



# Forschungsvorhaben

Elektrifizierung von MetroBus-Linien mit Schnellladeinfrastruktur

## Abschlussbericht



**Zuwendungsempfänger:** Berliner Verkehrsbetriebe

**Förderkennzeichen:** 03EMF0105A

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.09.2018 – 31.12.2022

**Berichtszeitraum:** 01.09.2018 – 31.12.2022

## Inhalt

Abbildungsverzeichnis .....	4
Tabellenverzeichnis .....	5
1 Einleitung .....	6
2 Eingehende Darstellung wissenschaftlich-technischer und anderer Ergebnisse	7
2.1 Planung und Auslegung.....	7
2.1.1 Linienvergleich, -auswahl und Systemauslegung .....	7
2.1.2 Erstellung eines Flächen- und Infrastrukturkonzeptes Depot.....	10
2.1.3 Standortanalyse und Vorplanung straßenseitige Ladeinfrastruktur.....	10
2.2 Beschaffung, Errichtung, Inbetriebnahme Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur..	11
2.2.1 Ausschreibung und Vergabe Fahrzeuge und Ladegeräte.....	11
2.2.2 Ausschreibung und Vergabe Planung, Errichtung und Betrieb Ladeinfrastruktur .....	12
2.2.3 Planung straßenseitige Ladeinfrastruktur (Opportunity Charging) .....	12
2.2.4 Errichtung straßenseitige Ladeinfrastruktur .....	12
2.2.5 Planung und Errichtung Ladeinfrastruktur Depot .....	13
2.2.6 Produktionsüberwachung und Inbetriebnahme Fahrzeuge mit Infrastruktur.....	13
2.3 Betriebs- und Störfallkonzept.....	15
2.3.1 Anpassung Fahr-, Umlauf- und Dienstplanung an den E-Betrieb .....	15
2.3.2 Integration E-Betrieb in die Betriebsabläufe.....	17
2.3.3 Störfallkonzept E-Betrieb .....	17
2.3.4 Schulungskonzepte und Mitarbeiterschulungen für Fahrzeuge, Infrastruktur, Störfallkonzept .....	19
2.4 Monitoring, Auswertung und Optimierung.....	19
2.4.1 Entwicklung eines Systems zur Datenerfassung und -auswertung.....	19
2.4.2 Erfassung und Auswertung von Betriebs- und Verbrauchsdaten.....	21
2.4.3 Messungen zum Energiebedarf der Fahrzeuge .....	24
2.4.4 Empirische Studie zur thermischen Behaglichkeit im Fahrzeug.....	25
2.5 Projektmanagement, Kommunikation und Partizipation .....	28
2.5.1 Projektleitung .....	28
2.5.2 Bürgerpartizipation.....	28
2.5.3 Interaktive Information im Web .....	29
3 Vergleich Abschluss des Vorhabens mit der ursprünglichen Planung .....	30
3.1 Meilensteinplan.....	30
3.2 Zielerreichung und Veränderungen .....	32

3.3 Bekanntgabe relevanter Ergebnisse von dritter Seite.....	32
3.4 Notwendigkeit von Änderungen der Zielsetzung.....	32
3.5 Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans .....	32

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Steckbrief der ausgewählten Projektklinie .....	8
Abbildung 2: Linienführung der Projektklinie .....	8
Abbildung 3: Parameter beschaffter Fahrzeuge und HPC.....	12
Abbildung 4: Aufbau Ladeinfrastruktur an der Endstelle Hertzallee.....	13
Abbildung 5: E-MetroBus im Ersatzverkehr (12/M13) .....	16
Abbildung 6: Simulationsergebnisse technischer Ausfall HPC, Quelle: TU Berlin ....	17
Abbildung 7: Auszug aus dem Handlungsleitfaden für die Betriebsleitstelle .....	18
Abbildung 8: Frontend Active Monitoring Fa. Siemens.....	19
Abbildung 9: Flottenreport des Systems zur Datenerfassung und Auswertung .....	21
Abbildung 10: Auswertung des >24h-Betriebes.....	22
Abbildung 11: Verfügbarkeit Ladeinfrastruktur.....	23
Abbildung 12: Technischer Einsatzkoeffizient und Laufleistung der Fahrzeuge .....	24
Abbildung 13: Schadensmeldungen innovativ/konventionell in Prozent .....	24
Abbildung 14: Ergebnisse der Messfahrten am 24.06.2022. Quelle: TU Berlin .....	25
Abbildung 15: Gemessene Lufttemperatur (a) und Temperaturunterschied (b) Quelle: TU Berlin.....	26
Abbildung 16: Ergebnisse der Messfahrten am 24.06.2022. Quelle: TU Berlin .....	26
Abbildung 17: Thermische Behaglichkeit Quelle: TU Berlin .....	27
Abbildung 18: Thermisches Empfinden der Fahrgäste im Bus. Quelle: TU Berlin....	27
Abbildung 19: Projektflyer.....	28
Abbildung 20: Durch die Partner entwickelte Web-App .....	29

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Funktionale Anforderungen an Fahrzeuge und Schnellladeinfrastruktur ...	9
Tabelle 2: Ergebnis zur Performance der Fahrzeuge während des Testbetriebes ...	14
Tabelle 3: Ergebnis zur Performance der HPC während des Testbetriebes .....	15
Tabelle 4: Rückführung von unproduktiven Dienstzeiten auf der Projektlinie 200 ....	15
Tabelle 5: Zusätzliche Leistung nach Betriebstag auf der Linie 100.....	16
Tabelle 6: Kennziffern für die Betriebsdatenauswertung .....	20
Tabelle 7: Meilensteinplan BVG .....	31

## 1 Einleitung

Mit dem Projekt „E-MetroBus“ konnten die Berliner Verkehrsbetriebe eine weitere Ausbaustufe bei der Elektrifizierung des Busverkehrs in Berlin realisieren. Mit diesem Projekt konnte dabei beleuchtet werden, unter welchen Rahmenbedingungen E-Busse im hochfrequenten Stadtbusverkehr in der Konfiguration als Opportunity Charger in Kombination mit entsprechender Schnellladeinfrastruktur eingesetzt werden können.

Übergeordnetes Ziel des Teilvorhabens war daher die Realisierung eines robusten, stabilen E-Bus-Betriebs unter den hohen Lastbedingungen des Metrobus-Verkehrs.

Hierzu waren die folgenden betrieblichen Arbeitsziele zu erfüllen:

- Entwicklung und Validierung eines robusten Betriebskonzeptes und flexiblen Störfallmanagements für elektrifizierte Metrobus-Linien
- Analyse des Einflusses der Zwischenladung auf die Betriebsstabilität im hochfrequenten Metrobus-Verkehr und Evaluation von Korrekturmaßnahmen
- Erweiterung der Kompetenzen im Bereich Planung und Betrieb des Elektrobusverkehrs

Hieraus ergaben sich für das Teilvorhaben folgende technisch-wissenschaftliche Arbeitsziele:

- Erprobung und Optimierung von Schnellladeinfrastruktur im Leistungsbereich >300 kW
- Auslegung der Traktionsbatterie und Untersuchung der durch Betriebsstörungen erforderlichen betrieblichen Reserven

Schließlich konnten die folgenden strategischen Ziele formuliert werden, die das Teilvorhaben erfüllen sollte:

- Senkung der Beschaffungskosten für E-Busse und Ladeinfrastruktur durch hohe Stückzahlen
- Positionierung Berlins als Vorreiter in der Transformation zum emissionsfreien und klimaneutralen Nahverkehr (Stichwort: Klimaneutrales Berlin 2050)
- Erhöhung der Sichtbarkeit und Akzeptanz der E-Mobilität

Zum Erreichen der genannten Ziele wurden 17 Gelenkbusse mit einer Länge von 18 m in der Ausführung als Gelegenheitslader beschafft. Die Busse wurden im Liniennetz der BVG vorrangig auf der ausgewählten Projektlinie betrieben, kamen aber temporär auch auf anderen Linien und Szenarien zum Einsatz. Weiter wurde innerhalb des Projektes neben der Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof auch Schnellladeinfrastruktur mit einer Leistung von bis zu 600 KW beschafft und in unterschiedlichen Leistungsabstufungen erprobt.

## **2 Eingehende Darstellung wissenschaftlich-technischer und anderer Ergebnisse**

### **2.1 Planung und Auslegung**

#### **2.1.1 Linienvergleich, -auswahl und Systemauslegung**

Die Auswahl der zu elektrifizierenden Demonstrationlinie für das Projekt wurde mit dem Management der BVG und der Berliner Senatsverwaltung für Umwelt und Verkehr anhand verschiedener Kriterien diskutiert.

Dabei waren die folgenden Fragenstellungen von besonderer Relevanz.

- Ist die ausgewählte Linie sichtbar und öffentlichkeitswirksam?
- Ist an den Endstellen sowie auf dem Betriebshof genügend Platz für Ladeinfrastruktur?
- Wie ist die NO<sub>x</sub>-Belastung entlang der Linienführung?
- Lässt sich die Linie mit 15 Fahrzeugen voll- oder nur teilelektrifizieren?
- Wie verspätungs- und störungsanfällig ist die ausgewählte Linie?
- Wird straßenseitige Ladeinfrastruktur an mehr als drei Endstellen benötigt?
- Lässt sich die Linie mit „Zero Emission“ elektrifizieren?

Während des sukzessiven Auswahlprozesses sind insbesondere die Linien nicht weiter in Betracht gezogen worden, an deren Endstellen entweder der Platz für Ladeinfrastruktur und/oder der Netzanschluss nur mit hohem baulichen und v. a. bezogen auf die Projektlaufzeit mit zu hohem zeitlichem Aufwand hergestellt hätte werden können.

Nach gründlicher Abwägung aller betrieblichen Einflussfaktoren und den förderpolitischen Vorgaben bzw. den gesteckten Projektzielen fiel die Wahl auf die Buslinie 200. Die Linie 200 verkehrt durch die Innenstadt, verbindet die City Ost und die City West miteinander und hatte somit auch in Bezug auf die öffentliche Wirkung des Projekts eine hohe Sichtbarkeit. Mit den beschafften 17 Fahrzeugen konnte diese Linie vollelektrifiziert werden.



Mit dem Partner TUB wurden die Umlaufpläne und Verspätungsdaten für sämtliche M-Linien und einige prominente Innenstadtlinien (100, 200, TXL) analysiert, um die Grundlage für die funktionalen Anforderungen an die zu beschaffenden Fahrzeuge und Ladegeräte zu legen. Mittels des TUB-Simulationstools wurden vor allem die notwendige Batteriekapazität, die mögliche Auslegung des Heiz- und Kühlsystems (elektrisch oder fossil) bei den Fahrzeugen sowie die erforderliche Ladeleistung bei den straßenseitigen Schnellladesystemen (High Power Charger, HPC) identifiziert.

Unter Berücksichtigung der verfügbaren Technologien hat sich die BVG darauf fokussiert, ein System-Setup zu finden, das mit möglichst geringen betrieblichen Anpassungen die Befahrung der anspruchsvollsten Linien mit gelegentlichladenden E-Bussen erlaubt. Damit ist analog zum konventionellen Dieselantrieb die Möglichkeit gegeben, das Systems auf jeder Berliner Linie einsetzen zu können. Dabei richtete sich das Augenmerk auch darauf, die Anforderungen an die Fahrzeuge und Schnellladesysteme so zu gestalten, dass bei ihrem Einsatz ineffiziente und kostenerhöhende Wirkungen auf die betrieblichen Prozesse reduziert bzw. vermieden werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in die funktionalen Leistungsbeschreibungen für die Fahrzeuge und Schnellladesysteme eingeflossen.

