden über alle wirtschaftlich sinnvollen Segmente einer Gemeinde (über 900 kWh/m/a). Als Vergleich dient das konduktive Laden im Depot zwischen 22 und 6 Uhr.</p> <p>Zur Emissionsberechnung wurden stündlich aufgelöste CO₂-Intensitäten des deutschen Strommixes verwendet – für 2024 basierend auf dem Green Grid Compass, für 2035 und 2045 auf dem fE-Trendszenario. Die Ergebnisse zeigen, dass das Emissionsreduktionspotenzial durch DWPT zwar vorhanden, aber insgesamt begrenzt ist. Im Jahr 2024 könnten durch DWPT deutschlandweit rund 7.756 t CO₂-Äquivalente eingespart werden (bei Nutzung der besten 1000 m WCL je Gemeinde), während bei</p>

	<p>wirtschaftlicher Betrachtung nur 497 t eingespart würden. Im Jahr 2035 steigt das Potenzial auf bis zu 12.014 t, sinkt jedoch bis 2045 wieder auf 8.056 t ab – ein Effekt der fortschreitenden Dekarbonisierung des Stromsystems.</p> <p>Diese Entwicklung verdeutlicht eine zentrale Rückwirkung auf das Energiesystem: Je sauberer der Strommix wird, desto geringer ist der ökologische Vorteil des zeitlich optimierten Ladens durch DWPT. Während 2024 noch deutliche Unterschiede zwischen Tages- und Nachtstrom bestehen, gleichen sich diese Unterschiede bis 2045 zunehmend an. Die Gesamtemissionen des Übernachtsladens sinken im gleichen Zeitraum von 3,8 Mio. t auf 1,4 Mio. t CO₂-Äquivalente – eine Reduktion um rund zwei Drittel. Damit wird deutlich, dass die Dekarbonisierung des Stromsystems einen wesentlich größeren Einfluss auf die Klimabilanz des ÖPNV hat als die Wahl der Ladetechnologie. Dennoch kann DWPT zur besseren Integration von PV-Strom ins Energiesystem beitragen.</p> <p>Zusätzlich wurden Rückwirkungen auf das Energiesystem analysiert. Eine Fallstudie in Balingen zeigte, dass DWPT zu einer signifikanten Reduktion der Spitzenlast im Busdepot führen kann – je nach Ladeleistung um 26 % bei 36 kW bis zu 36 % bei 70 kW. Dies entlastet die Ladeinfrastruktur und kann Investitionen in Netzanschlüsse und Lastmanagement reduzieren. Gleichzeitig ermöglicht DWPT eine Reduktion der Batteriekapazität um 13 % bei 36 kW und bis zu 21 % bei 70 kW, was sich positiv auf Fahrzeuggewicht, Kosten und Ressourcenverbrauch auswirkt.</p> <p>Die direkte Emissionsminderung in Balingen lag hingegen nur zwischen 4 % und 6 %, was vor allem auf den erhöhten Energiebedarf im Winter sowie die höhere Emissionsintensität des Stroms in der kalten Jahreszeit zurückzuführen ist. Diese Ergebnisse bestätigen, dass DWPT zwar betriebliche Vorteile bietet, das ökologische Einsparpotenzial jedoch begrenzt bleibt.</p> <p>Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Power-Quality-Messungen durch EnBW am Busdepot haben gezeigt, dass beim statischen induktiven Laden eines einzelnen Busses keine kritischen Netzwirkungen auftreten. Die gemessenen Werte lagen innerhalb der zulässigen Grenzbereiche, sodass aus netztechnischer Sicht keine unmittelbaren Einschränkungen bestehen.</p>
--	---

	<p>Im Gegensatz dazu kann bei einer hohen Auslastung im dynamischen induktiven Laden, etwa bei kontinuierlicher Energieübertragung entlang einer Buslinie, eine signifikante Belastung des Verteilnetzes entstehen. Mögliche Probleme umfassen Spannungseinbrüche, Oberschwingungen sowie einen erhöhten Blindleistungsanteil, insbesondere wenn mehrere Fahrzeuge gleichzeitig laden. Diese Effekte können die Netzqualität beeinträchtigen und zu Störungen bei anderen Verbrauchern führen.</p> <p>Zur Begrenzung dieser Netzzrückwirkungen sind technische Maßnahmen erforderlich, darunter:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dezentrale Blindleistungskompensation durch kapazitive Elemente, • aktive Filter zur Reduktion von Oberschwingungen, • sowie ein intelligentes Lastmanagement, das Ladeprozesse zeitlich und leistungstechnisch koordiniert. <p>Zusätzlich kann die Einbindung in ein Smart Grid mit Echtzeitüberwachung und adaptiver Steuerung die Netzstabilität auch bei hoher Ladeaktivität sicherstellen.</p> <p>Insgesamt zeigt sich, dass DWPT aus klimapolitischer Sicht ein begrenztes Emissionsreduktionspotenzial bietet. Die größten Effekte auf die CO₂-Bilanz ergeben sich durch den Ausbau erneuerbarer Energien und die Dekarbonisierung des Stromsystems. Nicht zuletzt kann die Reduktion der Batteriekapazität durch DWPT einen signifikanten positiven Beitrag zur Ressourcenschonung und Systemeffizienz leisten.</p>
--	---

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Detaillierte Informationen sind dem zahlenmäßigen Verwendungsnachweis gemäß Nr. 19.3 NKBF 98 zu entnehmen.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Teilvorhaben Konsortialführer EnBW:

Die geleisteten Arbeiten haben primär dem Aufbau und Betrieb der Ladeinfrastruktur in Balingen und der Projektkoordination gedient. Ersteres war mit erheblichem Koordinationsaufwand zwischen verschiedenen Akteuren (Tiefbau- und Ordnungsamt der Stadt Balingen, Stadtwerke Balingen, Verkehrsunternehmen Maas Reisen, Electreon Wireless GmbH als Systemlieferant und deren Unterauftragnehmer Eurovia, Bundesnetzagentur) verbunden, ohne diesen der weltweit erstmalige Aufbau dieser neuartigen und komplexen Technik in einen bestehenden engen Straßenraum nicht

möglich gewesen wäre, wie es für die Erforschung der Technik im untersuchten Anwendungsfall erforderlich war. Die Ladetechnik und die zugehörigen (Straßen-)Bauarbeiten waren wegen der noch geringen Stückzahlen (damit hohe Fertigungskosten) und der noch unerprobten Bauprozesse mit hohen Kosten verbunden, wobei Erfahrungen von allen direkt Beteiligten (neben EnBW auch Stadtwerke Balingen, Tiefbauamt Balingen und Electreon Germany) umfangreich gesammelt wurden, was deutliche Kostenreduktionen für zukünftige Realisierungen verspricht.

