

„BEEDeL - Bewertung des Einsatzes von Elektrobussen mit dezentraler Ladeinfrastruktur in Metropolen am Beispiel der HOCHBAHN “

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger	Förderkennzeichen
Hamburger Hochbahn AG (Projektleiterin für BEEDeL)	03EM0205 A
Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme	03EM0205 B
Hochschule für Angewandte Wissen- schaften Hamburg	03EM0205 C
Bewilligungszeitraum 01.10.2014 – 31.12.2016	Projektleiter Hr. Schenk, Hamburger Hochbahn AG

7. Juni 2017

Inhaltsverzeichnis

A.	Abschlussbericht	1
A.1	Ausgangslage	1
A.1.1	Projektbeteiligte	1
A.1.2	Ziele	2
A.1.3	Aufgabenstellung.....	3
A.1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
A.1.5	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn	5
A.2	Projektevaluation	6
A.2.1	Projektverlauf	6
AP 1	Projektmanagement	6
AP 1.1	Organisation	6
AP 1.2	Durchführung	7
AP 1.3	Öffentlichkeitsarbeit.....	7
AP 1.4	Qualitätsmanagement.....	8
AP 2	Grundlagen	8
AP 2.1	Grundlagenermittlung.....	8
AP 2.2	Aufbereitung der Linienpläne für die Grobrasterung	9
AP 2.3	Bestandsaufnahme Fahrzeuge und Ladetechnik	10
AP 3	Grobrasterung Liniennetz	11
AP 3.1	Ermittlung Streckenenergiebedarf	11
AP 3.2	Durchführung der Grobrasterung	11
AP 3.3	Definition Szenarien (Umläufe, Teilnetze)	12
	Auswahlkriterien für geeignete Teilnetze	12
	Ausgewählte Teilnetze	13
AP 3.4	Auswahl relevanter Nachladeregimes.....	14
AP 4	Detaillierung Teilnetz	16
AP 4.1	Vermessung ausgewählter Linien	16
AP 4.2	Detaillierte Betrachtung ausgewählter Linien.....	17
	Vorgehensweise	17
	Gelenkbusteilnetz.....	18
	Solobusteilnetz	20
	Zusammenfassung der Ergebnisse	21
AP 4.3	Infrastrukturplanung	22
	Erforderliche Flächen für Lademast und Überliegerflächen	22
	Erforderliche Flächen der Infrastruktur für Anschluss an das Mittelspannungsnetz.....	23
	Ergebnis – Flächenverfügbarkeit.....	23
	Ergebnis – Elektrischer Anschluss Ladeinfrastruktur	24
AP 4.4	Festlegung Verkehrskonzept und Fahrpläne.....	24
AP 5	Betriebliche Bewertung	25
AP 5.1	Umsetzbarkeit	25
AP 5.2	Gestaltungsbedarf	25

	Ermittlung der Flottengröße für den Betrieb der betrachteten Teilnetze	26
	Energetische Überprüfung der Umlaufverknüpfungen	27
	Aufwand Umrüstung Betriebshöfe.....	29
	Aufwand Ausrüstung Strecke	30
	Ausbildung Werkstattpersonal.....	30
	Ausbildung Fahrpersonal.....	30
	Betriebliche Stabilität	31
AP 5.3	Zeitliche Abläufe.....	31
	Bauliche Umrüstung von Linienendpunkten für die Herstellung dezentraler Ladeinfrastruktur.....	32
	Planung, Genehmigung und Bau der dezentralen Ladeinfrastruktur	32
	Umrüstung eines Betriebshofs.....	32
	Fahrzeugbeschaffung	33
	Parallelität der Prozesse.....	33
AP 5.4	Wirtschaftliche Gesamtbewertung	33
5.4.1	Investitionen Infrastruktur	34
	Investitionen Fahrzeuge	34
	Betriebskosten Fahrzeuge	34
	Schulungsaufwand Werkstatt und Fahrpersonal	34
AP 5.5	Übertragbarkeit	34
AP 6	Kosteneffiziente Messtechnik	35
AP 6.1	Analyse der vorhandenen Messtechnik	35
AP 6.2	Konzeption einer maßgeschneiderten, kosteneffizienten Messtechnik.....	35
AP 6.3	Aufbau der Prototypgeräte	36
AP 6.4	Evaluierung der kosteneffizienten Messtechnik	37
AP 7	Batterieeffizienter Betrieb	40
AP 7.1	Analyse der durchgeführten Messungen	40
AP 7.2	Durchführung Basisuntersuchungen an Einzelzellen	41
AP 7.3	Ableitung von Lade-/Entlade-Szenarien.....	45
AP 7.4	Ableitung von Vorschlägen zur verbesserten Linienführung	47
A.2.2	Zahlenmäßiger Nachweis sowie Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	50
A.2.2.1	Zahlenmäßiger Nachweis	50
A.2.2.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	50
A.2.3	Verwertbarkeit und Anschlussfähigkeit.....	50
A.2.4	Bekanntgewordener Fortschritt bei anderen Stellen während der Projektlaufzeit	51
A.2.5	Veröffentlichung von Ergebnissen	52
B.	Erfolgskontrollbericht	54
B.1	Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen	54
B.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen	55
	Zentrale Ergebnisse des Vorhabens	55
	Einschränkungen	55

B.3	Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben	56
B.4	Fortschreibung des Verwertungsplans	56
B.5	Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung	56
	Kostenplanung.....	56
	Zeitplanung.....	56
C.1	Berichtsblatt	57
C.2	Document Control Sheet	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Projektzeitplan	5
Abbildung 2	Ausgewähltes Gelenkbusteilnetz	13
Abbildung 3	Ausgewähltes Solobusteilnetz	14
Abbildung 4	Optimierte Aufbaureihenfolge der dezentralen Ladeinfrastruktur für das Gelenkbus-Teilnetz (Szenario A)	18
Abbildung 5	Optimierte Aufbaureihenfolge der dezentralen Ladeinfrastruktur für das Gelenkbus-Teilnetz (Szenario B aufbauend auf dem Vollausbau Szenario A)	19
Abbildung 6	Für den elektrifizierten Betrieb des Gelenkbus-Teilnetzes erforderliche Ladestellen/Lademasten in grün (Szenario B), im Rahmen der Grobrasterung ermittelte, aber nicht erforderliche Ladestellen in grau.....	19
Abbildung 7	Optimierte Aufbaureihenfolge der dezentralen Ladeinfrastruktur für das	20
Abbildung 8	Optimierte Aufbaureihenfolge der dezentralen Ladeinfrastruktur für das Solobus-Teilnetz (Szenario B aufbauend auf dem Vollausbau Szenario A)	20
Abbildung 9	Für den elektrifizierten Betrieb des Solobus-Teilnetzes erforderliche Ladestellen/Lademasten in grün (Szenario B), im Rahmen der Grobrasterung ermittelte, aber nicht erforderliche Ladestellen in grau.....	21
Abbildung 10	Übersicht der notwendigen Ladeinfrastruktur und der Elektrifizierungsquote in den betrachteten Szenarien und Teilnetzen.....	22
Abbildung 11	Lademast am Elektrobusterminal Hamburg	22
Abbildung 12	Weganteil außerhalb und innerhalb des Teilnetzes	24
Abbildung 13	Fahrzeugbedarf für den Betriebshof Gleisdreieck unterteilt nach Tageszeit	27
Abbildung 14	Fahrzeugbedarf für den Betriebshof Gleisdreieck unterteilt nach Tageszeit	27
Abbildung 15	Anzahl der Ladevorgänge auf dem Betriebshof Gleisdreieck und Langenfelde	28
Abbildung 16	Maximale Fahrzeuganzahl und eingesetzte Anzahl der Fahrzeuge in beiden Fahrzeugspitzen	28
Abbildung 17	Gegenüberstellung der Kennzahlen der betrachteten Teilnetze im Vergleich zum HOCHBAHN Gesamtnetz.	29
Abbildung 18	Blockdiagramm des Messsystems mit seinen Komponenten.....	36
Abbildung 19	Aufbau des Gesamtsystems aus 12 Datenloggern mit sicherer, drahtloser Datenverbindung zum Datenserver.....	36
Abbildung 20	Datenlogger Kleinserie (Foto: M. Wegner, HAW-Hamburg).....	37
Abbildung 21	Datenlogger in der Einbauposition im Nahverkehrsbus	37
Abbildung 22	Überblick der Messungen im Hamburger Stadtgebiet	38
Abbildung 23	GPS-Signal (rot) und korrigiertes Signal (türkis).....	39
Abbildung 24	Übersicht über die in AP 7 durchgeführten Arbeiten	40
Abbildung 25	Prüfstand bestehend aus der Temperaturkammer (links) und dem Zykliergerät (rechts).	41
Abbildung 26	Vier 15-Ah-Zellen in LFP-Technologie eingebaut in einer Metallbox für die Prüfstandsuntersuchung.....	42
Abbildung 27	Strom- und Temperaturverlauf für eine LTO-Zelle (20 Ah) und eine LFP-Zelle (15 Ah) mit an die Zellgröße angepasster Strombelastung	43
Abbildung 28	Verringerung der nutzbaren Kapazität (SOH) von verschiedenen Batteriezellen während der Langzeittests.....	44
Abbildung 29	Kenndaten zu den getesteten Batterietypen aus den Datenblättern der Hersteller und aus eigenen Messungen	47