*Tabelle 1: Funktionale Anforderungen an Fahrzeuge und Schnellladeinfrastruktur*

<b>Anforderung Fahrzeug</b>	<b>Betriebliche Auswirkung</b>
Mindestreichweite bei max. Energieverbrauch 60 km (im 6. Betriebsjahr)	Betriebliche Flexibilität/ Stabilität: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeuge auf allen M-Linien einsetzbar</li> <li>• 1,5 komplette Linienumläufe zzgl. Aussetzfahrt zum Hof ohne Zwischenladen</li> </ul> Investitionskosten/ Betriebskosten: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorkonditionieren des Fahrgastinnenraumes vor Betriebsbeginn nicht notwendig</li> <li>• 1:1 Plug-in Ladeinfrastruktur im Depot nicht notwendig</li> </ul>
Robuste Traktionsbatterie, Betrieb ohne Vorkonditionierung möglich	Investitionskosten/ Betriebsabläufe, -kosten: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1:1 Plug-in Ladeinfrastruktur im Depot nicht notwendig</li> <li>• Reduzierte Anzahl an Plug-in-Säulen wird nur zum Balancen der Batterie benötigt</li> </ul>
Fahrzeug kann beim Laden vom Fahrer verlassen werden und verschlossen werden	Betriebskosten: Keine Verlängerung der Wendezeiten und Anpassung der Umlauf- und Dienstplanung
Elektrische Heizung	Betriebskosten: Kein Tankvorgang im Depot, wie bei Fahrzeugen mit fossiler Heizung.

Anforderung/ Schnellladeinfrastruktur (HPC)	Auslegung	Betriebliche Auswirkung
Ladeleistung 450 KW		Betriebskosten: Kurze Ladezeiten, geringere Anpassungen der Umlauf- und Dienstplanung
2 HPC pro Linie an jeder End- bzw. Ladestelle		Betriebskosten: Bei „Überlage“ (verfrühte oder verspätete Fahrzeuge warten auf den Ladevorgang) kein reguläres Freimachen des HPC durch Vorrücken der Fahrzeuge vor der Abfahrtszeit erforderlich; dadurch geringere Anpassungen der Umlauf- und v. a. der Dienstplanung
(mind.) 1 HPC pro Linie im Depot		Betriebskosten/ Betriebsabläufe: Schnellladen ersetzt den bisherigen Tankvorgang während der Innenreinigung des Fahrzeuges
Aktivierung/ Deaktivierung Ladevorgang < 30 Sekunden		Betriebskosten: Begrenzung der Zeit für den gesamten Ladezyklus, keine/ geringere Anpassung der Umlaufplanung

### 2.1.2 Erstellung eines Flächen- und Infrastrukturkonzeptes Depot

Die Fahrzeuge der Linie 200 wurden auf dem Betriebshof Indira-Gandhi-Straße stationiert, auf dem seinerzeit parallel zum Projekt E-MetroBus eine E-Busflotte, bestehend aus 120 Depotladern (ausschließlich depotladende Solobusse) aufgebaut wurde.

Eine wesentliche Rolle im Rahmen der Vorplanung spielte daher insbesondere die Schaffung einer entsprechenden Netzanschlusskapazität für den Hof, die im Kontext mit dem Aufbau der Plug-in-Ladegeräte für die 120 Depotlader Begrenzungen unterlag.

Ergebnis der Systemauslegung war, dass es sich günstig auf die betrieblichen Prozesse auswirkt, einen Schnelllader (HPC) sowie Ladesäulen im Verhältnis 1:3 zur beschafften Anzahl der Fahrzeuge im Depot zu errichten. Die Standortauswahl für den HPC wurde unter Berücksichtigung aller betrieblichen Abläufe und Prozesse der künftig aus Diesel- und E-Bussen bestehenden gemischten Flotte auf dem Hof getroffen.

### 2.1.3 Standortanalyse und Vorplanung straßenseitige Ladeinfrastruktur

Das Auffinden von Leitungen im Baugrund führte hinsichtlich der Festlegung der betrieblich optimalen Position der HPC an beiden Endstellen zu mehrmaligen Umplanungen. Der Abschluss der Vorplanungen konnten daher statt im 3. Quartal 2018 erst im 1. Quartal 2019 erreicht werden.

Die Anschlüsse an das Stromnetz konnten an beiden Endstellen ohne Einschränkungen, wenn auch nur mit einem langen Planungsvorlauf von ca. 12 Monaten realisiert werden. Die Herstellung der Netzanschlüsse (inkl. Übergabestation)

waren darüber hinaus mit hohen Kosten verbunden. Diese belaufen sich auf 1/4 bis 1/3 der Kosten für die HPC und erhöhten damit die Gesamtkosten für den Aufbau der Ladeinfrastruktur signifikant.

Die zuständigen Bezirksämter zeigten sich bei der Vorstellung des Projektes und bei der Klärung der Genehmigungsrechts für die Errichtung der HPC aufgeschlossen und kooperativ. Für die Errichtung der HPC bestand die Notwendigkeit, eine entsprechende Sondernutzungsgenehmigung für die Bestandsendstellen zu erwirken.

## **2.2 Beschaffung, Errichtung, Inbetriebnahme Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur**

### **2.2.1 Ausschreibung und Vergabe Fahrzeuge und Ladegeräte**

Das Ausschreibungsverfahren für 15 Fahrzeuge und bis zu sechs Schnellladegeräte (HPC) wurde im 1. Q 2019 mit einem Zuschlag an den Fahrzeughersteller Solaris abgeschlossen. Fahrzeuge und HPC wurden als Gesamtsystem beschafft, Solaris agierte daher wie ein Generalunternehmer. Die Fa. Siemens war Zulieferer für die HPC. Im Ergebnis der Systemauslegung wurden insgesamt vier HPC mit 450 KW für die Endstellen (je zwei) und ein HPC mit 300 KW für den Betriebshof beschafft.

Der Zuschlag für das Gesamtsystem erfolgte unter dem ursprünglich kalkulierten Budget, so dass mit Zustimmung des Projektträgers zwei weitere baugleiche Fahrzeuge im Rahmen einer Erweiterung des Lieferumfangs bei Solaris beschafft wurden.

Im Rahmen des Projektes sollte ein Teil der Fahrzeuge testweise auch auf anderen als der Linie 200 zum Einsatz kommen. Mit der Aufstockung der „E-MetroBus-Flotte“ auf 17 Fahrzeuge war eine erhöhte Einsatzflexibilität verbunden, da der Einsatz der Fahrzeuge auf weiteren Linien zu Testzwecken besser skaliert werden konnte. Der Vergleich der Ergebnisse verschiedener Linieneinsätze lieferte zudem einen höheren Erkenntnisgewinn als der konstante Einsatz auf nur einer Linie.

Um eine homogene Plug-in-Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof Indira-Gandhi-Str. zu gewährleisten, wurden die Plug-in-Ladesäulen für das Projekt in einem Vergabeverfahren mit den Säulen für die 120 Depotlader beschafft.

Abbildung 3: Parameter beschaffter Fahrzeuge und HPC

**Das Gesamtsystem basierte auf dem neuesten Stand der Technik**

**und war damit der Garant für einen stabilen Betrieb auf der Projektlinie**

**Fahrzeug: Solaris Urbino 18 electric**

- Vollelektrische Heizung
- CO2 Klimaanlage mit Wärmepumpe
- Reichweite min. 60 km
- Max. Energieverbrauch 2,17 kWh/km
- 12 Jahre Beschaffens- und Haltbarkeitsgarantie

**Batterie**

- Batterietechnologie: Lithium-Titanat-Oxid (LTO)  
→ sehr langlebig und zuverlässig
- Kapazität brutto: 174 kWh
- Kapazität netto: 156 kWh
- 7 Jahre Gewährleistung

**Schnelladesystem: Siemens**

- Inverser Pantograph mit 450 kW (Linie), 300 kW (Depot)
- 3 Jahre Gewährleistung
- Service und Wartung für 3 Jahre
- Active Monitoring für Störungsüberwachung



## 2.2.2 Ausschreibung und Vergabe Planung, Errichtung und Betrieb Ladeinfrastruktur

Die ursprüngliche Absicht, die Planung, Errichtung und den Betrieb der Ladeinfrastruktur als Gesamtpaket auszuschreiben und zu vergeben hatte sich als nicht praktikabel erwiesen. Ein bereits im Jahr 2018 gestartetes Präqualifikationsverfahren endete mit der Erkenntnis, dass eine entsprechende Gesamtleistung am Markt nicht erhältlich war, demzufolge ein Vergabeverfahren ergebnislos verlaufen würde. Die Leistungen wurden daher einzeln ausgeschrieben. Der Betrieb der Ladeinfrastruktur erfolgte durch die BVG, sofern er sich auf die Instandhaltung bezog für die ersten 3 Jahre durch die Lieferanten der Ladegeräte.

## 2.2.3 Planung straßenseitige Ladeinfrastruktur (Opportunity Charging)

Die Anträge auf Sondernutzung der Endstellen Hertzallee und Michelangelostraße sind von den Bezirksämtern Mitte und Pankow im 3. Quartal 2018 genehmigt worden.

Nachdem die Ausführungsplanung für den Kabeltiefbau im 3. Quartal 2019 in Abstimmung mit Siemens fertiggestellt werden konnte, wurden die Tiefbauarbeiten auf Basis dieser Planung im 4. Quartal 2019 beauftragt.

Die Ausführungsplanung für die endgültigen Standorte der HPC an den Endstellen und im Depot Indira-Gandhi-Str. wurde wie v. g. im 3. Quartal 2019 fertiggestellt.

## 2.2.4 Errichtung straßenseitige Ladeinfrastruktur

Die verkehrsrechtlichen Anordnungen für die Endstellen Michelangelostraße und Hertzallee wurden im Berichtszeitraum erteilt, in der Folge konnte an beiden Endstellen sowohl mit den Tiefbauarbeiten als auch mit der eigentlichen Errichtung der Ladeinfrastruktur begonnen werden.

An der Endstelle Hertzallee konnten alle Tiefbauarbeiten bis Ende Januar 2020 abgeschlossen und abgenommen werden. Der Aufbau der Trafostation der Ladehäuser und Lademasten erfolgte direkt im Anschluss. Die technisch-funktionale Abnahme erfolgte im 3. Quartal 2020 mit leichter Verzögerung ohne Beanstandungen.

Abbildung 4: Aufbau Ladeinfrastruktur an der Endstelle Hertzallee



An der Michelangelostraße konnten alle Tiefbauarbeiten bis Ende März 2020 beendet und abgenommen werden. Die Errichtung der Ladeinfrastruktur wurde am 30.06.2020 erfolgreich abgeschlossen. Die technisch-funktionale Abnahme erfolgte ebenfalls im 3. Quartal 2020 ohne Beanstandungen.

### **2.2.5 Planung und Errichtung Ladeinfrastruktur Depot**

Die Ausführungsplanung für die Errichtung der Depotladegeräte wurde im 4. Quartal 2019 fertiggestellt. Die Lieferung der Plug-in-Ladegeräte selbst erfolgte im 2. Quartal 2020, die Fertigstellung der Errichtungsarbeiten Anfang des 3. Quartal 2020.

### **2.2.6 Produktionsüberwachung und Inbetriebnahme Fahrzeuge mit Infrastruktur**

Im 3. Quartal 2019 sind Qualitätskontrollen an den sich in der Fertigung befindenden Fahrzeugen im Werk ohne Beanstandung durchgeführt worden.

Die Fahrzeugauslieferung startete mit dem ersten Fahrzeug am 27.03.2020 mit etwa einmonatigem Verzug. Weitere Fahrzeuganlieferungen erfolgten operativ aufgrund von Corona bedingten Verzögerungen im grenzüberschreitenden Warenverkehr. 16 von 17 Fahrzeugen konnten bis Ende Juni angeliefert werden.