Teilvorhaben Stadtwerke Balingen:

Die im Rahmen dieses Arbeitspakets durchgeführten Arbeiten waren für die Zielerreichung des Projekts zwingend notwendig. Insbesondere mussten Tiefbauarbeiten realisiert werden, um die Netzanschlüsse für die Management Units herzustellen. Diese Maßnahmen waren mit einem vergleichsweise hohen Kostenaufwand verbunden, stellten jedoch eine unverzichtbare Voraussetzung für den Betrieb des induktiv ladenden Elektrobusses dar. Ohne eine stabile Netzanbindung wäre die Ladeinfrastruktur nicht funktionsfähig gewesen, sodass die Erprobung im Shuttleverkehr und im regulären Linienbetrieb nicht hätte stattfinden können. Darüber hinaus war es erforderlich, den Bus über einen längeren Zeitraum im regulären Tagesbetrieb einzusetzen. Reine Testfahrten hätten nicht die gleiche Aussagekraft gehabt, da sich die Fahrer dort erfahrungsgemäß stärker konzentrieren und dadurch ein nicht repräsentatives Fahr- und Ladeverhalten zu erwarten gewesen wäre. Nur durch den täglichen Betrieb unter realen Bedingungen konnten belastbare Daten gewonnen, Routinen entwickelt und verlässliche Ergebnisse erzielt werden. Der Umfang und die Intensität der Arbeiten waren daher im Hinblick auf die Projektziele sachgerecht und angemessen.

Teilvorhaben KIT:

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Projekt ELINA sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, um die Anwendbarkeit von dynamisch induktiver Ladeinfrastruktur für die Verwendung im ÖPNV zu untersuchen. Dabei wurde auf zahlreiche Randbedingungen, wie betriebliche Eigenheiten, infrastrukturseitige Einschränkungen sowie herstellerabhängige Faktoren, die für die Planung wichtig sind, eingegangen. Ein datengetriebener Ansatz zur Bestimmung der Eignung und optimalen Positionierung von Ladeinfrastruktur ermöglichte eine fundierte Bewertung potenzieller Einsatzorte unter Berücksichtigung realer Betriebsdaten. Darüber hinaus wurde ein niederschwelliger Einstieg in die Technologie durch die Entwicklung praxisnaher Werkzeuge und Handlungsempfehlungen unterstützt, um Kommunen und Verkehrsunternehmen den Zugang zur induktiven Ladetechnologie zu erleichtern.

Teilvorhaben FfE:

Die Arbeiten im Projekt Elina zur dynamischen induktiven Ladeinfrastruktur im ÖPNV waren angemessen, da sie zentrale Aspekte für die erfolgreiche Umsetzung und gesellschaftliche Akzeptanz dieser Technologie beleuchteten. Die Akzeptanzstudie lieferte wertvolle Erkenntnisse darüber, wie Fahrgäste und Stakeholder die neue Ladeinfrastruktur wahrnehmen, was essenziell für die langfristige Integration in den öffentlichen Nahverkehr ist. Die Potenzialanalyse für Deutschland zeigte auf, wo und in welchem Umfang die Technologie sinnvoll eingesetzt werden kann, und identifizierte strategisch relevante Einsatzorte. Schließlich verdeutlichte die Untersuchung zum Emissionsreduktionspotenzial, welchen Beitrag die Technologie zur Erreichung von Klimazielen leisten kann – ein entscheidender Faktor für die ökologische Bewertung und politische Unterstützung des Projekts

2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Tabelle 2.4.1: Verwertung Teilvorhaben Konsortialführer EnBW

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Planung und Bau von DWPT-Systemen im bestehenden engen Straßenraum	Expertise aufgebaut, insbesondere zu Anforderungen an Straßenraum für Schaltschränke, tatsächliche Fahrweise und Akzeptanz von Assistenzsystemen durch Busfahrpersonal, praktisch realisierbare Kurvenradien. Keine Fortführung von EnBW-Aktivitäten zu echten DWPT-Ladestrecken im städtischen Raum (kurze semidynamische Strecken ausgenommen).
Betrieb von DWPT-Systemen für geschlossene ÖPNV-Systeme (ohne fahrzeugindividuelle Abrechnung)	Trotz steigender Ladeleistungen bei kabellosen Systemen enteilt das konduktive Laden mit absehbaren Leistungen im Multi-Megawatt-Bereich, welches zudem zu bestehenden DC-Ladelösungen abwärtskompatibel ist. Deshalb wird sich EnBW auf konduktive Lösungen konzentrieren, bis kabellose Lösungen deutlich höhere Leistungen im seriennahen Einsatz demonstrieren. Fortführung der Erprobung in Karlsruhe und Balingen im Rahmen des Projekts EMADI, das auf die fahrzeugindividuelle Abrechnung abstellt.