A. Abschlussbericht

A.1 Ausgangslage

Die Stadt Hamburg plant, ab dem Jahr 2020 ausschließlich Busse mit emissionsfreiem Antrieb zu beschaffen. Vor diesem Hintergrund ist die Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN) aufgefordert, zeitnah entsprechende Festlegungen zu treffen, um dieser Forderung rechtzeitig nachkommen zu können. Aufgrund der Komplexität der Materie und der zahlreichen Abhängigkeiten von Technik, Betrieb und Infrastruktur können *diese* Festlegungen nicht getroffen werden, ohne entsprechende Untersuchungen durchgeführt zu haben. Das Projekt BEEDeL beleuchtet dabei, ob die Technik der dezentralen Ladeinfrastruktur eine mögliche technische Lösung darstellt.

A.1.1 Projektbeteiligte

Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN)

Die HOCHBAHN ist eines der größten Nahverkehrsunternehmen in Deutschland und leistet den öffentlichen Personennahverkehr in der Metropolregion Hamburg auf 110 Buslinien und 4 U-Bahnlinien. In den zurückliegenden Jahren konnte die HOCHBAHN auf ihren Linien einen im Bundesvergleich sehr hohen Fahrgastzuwachs erreichen.

Bei der Erprobung von umwelt- und klimaschonenden Bussen gehört die HOCHBAHN zu den aktivsten Verkehrsunternehmen in Deutschland. Bereits seit 2003 werden bei der HOCHBAHN klimafreundliche und leise Brennstoffzellenbusse in unterschiedlichen Entwicklungsstufen erprobt. Zurzeit sind als innovative Busse im Einsatz:

- 27 Dieselhybridbusse von Volvo (12 Solobusse und 15 Gelenkbusse)
- 3 Plug-in-Busse von Volvo
- 3 Batteriebusse von Solaris
- 2 Batteriebusse mit Brennstoffzelle als Range-Extender von Solaris
- 4 Brennstoffzellenbusse von Daimler.

Fraunhofer IVI

Das Fraunhofer IVI erarbeitet seit Jahren Konzepte für hybride und rein elektrische Antriebs-, Energiespeicher- und Energieversorgungs-lösungen. Umfangreiche Arbeiten im Zuge der Einführung und Optimierung von Hybridbussen wurden in verschiedenen Projekten in Dresden, Hannover, Leipzig und München, so u. a. im Projekt SaxHybrid ausgeführt. Die inzwischen weitgehend automatisierte Datenerfassung und Datenauswertung erlauben eine effiziente Bearbeitung von Messdaten.

Während der letzten Jahre wurden vom Fraunhofer IVI auch verstärkt Einführungskonzepte für rein elektrisch angetriebene Stadtbusse für verschiedene Verkehrsbetriebe innerhalb Deutschlands entwickelt und umgesetzt.

Um derartige Aufgabenstellungen mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit durchführen zu können, wurde im Rahmen bereits abgeschlossener Projekte eine leistungsfähige Software-Werkzeugkette entwickelt.

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg)

Die HAW Hamburg gehört mit rund 16.000 Studierenden zu den größten, praxisorientierten Hochschulen in Deutschland. Insbesondere in den Ingenieurwissenschaften haben viele Projekte besonderen Bezug zur lokalen Wirtschaft, einige davon auch zu den Unternehmen des öffentlichen Personenverkehrs.

Unter anderen bestehen Forschungsaktivitäten in folgenden Schwerpunkten:

Im Jahr 2011 wurde das Projekt „BATSEN“ gefördert durch das BMBF gestartet. Ziele sind die Erarbeitung von Grundlagen sowie die Implementierung und die Anwendung eines drahtlosen Sensornetzes für die Überwachung von mehrzelligen großen Fahrzeugbatterien.

Darüber hinaus wurde 2014 das Projekt „Urban Mobility Lab“ gestartet mit dem Ziel, neuartige Produkte für die Mobilität in urbanen Metropolen zu entwickeln. Die Schwerpunkte liegen hier auf der Elektromobilität einschließlich der Batteriesysteme für urbane Regionen, intelligente Mobilitätsnetzwerke, dem autonomen Manövrieren in dichtem Verkehr sowie das Geräuschverhalten und die Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugen ohne Verbrennungsmotor.

Seit 2012 besteht eine Kooperation mit der Universität Hamburg im Rahmen der „Graduate School Key Technologies for Sustainable Energy Systems in Smart Grids“. An der HAW werden im Rahmen dieses Projektes neuartige Konzepte für Netzmanagement, Batterietechnologien und Batteriesensorik entwickelt.

A.1.2 Ziele

Die Ziele des Vorhabens BEEDeL sind:

- Ermittlung und Bewertung von Einsatzpotenzialen sowie Ausgestaltung von Einsatzszenarien für E-Busse mit dezentraler Ladeinfrastruktur in Hamburg,
- Entwicklung von vereinfachten Messmethoden zur Erfassung tatsächlich im Linienbetrieb auftretender Anforderungen an Stadtbusse auf ausgewählten Linien, Umläufen und Linienbündeln,
- Ermittlung von Streckenenergiebedarfen in realen Teilnetzen in Hamburg unter Berücksichtigung verschiedener Fahrzeugtypen und Heiz- und Klimatisierungskonzepte,
- Ermittlung der wesentlichen Anforderungen an die dezentrale Ladeinfrastruktur wie Ladeleistung, Anschlussleistung, Ladezeiten, Verfügbarkeit und Kosten sowie der für eine sukzessive Erweiterung notwendigen Zahl der Ladestandorte und der Leistungsfähigkeit der Ladesäulen Abgleich der tatsächlichen Leistungsfähigkeit

aktueller und in naher Zukunft verfügbarer rein elektrisch angetriebener Stadtbusse, ihrer Batterien und ihrer dezentralen Ladeinfrastruktur mit den Anforderungen aus realen Einsatzprofilen in Hamburg,

- Gewinnen von Erkenntnissen über die Frage, ob dezentrale Ladeinfrastruktur die geeignete Form der Weiterentwicklung zu einem emissionsfreien Busbetrieb ist,
- Ermittlung optimaler Standorte für Ladeeinrichtungen im Liniennetz und Entwicklung eines Vorschlags für eine sinnvolle Ausgestaltung eines Gesamtsystems,
- Ausarbeitung sinnvoller Entwicklungsschritte für den Aufbau eines Bus-(Teil)-Netzes mit dezentraler Ladeinfrastruktur,
- Beurteilung des Einflusses der Betriebsstrategien auf die eingesetzten Batterien und ihre Auslegung,
- Erreichen von gesicherten Erkenntnissen zu den Auswirkungen einer Einführung von elektrisch angetriebenen Stadtbusen in Teilnetzen hinsichtlich Flexibilität, Produktivität, des Flächen- und Investitionsbedarfs sowie der laufenden Kosten,
- Sicherung eines sukzessiven Einführungskonzeptes für elektrisch angetriebene Stadtbusse in Teilnetzen mit besonderem Augenmerk auf lokal vorhandene Randbedingungen, Einschränkungen und Gestaltungsnotwendigkeiten sowie
- Aufzeigen der auftretenden Konflikte zwischen den verschiedenen Ansprüchen an das Busverkehrssystem bei einem Umstieg auf Elektromobilität.