Im 3. und 4. Quartal 2020 konnte sowohl das 17. Fahrzeug angeliefert als auch alle Fahrzeuge und die gesamte Ladeinfrastruktur funktional und final abgenommen werden.

Die erste Fahrgastfahrt auf der Projektlinie 200 fand im August 2020 unter Einbindung der Fördermittelgeber, Projektpartner und Lieferanten statt.

Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur wurden in der Folge in einem sogenannten „Pre-Testbetrieb“ unter Realbedingungen in den Monaten August, September, Oktober und November im regulären Betrieb getestet. Dieser „Pre-Testbetrieb“ lieferte dabei wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Stabilität von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur. So konnten beispielweise Schwachstellen in Form von Serienmängeln an den Fahrzeugen bzw. auch hinsichtlich der Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur identifiziert werden. Die Projektleitung veranlasste daher die Unterbrechung des Testbetriebs am 27.11.2020 bis auf Weiteres, da es im laufenden Betrieb wiederholt zu Problemen an Fahrzeugen, Ladeinfrastruktur sowie eines Subsystems in Bezug auf deren Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit kam. Auch die Bereitstellung der Daten in den Monitoringsystemen (ViriCiti und EVC<sup>3</sup>-Siemens) gab Anlass zur Nachsteuerung. In regelmäßigen Terminen konnten sämtliche Themen adressiert und gemeinsam mit den Lieferanten bearbeitet werden, sodass sich nach und nach Fortschritte einstellten und der Testbetrieb am 08.12.2020 wieder aufgenommen werden konnte. Der für die Abnahme des Gesamtsystems durchzuführende 14-tägige Testbetrieb mit 15 Fahrzeugen und der gesamten Ladeinfrastruktur konnte schließlich am 12.12.2020 erfolgreich abgeschlossen werden. Die Abnahme des Gesamtsystems erfolgte unter Berücksichtigung vertraglich möglicher Einbehalte gegenüber dem Generalunternehmer Solaris.

Tabelle 2: Ergebnis zur Performance der Fahrzeuge während des Testbetriebes

Fahrzeug	18. Nov	19. Nov	20. Nov	21. Nov	22. Nov	23. Nov	24. Nov	25. Nov	26. Nov	08. Dez	09. Dez	10. Dez	11. Dez	12. Dez
Fahrzeug	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
5420	F	F	F	X	F	X	F	F	R	F	F	F	X	F
5421	F	F	X	F	F	X	F	X	F	FA	F	R	FA	FA
5422	F	F	F	F	R	F	F	F	F	F	F	F	F	F
5423	F	F	F	R	F	F	F	F	F	F	FA	R	F	F
5424	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
5425	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	R
5426														
5427	F	F	R	F	F	F	R	F	F	F	R	F	F	R
5428	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
5429	F	F	F	F	F	F	F	R	R	F	F	F	FA	F
5430	R	F	F	F	F	F	R	R	F	X	X	F	F	F
5431	F	F	F	F	F	F	F	F	F	R	F	F	F	F
5432	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	X	F
5433	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
5434		R	F	F	R	F	F	F	F	F	F	F	F	F
5435		R	F	F	F	X	FA	F	F	F	F	F	F	F
5436	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
Frühablauf	14	14	14	14	14	13	14	14	14	14	14	14	14	14
Verspätet eingesetzt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abgelöst	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	2	1
Stehenbleiber	0	0	1	1	0	3	0	1	0	1	1	0	2	0
Reserve	1	2	1	1	2	0	2	1	2	1	1	2	0	2
verfügbare Fahrzeuge 08:00	15	16	15	15	16	13	16	15	16	15	15	16	14	16
TEK in %	93,8	100,0	93,8	93,8	100,0	81,3	100,0	93,8	100,0	93,8	93,8	100,0	87,5	100,0
BEK in %	107,1	114,3	107,1	107,1	114,3	92,9	114,3	107,1	114,3	107,1	107,1	114,3	100,0	114,3

Legende:  
 F= Frühablauf  
 FA= Fahrzeug abgelöst  
 FV= Verspätet eingesetzt  
 X= Stehenbleiber  
 R= Reserve

Tabelle 3: Ergebnis zur Performance der HPC während des Testbetriebes

HPC/EVC <sup>3</sup>	18. Nov	19. Nov	20. Nov	21. Nov	22. Nov	23. Nov	24. Nov	25. Nov	26. Nov	08. Dez	09. Dez	10. Dez	11. Dez	12. Dez
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
BFI01	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
MIC01	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
MIC02	F	F	F	F	F	F	F	F	KS	F	F	F	F	F
HZA01	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
HZA02	F	F	F	F	F	S	F	F	F	F	F	F	F	F
EVC <sup>3</sup>	F	F	F	F	F	S	F	F	S	F	F	F	F	F
ungestört	5	5	5	5	5	4	5	5	4	5	5	5	5	5
Störung < 2 Std.	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Störung > 2 Std.	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Verfügbarkeit 24h in %	100	100	100	100	100	80	100	100	80	100	100	100	100	100

Legende: F= ungestört  
KS= Störung < 2 Std.  
S= Störung > 2 Std.

Im Anschluss an den Testbetrieb konnte das Gesamtsystem erfolgreich in den Regelbetrieb überführt werden.

## 2.3 Betriebs- und Störfallkonzept

### 2.3.1 Anpassung Fahr-, Umlauf- und Dienstplanung an den E-Betrieb

Die grundlegenden Arbeiten konnten Ende des 4. Quartals 2019 abgeschlossen werden.

Im Ergebnis bestand aufgrund der Leistungsfähigkeit von Fahrzeugen und HPC kein grundsätzlicher Anpassungsbedarf für die Fahr- und Umlaufplanung.

Gegenüber dem Betrieb mit Dieselfahrzeugen hat sich während der gesamten Projektlaufzeit kein Fahrzeugmehrbedarf ergeben.

Auch bei der Dienstplanung (Pausenregelung) gab es u. a. wegen der Möglichkeit, dass die Fahrer die Fahrzeuge während des Ladevorgangs verlassen können, keine durch den elektrischen Betrieb veranlassten Anpassungen. Einzig nach Ein- und vor den Aussetzfahrten der Fahrzeuge vom bzw. zum Betriebshof wurde zu Beginn des regulären Fahrgastbetriebes eine zusätzliche Nachladezeit implementiert. Durch diese Maßnahme sollte der Aufwand des reinen Nachladens auf dem Betriebshof reduziert werden. Auch hier führte jedoch die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems im 3. Quartal 2021 dazu, dass die Zeiten im Verlauf des Projektes wieder zurückgenommen werden konnten und somit der Wirkungsgrad der Dienstpläne für den elektrischen Betrieb dem Betrieb mit Dieselfahrzeugen entsprach.

Tabelle 4: Rückführung von unproduktiven Dienstzeiten auf der Projektlinie 200

	Anz. betroffener Umläufe/Tag	unproduktive Dienstzeit in Min./Umlauf	Gesamt Min./Tag	Gesamt Min./Jahr	Gesamt Std./Jahr
Mo.-So.	7	7	49	17.885	298

Im Rahmen des F+E Teils im Projekt wurden in der Zeit von April 2021 bis August 2021 auch erstmals operativ 1-2 Fahrzeuge versuchsweise aber regelmäßig auch auf anderen Linien der BVG eingesetzt. Hierbei handelte es sich zunächst um einen 8 Kilometer langen Schienenersatzverkehr auf den Straßenbahnlinien 12 und M13 mit einseitiger Nachlademöglichkeit an dem auf dem Betriebshof Indira-Gandhi-Str. befindlichen 300 kW HPC. Die Fahrzeuge konnten auch hier ohne Einschränkungen analog dem Betrieb mit Dieselfahrzeugen eingesetzt werden.

Abbildung 5: E-MetroBus im Ersatzverkehr (12/M13)



Aufgrund von turnusmäßigen Änderungen in der Fahrplanung hatte sich außerdem der Fahrzeugbedarf auf der Projektklinie von ursprünglich 14 auf 13 Fahrzeuge reduziert. Zur Kompensation konnten im 4. Quartal 2021 die Fahrplanungen für einen alternativen Fahrzeugeinsatz abgeschlossen werden. Diese konnten - nach interner Rücksprache mit den Fachabteilungen – zum 09.03.2022 umgesetzt werden. Ab genanntem Datum wurden 2 Fahrzeuge mit Gelegenheitsladetechnik auf der innerstädtischen Linie 100 und auf der Nachtbuslinie N2 eingesetzt. Auch hier konnte ein stabiler Betrieb analog dem Dieselbetrieb realisiert werden, ohne dass Anpassungen bei der Fahrplanung notwendig waren. Die Nachladung erfolgte an einem der beiden HPC an der Hertzallee. Die planmäßige Gesamtfahrleistung der E-MetroBus-Flotte konnte mit dieser Maßnahme um 16.405 Minuten (273,4 Stunden) bzw. 3.173 Kilometer je Kalenderwoche gesteigert werden und somit – bei entsprechender Fahrzeugverfügbarkeit - einen weiteren, wertvollen Beitrag zur lokalen Einsparung von CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> leisten.

Tabelle 5: Zusätzliche Leistung nach Betriebstag auf der Linie 100

zusätzliche Leistung ab 09.03.2022	Betriebstag	Betriebszeit je Betriebstag (in Min)	Betriebskilometer je Betriebstag
	Mo-Do	2956	588
	Fr	2211	436
	Stg	2370	385

Eine alternative Einsatzerprobung auf weiteren Linien der BVG – auch auf anderen Betriebshöfen - konnte aufgrund des starken Verschnitts der einzelnen Linien untereinander, der Wartung und Instandsetzung der Fahrzeuge und dem damit verbundenen hohen Schulungsaufwand weiterer Personale im Fahrdienst und in den Betriebswerkstätten nicht realisiert werden.

### 2.3.2 Integration E-Betrieb in die Betriebsabläufe

Sämtliche Serviceabläufe im Depot (u. a. Laden, Reinigen, Werkstattservice) funktionierten während der Projektlaufzeit einwandfrei. Dabei lieferte der 300 kW Lademast auf dem Betriebshof Indira-Gandhi-Str. einen wertvollen Beitrag, um Fahrzeuge nach Service und Wartung schnell nachzuladen und damit sehr zügig voll einsatzfähig zu machen. Auch die 6 beschafften Ladesäulen (eingestellt auf zunächst 30 kW später auf 15 kW Ladeleistung) sind gut in die Abläufe integriert und gewährleisten zuverlässig die Pflege der in den Fahrzeugen verbauten Akkus. Das ungleiche Verhältnis von Ladesäulen und Fahrzeugen wird dabei über einen eigens realisierten „Ladeturnus“ ausgeglichen. Mit dem Ladeturnus ist die notwendige Übersichtlichkeit und Historie über die einzelnen Ladevorgänge geschaffen worden.

### 2.3.3 Störfallkonzept E-Betrieb

Für die ggf. auftretenden technischen Ausfälle der HPC an den Endstellen, wurde durch den Partner TUB mittels energetischer Simulationen ermittelt, ob ein Weiterbetrieb der Linie 200 mit E-Bussen möglich ist, und wieviel Zeit bis zur notwendigen Ablösung der elektrischen Gelenkbusse durch Diesel- oder depotladende Busse verbleibt, falls ein Weiterbetrieb mittels Gelegenheitsladung nicht möglich ist.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich mit geringen operativen betrieblichen Anpassungen (sog. „Vorrücken“) fast alle technischen Störfälle auffangen lassen und der Betrieb mit einem HPC grundsätzlich möglich ist.