Tabelle 2.4.2: Verwertung Teilvorhaben Stadtwerke Balingen

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Durchführung des Busbetriebs im Shuttleverkehr während der Gartenschau sowie Integration in die Linien 14 und 24	Nachweis der technischen Machbarkeit und organisatorischen Umsetzbarkeit des induktiven Ladens im ÖPNV-Betrieb; Grundlage für zukünftige Entscheidungen zur Netzintegration
Schulung des Fahrpersonals und Betriebserfahrungen mit Assistenzsystemen	Verbesserung der Fahrerakzeptanz und -kompetenz; Entwicklung von Schulungskonzepten für künftige Anwendungen
Erkenntnisse aus täglichen Betriebsabläufen (Routen, Ladezyklen, Abstellzeiten)	Praktische Erfahrungswerte für Planung und Optimierung zukünftiger Betriebsabläufe; Übertragbarkeit auf andere Linien und Städte
Umgang mit Fahrgast-Feedback und Beschwerden (z. B. Lüftergeräusche, Strahlungsbedenken)	Verbesserung der Kommunikation mit Fahrgästen; Entwicklung von Strategien zur frühzeitigen Entkräftung von Vorbehalten bei Einführung neuer Technologien
Dokumentation organisatorischer und technischer Herausforderungen (z. B. Tiefbau, Netzanschlüsse)	Wertvolle Erfahrungsbasis für Folgeprojekte, insbesondere zur realistischen Kosten- und Aufwandsschätzung bei der Einführung induktiver Ladeinfrastruktur
Fortführung der Erfahrungen im Rahmen des EMADI-Projekts	Sicherstellung der nachhaltigen Nutzung der im Projekt ELINA gewonnenen Erkenntnisse; Weiterentwicklung der induktiven Ladetechnologie und Übertragung auf neue Anwendungsfelder

Tabelle 2.4.3: Verwertung Teilvorhaben KIT

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Aufbau eines Planungstool	<p>Am KIT konnten in diesem Vorhaben zahlreiche vielversprechende Fragestellungen betrachtet werden. Der Aufbau eines Planungstool für die Planung von dynamisch induktiver Ladeinfrastruktur für den Busverkehr basierend auf den Messdaten aus dem regulären Betrieb war ein grundlegender Schritt und kann auch in Zukunft verwendet werden. Das KIT profitiert von den erworbenen Kompetenzen im Bereich der Positionierung von Ladeinfrastruktur für den ÖPNV, die ein relevantes Forschungsfeld für die Zukunft sind. Das KIT stärkt zusätzlich seine wissenschaftliche Position im Bereich der Systemoptimierung und der Wechselwirkungen zwischen Betrieb, Infrastruktur und dem Fahrzeug.</p> <p>Durch die Kooperation mit Komponentenherstellern, Energieversorgern, Stadtwerken sowie Forschungseinrichtungen ergeben sich wertvolle Kontakte für weitere Forschungsaktivitäten.</p>

Tabelle 2.4.4: Verwertung Teilvorhaben FfE

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Methodik zur Konzeption von repräsentativen Befragungen zur Technologieakzeptanz im Bereich von Ladestrategien und -technologien in der Elektromobilität	Die Methodik zur Konzeption repräsentativer Befragungen kann in künftigen Forschungsprojekten gezielt eingesetzt werden, um die Akzeptanz neuer Ladeansätze in der Elektromobilität systematisch zu erfassen. Sie unterstützt dabei, Nutzerperspektiven frühzeitig zu integrieren und technologiebezogene Entscheidungen evidenzbasiert zu treffen.
Integration und Weiterentwicklung eines Routing Algorithmus zur Bestimmung der Strecken der Buslinien	Der entwickelte Routing Algorithmus kann in folgenden Projekten nicht nur zur Bestimmung von Fahrstrecken verwendet werden, sondern beispielsweise auch zur Identifikation von Verteilnetztopologien und Wärmenetzen eingesetzt werden.
Weiterentwickeltes Modell zur Bestimmung der THG-Emissionen für induktives Laden	Das Modell zur Bestimmung von THG-Emissionen von verschiedenen Use Cases wird in weiteren Forschungsprojekten wie BDL-Next und Systemladen 2025 verwendet.

2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Teilvorhaben Konsortialführer EnBW:

Der Systemlieferant Electreon Wireless erprobt sein System auf der Bundesautobahn 6 bei Amberg im Rahmen des (ebenfalls BMW-geförderten) Projekts E|MPOWER; Ergebnisse lagen zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts nicht vor. Außerdem hat Electreon angekündigt, eine weiterentwickelte Variante seines Systems in einem Projekt in Frankreich einzusetzen, das eine Leistungssteigerung um über 50 % verspricht, was erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit solcher Systeme hätte.

Als stärkste zu DWPT konkurrierende Technologie hat sich während der Projektlaufzeit das kabelgebundene Gleichstrom-Schnellladen abgezeichnet. So wurde von verschiedenen Anbietern von schweren Nutzfahrzeugen und Ladetechnik das Laden mit einem Megawatt und mehr mittels MCS mit nahezu serienreifer Technik öffentlichkeitswirksam demonstriert. Das könnte auch im ÖPNV Verbreitung finden und das Nachladen an zentralen Haltestellen für wenige Minuten zu einer praktikablen Möglichkeit machen. Damit könnten auch mit überschaubaren Batteriekapazitäten eine anspruchsvolle Tagesfahrleistung unter allen Umständen sicher absolviert werden.

Dem gegenüber steht das stationäre kabellose Laden, das in ELINA während des Gartenschau-Betriebs an den Endhaltestellen und im späteren Verlauf an den Haltestellen ZOB und Zentrum Neige ebenfalls erprobt wurde und durch die geringeren Straßenbaukosten ein deutlich größeres Potential für eine hohe Wirtschaftlichkeit als das dynamische Laden aufweist. In ELINA wurden die Busfahrpläne absichtlich unverändert gelassen, um die Kompatibilität der Technik mit dem bestehenden ÖPNV-System zu erproben; mit Anpassungen der Fahrpläne im Minutenbereich und in der umlauftechnischen Verknüpfung der verschiedenen Linien könnten deutlich größere Energiemengen während des Betriebs geladen werden. Im Gegensatz zum Laden per Kabel oder per Pantograph ist dies ohne Stolpergefahr und damit barrierefrei, ohne mechanische Abnutzung und ohne die visuellen Beeinträchtigungen durch Oberleitungsinseln möglich. Besonders großes Potential bietet der Einsatz bei Regionalbussen, die lange Strecken über Landstraßen zurücklegen und damit einen hohen Energiebedarf haben, gleichzeitig typischerweise an den Endhaltestellen regelmäßig Wartezeiten von einigen Minuten aufweisen, die optimal zum Nachladen geeignet sind. Dieser Einsatz wurde im Rahmen von ELINA nicht untersucht, eine spätere Untersuchung und ggf. Erprobung erscheinen sinnvoll.