A.1.3 Aufgabenstellung

Das Vorhaben BEEDeL hat die Ermittlung und die Bewertung der Einsatzpotenziale sowie die Ausgestaltung von Einsatzszenarien für Elektrobusse mit dezentraler Ladeinfrastruktur in Hamburg zum Inhalt.

Dabei sollen insbesondere betriebliche Fragestellungen und ihre wirtschaftlichen (Produktivität, Flexibilität) und funktionellen (Fahrplangestaltung, Flächenbedarfe, Struktur Teilnetze) Auswirkungen untersucht und bewertet werden. Das Ziel ist es, eine möglichst hohe Planungssicherheit bei der künftigen Auslegung einer wachsenden Flotte von Elektrobussen mit dezentral im Liniengebiet der HOCHBAHN angelegten Ladeeinrichtungen zu erhalten (Investitionen, Umsetzbarkeit, Auswirkungen auf Leistungsangebot etc.). Die exemplarisch in der Metropole Hamburg ermittelten Ergebnisse sollen anschließend auch für geplante Elektrobussysteme in anderen Großstädten genutzt werden können.

Auch welche Kosten mit der Installation der Ladeinfrastruktur im Stadtgebiet verbunden sind, soll im Rahmen der Untersuchung anhand plausibler Ausbauszenarien evaluiert werden.

Damit die verfügbaren Ladezeitfenster effektiv genutzt werden können, müssen die Ladestationen über eine möglichst hohe Ladeleistung verfügen, was wiederum direkte Auswirkungen auf die Nutzbarkeit des lokalen Stromnetzes und somit auf die Kosten der Infrastruktur hat. Für einen attraktiven und störungsfreien Betrieb eines elektrischen Teilnetzes ist es erforderlich, eine optimale Balance zwischen Infrastrukturinvestition und Fahrzeuginvestition sowie Fahrzeugverfügbarkeit, Fahrplantreue und Wirtschaftlichkeit herzustellen.

Nicht zuletzt sollen im Rahmen dieser Untersuchung die Auswirkungen einer potenziellen Umstellung auf Elektrobusse mit Gelegenheitsladen hinsichtlich der Produktivität der Leistungserbringung und der Flexibilität beim Fahrzeugeinsatz ermittelt werden, da sie erhebliche Wirkungen auf die Wirtschaftlichkeit haben. Zudem sollen weitere verwandte Themen wie die Verfügbarkeit der notwendigen Flächen für die Ladeinfrastruktur (auf der Strecke und den Betriebshöfen) sowie der elektrischen Versorgung bei künftig wachsenden Elektrobusflotten bewertet werden.

Im Rahmen des Projektes BEEDeL werden verschiedene Szenarien für räumliche oder funktionelle Ausbaustufen (Umläufe – Teilnetze – Gesamtnetz) für die Einführung von elektrisch angetriebenen Stadtbussen bei der HOCHBAHN erarbeitet und bewertet.

Es ist davon auszugehen, dass belastbare, verlässliche Aussagen über die tatsächliche Motor- und Batterieleistungsanforderung und somit der Energiebedarf der Fahrzeuge nur auf Basis detaillierter Messungen der Geschwindigkeits- und Belastungsprofile der Stadtbusse vor Ort auf der jeweiligen Linie getroffen werden können. Diese Kennwerte können größtenteils direkt durch Messungen an aktuell im Einsatz befindlichen konventionellen Bussen auf den jeweiligen Linienabschnitten erfasst werden. Die dabei aufgezeichneten Fahrzeiten können aufgrund der Verkehrslage sehr starken Streuungen unterliegen. Insbesondere bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen kann dies zu Problemen bei der Fahrzeugverfügbarkeit führen, da z. B. erforderliche Ladezeiten nicht eingehalten werden können oder das Fahrzeug aufgrund von Stau nicht bis an die Ladestation heranfahren kann. Diese realistischen Randbedingungen sind durch die Messungen automatisch mit zu erfassen.

Die deshalb erforderlichen Messungen der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile finden aktuell mit aufwändiger Messtechnik statt, die nur von Fachpersonal bedient werden kann. Wenn nur einzelne Stadtbus-Linien untersucht werden sollen, ist dieser Aufwand akzeptabel. Werden aber, wie in diesem Projekt, mehrere Umläufe oder Teilnetze untersucht, ist dieser Aufwand nicht länger realisierbar. Dementsprechend werden im Projekt angepasste, vereinfachte und kostengünstigere Messmethoden zur Erfassung von realen Einsatzprofilen von Stadtbussen entwickelt und erprobt, die es ermöglichen, in allen zu untersuchenden Szenarien eingesetzt zu werden.

A.1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Details zum Ablauf des Vorhabens können den beigefügten Ablaufplan (vgl. Abb. 1) entnommen werden.