Abbildung 6: Simulationsergebnisse technischer Ausfall HPC, Quelle: TU Berlin

### Simulationsergebnisse: Mit Vorrücken

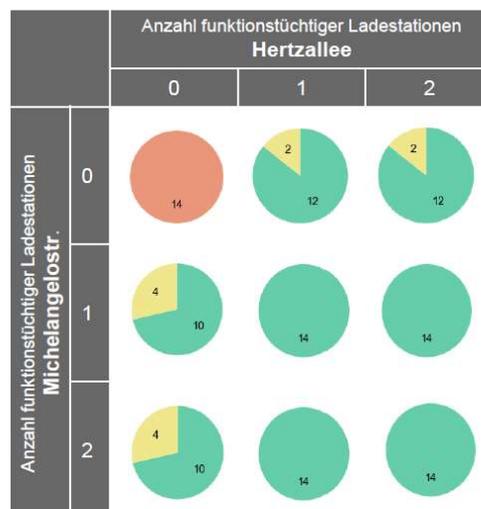


#### Mit Vorrücken:

- Sind bei Ankunft eines Fahrzeugs alle Ladeplätze belegt, wird auf einen freien Ladeplatz gewartet. Nur, wenn bis zur Abfahrt kein Ladeplatz frei wird, wird der Ladevorgang übersprungen.
- Nach Ende eines Ladevorgangs wird der Ladeplatz sofort freigegeben.
- Der Fahrer muss anwesend sein, um das Fahrzeug zu rangieren.

Die Kuchendiagramme zeigen jeweils die **Anzahl Umläufe**, die

- ohne Unterschreiten einer Restreichweite von 20 km (grün),
- mit Unterschreiten einer Restreichweite von 20 km (gelb),
- nicht (rot) betrieben werden können.



Analog konnte bei Erreichbarkeit von mindestens einer Endstelle im Falle anderer Betriebsstörungen (z. B. Demonstrationen, Blockierung der HPC durch fremde Fahrzeuge) der elektrische Betrieb mit geringen dispositiven Maßnahmen der Leitstelle während der gesamten Projektlaufzeit fortgeführt werden.

Grundlage für den stabilen Betrieb des Gesamtsystems während der gesamten Projektlaufzeit war die zuvor durchgeführte Analyse und Evaluation von relevanten Störfällen bezogen auf die Nichterreichbarkeit und/oder den Ausfall der HPC an den Endstellen sowie die geringfügige Anpassung von Prozessen und Strukturen in der Leitstelle, mit denen auf diese Störfälle reagiert werden sollte. Diese mündete in einem entsprechend detaillierten Handlungsleitfaden für die Mitarbeiter\*innen der Betriebsleitstelle im Falle von Störungen an der Ladeinfrastruktur. Das Störfallkonzept kam während der Projektlaufzeit mehrfach zur Anwendung und konnte dabei stets den Betrieb der Projektlinie aufrechterhalten. Fahrgastrelevanter Ausfall konnte vermieden werden. Das Störfallkonzept muss allerdings angepasst werden, wenn Fahrzeuge zukünftig anders konfiguriert werden oder auf Linien mit stark abweichenden Parametern zum Einsatz kommen.

Abbildung 7: Auszug aus dem Handlungsleitfaden für die Betriebsleitstelle

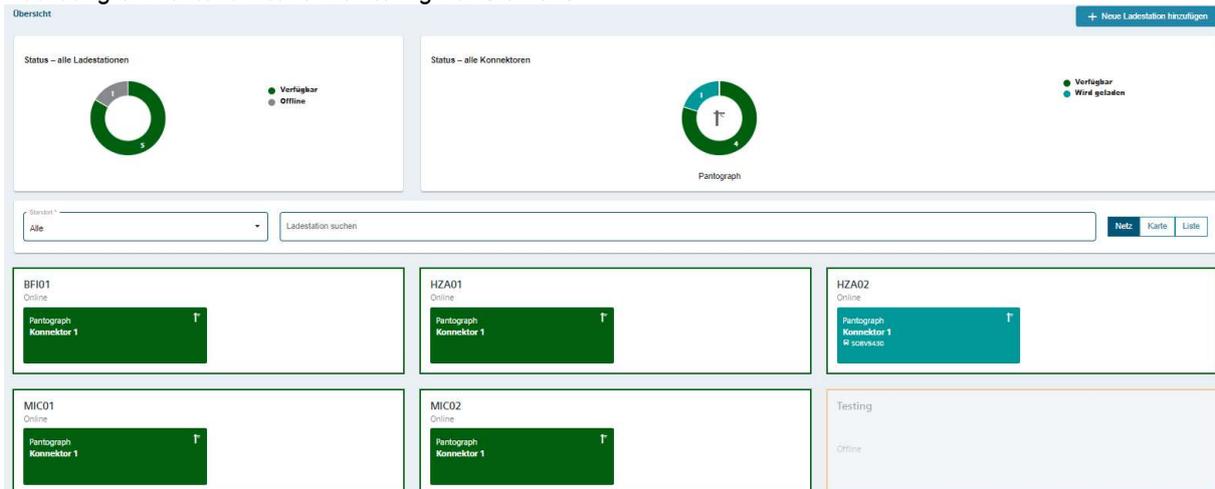
**Störung im lfd. Betrieb**

Szenario	Endstelle A/B		←  →				Endstelle A/B		Szenario
	HPC1	HPC2	physisch blockiert	technisch gestört	physisch blockiert	technisch gestört	HPC1	HPC2	
1 HPC physisch blockiert oder technisch gestört			< 1 Std.		> 1 Std.				Beide HPC funktionsfähig
			Keine dispositiven Maßnahmen erforderlich, da zweiter HPC verfügbar. Ggf. bei Überlage ladendes Fahrzeug unter Berücksichtigung der Fahrplanlage vorziehen lassen. (Anweisung durch BLO) Ggf. "Pausengutschriften" erforderlich						
1 HPC physisch blockiert oder technisch gestört			< 1 Std.		> 1 Std.				1 HPC physisch blockiert oder technisch gestört
			Keine dispositiven Maßnahmen erforderlich, da zweiter HPC verfügbar. Ggf. bei Überlage ladendes Fahrzeug unter Berücksichtigung der Fahrplanlage vorziehen lassen. (Anweisung durch BLO) Ggf. "Pausengutschriften" erforderlich						
2 HPC physisch blockiert oder technisch gestört			< 1 Std.		> 1 Std.				Beide HPC funktionsfähig
			Kommunikation mit Fahrpersonal über Restreichweite A: Reichweite < 30 km: Warten bis 1 HPC frei, dann unabhängig von Fahrplanlage 5 Minuten (bis Reichweite = 30 km) laden B: Reichweite > 30 km: Wenn HPC vor Abfahrt nicht verfügbar, Laden auslassen und an anderer Endstelle nachholen						
			Dispositive Maßnahmen erforderlich 50 % der Fahrzeuge werden gegen Dieselfahrzeuge abgetauscht. Kommunikation mit Fahrpersonal über die Ladezustände/ Restreichweite des Fahrzeuges Fahrzeugeabtausch erfolgt priorisiert nach geringster Restreichweite (und/ oder Nähe zu BFI?)						
2 HPC physisch blockiert oder technisch gestört			< 1 Std.		> 1 Std.				1 HPC physisch blockiert oder technisch gestört
			Laden an komplett gestörter Endstelle auslassen. Nebenverbraucher während Wendezeit abschalten lassen. Laden am funktionstüchtigen HPC auf volle Reichweite, unabhängig von der Fahrplanlage. Nach Beendigung des Ladevorgangs vorrücken, um Ladestelle für wartende Fahrzeuge freizumachen. (Anweisung durch BLO)						
			Mind. 50 % Abtausch gegen Diesel. Kommunikation mit FP über die Restreichweite. Fahrzeugeabtausch erfolgt priorisiert nach geringster Restreichweite (und/ oder Nähe zu BFI). Bei entstehender Überlage ladendes Fahrzeug unter Berücksichtigung der Fahrplanlage vorziehen lassen, um Ladestelle für wartende Fahrzeuge freizumachen.						
2 HPC physisch blockiert oder technisch gestört			< 1 Std.		> 1 Std.				2 HPC physisch blockiert oder technisch gestört
			Keine dispositiven Maßnahmen erforderlich. Alle E-GN bleiben auf der Linie. Ggf. ausgelassene Ladevorgänge werden nach Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der HPC unter Ausnutzung der vollen Wendezeit nachgeholt (Volladung)						
			Keine dispositiven Maßnahmen erforderlich. Alle E-GN bleiben auf der Linie. Ggf. ausgelassene Ladevorgänge werden nach Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der HPC unter Ausnutzung der vollen Wendezeit nachgeholt (Volladung)						

Eine weitere Unterstützung bot das mit Verzögerung im 3. Quartal 2020 gelieferte Active Monitoring der Fa. Siemens. Hierdurch war es der Leitstelle der BVG möglich, die 5 HPC auf der Strecke und im Depot in Echtzeit zu überwachen und auf mögliche Störungen gemäß Handlungsleitfaden zu reagieren.

Die vereinbarte, proaktive Meldung von Fa. Siemens in Richtung der Omnibusleitstelle der BVG im Falle einer Störung oder eines Ausfalls von HPC konnte aufgrund von personellem Ressourcenmangel in der Siemens Infrastruktur Leitstelle in sämtlichen Fällen nicht ordnungsgemäß realisiert werden und gab somit entsprechend Anlass zur Kritik am Liefergegenstand. Die Überwachung der Ladeinfrastruktur seitens des Herstellers wurde schlussendlich von Firma Siemens an einen externen Dienstleister vergeben.

Abbildung 8: Frontend Active Monitoring Fa. Siemens



### 2.3.4 Schulungskonzepte und Mitarbeiterschulungen für Fahrzeuge, Infrastruktur, Störfallkonzept

Die Schulungen für das Fahr- und Betriebspersonal konnten aufgrund der Corona-Pandemie zunächst nur in kleinen Gruppen und unter Berücksichtigung der jeweils geltenden Abstands- und Hygieneregeln durchgeführt werden. Bis zum Ende des Jahres 2021 konnten bei den Fahrerinnen und Fahrern des Betriebshofes Indira-Gandhi-Str alle Fahrpersonale geschult und auf das Fahrzeug eingewiesen werden. Neu eingestellte Mitarbeiter\*innen wurden im Rahmen ihrer Einarbeitung von Anfang an mit der neuen Technologie vertraut gemacht.

Auf fahrzeugspezifische Herstellerschulungen für das Werkstattpersonal musste aufgrund der Corona-Lage – bedingt durch die Einreisebestimmungen nach Deutschland - jedoch weiterhin verzichtet werden. Da die Fahrzeuge im Rahmen der Garantie- und Gewährleistungszeiträume vorerst überwiegend durch den Hersteller selbst bearbeitet wurden und das Werkstattpersonal bereits über umfangreiche Kenntnisse aus der Bearbeitung von elektrisch angetriebenen 12m-Fahrzeugen verfügte, konnten diese Schulungen problemlos in der zweiten Jahreshälfte 2021 nachgeholt werden.

## 2.4 Monitoring, Auswertung und Optimierung

### 2.4.1 Entwicklung eines Systems zur Datenerfassung und -auswertung

Die bereits Anfang 2019 begonnene Definition des Zielsystems für die betrieblichen Kennziffern und Identifikation der dazugehörigen Datenquellen mündete in einem Datenauswertungssystem, mit welchem die Stabilität und die Performance des Gesamtsystems bewertet und ggf. optimiert werden sollte. Hierbei wurden sowohl Daten aus den Monitoringsystemen der Lieferanten von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur als auch bereits vorliegende Betriebsdaten aus dem Regelbetrieb der Fahrzeugbestandsflotten berücksichtigt.