Teilvorhaben Stadtwerke Balingen:

Während der Projektlaufzeit wurde deutlich, dass sich die Elektromobilität im Bereich des öffentlichen Personennahverkehrs unabhängig von ELINA dynamisch weiterentwickelte. Insbesondere bei der Batterietechnologie und den damit erzielbaren Reichweiten waren erhebliche Fortschritte zu verzeichnen. So präsentierte BYD im Juni 2025 auf der UITP-Messe einen Überlandbus mit einer Batteriekapazität von 560 kWh und einer Reichweite von bis zu 700 km (electrive.net, 24.06.2025). Ebenso stellte Daimler Buses mit dem eCitaro der vierten Batterie-Generation (NMC4) eine Lösung vor, die durch eine höhere Energiedichte und eine deutlich verlängerte Lebensdauer überzeugt (electrive.net, 27.05.2025). Parallel dazu verdeutlichte ein Interview mit DB Regio Bus Nord, dass auch auf regionalen und ländlichen Linien zunehmend alltagstaugliche elektrische Konzepte erprobt werden, die auf die verbesserte Batterietechnik aufbauen (electrive.net, 13.03.2025).

Diese Entwicklungen sind für das Teilvorhaben in Balingen insofern relevant, als größere Batteriekapazitäten und höhere Energiedichten die Notwendigkeit von Zwischenladungen tendenziell reduzieren und damit alternative Ladetechnologien wie das induktive Laden weniger zwingend erscheinen lassen. Gleichzeitig bleibt das induktive Laden jedoch von Bedeutung, da es Flexibilität in den Betriebsabläufen schafft und eine sinnvolle Ergänzung darstellen kann, insbesondere dann, wenn Fahrzeuge längere Einsatzzeiten oder kurze Ladefenster abdecken müssen.

Vor diesem Hintergrund liefern die in Balingen gewonnenen Praxiserfahrungen einen wichtigen Beitrag zur realistischen Einordnung der technologischen Fortschritte und bieten wertvolle Vergleichswerte für die zukünftige Planung und Bewertung von Betriebskonzepten im ÖPNV.

Teilvorhaben KIT:

In den letzten Jahren sind zwei bedeutende Forschungsprojekte zur dynamisch induktiven Ladeinfrastruktur entstanden, die unterschiedliche Schwerpunkte setzen. Das Projekt InductInfra (Induktive dynamische Energieversorgung von Fahrzeugen über die Straßenverkehrsinfrastruktur, Projektende 2023), koordiniert von der RWTH Aachen, konzentriert sich auf die bautechnische Integration induktiver Ladesysteme in bestehende Straßeninfrastrukturen. Im Mittelpunkt stehen dabei die Entwicklung geeigneter Materialien, die Einbettung der Technik in Asphalt- und Betonstraßen sowie die Nutzung erneuerbarer Energien zur Versorgung der Ladeinfrastruktur. Ziel ist es, Fahrzeuge während der Fahrt mit Energie zu versorgen und so Reichweitenängste zu reduzieren sowie die Batteriegröße zu optimieren.

Im Gegensatz dazu richtet sich das Projekt MILAS (Modulare intelligente induktive Ladesysteme für autonome Shuttles, Projektende 2024) auf den urbanen Raum und die Anforderungen autonomer Shuttle-Flotten. Hier liegt der Fokus auf der Entwicklung modularer, intelligenter Ladesysteme, die sich flexibel an verschiedene Fahrzeugtypen und Einsatzorte anpassen lassen. Besondere Aufmerksamkeit gilt der intelligenten Steuerung der Energieübertragung sowie der Integration in automatisierte Mobilitätskonzepte.

Zwischen 2023 und 2025 wurde in der japanischen Stadt Kashiwa ein wissenschaftlich begleitetes Demonstrationsprojekt zur dynamisch induktiven Ladeinfrastruktur durchgeführt. Ziel des Projekts ist die Erprobung eines neu entwickelten Systems zur Energieübertragung während der Fahrt. Dabei werden vorgefertigte Spulen in die Fahrbahn integriert, die in der Lage sind, elektrische Energie kontaktlos an entsprechend ausgerüstete Fahrzeuge zu übertragen. Die Spulen basieren auf Entwicklungen der Universität Tokio und sind so konzipiert, dass sie nur bei Fahrzeugerkennung aktiviert werden, um Energieverluste zu minimieren.

Die Projektlaufzeit erstreckte sich über zwei Jahre, von 2023 bis März 2025. In dieser Zeit wurden verschiedene technische und infrastrukturelle Aspekte untersucht. Die Forschungsschwerpunkte liegen auf der Effizienz der Energieübertragung, der Interaktion zwischen Fahrzeug und Infrastruktur, der Integration in bestehende urbane Verkehrsnetze sowie auf der Analyse der Auswirkungen auf den Energieverbrauch und die Fahrzeugreichweite. Zusätzlich wird die Möglichkeit betrachtet, durch kontinuierliches Laden während der Fahrt die Größe von Fahrzeugbatterien zu reduzieren. Das Projekt wird von einem Konsortium aus Universitäten und Industriepartnern getragen und dient der wissenschaftlichen Bewertung der technischen Machbarkeit und Systemintegration dynamischer induktiver Ladesysteme im urbanen Raum.

Die im Mai 2025 veröffentlichte Studie Infrastructure Planning for Inductive Charging in Electrified Shuttle Systems von Bischoff, Hammani und Schiffer befasst sich mit der modellbasierten Planung von Ladeinfrastruktur für elektrische Shuttle-Systeme. Im Fokus steht die Entwicklung eines

Optimierungsmodells zur Standortwahl und Auslegung von Ladepunkten, wobei sowohl stationäre als auch dynamisch induktive Ladeoptionen berücksichtigt werden.