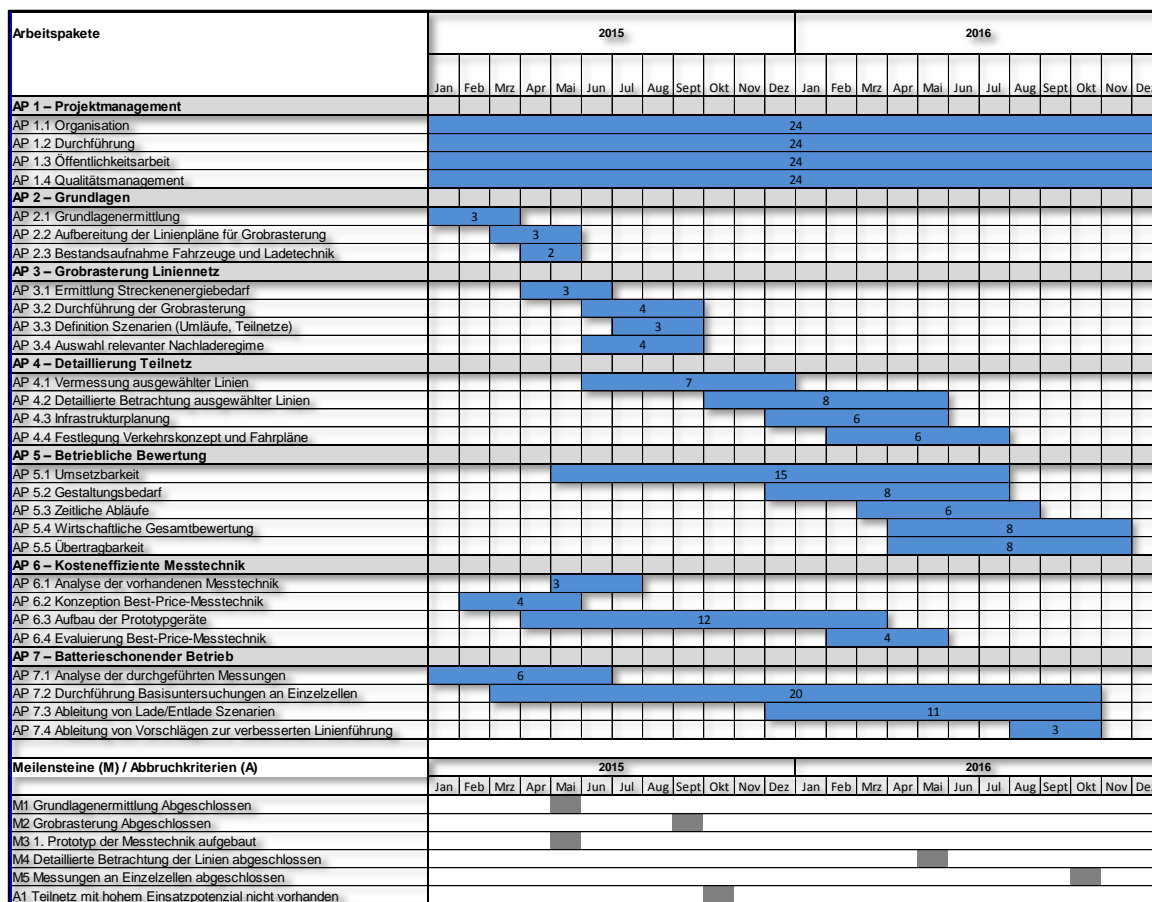


Abbildung 1: Projektzeitplan

A.1.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Linienanalyse zur Einführung von Elektrobussen

Die Entwicklung der Batterietechnologie ist in den letzten Jahren stark voran geschritten. Viele deutsche Kommunen denken über die Einführung von rein elektrisch angetriebenen Stadtbussen nach bzw. haben bereits Fahrzeuge beschafft.

Werden die zu elektrifizierenden Linien umfangreicher oder die energetischen Anforderungen hinsichtlich Liniengestaltung, Fahrpläne, technische Details der Fahrzeuge und Ladestationen, Positionierung der Ladestationen im Netz, Beschaffungs- und Lebensdauerkosten etc. anspruchsvoller, ist eine vernetzte Betrachtung, wie sie in diesem Vorhaben durchgeführt wird, unumgänglich.

Messtechnik für Orts-Geschwindigkeits-Profile

Die Bestimmung von Orts-Geschwindigkeitsprofilen für die Linienanalyse erfolgt nach dem Stand der Technik mittels teurer Spezialmesstechnik, die die Eingangsdaten für die detaillierte Betrachtung einzelner Linien via Simulation liefert. Gilt es jedoch größere Umfänge zu erfassen,

wie sie bei der Simulation sukzessiv wachsender Teilnetze auftreten, so besteht das Erfordernis nach einer einfach handzuhabenden, vergleichsweise kostengünstig verfügbaren Messtechnik. Diese kostengünstige Messtechnik wurde im Rahmen dieses Vorhabens entwickelt und erprobt.

Analyse des Batterieverhaltens

Nach dem Stand der Technik werden die eingesetzten Batterien in elektrisch angetriebenen PKWs hinsichtlich ihres Ladungszustands (State Of Charge, SOC) mit daraus abgeleiteter Reichweitschätzung bewertet. Hierzu werden experimentell gewonnene Beschreibungen hinterlegt, die aufgrund der anderen Fahrprofile von PKWs (vgl. Neuer Europäischer Fahrzyklus NEFZ) nur begrenzt für den Busbetrieb zutreffend sind.

Die Messungen, die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführt wurden, liefern Hinweise auf

- das Alterungsverhalten der Zellen in Abhängigkeit der Entladetiefe (Vollzyklen bzw. Teilzyklen bei Gelegenheitsladen),
- Hinweise auf das Alterungsverhalten der Zellen in Abhängigkeit der Ladegeschwindigkeit sowie
- Aussagen zu aktueller und zukünftiger Standard-Batterietechnologie im Test.

Die Erkenntnisse aus dem Vorhaben BEEDeL können bei zukünftig anstehenden strategischen Entscheidungen der HOCHBAHN bei der Fahrzeugbeschaffung als wichtige Grundlage dienen.

A.2 Projektevaluation

A.2.1 Projektverlauf

AP 1 Projektmanagement

Aufgrund seiner interdisziplinären Ausrichtung, der Innovationskraft und Komplexität des Vorhabens wurde das Projektmanagement durch die HOCHBAHN übernommen, da nur sie einen Einblick in alle zu berücksichtigenden Aufgabenfelder hat. Es konnte sichergestellt werden, dass in Abstimmung aller Projektbeteiligten im Verbundprojekt eine fristgerechte, zeit- und kosteneffiziente Bearbeitung der Teilarbeitspakete erfolgte.

AP 1.1 Organisation

Die Projektorganisation umfasste alle aufbau- und ablauforganisatorischen Regelungen zur Abwicklung des Projektes BEEDeL. Hier wurden die Arbeitsteilung zwischen Personen und Teams festgelegt sowie die Aufgaben, Kompetenzen, Verantwortlichkeiten, Weisungsbefugnisse, Kontrollrechte und Aufsichtspflichten koordiniert.

Der Zuwendungsbescheid zum Vorhaben BEEDeL ist am 20. Januar 2015 bei der HOCHBAHN eingegangen. Das Projekt wurde rückwirkend zum 01.10.2014 mit einer Projektlaufzeit bis zum

30.09.2016 bewilligt. In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde beim PtJ eine kostenneutrale Verlängerung des Vorhabens bis zum 31.12.2016 beantragt, da durch die Zustellung der Zuwendungsbescheide im Januar 2015 die inhaltliche Arbeit erst zum ersten Quartal 2015 aufgenommen werden konnte. Dem Verlängerungsantrag wurde durch den Projektträger mit Bescheid vom 05.06.2015 zugestimmt.

Die Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum Jahresende 2016 schaffte die Voraussetzung, den zeitlichen Rahmen aufrecht zu erhalten, der zur Bearbeitung der Arbeitspakete im Projekt in der erforderlichen Detailtiefe notwendig war.

AP 1.2 Durchführung

Das Projektmanagement führte eine kontinuierliche Überprüfung der Einhaltung des Projektplanes (Zeit-, Kosten-, Ressourcenplanung) durch, um zeitliche, inhaltliche oder wirtschaftliche Abweichungen frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls durch geeignete Maßnahmen zu korrigieren.

Die konkrete Umsetzungsphase des Projekts wurde am 20.03.2015 mit der Kick-Off-Sitzung bei der HOCHBAHN gestartet.

Um den Projektfortschritt zu begleiten und zu dokumentieren wurde eine Projektgruppe eingerichtet, die sich aus den für die jeweiligen Arbeitspakete zuständigen Personen zusammengesetzt hat. Auf den Projektgruppentreffen wurde über den erreichten Sachstand berichtet und offene Fragen erörtert. Vom 1.10.2014 bis zum 31.12.2016 fanden insgesamt 9 ordentliche Projektgruppensitzungen statt. Darüber hinaus wurden themenbezogene Sondertermine und Workshops durchgeführt.

Zusätzlich zu den Projektgruppensitzungen fanden sogenannte Steuerkreissitzungen statt, auf denen über den Projektfortschritt berichtet wurde. Im Steuerkreis waren neben den Mitgliedern der einzelnen Projektgruppen auch Vorstandsvertreter und Bereichsleiter der HOCHBAHN, die Geschäftsführung der FFG sowie die Abteilungsleitung des Fraunhofer IVI vertreten. Im Laufe des Projektes hat der Steuerkreis vier Mal getagt. Die abschließende Steuerkreissitzung fand am 14. Dezember 2016 statt.