Tabelle 6: Kennziffern für die Betriebsdatenauswertung

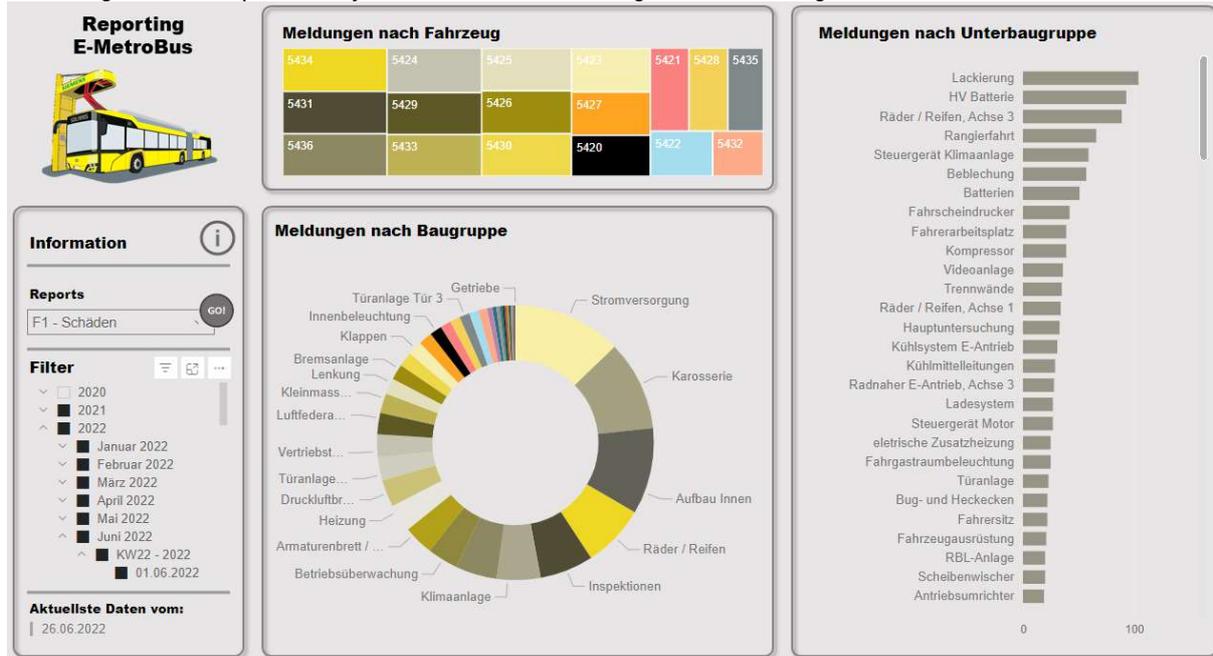
Kategorie	Kennzahl/Parameter	Output
Betrieb	B1	Dienstplanwirkungsgrad
	B2	Fahrplanwirkungsgrad
	B3	Planbauwirkungsgrad
	B4	Personalbedarf
	B5	Fahrzeugbedarf
	B6	Ausfallgründe
Fahrzeug	F1	Schäden
	F2	Verfügbarkeit
	F3	Betriebskosten
	F4	Fahrzeugdisposition IVU
	F5	Vermiedene Emissionen
	F6	Gesamtverbrauch pro km
	F6a	Gesamtverbrauch
	F6b	SoC-Verlauf
	F7	Durchschnittsgeschwindigkeit
	F8	Anzahl Ladevorgänge
	F9	Rekuperationsrate
	F10	Fahrzeit
	F11	Fahrdistanz
	F12	Geschwindigkeitsprofil
	F13	Temperatur
	F14	Batterie
	F15	Elektromotor
F16	Bordnetz	
F17	Ladegerät (aufgenommene Ladung am Netzpunkt)	
Ladeinfrastruktur	L1	Wirkungsgrad
	L2	Ausfallsache
	L3	Zuverlässigkeit
	L4	Verfügbarkeit
	L5	Ladezeit im Depot
	L6	Zählerstand
Ladeinfrastruktur - Minimaldatenset	L7	Ladevorgang
	L8	Zuverlässigkeit
	L9	Verfügbarkeit
Werkstatt/ Instandhaltung Fahrzeuge	W1	Technischer Einsatzkoeffizient
	W2	Betrieblicher Einsatzkoeffizient
	W3	Mean Distance Between Failures
	W6	Mehrfachbemängelung

Während der Projektlaufzeit konnten die jeweiligen Dashboards zu einzelnen Fahrzeugen bzw. der gesamten Flotte stetig weiterentwickelt, in der Modellierung angepasst und mit Echtdateien befüllt werden. Die relevanten Daten kamen dabei sowohl aus BVG-internen und bereits vorliegenden Betriebsdaten sowie den zum Ende des Projektes leider noch immer zum Teil unvollständigen Daten der Lieferanten von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur bzw. der angeschlossenen Systeme und Datenlogger. Bereits im Zuge der Abnahme des Gesamtsystems im 4. Quartal 2020 wurden die Lieferanten aufgefordert, die noch vorhandenen Lücken zu schließen. Hierzu wurden u.a. regelmäßige Arbeitstreffen zwischen Solaris, Siemens bzw. ViriCiti und der BVG fortgeführt. Anpassungen auf Seiten der Hersteller führten zu einer Verbesserung hinsichtlich der Qualität und Quantität der gelieferten Daten.

Während Projektlaufzeit wurde in Zusammenarbeit mit der TU Berlin auch die Erstellung von vordefinierten Reports unter Einbindung aller Datenquellen zur automatisierten Datenauswertung weiter fortgesetzt. Mit dem Lieferanten der Ladeinfrastruktur, der Fa. Siemens, wurde zur weiteren Vereinfachung bzw. der Automatisierung von bestimmten Auswertungen die Lieferung der betreffenden Daten an eine API-Schnittstelle vereinbart. Diese konnte in der Folge zügig implementiert werden und ist im 1. Quartal 2022 „live“ gegangen.

Im Ergebnis konnte ein Report aus allen verfügbaren Datenquellen erstellt werden, um die Performance des Gesamtsystems darzustellen und so mit dem bisherigen Dieselbetrieb auf der Projektklinie vergleichen zu können.

Abbildung 9: Flottenreport des Systems zur Datenerfassung und Auswertung



## 2.4.2 Erfassung und Auswertung von Betriebs- und Verbrauchsdaten

Im Berichtszeitraum betrug der Verbrauch des Gesamtsystems (Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur) im Mittel 2,02 kWh/km und lag somit unter den geforderten 2,17 kWh/km. Der technische Einsatzkoeffizient (TEK) der Flotte lag phasenweise aufgrund von Nacharbeiten aus den Hauptuntersuchungen der Fahrzeuge weit unter der Zielmarke von 90%.

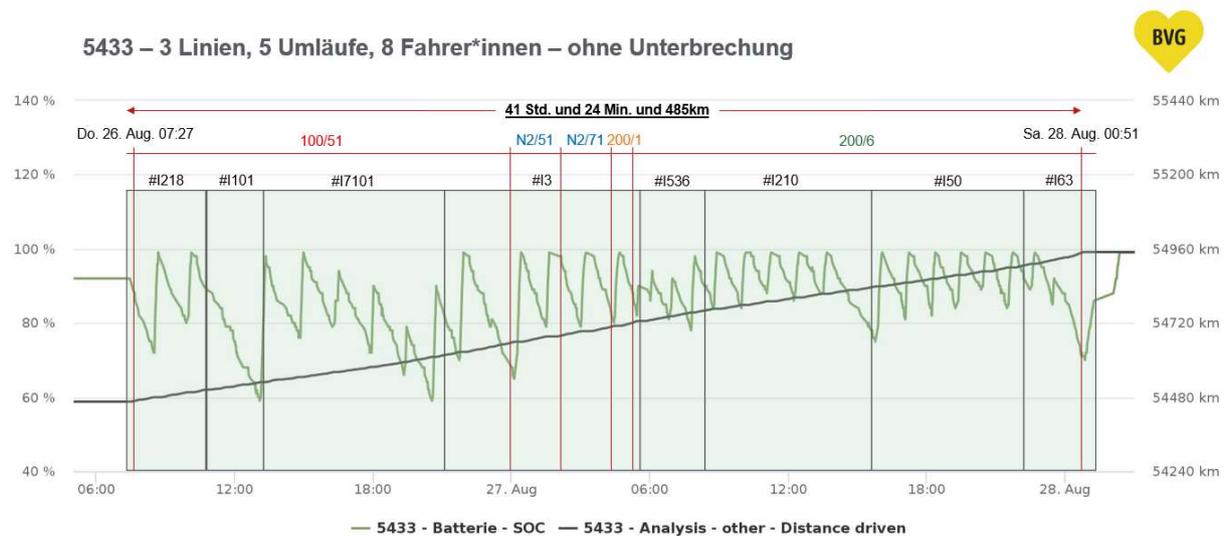


Erste Test- bzw. Messfahrten:	~1,2-1,6 kWh/km
Erste Fahrgastfahrten 08/20:	~1,4-2,2 kWh/km
Flottenverbrauch Peak 02/21:	bis zu 3,35 kWh/km
Flottenverbrauch im Mittel:	~2,02 kWh/km
Reisegeschwindigkeit:	ø 15,8 km/h (analog Dieselbetrieb)
Umläufe:	14/14 Diesel/Elektro
Wendzeiten:	+/- 0 Minuten
Fahrplanwirkungsgrad:	+/- 0%
Ladeleistung:	450kw → 300kw
Benötigte Ladezeit:	7-15 Min. bis SoC 97%
Laden an den Endstellen:	ohne Beanstandung
Betriebsstabilität:	99%

Auf Grundlage der bereits gesammelten Erfahrungen, der vorliegenden Daten sowie den Ergebnissen aus erfolgten Auswertungen, startete das Projektteam im August 2021 den Versuch, ein Fahrzeug der E-MetroBus-Flotte länger als einen regulären Betriebstag durchgängig im Einsatz zu halten. Ziel war es, Optimierungspotentiale und Denkansätze für das weitere Vorgehen während eines möglichen Hochlaufes von

Fahrzeugen mit Gelegenheitsladetechnik hinsichtlich der Systemauslegung und der Linienauswahl aufzuzeigen. Im Ergebnis konnte das Fahrzeug B-V 5433 über einen Zeitraum von 41 Stunden und 24 Minuten auf 3 unterschiedlichen Linien ununterbrochen eingesetzt werden und legte dabei eine Fahrdistanz von 485 Kilometern zurück. Dies entspricht mehr als einer für Dieselfahrzeuge konzipierten, durchschnittlichen Umlauflänge bei der BVG. Dabei war über lange Einsatzzeiten das Nachladen an nur einer Endstelle (Hertzallee) mit einer reduzierten Ladeleistung von 300 kW möglich. Der SOC-Wert des eingesetzten Fahrzeuges sank während der Einsatzzeit nie unter den Wert von 60% ab.