Das Modell integriert die Routenplanung elektrischer Fahrzeuge mit deren Energiebedarf und erlaubt Umwege zu Ladepunkten innerhalb definierter Grenzen. Zur Lösung des Problems wird ein iterativer lokaler Suchalgorithmus in Kombination mit einem ressourcenbeschränkten Label-Setting-Verfahren eingesetzt. Die Autoren analysieren verschiedene Szenarien, darunter die Einbindung von Photovoltaik und dezentraler Energiespeicherung, um deren Einfluss auf die Infrastrukturplanung zu untersuchen.

Die Methodik wird anhand eines realen Anwendungsfalls in der Stadt Hof (Deutschland) angewendet. Die Studie liefert eine strukturierte Herangehensweise zur Bewertung und Planung von Ladeinfrastruktur unter Berücksichtigung technischer, betrieblicher und infrastruktureller Rahmenbedingungen.

Teilvorhaben FfE:

Während der Projektlaufzeit sind mehrere Studien zur Ladeinfrastruktur im öffentlichen Nahverkehr sowie zum Einsatz von DWPT erschienen. So befasst sich Tran et al. (2022) in „Dynamic wireless charging lanes location model in urban networks considering route choices“ mit der theoretischen Standortwahl für Ladeinfrastruktur, verwendet jedoch keine realen Fahrplandaten und nimmt keine nationale Skalierung vor. Caroleo et al. (2024) nutzen in ihrer Studie „Towards full electrification of local public transport“ zwar frei verfügbare Fahrplandaten zur Analyse der Elektrifizierung des ÖPNV, berücksichtigen jedoch keine induktiven Ladeverfahren wie DWPT.

Weitere Arbeiten, etwa „Optimal Planning of Dynamic Wireless Charging Infrastructure for Electric Vehicles“ von Elmeligy et al. (2024) und „Reliable dynamic wireless charging infrastructure deployment problem for public transport services“ von Wang et al. (2024), konzentrieren sich auf die algorithmische Optimierung von Ladeinfrastruktur, meist für den Individualverkehr und auf Basis hypothetischer Daten. Du et al. kombinieren in dem 2025 erschienenen Paper „Optimal deployment of dynamic wireless charging infrastructure for battery electric buses“ GTFS- und OpenStreetMap-Daten zur Optimierung von DWPT für Busse, beschränken sich jedoch auf die Stadt Auckland in Neuseeland. Die japanische Studie von Gunji et al. (2025) zeigt das Potenzial von DWPT zur Reduktion von Treibhausgasemissionen, insbesondere durch kleinere Batterien und damit geringere Emissionen bei Produktion und Betrieb.

Das Teilvorhaben der FfE geht über diese Ansätze hinaus: Es liefert erstmals eine deutschlandweite Potenzialanalyse für DWPT im ÖPNV und untersucht, inwiefern sich Emissionen durch eine bessere Integration von PV-Strom durch das Laden während der Fahrt reduzieren lassen.

2.6. Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen

Tabelle 2.6.1: Veröffentlichungen Teilvorhaben Konsortialführer EnBW

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Titel: Wireless Electric Road Systems – Technology Readiness and Recent Developments	Datum: 19.06.2024	Publiziert in: 2024 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE) DOI: 10.1109/WPTCE59894.2024.10557264	Inhalt: The progress in dynamic wireless power transfer (D-WPT) led to the availability of wireless Electric Road Systems (wERS) that offer smart infrastructure solutions that can substantially reduce transport emissions and electric vehicle (EV) range anxiety. The basis of this technology is resonant Wireless Power Transfer (WPT), which was first demonstrated in the 1890s by Nikola Tesla and has since been developed for various applications. This paper illustrates the state of Electreon’s wERS technology by insights from current pilot projects as well as progress from active R&D activities.
Titel: Projekt ELINA: kontaktloses Laden im öffentlichen Nahverkehr	Datum: 10/2024	Publiziert in: DER NAHVERKEHR – Öffentlicher Personennahverkehr in Stadt und Region ISSN 0722-8287	Inhalt: Mit Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) testet ein Konsortium aus Forschung und Industrie (EnBW, Stadtwerke Balingen, KIT, FfE und Electreon) in der süddeutschen Stadt Balingen das kontaktlose Laden im öffentlichen Nahverkehr. Das System wurde auf einer Länge von einem Kilometer in der Fahrbahn sowie an mehreren Haltestellen installiert und ist seit Mai 2023 erfolgreich in Betrieb. Der Bau im innerstädtischen Umfeld gestaltete sich aufgrund der unterirdischen Infrastruktur und dem hohen Abstimmungsaufwand mit einer Vielzahl an lokalen Stakeholdern herausfordernd. Die aktuell noch hohen Installationskosten lassen sich zukünftig vor allem durch Prozessoptimierungen und den Wettbewerb im Straßenbau senken. Mit der Technik in Balingen ist eine durchschnittliche Ladeleistung von rund 60 Kilowatt (kW) realisierbar. Während des Shuttlebetriebs zur Gartenschau nahm der E-Bus bis zu 130 kWh Energie pro Betriebstag kontaktlos während der Fahrt und an den Haltestellen auf. Das technisch mögliche Potential des kontaktlosen Ladens wird in der Praxis momentan noch nicht ausgeschöpft, da die dafür optimale Positionierung von Fahrzeug zur Ladeinfrastruktur häufig nicht erreicht wird. Damit das kontaktlose Laden zukünftig Anwendung findet, gibt es aus Betreibersicht Verbesserungsbedarfe bei der Anwenderfreundlichkeit und Leistungsfähigkeit des Systems. Die Projektpartner arbeiten gemeinsam an Maßnahmen zur besseren Positionierung und Erhöhung der Ladeleistung. Die ersten Zwischenergebnisse der Akzeptanzanalyse haben ein positives Stimmungsbild bei den Fahrgästen bezüglich der Ladetechnik gezeigt. Bei einer Befragung während des laufenden Betriebs ergab sich eine hohe Akzeptanz von kontaktlosem Laden im öffentlichen Nahverkehr.