AP 1.3 Öffentlichkeitsarbeit

Die ursprüngliche Planung sah vor, die Außendarstellung des Projektes in Abstimmung zwischen den beteiligten Partnern sowie nach den Vorgaben des Zuwendungsgebers und gemäß den Förderrichtlinien des Projektträgers projektbegleitend durchzuführen. Auf der vierten Projektgruppensitzung am 15.7.2015 wurde von den Projektpartnern beschlossen, Veröffentlichungen erst vorzunehmen, sobald zentrale Erkenntnisse und Schlussfolgerungen des Projekts vorliegen.

AP 1.4 Qualitätsmanagement

Insbesondere durch die Beteiligung mehrerer Unternehmen ist innerhalb des Projektmanagements ein übergreifendes Qualitätsmanagement zur Sicherstellung eines angemessenen und hohen Standards der Projektrealisierung notwendig.

Die Einhaltung der festgelegten Meilensteine wurde regelmäßig überprüft und auf den Steuerkreissitzungen berichtet. Alle Meilensteine konnten im Laufe des Projektes rechtzeitig abgebildet werden.

AP 2 Grundlagen

AP 2.1 Grundlagenermittlung

Im Rahmen des Arbeitspakets 2.1 waren die Grundlagen dafür zu ermitteln, wie die Grobrasterung des Liniennetzes im AP 3 sowie später die Detaillierung der Teilnetze in AP 4 erfolgen soll. Hierzu waren alle Randbedingungen des Vorhabens zu benennen, abzugrenzen und zu definieren. Es wurden die für die Systemauslegung relevanten Größen benannt und Erfahrungswerte für eine Eingrenzung aus den Ergebnissen bisheriger Arbeiten vorgestellt. Die abschließende Definition der tatsächlich anzusetzenden Parameter erfolgte in Abstimmung aller Projektpartner.

Um die zukünftige technische Entwicklung zu berücksichtigen, wurden drei zu betrachtende Zeitscheiben gewählt. Die erste Zeitscheibe (Szenario A) stellt den derzeit verfügbaren Stand der Technik dar. Die zweite Zeitscheibe (Szenario B) soll bereits einen lokal rein emissionsfreien Betrieb beinhalten, so wie es die Zielvorstellung der Stadt Hamburg beginnend ab dem Jahr 2020 ist. In der dritten Zeitscheibe (Szenario C) soll sich sowohl die Weiterentwicklung der Speichertechnologie als auch der Fahrzeugheizung und -klimatisierung widerspiegeln.

Einen maßgeblichen Einfluss auf die Reichweite eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs haben die für die Simulation anzusetzenden klimatischen Bedingungen. Hierzu wurde eine umfangreiche Auswertung der Klimadaten für die Stadt Hamburg der letzten 53 Jahre vorgenommen und die erfassten extremen Temperaturen hinsichtlich ihrer Häufigkeit bewertet. Die unterschiedlichen Systemlösungen der Heizung und Klimatisierung des Fahrgastinnenraums wurden entsprechend ihres aktuellen Entwicklungsstandes aufgeführt und in einer Bewertungsmatrix gegenübergestellt. Weitere Simulationsparameter der Fahrzeugkonfiguration, wie Fahrzeugleermasse, Fahrzeuggröße und anzusetzende Zuladung (Anzahl der Fahrgäste im Fahrzeug), wurden für jede Zeitscheibe diskutiert und abschließend festgelegt.

Die Batterietechnologie ist eines der zentralen Themen der Elektromobilität. Der Energieinhalt und die Leistung des Energiespeichers bestimmen neben den Abständen der Ladestationen die Wegstrecke, die mit einem Fahrzeug zurückgelegt werden kann. Als Ausgangsbasis für das Projekt BEEDeL wurden daher Grundlagen, Wertungen und Prognosen analysiert, die sich auf

Batteriemerkmale und Batterieparameter im Elektrobuseinsatz in den erwähnten Zeitscheiben beziehen und für die Modellannahmen im Projekt verwertet wurden. Neben der Batterietechnologie werden die zukünftigen Fortschritte der Produktionstechnologie und konstruktive Verbesserungen unter Berücksichtigung einer Lernkurve bewertet. Die Prognosen haben einen hohen Unsicherheitsgrad. Für die Anwendung in Elektrobussen ist eine nachgelagerte Anbindung an den Leitmarkt Elektro-PKW, also insbesondere die dortige Stückzahlentwicklung zu sehen. Für die getroffene Einschätzung hinsichtlich der Energiedichte und anderer technologischer Faktoren spricht, dass die Anwendung in der Elektromobilität und insbesondere bei Elektrobussen der schnellen Verwendung neuester Technologie in der Verbraucherelektronik um mindestens fünf Jahre zeitlich nachläuft.

In der Steuerkreissitzung vom 29.06.2015 wurden sämtliche für die Simulationen relevanten Größen vorgestellt und diskutiert. Ausgehend von den drei Zeitscheiben wurden von allen Projektpartnern Randbedingungen und Vorgaben verabschiedet, um die technologische Entwicklung zu berücksichtigen und den Vergleich verschiedener Systeme zu ermöglichen. Durch diese Vorgehensweise werden beispielsweise die wirtschaftlichen und betrieblich-technischen Auswirkungen (z.B. elektrifizierbare Teilnetzgröße) durch den Einsatz einer fossilen Zusatzheizung im Vergleich zu einer elektrischen Heizung sichtbar. Ebenso wurden Reservemechanismen vorgestellt und verabschiedet, die greifen sollen, wenn die vorgegebenen Temperaturgrenzwerte weiter unter- bzw. überschritten werden. Diese sollen sicherstellen, dass das Fahrzeug seine Reichweite auch bei extremen Witterungsbedingungen durch Einschränkung von Komfortmerkmalen (Innenraumtemperatur) für die Fahrgäste sicherstellen kann

AP 2.2 Aufbereitung der Linienpläne für die Grobrasterung

Für die Grobrasterung des Liniennetzes wurden dem Fraunhofer IVI nach Absprache alle notwendigen betrieblichen Informationen übermittelt und in eine Datenbank importiert.

Neben den Stammdaten, wie z. B. Haltestellennamen und -koordinaten oder Linienverläufe umfasst die Datenlieferung insbesondere die vollständigen Umlaufdaten aller sechs HOCHBAHN-Betriebshöfe sowie der drei Höfe der Tochterunternehmen Jasper und Süderelbe-Bus. Es sind alle vier Tagesarten (Montag bis Donnerstag, Freitag, Samstag und Sonntag) berücksichtigt, es fehlen ausschließlich einige wenige, durch andere Auftragsunternehmer (z. B. VHH) geleistete Auftragsverkehre.

Die Umlaufpläne beinhalten v. a. Informationen zu der geplanten Abfolge der durch einen Bus zu leistenden Fahrplanfahrten mit Beginn und Ende der Fahrten sowie Start- und Zielhaltestellen. Ebenfalls berücksichtigt sind sämtliche für die Verknüpfung der produktiven Fahrten notwendigen Leer-, Ein- und Aussetzfahrten, sowie die entstehenden Wendezeiten.

Obwohl die übermittelten Umlaufpläne an einem Stichtag im April 2015 gültig waren, bilden sie den HOCHBAHN-Busbetrieb im Jahresfahrplan 2015 hinreichend genau ab, auch wenn sich einzelne Umläufe unterjährig geringfügig verändern können.

AP 2.3 Bestandsaufnahme Fahrzeuge und Ladetechnik

Innerhalb des AP 2.3 wurde der aktuelle Stand der Technik sowohl von Elektrobussen als auch von für die Elektromobilität kritischen Fahrzeugkomponenten wie Energiespeicher, Ladegeräte etc. ermittelt.