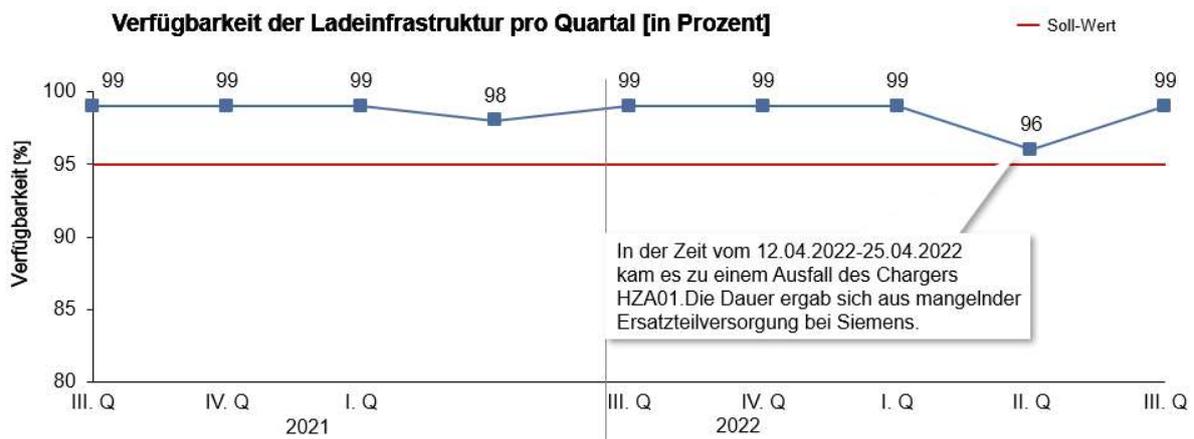
Abbildung 10: Auswertung des >24h-Betriebes



Hinsichtlich der Erprobung und Optimierung von Schnellladeinfrastruktur im Leistungsbereich >300 kW konnte also gezeigt werden, dass eine Ladeleistung von 300 kW auf der Projektline völlig ausreichend ist. Der Betrieb des Gesamtsystems mit einer Ladeleistung von 450 kW zeigt nur eine marginale Verkürzung der Ladedauer und hat somit keinen wesentlichen Einfluss auf die Betriebsstabilität. Einseitiges Nachladen in Kombination mit Verspätungslagen und erhöhten Verbräuchen ist jedoch zum Teil kritisch für den Betrieb.

Ein wesentlicher Faktor für den stabilen und qualitativ hochwertigen Betrieb der Flotte auf den Linien 100, 200, N2 sowie im Ersatzverkehr, analog eines zuvor durchgeführten Dieselseinsatzes, war die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur. Diese lag während der Projektlaufzeit im Mittel bei 99% und somit deutlich über der zuvor definierten Mindestanforderung von 95%.

Abbildung 11: Verfügbarkeit Ladeinfrastruktur

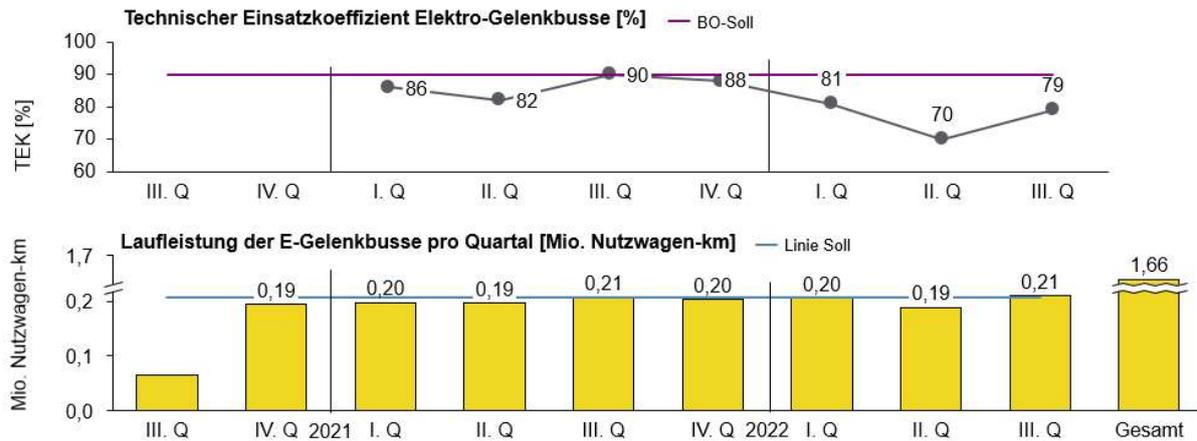


Bei der Auslegung der Traktionsbatterie und Untersuchung der durch Betriebsstörungen erforderlichen betrieblichen Reserven ist die Konfiguration der Fahrzeuge mit Lithium Titanat Oxide Batterien und einer Kapazität von 178 kW/h brutto beziehungsweise 139 kW/h netto als zielführend und stabilisierend für den Betrieb analysiert worden. Dies zeigte sich sowohl im überwiegenden Betrieb auf der Projektlinie, aber auch im Rahmen verschiedener alternativ durchgeführter Einsatzszenarien.

Die Auslegung des Antriebes der Fahrzeuge mit der elektrischen Antriebsachse AVE 130 des Herstellers Zahnradfabrik Friedrichshafen (ZF) erwies sich während der gesamten Projektlaufzeit als störanfällig. Der Hersteller wurde bereits beauftragt hier eine Lösung zu erarbeiten, um die Zuverlässigkeit des Antriebes dauerhaft zu verbessern und den Antrieb in der 2. Generation bis Ende des Jahres 2023 zur Marktreife zu entwickeln. Ebenso führte die Hauptuntersuchung der Fahrzeuge beziehungsweise die hieraus resultierenden nachgelagerten Arbeiten an den Fahrzeugen im 2. Quartal 2021 und im 2. Quartal 2022 zu einem starken unterschreiten des betrieblich vorgegebenen Sollwertes des Technischen Einsatzkoeffizienten (TEK) von 90 Prozent. Für den weiteren E-Bushochlauf bei der BVG soll hier – soweit dies der finale Zeitpunkt des Fördermittelabflusses der jeweiligen Fahrzeugbeschaffungen zulässt - eine über das jeweils gesamte Jahr gestaffelte und somit homogenere Zulassung der Fahrzeuge erfolgen.

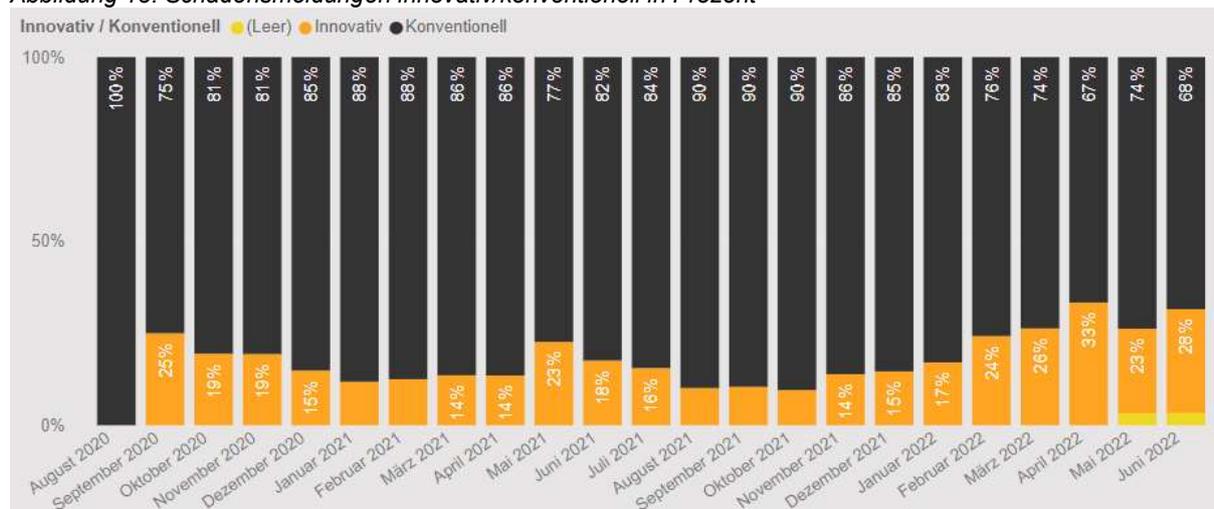
Aufgrund der bei einem ausschließlichen Betrieb auf der Projektlinie 200 recht hohen Fahrzeugreserve von dann 20 Prozent, konnte die erforderliche Zielmarke von 200.000 Nutzwagenkilometern aus dem zuvor durchgeführten Dieselpetrieb jedoch regelmäßig realisiert werden.

Abbildung 12: Technischer Einsatzkoeffizient und Laufleistung der Fahrzeuge



Ein im Vergleich zum konventionellen Antrieb überproportional hoher Ausfall oder Instandhaltungsaufwand „E-Busspezifischer“ Fahrzeugkomponenten konnte während der Projektlaufzeit nicht verzeichnet werden.

Abbildung 13: Schadensmeldungen innovativ/konventionell in Prozent



### 2.4.3 Messungen zum Energiebedarf der Fahrzeuge

Während der Projektlaufzeit wurden unter verschiedenen klimatischen Bedingungen mehrfach Messfahrten mit Fahrgästen (Realbetrieb) durchgeführt. Die Ziele der Messfahrten waren:

- Untersuchung des Energiebedarfs der Fahrzeuge bei unterschiedlichen Außentemperaturbedingungen
- Bestimmung der klimatischen Bedingungen im Fahrgastraum und der thermischen Behaglichkeit der Fahrgäste

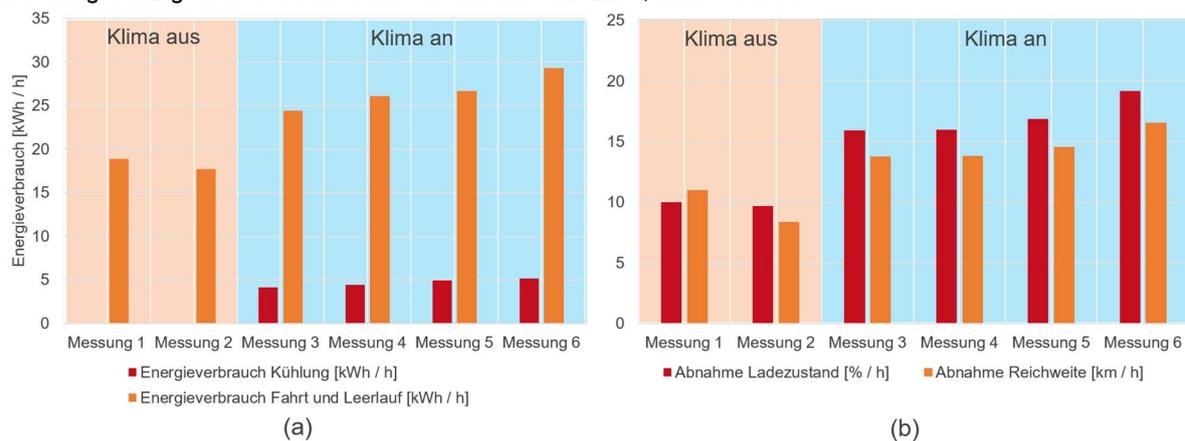
In enger Abstimmung zwischen der TU Berlin, der Fa. Konvekta (Klimaanlagenlieferant) und der BVG wurden die Fahrzeuge entsprechend vorbereitet, mit Messtechnik ausgestattet und in den regulären Einsatz auf der Projektlinie

gebracht. Alle Messfahrten wurden mit automatischen Klimaeinstellungen durchgeführt.

- Messfahrten am 24.03.2022, 30.03.2022 und 07.04.2022: Messungen in Übergangszeit mit Heizung und Lüftung (gemessene Außentemperatur zwischen 8°C und 15°C).
- Messfahrten am 17.06.2022 und 24.06.2022: Messungen in Sommerzeit mit Kühlung (gemessene Außentemperatur zwischen 18°C und 33°C).

Der Energieverbrauch des Klimasystems ist für die Messungen am 24.06.2022 in Abbildung 14a) dargestellt. Der Energieverbrauch steigt mit zunehmenden Außentemperaturen von 4,1 kWh/h (Messung 3, mittlere Außentemperatur 29,8°C) auf bis 5,1 kWh/h (Messung 4, mittlere Außentemperatur 32,7°C). Dieser hohe Energieverbrauch führt zu einer erhöhten Abnahme des Ladezustandes (SoC) und der Reichweite, wie in Abbildung 14(b) dargestellt. So steigt mit angeschaltetem Klimasystem die Abnahme des Ladezustandes von ca. 10 %/h auf bis 19 %/h und die Abnahme der Reichweite von 8 km/h auf bis 16,5 km/h.