Tabelle 2.6.2: Veröffentlichungen Teilvorhaben Stadtwerke Balingen

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Titel: Shuttle-Bus zur Gartenschau: Erster induktiv ladender Bus in Balingen	Publiziert in: Zollern-Alb-Kurier (Print/Online); Datum: 04.05.2023	Inhalt: Zum Auftakt der Landesgartenschau stellte die Stadt Balingen gemeinsam mit den Stadtwerken den ersten induktiv ladenden Elektrobus vor. Der Beitrag hob die Bedeutung des Projekts ELINA für eine nachhaltige Mobilität hervor und erläuterte den Shuttle-Einsatz zwischen Charlottenstraße und Messegelände. Besonderes Augenmerk lag auf der innovativen Ladeinfrastruktur und ihrer Rolle als Pilotanwendung im deutschen ÖPNV.	
Titel: Flyer „Induktives Laden im ÖPNV – Projekt ELINA“	Publiziert in: Landesgartenschau Balingen, Informationsstände; Datum: Mai 2023	Inhalt: Besucherinnen und Besucher der Gartenschau erhielten kompakte Informationen zu den technischen Grundlagen des induktiven Ladens, den Umweltvorteilen sowie den beteiligten Partnern. Der Flyer diente als niederschwellige Informationsquelle und trug zur breiten öffentlichen Akzeptanz des Projekts bei.	
Titel: Plakatserie „Shuttle-Bus zur Gartenschau“	Publiziert in: Stadtgebiet Balingen, Haltestellen Charlottenstraße & Messegelände Datum: Mai–September 2023	Inhalt: Im Rahmen einer begleitenden Öffentlichkeitskampagne wurde der Shuttle-Bus mit großformatigen Plakaten beworben. Ziel war die Sichtbarkeit des Angebots im öffentlichen Raum und die Steigerung der Fahrgastzahlen während der Landesgartenschau.	
Titel: Pilotprojekt induktives Laden erfolgreich gestartet	Publiziert in: Website der Stadtwerke Balingen (www.stadtwerke-balingen.de); Datum: Juni 2023	Inhalt: In einem Online-Beitrag informierten die Stadtwerke über die erfolgreiche Inbetriebnahme des Elektrobusses und der Ladeinfrastruktur. Der Artikel erläuterte die Funktionsweise des Systems und präsentierte erste Eindrücke aus dem Fahrbetrieb.	
Titel: Projektvorstellung und Genehmigung im Gemeinderat	Publiziert in: Gemeinderat Balingen, öffentliche Sitzung; Datum: 2022	Inhalt: Im Rahmen einer Gemeinderatssitzung wurde das Projekt ELINA vorgestellt und beschlossen. Thematisiert wurden Investitionskosten, erwartete Nutzenpotenziale sowie die Rolle der Stadtwerke Balingen als Projektpartner.	
Titel: Zwischenpräsentation zum Projekt ELINA	Publiziert in: Gemeinderat Balingen, öffentliche Sitzung; Datum: 2023	Inhalt: In einer öffentlichen Sitzung stellte die Projektleitung den Zwischenstand vor. Diskutiert wurden die Erfahrungen aus dem Shuttle-Betrieb während der Landesgartenschau, erste Ergebnisse zu Ladeeffizienz und Fahrgastakzeptanz sowie die weiteren Schritte im Projekt.	
Titel: Abschlusspräsentation ELINA	Publiziert in: Gemeinderat Balingen, öffentliche Sitzung; Datum: 2025	Inhalt: Nach Projektabschluss präsentierten die Stadtwerke Balingen die Betriebserfahrungen aus drei Jahren Testbetrieb. Die Diskussion drehte sich um die Zuverlässigkeit der DWPT-Technologie, die Wirtschaftlichkeit im Linienverkehr und die Chancen zur Weiterführung mit EMADI.	