So gibt es prototypische und seriennahe Fahrzeugsysteme mit ganz unterschiedlichen Energiespeicherlösungen, sowohl bezüglich der Systemtechnologie als auch des Speicherinhalts. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, welche tatsächlich nutzbare Energiemenge den Fahrzeugen bereitgestellt werden kann und wie oft und mit welcher Leistung der Energiespeicher ge- oder entladen werden darf. Da die Berechnungen für mehrere Szenarien erfolgen (siehe AP 2.1), wurde die zukünftige Entwicklung bei Gesamtenergieinhalt und nutzbarem Energieinhalt der Batterie sowie der Systemmasse für die einzelnen Szenarien abgeschätzt. Als Ausgangsbasis wurden daher Grundlagen, Wertungen und Prognosen analysiert, die sich auf Batteriemerkmale und Batterieparameter im Elektrobuseinsatz in den erwähnten Zeitscheiben beziehen. Neben der Batterietechnologie werden die zukünftigen Fortschritte der Produktionstechnologie und konstruktive Verbesserungen unter Berücksichtigung einer Lernkurve bewertet. Die Prognosen haben einen hohen Unsicherheitsgrad. Für die Anwendung in Elektrobussen ist eine nachgelagerte Anbindung an den Leitmarkt Elektro-PKW, also insbesondere die dortige Stückzahlentwicklung zu sehen. Für die getroffene konservative Einschätzung hinsichtlich der Energiedichte und anderer technologischer Faktoren spricht, dass die Anwendung in der Elektromobilität und insbesondere bei Elektrobussen der schnellen Verwendung neuester Technologie in der Konsumelektronik um mindestens fünf Jahre zeitlich nachläuft.

Für die Heizung des Fahrgastinnenraums wurden ebenfalls der Stand der Technik sowie prototypische Lösungen ermittelt. So umfasst die Untersuchung u. a. mögliche (zusätzliche) Speicherlösungen im Fahrzeug, damit der Hauptenergiespeicher lediglich für die Traktion und den Betrieb der Nebenverbraucher und des Bordnetzes ausgelegt werden muss. Hierbei wurde deutlich, dass mitunter noch ein enormer Entwicklungsaufwand bei den verschiedenen Speichertechnologien notwendig ist.

Im Bereich der Ladetechnik wurden vollautomatische Ladestationen, wie das bereits bei der HOCHBAHN eingesetzte Siemens-System „High-Power-Charger“, bei dem über eine galvanische Verbindung die Ladung erfolgt, erfasst. Dieses System, bei dem in kürzester Zeit der Kontakt hergestellt und mit einer Ladeleistung von 300 kW geladen werden kann, basiert auf einem Stromabnehmer, welcher sich von der Ladesäule absenkt und die Verbindung zum fahrzeugseitigen Kontakt herstellt. Aber auch Steckerlösungen und verschiedene induktive Nachladeverfahren, welche einen teils sehr deutlich unterschiedlichen Entwicklungsstand aufweisen, wurden berücksichtigt.

AP 3 Grobrasterung Liniennetz

AP 3.1 Ermittlung Streckenenergiebedarf

Der Energiebedarf eines Elektrobusses setzt sich zusammen aus dem Energiebedarf

- für die Traktion,
- für den Betrieb der Nebenverbraucher,
- für die Heizung und die Klimatisierung des Fahrgastinnenraums sowie des Fahrerarbeitsplatzes und
- den Lade- und Entladeverlusten des Energiespeichers.

Aus Langzeitmessungen von Fahrzeugen im Linienbetrieb sowie aus Einzelprüfungen auf Testständen und Prüfgeländen konnten zahlreiche Verbrauchswerte bzw. Energiebedarfe einzelner Aggregate und Komplettsysteme seitens des Fraunhofer IVI ermittelt werden. Die gewonnenen Daten sind die Ausgangsbasis für die Parametrisierung der einzelnen Fahrzeuggruppen für die Grobrasterung des Liniennetzes. Aufgrund der verhältnismäßig flachen Topographie der Stadt Hamburg kann das Höhenprofil in diesem Berechnungsschritt vernachlässigt werden.

AP 3.2 Durchführung der Grobrasterung

Aufgrund des großen und komplexen Hamburger Liniennetzes, wurde im Rahmen des Projektes BEEDeL die Software IVInet für die Durchführung der Grobrasterung angepasst. Da die vorliegenden Fahrzeugumläufe nicht linienrein verlaufen und die einzelnen Linien von verschiedenen Betriebshöfen bedient werden, war die bisherige Softwarelösung nicht mehr ausreichend. Mit der neuen Software können die Umlaufpläne der HOCHBAHN direkt eingelesen werden und die Konfiguration der zu simulierenden Fahrzeuge kann für jede einzelne Fahrzeuggruppe separat erfolgen.

Im Arbeitspaket 2.1 - Grundlagenermittlung wurden die für die Grobrasterung zu berücksichtigenden Randbedingungen definiert. Diese Vorgaben dienen als Eingangsparameter für die Berechnungen der drei zu untersuchenden Szenarien.

In der Berechnung wurden alle Leer-, Einsatz- und Aussetzfahrten berücksichtigt. Die Berechnungsschritte lieferten Aussagen über den Energiebedarf für die Fahrten und im Stand während der Wendezeiten, die Summe aller Wendezeiten je Linienendpunkt und daraus abgeleitet die potentiell mögliche nachladbare Energiemenge. Unter Verwendung eines speziell entwickelten Optimierungsansatzes wurden die Einzelergebnisse der Ladestationsanalysen aller Linien zusammengeführt und die für das jeweilige Liniennetz optimalen Ladestellen¹ ermittelt. Für jeden Ausbaustand des Ladestationsnetzes konnte für jede Ladestelle die Energiemenge berechnet werden, die tatsächlich nachgeladen wurde.

¹ Eine Ladestelle ist ein mit einer ausreichenden Anzahl an Lademasten versehener Ort für das dezentrale Nachladen

Für jede Ladestellenkombination² konnten die einzelnen SOC-Verläufe der darauf verkehrenden Fahrzeugumläufe ermittelt werden. Darüber hinaus wurden die einzelnen Linienverknüpfungen³, die zurückgelegten Wegstrecken, der Energiebedarf des Fahrzeugs und die nachladbare Energiemenge ausgegeben.

Ein Busliniennetz einer Metropolregion wie in Hamburg mit über 800 Fahrzeugen und über 120 Buslinien kann unmöglich in kurzer Zeit von konventionell angetriebenen Dieselfahrzeugen auf Elektrofahrzeuge umgestellt werden. Daher wurde im Rahmen der Grobrasterung für jedes Szenario ein aus energetischer Sicht sinnvoller Netzausbauplan erstellt. Dieser berücksichtigt im Wesentlichen die sich durch die nicht linienreinen Fahrzeugumläufe ergebenden Linienbündel. Die Ergebnisse der Grobrasterung bildeten die Grundlage für die Ableitung von Teilnetzen in AP 3.3.

AP 3.3 Definition Szenarien (Umläufe, Teilnetze)

Auswahlkriterien für geeignete Teilnetze

Da die detaillierte Untersuchung von Umläufen (AP 4) mit einem deutlich höheren Aufwand verbunden ist als die zuvor durchgeführte Grobrasterung, ist es erforderlich, geeignete Teile des Hamburger Busnetzes auszuwählen. Bei der Auswahl von geeigneten Teilnetzen soll grundsätzlich auch berücksichtigt werden, dass diese für eine Elektrifizierung in näherer Zukunft grundsätzlich in Frage kommen.