Abbildung 14: Ergebnisse der Messfahrten am 24.06.2022. Quelle: TU Berlin



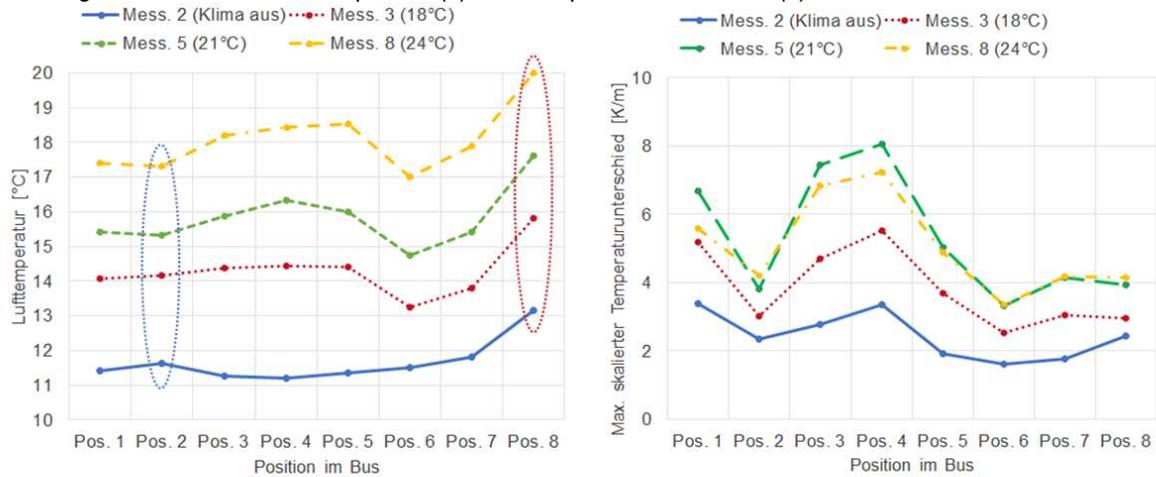
#### 2.4.4 Empirische Studie zur thermischen Behaglichkeit im Fahrzeug

Schon im August und November 2021 konnten erstmals Messfahrten mit Fahrgästen (Realbetrieb) mit Fahrzeugen aus der E-MetroBus- Flotte durchgeführt werden. Auch hier wurden die Fahrzeuge entsprechend vorbereitet, mit Sensorik bzw. Messtechnik ausgestattet und in den regulären Einsatz auf der Projektlinie gebracht. Erstmals wurden dabei auch Fahrgäste zur thermischen Behaglichkeit im eingesetzten Fahrzeug, bei unterschiedlich voreingestellter Innenraumtemperaturen, befragt.

Die durchschnittliche gemessene Lufttemperatur im Gelenkbus (Messung am 23.11.21) ist in Abbildung 15(a) für verschiedene Positionen im Bus und eingestellten Innenraumtemperaturen dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die klimatischen Bedingungen, je nach Position im Bus, erheblich unterscheiden. Abhängig von der Einstellung des Klimatisierungssystems beträgt der maximale Temperaturunterschied bis zu 3,0 K. Die kälteste Position ist Pos. 2 (im Vorderwagen zwischen den Türen) und die wärmste Position ist Pos. 8 (im Anhänger). Es zeigt sich zudem, dass die gemessene Lufttemperatur für die meisten Positionen niedriger ist als die eingestellte Solltemperatur. Dieser Unterschied nimmt bei höheren Solltemperaturen zu und

erreicht einen maximalen Wert von etwa 5,9 K. Dieser Unterschied ist auf die Luftkonvektion im Inneren des Busses zurückzuführen, durch die die warme Luft nach oben strömt. Unterstützt wird diese Vermutung durch Abbildung 15(b), die den maximalen skalierten Temperaturunterschied zwischen den Fuß- und den Kopfbereichen zeigt. Es zeigt sich, dass der maximale Wert etwa 8,0 K/m erreicht.

Abbildung 15: Gemessene Lufttemperatur (a) und Temperaturunterschied (b) Quelle: TU Berlin

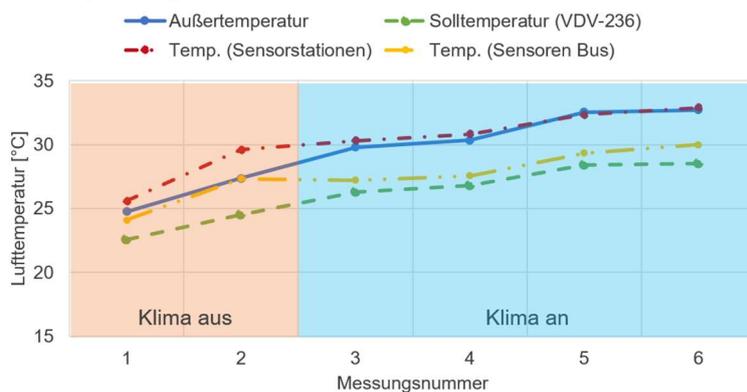


(a) Durchschnittliche Lufttemperatur

(b) Maximaler skaliertes Temperaturunterschied zwischen Fuß- und Kopfbereich

Abbildung 16 zeigt die mittlere Lufttemperatur im Fahrgastraum (rote Linie) für die Messungen vom 24.06.2022. Hier ist zu sehen, dass die Lufttemperatur mit zunehmenden Außentemperaturen (blau Linie) auch zunimmt, auch wenn die Klimaanlage angeschaltet ist. Darüber hinaus ist die mittlere Lufttemperatur bis zu 5,0 K höher als die in der VDV-236-Schrift angegebenen Solltemperatur (grüne Linie).

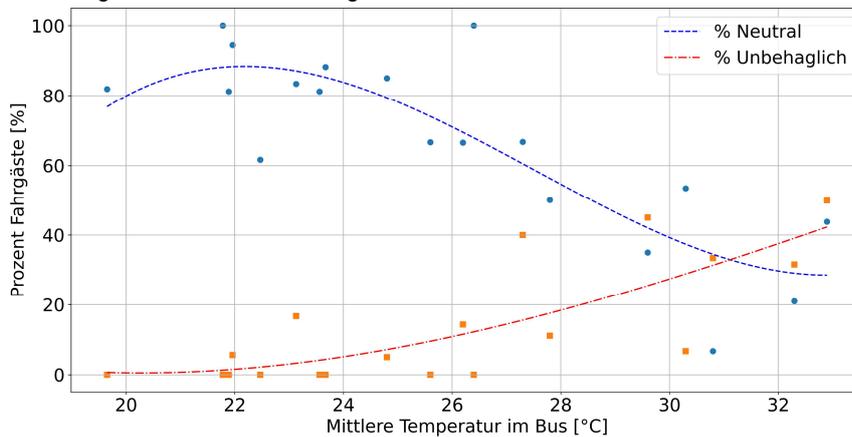
Abbildung 16: Ergebnisse der Messfahrten am 24.06.2022. Quelle: TU Berlin



In den Messfahrten in Übergangszeit wurden die klimatischen Bedingungen im Bus von mehr als 85% der Fahrgäste als angenehm empfunden. Außerdem wurde das thermische Wohlbefinden auch bei ausgeschalteter Heizung (Innenraumtemperatur zw. 12,8°C und 17,9°C) als zufriedenstellend empfunden. Dies bestätigt die Ergebnisse der vorangegangenen Messungen im November 2021 und weist darauf hin, dass auch bei niedrigeren Innenraumtemperaturen ein guter thermischer Komfort im Bus gewährleistet werden kann.

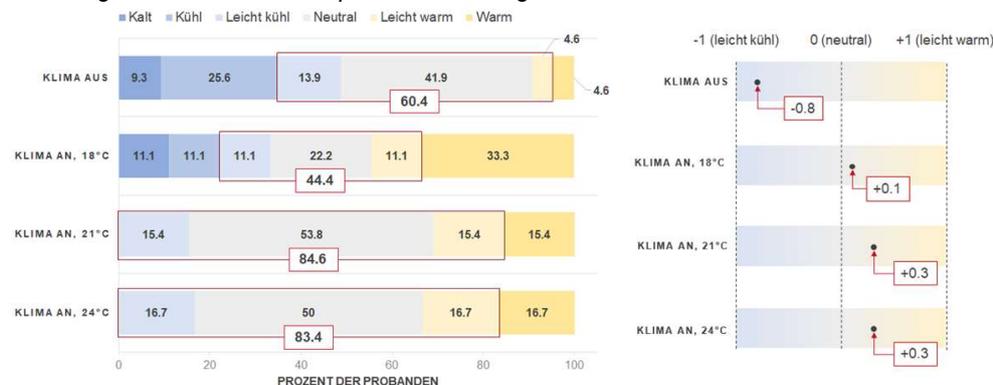
Bei den Sommermessfahrten hat sich die thermische Behaglichkeit der Fahrgäste bei zunehmenden Innenraumtemperaturen drastisch verschlechtert, wie in Abbildung 17 dargestellt. So haben schon bei Innenraumtemperaturen höher als 28°C mehr als 20% der Fahrgäste die thermischen Bedingungen als unkomfortabel wahrgenommen. Dies weist darauf hin, dass niedrigere Temperaturen in der Kabine erforderlich sind, um ein gutes thermisches Wohlbefinden zu gewährleisten.

Abbildung 17: Thermische Behaglichkeit Quelle: TU Berlin



Das thermische Empfinden im Gelenkbus ist in Abbildung 18(a) für die verschiedenen Innenraumtemperaturen dargestellt. Es ist zu sehen, dass für die Mehrheit der Probanden das thermische Empfinden entweder „leicht kühl“, „neutral“ oder „leicht warm“ ist. Das durchschnittliche thermische Empfinden ist in Abbildung 18(b) dargestellt. Es zeigt sich, dass das thermische Empfinden bei höheren Innenraumtemperaturen wärmer wird. So nimmt der Wert von -0,8 auf der ASHRAE Skala (entsprechend „leicht kühl“) für den Fall „Klima aus“ bis zu +0,3 für den Fall „Klima an, 24°C“ (entsprechend „neutrales“ thermisches Empfinden) zu. Diese Ergebnisse können benutzt werden, um die optimale Innenraumtemperatur zu identifizieren, um eine gute thermische Behaglichkeit zu gewährleisten und gleichzeitig den Energieverbrauch der Nebenverbraucher zu senken. Im angegebenen Fall ist diese Innenraumtemperatur 18,0°C, die einem durchschnittlichen thermischen Empfinden von +0,1 auf der ASHRAE Skala entspricht.

Abbildung 18: Thermisches Empfinden der Fahrgäste im Bus. Quelle: TU Berlin



(a) Thermisches Empfinden im Bus – Verteilung

(b) Thermisches Empfinden im Bus - Durchschnittswerte

## 2.5 Projektmanagement, Kommunikation und Partizipation

### 2.5.1 Projektleitung

Die Zusammenarbeit mit den Partnern RLI und TUB im Forschungsprojekt erfolgte in regelmäßigen 4- bis 6-wöchigen Projekttreffen, in denen über den Fortschritt in den Arbeitspaketen berichtet, die gemeinsamen Arbeiten in den partnerübergreifenden Arbeitspaketen gesteuert und der gemeinsame Projektzeitplan aktualisiert wurde.

Die datenmäßige Vernetzung der Partner erfolgt über eine cloudbasierte Kommunikationsplattform, die physisch durch das RLI bereitgestellt wird.

### 2.5.2 Bürgerpartizipation

Die Einbindung von Anwohnern im Verlauf der Linienführung bzw. an den Endstellen im Rahmen einer Informationsveranstaltung wurde aufgrund geltender Regelungen zum Umgang mit der Corona-Pandemie abgesagt. Zur Information wurde alternativ ein Infoflyer erstellt und an Haushalte im Bereich der Endstelle Michelangelostr. verteilt.