Tabelle 2.6.3: Veröffentlichungen Teilvorhaben KIT

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Titel: Induktive Ladung von Elektrobussen während der Fahrt: Das Beispiel Balingen Publiziert in: DER NAHVERKEHR ELEKTROBUS-SPEZIAL 2023 (ISSN 0722-8287) Datum: 22.03.2023			<p>Inhalt: Im Rahmen des Forschungsprojekts wird vom KIT eine Planungssoftware entwickelt, welche die wirtschaftlich optimale Planung von DWPT-Infrastruktur für Busnetze unterstützen soll. Die Software bildet den Kern eines neuen strukturierten, integrierten Planungsprozesses. Eine damit realisierte Infrastruktur soll einen dauerhaften sicheren Betrieb des technischen Gesamtsystems, bestehend aus Fahrzeug und Infrastruktur, auch unter schwierigen Bedingungen gewährleisten. Ein Beispiel dafür sind heiße oder kalte Betriebstage, an denen der Energiebedarf des Busses durch einen erhöhten Klimatisierungsbedarf besonders hoch ist. Aber auch veränderte Verkehrssituationen, die eine Nutzung der Ladeinfrastruktur kurzfristig nicht zulassen und damit die Nachladung der Batterie verhindern. Am KIT wurden dazu bereits Untersuchungen angestellt, wie sich Buslinien elektrifizieren lassen und die technischen sowie ökonomischen Auslegungskriterien betrachtet. Bei der multikriteriellen Auslegung des Gesamtsystems Elektrobus müssen Fahrzeug und Infrastruktur gleichermaßen betrachtet werden, um den Betrieb nicht zu beeinflussen. Es ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen der Wahl der Batteriekapazität des Fahrzeugs im Verhältnis sowohl zur Anzahl der Ladehaltestellen als auch zu der Ladeleistung. Durch die Verwendung der DWPT Technologie ergeben sich weitere Freiheitsgrade bei der Positionierung der Ladeinfrastruktur. Für die dynamische induktive Ladung sind Streckenabschnitte mit geringen Durchschnittsgeschwindigkeiten besonders geeignet. Bei einer geringeren Überfahrts- geschwindigkeit kann eine entsprechend größere Energiemenge von den Spulen in der Straße auf den Bus übertragen werden. Dadurch müssen keine langen Pausen an elektrifizierten Haltestellen erfolgen, welche Einfluss auf die Taktung haben. Von zentraler Bedeutung ist die Positionierung der induktiven Ladeinfrastruktur. Idealerweise sind Streckenabschnitte und Haltestellen zu elektrifizieren, die von mehreren Linien angefahren werden. Damit lässt sich eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit beim Bau und Betrieb der Ladeinfrastruktur erreichen.</p>
Titel: Electrification of public transport: contact-free charging of electric buses on the move and at bus stops Publiziert in: Konferenzbeitrag 1. Deutsch Französische Eisenbahnkonferenz in Metz Datum: 27.03.2025			<p>Inhalt: Das Forschungsprojekt ELINA erprobt die dynamische drahtlose Ladetechnologie für Elektrobusse in der süddeutschen Stadt Balingen. Für das Pilotprojekt kommt ein Elektrobus zum Einsatz, der auf ausgewählten Streckenabschnitten und Bushaltestellen in der Stadt kontaktlos während der Fahrt und im Stand geladen wird. Auf einer Gesamtstrecke von rund einem Kilometer kann, der im regulären Linienverkehr eingesetzte Bus kontaktlos mit elektrischer Energie für die Traktion und die Nebenverbraucher versorgt werden, ohne die Fahrt unterbrechen zu müssen. Sendespulen sind in der Straße eingelassen und über Kabel und Leistungselektronik an das öffentliche Stromnetz angeschlossen. Um nennenswerte Energiemengen während der Fahrt zu übertragen, sind Streckenabschnitte erforderlich, bei denen viele Spulen hintereinander in die Fahrbahn eingelassen sind. Außerdem sind einzelne Haltestellen mit Ladetechnik ausgestattet, was eine Nachladung während dem Aus- und Einsteigen sowie während Pausenzeiten ermöglicht. Im Rahmen des Forschungsprojekts wird vom KIT eine Planungssoftware entwickelt, welche die wirtschaftliche optimale Planung von DWPT-Infrastruktur für Busnetze unterstützen soll. Die Software bildet den Kern eines neuen strukturierten, integrierten Planungsprozesses. Eine damit realisierte Infrastruktur soll einen dauerhaften sicheren Betrieb des technischen Gesamtsystems, bestehend aus Fahrzeug und Infrastruktur, auch unter schwierigen Bedingungen gewährleisten. Ein Beispiel dafür sind heiße oder kalte Betriebstage, an denen der Energiebedarf des Busses durch einen erhöhten Klimatisierungsbedarf besonders hoch ist. Aber auch veränderte</p>

Verkehrssituationen, die eine Nutzung der Ladeinfrastruktur kurzfristig nicht zulassen und damit die Nachladung der Batterie verhindern.

Titel: Method for automating the layout of wireless charging infrastructure for public transport vehicles

Publiziert in: Konferenzbeitrag EPTS Karlsruhe 2025 - International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (Fullpaper angenommen)

Datum: 07.-08.10.2025

Inhalt: Transforming mobility to a shared, public and decarbonised system are key challenges of our time. Battery electric buses are a promising option for cities to reduce local greenhouse gas and noise emissions in public transport. The dominant charging strategy to date is concentrated during breaks but mainly overnight in depots which leads to several disadvantages. The sustainable energy mix in Germany peaks during daytime. Demand-oriented charging strategies hold a massive potential in increasing the overall efficiency due to smaller and lighter battery packs and shorter down times, Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) is considered an economic solution approach. This paper presents a method for automating the planning of the wireless charging systems for public transport. The output is an organized map indicating the optimized positioning and sizing of the inductive coils. Beginning with a demand-oriented energy estimation, the method uses operational, vehicle and infrastructure data to derive an optimized coil positioning within the serviced road network. Therefore, single route sections are evaluated in terms of their characteristics such as maximum permitted speed, route utilisation, stops, traffic lights and pedestrian crossings. Furthermore, the study addresses the challenges posed by the involvement of multiple stakeholders and the identification of barriers to integration with existing transport infrastructure. The study also considers the fusion of meta data from relevant sources such as the charging infrastructure and vehicle specifications to gain additional information and improve the planning process. The complex set of variable input parameters are sampled within an optimization loop to derive the first data based optimum. A posteriori gained restrictions due to local, urban-structural conditions such as telecommunication, energy and other lines narrow down the scope for a new iteration. The paper contributes to the development of sustainable urban mobility solutions by providing coherent approaches to an efficient design of sustainable public transport.

Titel: Integrated Planning of Wireless Charging Infrastructure and Road Maintenance in Urban Bus Systems

Publiziert in: Konferenzbeitrag Transport Research Arena Budapest 2026 (Abstract angenommen, Fullpaper wird eingereicht); Datum: 18.-21.05.2026

Inhalt: The transition to emission-free public transport is crucial for sustainable urban development. However, the widespread implementation of electric bus systems requires vehicle electrification and the strategic deployment of charging infrastructure. This research focuses on integrating dynamic wireless power transfer (DWPT) systems into urban bus networks, emphasizing the synchronization of DWPT installation with planned road maintenance activities. By aligning these infrastructure processes, cities can reduce construction costs, limit traffic disruptions, and accelerate the rollout of green mobility solutions. The study introduces a planning framework that combines GIS-based spatial analysis with operational modeling to identify optimal road segments for DWPT deployment. Key factors include route frequency, energy demand, and maintenance schedules. A case study demonstrates how this synchronized approach enhances the technical and economic feasibility of DWPT systems while supporting long-term infrastructure resilience. The findings provide actionable insights for municipalities, transit agencies, and infrastructure planners aiming to implement cost-effective and scalable electrification strategies. This study offers a transferable planning approach that efficiently integrates sustainable charging infrastructure into urban transport systems. Aligning technological innovation with practical implementation strategies supports the development of resilient, low-emission mobility solutions. It provides actionable insights for cities aiming to modernize their public transport networks.