Für die Elektrifizierung eines Teilnetzes der Busflotte der HOCHBAHN muss neben der eventuellen Bereitstellung von dezentraler Ladeinfrastruktur auch die Versorgung der Fahrzeuge auf dem jeweiligen Betriebshof sichergestellt werden. Somit bringt die Umstellung eines Teilnetzes auf den Betrieb von batterie-elektrisch betriebenen Bussen auch eine Umrüstung des für die Fahrzeugversorgung zuständigen Betriebshofs mit sich. Daher ist gerade bei der Neueinführung der Technologie wünschenswert, dass ein ausgewähltes Teilnetz durch einen einzelnen Betriebshof versorgt werden kann, um den erforderlichen Infrastrukturaufwand so gering wie möglich zu halten. Im Wesentlichen sind folgende Aspekte der Betriebshöfe zu bewerten:

- Ausreichende elektrische Anbindung des Hofes für die Versorgung der Fahrzeuge (Nachladen der Batterien, Batterie-Balancierung, Vorkonditionierung)
- Ausrüstung der Werkstatt für den Umgang mit batterie-elektrisch betriebenen Fahrzeugen
- Kapazität im Bestand für die Versorgung von batterie-elektrischen Fahrzeugen

Mit dem Ziel, im Rahmen der Teilnetzuntersuchung möglichst gut geeignete Varianten für eine Einführung der Technologie zu entwickeln, ist eine Konzentration auf mit 12 m-Bussen

² Für den Betrieb des Busnetzes mit dezentralen Lademasten sind verschiedene Kombinationen an Ladestellen im Netz denkbar

³ Im Busnetz der HOCHBAHN werden die Einsatzprofile der Busse häufig durch miteinander verknüpfte Fahrten auf verschiedenen Linien gebildet.

betriebene Verkehre sinnvoll, da diese Fahrzeuge durch die Industrie aller Voraussicht nach als erste serienreif am Markt verfügbar sein werden.

Die vor allem mit 18 m-Gelenkbussen betriebenen MetroBus-Linien in Hamburg bieten aufgrund ihrer speziellen Charakteristik durch einen relativ linienreinen Betrieb sowie eine hohe Auslastung möglicher dezentraler Ladestationen durch den dichten Fahrplankontakt aber in besonderem Maße gute Voraussetzungen für eine Elektrifizierung mit sich. Daher ist auch diese Fahrzeuggruppe in der weiteren Betrachtung interessant. Lediglich Linien mit Fahrzeuggrößen größer 18,75 m soll in der weiteren Untersuchung nur nachrangig berücksichtigt werden, da zum aktuellen Zeitpunkt die Entwicklung von elektrisch betriebenen Großraum-Bussen noch kaum zu prognostizieren ist.

Ausgewählte Teilnetze

Im Detail wurde ein Gelenkbusteilnetz abgeleitet, welches insgesamt sechs Linien mit 11 potentiellen Ladestellen umfasst. Die Grobrasterung ergab, dass bei Verwendung einer chemischen Heizung ein sehr großer Anteil der Fahrzeugumläufe bereits mit Batteriefahrzeugen und mit Ladestellen an den genannten Linienendpunkten, betrieben werden könnte.

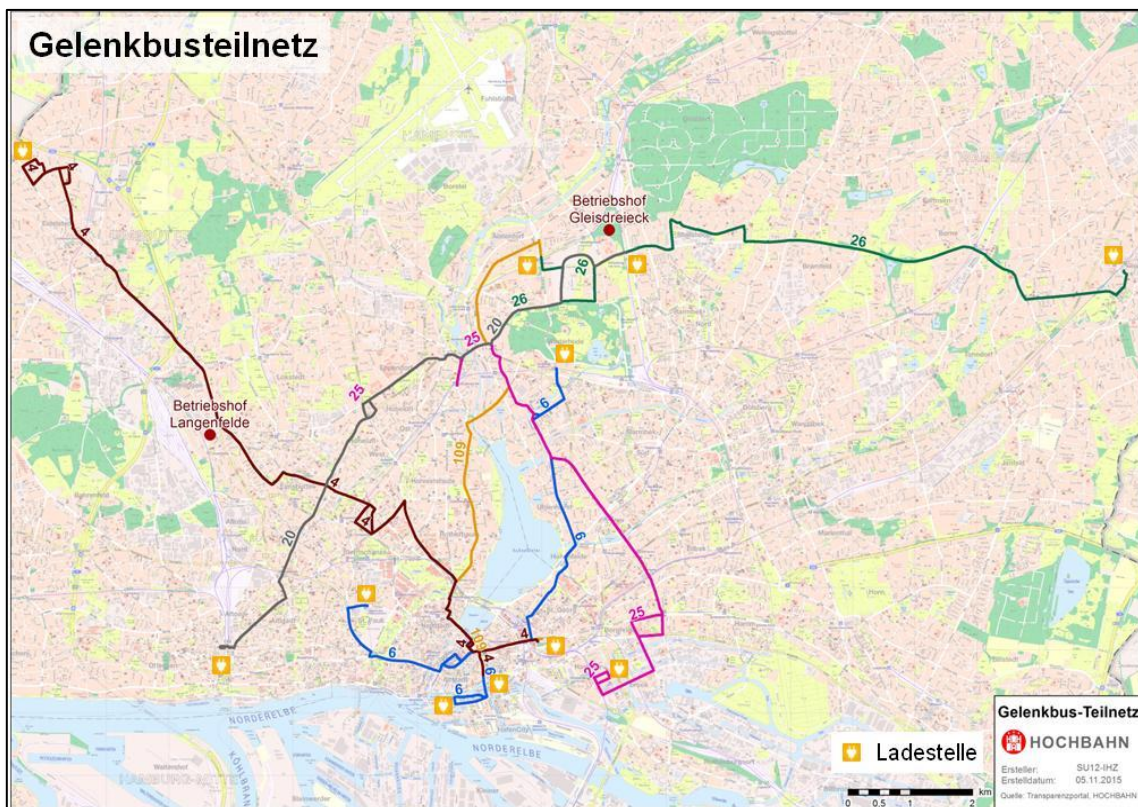


Abbildung 2: Ausgewähltes Gelenkbusteilnetz

Insgesamt drei Solobusteilnetze wurden hinsichtlich der bestmöglichen Umsetzbarkeit im Detail untersucht.

Aus der Bewertung aller Teilaspekte ging das Teilnetz „Gleisdreieck“ als Vorzugsvariante hervor. Daher wurde neben dem ausgewählten Teilnetz von Gelenkbuslinien dieses Teilnetz für den 12 m-Busbetrieb ausgewählt und soll im weiteren Projektverlauf im AP 4 detailliert untersucht werden.