Abbildung 19: Projektflyer

**Ein Hoch auf diese Phase.**  
Während unserer Hochlaufphase „Elektromobilität“ sitzen wir bis 2022 kontinuierlich unsere Busflotte um. In dieser Hochlaufphase sammeln wir Erfahrungen mit den Elektrobusen als Basis für die weitere Elektrifizierung bis 2030.  
2019 30 Elektro-Endecker  
2020 37 Elektro-Gelenkbusse und 90 Elektro-Endecker  
2022 bis zu 90 Elektro-Endecker  
Bis 2025 wollen wir unsere gesamte Busflotte auf Elektrobusse umstellen.

**Wir sagen trotzdem: „Tanke schön!“**  
Das Projekt E-Metrobus hat es wirklich in sich. Und weil sich eben so Anspruchsvolles und Wippenendes lassen mit unseren Partnern realisieren lässt, haben wir uns schließlich Unterstützung geholt – die TU Berlin und das Fraunhofer ILR. Mit beiden haben wir uns zu einer Forschungsvereinbarung zusammengeschlossen. Für die erfolgreiche Zusammenarbeit bedanken wir uns recht herzlich.  
Übrigens: Die Erkenntnisse aus dem Projekt kommen letztlich unter anderem, auch anderen Städten zugute. Ihr sagt also, wir fahren mit gutem Beispiel voraus.

**Das Wichtigste über unsere Stromschnellen.**  
Warum heißt das Projekt E-Metrobus?  
Weil die neuen Elektro-Gelenkbusse theoretisch rund um die Uhr unterwegs sein können – also Tag und Nacht, wie unsere „echten“ Metrobus-Linien.  
Braucht Berlin wirklich mehrere Elektrobus-Varianten?  
Überlegt: Denn jede Elektrobus-Variante hat spezifische Eigenschaften und deshalb ein eigenes Anwendungsfeld. Unsere Busse müssen unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Einige fahren nur in bestimmten Zonen, andere sehr lange Strecken quer durch die Stadt. Und wiederum andere müssen jedes Tag eine riesige Fahrgastzahl kommen bewältigen. Deshalb braucht Berlin einen Mix aus unterschiedlichen Elektrobusen.  
Fahren die E-Busse der Linie 200 auch auf anderen Linien?  
Solange das Projekt E-Metrobus läuft, fahren die Elektro-Gelenkbusse nur zwischen Tierzäunen und Michelangeloplatz. Dort sind die Ladegeräte installiert. Für Forschungswecke kann es aber durchaus sein, dass einer der neuen E-Busse auch auf einer anderen Linie eingesetzt wird.  
Ändert sich der Fahrplan der Linie 200?  
Nein. Die Fahrzeiten bleiben wie gewohnt.

**„Mach mal halblang“ war uns zu kurz.**  
Bereits seit 2019 schicken wir verschiedene Elektrobusse auf die Straße. Und bis 2022 kommen noch einige dazu. Wer nicht so lange warten möchte, darf sich freuen: Schon in diesem Jahr sorgen wir speziell für den Frischen Wind – mit unserem Projekt E-Metrobus.  
Ab Ende August 2020 nehmen auf der Linie 200 die ersten Elektro-Gelenkbusse der BVG Fahrt auf. Mit 18 Metern Gesamtlänge sind sie 6 Meter länger als unsere bekannten Elektrobusse. Aber kompakt, agil und mit dem Komfort, den Sie von unseren „alten“ kennen. Mit ihrer 100kWh können wir unseren Ziel die gleiche Stückzahl fahren. Wir wollen Berlin noch besser machen, den Ausstoß von CO<sub>2</sub> weiter reduzieren und dazu beitragen, dass die Berliner Luft Stück für Stück besser wird.

**Lade die Lade die.**  
Das ist beim E-Gelenkbus anders.  
Die wesentliche Unterschied der beiden E-Bus Typen. Die Elektrobusse von 2019 und 2020 sind Operativen, die neuen Gelenkbusse Gelenkbusse.  
Gelenkbusse (Gelenkbus)  
Der Gelenkbus hat ein fest installiertes Ladegerät an einem separaten Standort. Ein Ladegerät, das auch mehrere Busse an der Ladestation versorgen kann. Die Ladestation ist vollautomatisch. Der Ladeprozess ist vollautomatisch. Die Ladegeräte sind vollautomatisch. Die Ladegeräte sind vollautomatisch.  
Depotladung (Endecker)  
Nach einem Einsatz wird der E-Bus auf seinem Standort in der Nähe des Endes der Linie geladen. Der Ladeprozess ist vollautomatisch. Die Ladegeräte sind vollautomatisch. Die Ladegeräte sind vollautomatisch.

**Funktioniert die Technik bei jedem Wetter?**  
Ja. Partikelplan funktioniert bei Wind und Wetter. Damit sind auch Elektrobusse in Norwegen unterwegs. Und diesen Sommer ist ja fast so wie unser Wetter.  
Bspg. Das Ladegerät Riklan und Mithras-kwapp?  
Nein. Als Ladegerät bekommt die auch Beispiel von Ladegeräten für Mensch und Tier. Busse und Ladegeräte werden regelmäßig technisch geprüft und gewartet.

**Mehr Infos zum Projekt E-Metrobus findet ihr hier:**  
e-metrobus.berlin

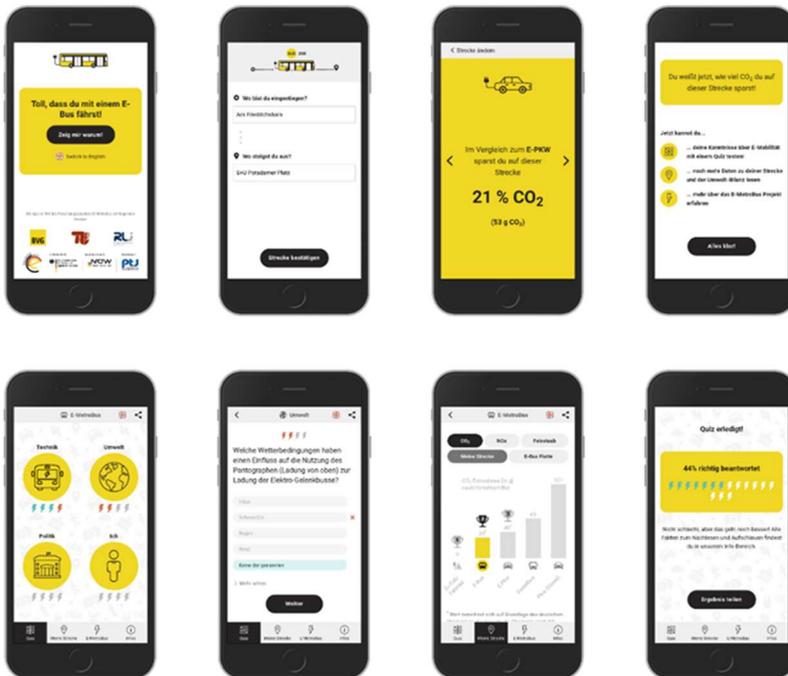
**Mehr Spannung auf Berlins Straßen: Die ersten Elektro-Gelenkbusse im Einsatz.**  
WEL WIR DICH LIEBEN  
BVG

**200 Zoologischer Garten – Michelangelostr.**

### 2.5.3 Interaktive Information im Web

Die Web-App für das Projekt wurde vom Projektpartner RLI gestalterisch und inhaltlich entwickelt und in den Projekttreffen mehrfach mit den Partnern diskutiert. Für spezifische Inhalte, z. B. die Umstellung des Busbetriebes auf elektrischen Antrieb, wurden Zuarbeiten von der BVG an das RLI geleistet. Hier hat vor allem die Presseabteilung der BVG durch spezifisches Feedback auf Basis bereits gesammelter Erfahrungen mit Anwendungen, wie beispielsweise der BVG Fahrinfo-App, gegeben und konkrete Vorschläge für die Kommunikation mit den Fahrgästen der Elektrobusse auf der Linie 200 unterbreitet.

Abbildung 20: Durch die Partner entwickelte Web-App



Entwickelte Web-App zur Smartphone-Anwendung unter der Adresse:

<https://e-metrobus.berlin/>

### **3 Vergleich Abschluss des Vorhabens mit der ursprünglichen Planung**

#### **3.1 Meilensteinplan**

Gegenüber der ursprünglichen Arbeits- und Zeitplanung ergaben sich Verzögerungen bei der Erreichung einiger Meilensteine sowie der von ihnen abhängigen Meilensteine. Diese beruhten in erster Linie auf Schutzmaßnahmen und Einschränkungen im Reiseverkehr durch Grenzschließungen sowie Testpflichten in Folge der im Jahr 2020 aufkommenden Corona-Pandemie.

Eine komplette Darstellung des Meilensteinplans der BVG mit allen Terminverschiebungen liefert die nachstehende Tabelle.

Tabelle 7: Meilensteinplan BVG

Meilensteine		Ursprüngliche Planung	Abschluss
BM1.1	Linienauswahl und Systemauslegung abgeschlossen-	3. Q 2018	3. Q 2018
BM1.2	Vorplanung Infrastruktur -abgeschlossen-	3. Q 2018	1. Q 2019
BM2.1	Vergabe Fahrzeuge, HPC (Opp. Charger)	3. Q 2018	1. Q 2019
	und Plug-In (Overnight Charger) -abgeschlossen-		4. Q 2019
BM2.2	Vergabe Planung	1. Q 2019	2. Q 2019
	und Errichtung Ladeinfrastruktur -abgeschlossen-		2. Q 2020
BM2.3	Lieferung Ladegeräte Depot (Plug-in) abgeschlossen-	3. Q 2019	3. Q 2020
BM2.4	Erteilung Sondernutzungserlaubnis abgeschlossen-	3. Q 2019	1. Q 2020
BM2.6	Lieferung Ladegeräte Linie (HPC) -abgeschlossen-	4. Q 2019	2. Q 2020
BM2.8	Auslieferung Fahrzeuge -abgeschlossen-	4. Q 2019	1. Q 2020
BM2.9	Fertigstellung Errichtung straßenseitige HPC	4. Q 2019	2. Q 2020
	und Plug-in Depot -abgeschlossen-		3. Q 2020
BM2.10	Aufnahme Test- und Fahrgastbetrieb abgeschlossen-	2. Q 2020	3. Q 2020
BM3.4	Störfallkonzept implementiert -abgeschlossen-	1. Q 2020	2. Q 2020
BM5.1	System zur Datenerfassung und-auswertung abgeschlossen-	2. Q 2020	4. Q 2021

An der ursprünglichen Kostenplanung haben sich keine Änderungen ergeben.

### **3.2 Zielerreichung und Veränderungen**

Die Erreichung der Ziele des Teilvorhabens konnten innerhalb des im Antrag angegebenen Zeitraumes realisiert werden.

### **3.3 Bekanntgabe relevanter Ergebnisse von dritter Seite**

Von dritter Seite sind während der Projektlaufzeit keine FuE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren. Darüber hinaus sind auch aus den bisher durchgeführten Analysen und Recherchen keine Veröffentlichungen bekannt geworden, die eine Änderung des Forschungsvorhabens zur Folge gehabt hätten.

### **3.4 Notwendigkeit von Änderungen der Zielsetzung**

Aus den Arbeiten und den Ergebnissen sind während der Projektlaufzeit keine Änderungen hinsichtlich der Zielsetzung erkennbar geworden.

### **3.5 Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans**

Aus den durchgeführten Arbeiten und den erzielten Ergebnissen haben sich während der Projektlaufzeit keine Änderungen bezüglich der wirtschaftlichen, technischen Erfolgsaussichten sowie bei der wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit des Projektes ergeben.

Berlin, 30.05.2022