Tabelle 2.6.4: Veröffentlichungen Teilvorhaben FfE

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
<p>Titel: Beitragsreihe Dynamisches Induktives Laden im Verkehr Publiziert in: FfE Beitragsreihe Dynamisches Induktives Laden Datum: 07/2023 bis 09/2025</p>			<p>Inhalt: In den letzten Jahren wurden zahlreiche Forschungsprojekte zur praktischen Umsetzung des dynamischen induktiven (Dynamic Wireless Power Transfer – DWPT) Ladens von Elektrofahrzeugen durchgeführt. Diese innovative Technologie ermöglicht eine drahtlose Energieübertragung, bei der Elektrofahrzeuge während der Fahrt aufgeladen werden können. Doch wie genau funktioniert diese Technologie und wo findet sich Induktion und induktives Laden bereits in unserem Alltag wieder? Welches Potenzial birgt das dynamische induktive Laden im öffentlichen Nahverkehr und welche Auswirkungen hat es auf Umwelt, Mensch und Energiesystem? Diesen und weiteren Fragestellungen widmet sich diese Beitragsreihe und beleuchtet das dynamische induktive Laden aus verschiedenen Perspektiven.</p> <p>Der erste Artikel beschäftigt sich mit der Funktionsweise und den Anwendungsbereichen des dynamischen induktiven Ladens. Der zweite Artikel die Rahmenbedingungen der Technologie des dynamischen induktiven Ladens, einschließlich Aspekte der Wirtschaftlichkeit, Regulatorik und Akzeptanz. Der dritte Beitrag dieser Reihe beschäftigt sich mit der öffentlichen Akzeptanz der DWPT Technologie. In dem vierten Beitrag dieser Reihe wird das nationale Technologiepotenzial im ÖPNV anhand von frei verfügbaren Datensätzen abgeleitet und regional aufgelöst. In dem fünften Beitrag wird eine Ökologische Bewertung der Technologie vorgenommen, indem das Emissionen des DWPT-Ladens dem Übernachtladen im Depot gegenübergestellt wird. Im letzten Beitrag der Reihe werden basierend auf den Erkenntnisse Handlungsempfehlungen für den Einsatz von DWPT im ÖPNV abgeleitet.</p> <p>Titel: Powering Public Transit: A Data-Driven Assessment of DWPT Feasibility for German Bus Routes Publiziert in: Eingereicht bei Geo-spatial Information Science Taylor & Francis Online Datum: im Erscheinen</p> <p>Inhalt: In the context of Germany’s climate neutrality goals by 2045, the electrification of public transport is a key strategy to reduce greenhouse gas emissions. Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) technology, which enables inductive charging of electric buses while in motion, offers a promising solution to reduce charging downtimes and battery sizes. However, its technical potential at the national level remains largely unexplored. This study presents a novel methodology to assess the municipal-level potential of DWPT in Germany using open-source geospatial and public transport schedule data. By applying routing algorithms and recursive optimization techniques, the study identifies optimal locations for wireless charging lanes (WCL) in 696 German municipalities with over 20,000 inhabitants. The analysis estimates transferable energy potentials for WCLs of 1,000 m, 2,000 m, and 5,000 m lengths and evaluates their impact on emissions and battery sizing. Results show that cities with centralized bus networks and no tram or metro systems—such as Wiesbaden and Aachen—exhibit the highest DWPT potential. While the overall national emission reduction potential is modest (approx. 2.5 kt CO₂e annually), certain municipalities demonstrate comparatively high local benefits. Furthermore, case studies using real vehicle schedules from Balingen suggest that DWPT can significantly reduce required battery capacities, especially in scenarios with limited downtime. This research highlights the value of combining open data and open-source tools for energy system planning and provides a replicable framework for assessing DWPT infrastructure deployment in other regions.</p> <p>Titel: Technologieakzeptanz von Dynamic Wireless Power Transfer im Mobilitätssektor: Empirische Evidenz aus Feldversuch und deutschlandweiter Befragung Publiziert in: Voraussichtliche Veröffentlichung der Publikation in 2026</p>

Datum: Voraussichtliche Veröffentlichung der Publikation in 2026

Inhalt: Die Einführung dynamisch induktiver Ladesysteme (Dynamic Wireless Power Transfer, DWPT) stellt eine vielversprechende Innovation für die Elektromobilität dar. Für eine erfolgreiche Marktdiffusion ist jedoch die gesellschaftliche Akzeptanz entscheidend. Die vorliegende Studie untersucht die Technologieakzeptanz von DWPT in Deutschland anhand eines zweistufigen Untersuchungsdesigns: einer lokalen Befragung von Nutzer:innen eines DWPT-betriebenen Shuttlebusses im Feldversuch sowie einer deutschlandweit repräsentativen Onlineumfrage. Basierend auf einer umfassenden Literaturanalyse wurden 15 relevante Einflussfaktoren identifiziert und in beiden Erhebungen operationalisiert. Die Ergebnisse zeigen eine insgesamt positive Grundeinstellung gegenüber DWPT, wobei praktische Erfahrung im Feldversuch zu einer deutlich höheren Akzeptanz führt. Die Regressionsanalysen identifizieren die wahrgenommene Nützlichkeit, persönliche Einstellung zur Elektromobilität, Vertrauen in verantwortliche Akteure sowie der individuelle Mehrwert als signifikante Einflussfaktoren auf die Einstellungsakzeptanz. Für die Verhaltensabsicht sind insbesondere der private Nutzen, ökologische Aspekte und die wahrgenommene Einfachheit der Nutzung entscheidend.

Die Studie liefert konkrete Handlungsempfehlungen für die Gestaltung von Informationskampagnen und die strategische Markteinführung von DWPT, insbesondere durch eine initiale Fokussierung auf den öffentlichen Verkehr. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung praktischer Erfahrung und transparenter Kommunikation zur Förderung der Technologieakzeptanz.