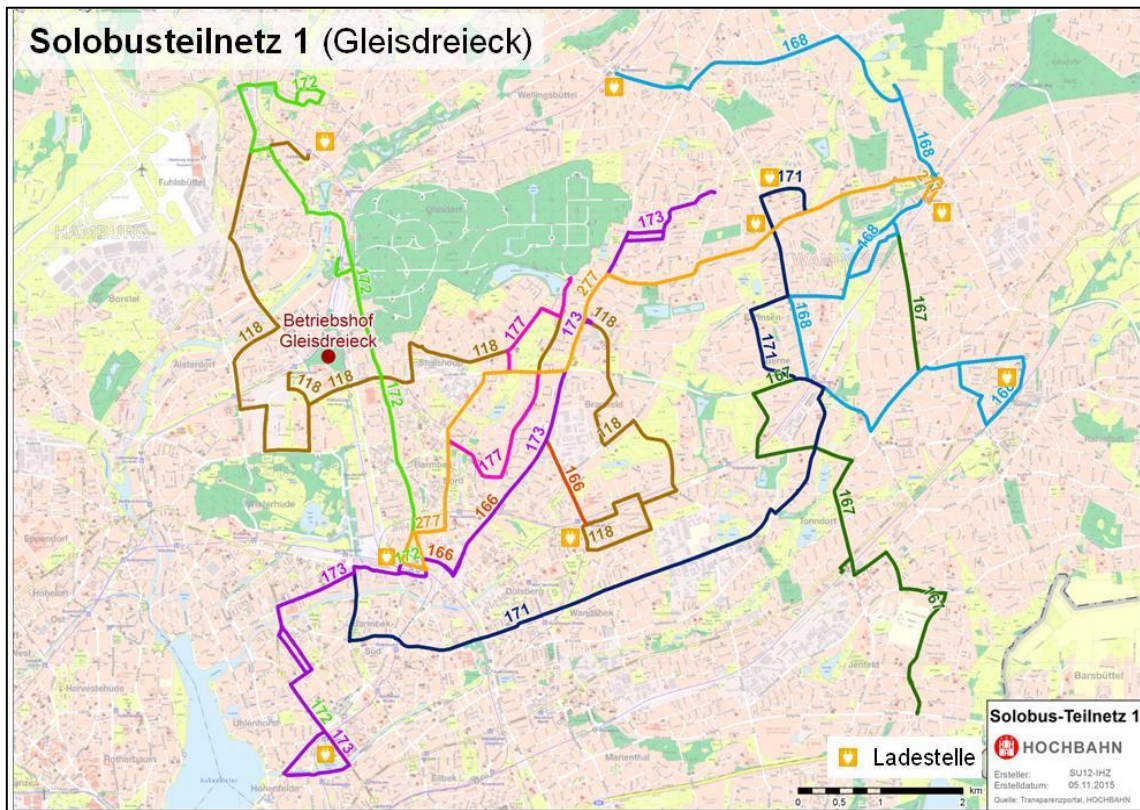


Abbildung 3: Ausgewähltes Solobusteilnetz

AP 3.4 Auswahl relevanter Nachladeregimes

Die Vielzahl an grundsätzlich möglichen Ladekonzepten erfordert vor Beginn der Berechnungen eine Festlegung für eine Technologie. Die Entscheidung für oder gegen bestimmte Konzepte ist mit Vor- und Nachteilen verbunden und beeinflusst u. U. die spätere Kompatibilität mit anderen technischen Lösungsansätzen. Gemeinsam mit dem Verkehrsbetrieb wurden deshalb Kernparameter für die durchzuführenden Untersuchungen spezifiziert. Die folgende Tabelle gibt beispielhaft eine Auswahl derzeitiger Ladekonzepte wider.

Ladekonzept	Bemerkung
Stationäre Ladung mit geringer Leistung Ladung über Nacht	<ul style="list-style-type: none"> - Geeignet für Energiespeicher mit niedriger zulässiger Ladeleistung - Energiespeicher mit hohem Energieinhalt (>250 kWh), hierdurch hohe Investitionskosten und hohe Fahrzeugmasse - Fahrzeugumlauf durch Energieinhalt limitiert

	<ul style="list-style-type: none"> - Zentrales Nachladen der Fahrzeuge auf dem Betriebshof - Keine optische Integration in das Stadtbild notwendig
Schnellladung mit konduktiver Übertragung	<ul style="list-style-type: none"> - Energiespeicher mit geringem bis mittlerer Energieinhalt (100 - 150 kWh) - Dezentrale Positionen der Ladestationen - Hohe Ladeleistung (bis 300 kW) - Größere Anzahl an Ladestationen notwendig - Integration in das Stadtbild notwendig
Nachladung mittels induktiver Nachladung	<ul style="list-style-type: none"> - Hoher Infrastrukturaufwand (Einbau Ladeschleife) - Energiespeicher mit geringem bis mittlerer Energieinhalt (100 -150 kWh) - Begrenzte Ladeleistung, dadurch höhere Standzeit im Umlauf notwendig - Zusätzliche Masse durch sogenannten „Pick-Up“-Stromüberträger
Nachladung während der Fahrt mittels Pan- tograph	<ul style="list-style-type: none"> - Installation von Fahrleitungsabschnitten notwendig - Hoher Investitionsaufwand - ggf. Nutzung vorhandener Infrastruktur (z.B. Unterwerke von Straßenbahnen oder U-Bahnen) - Energiespeicher mit geringem bis mittlerer Energieinhalt (100 -150 kWh) - Sichtbarkeit der Fahrleitung, Beeinflussung des Stadtbildes - Fixierung der Linienführung

Die ausschließlich zentrale stationäre Ladung der Fahrzeuge auf den Betriebshöfen der HOCHBAHN würde den Bedarf an Ladeinfrastruktur auf nur wenige Punkte konzentrieren. Eine Integration von Ladetechnologie im öffentlichen städtischen Raum wäre nicht notwendig, wodurch aufwändige Planungs- und Abstimmungsmaßnahmen entfallen. Dem gegenüber steht aber eine Konzentration an Nachladeleistung auf den Betriebshöfen, da die Fahrzeuge häufig parallel nachgeladen werden müssen. Für die Depotladung entscheidend ist die Reichweite eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs. Erst wenn Reichweiten der derzeitigen Fahrzeugumläufe auch abgedeckt werden können, bei entsprechender Berücksichtigung von Reserven für betriebliche Störungen, ist dieses Nachladeregime für ein Verkehrsunternehmen ausreichend geeignet. Die Grobrasterung ergab, dass, wenn von einer ausschließlichen Ladung auf dem Betriebshof ausgegangen wird, von den 1281 Fahrzeugumläufen im Szenario A insgesamt 199 Fahrzeugumläufe (15,5%) erfolgreich beendet werden können. Somit ist für einen Großteil der Fahrzeugumläufe, beim derzeitigen Stand der Technik, zusätzliche Ladeinfrastruktur im Liniennetz oder andere Konzepte wie Brennstoffzelle als Range-Extender oder Brechen von Umläufen erforderlich.

Die induktive Nachladung wurde aufgrund des erwarteten geringen Wirkungsgrads, dem derzeitigen Entwicklungsstand sowie den hohen Kosten für die Integration als Nachladesystem ausgeschlossen.

Bei der Nachladung während der Fahrt mittels Pantograph kann zwar auf bewährte Oberleitungsbustechnologie zurückgegriffen werden, die Fahrzeuge sind dabei aber weitestgehend auf die bestehende Linienführung fixiert. Des Weiteren können in Hamburg keinerlei Synergieeffekte genutzt werden, die sich durch eine Verschmelzung der Infrastruktur mit einer Straßenbahn ergeben würde. Die hohen Kosten und der enorme Planungs- und Genehmigungsprozess zur Anbringung von Fahrleitungen im städtischen Raum sprechen ebenfalls gegen eine derartige Ladetechnologie.

Die schnelle Nachladung über eine stationäre Ladestation mit einem Energieübertragungssystem wird bereits von der HOCHBAHN am sogenannten Elektrobusterminal erprobt. Dabei kann mit einer Ladeleistung von 300 kW während der normalen Wendezeit an einem Linienendpunkt genügend Energie in ein Fahrzeug übertragen werden, um die Folgestrecke elektrisch befahren zu können. Von Nachteil ist, dass entsprechender Platzbedarf für die Infrastruktur sowie die notwendigen Wendezeiten vorzuhalten sind.

Die Anzahl und Position von möglichen Ladestellen wurde im AP 3.2 für drei unterschiedliche Szenarien bestimmt.

AP 4 Detaillierung Teilnetz

AP 4.1 Vermessung ausgewählter Linien

Die Aufzeichnung realer Bedingungen im Busverkehr ist erforderlich, um insbesondere für die Linien bzw. Umläufe genauere Kalkulationsdaten zu erheben, für die nach Abschluss der Arbeiten an AP 3.2 auf Basis der Annahmen der Grobrasterung noch keine klare Aussage hinsichtlich ihrer Eignung für den Batteriebus-Betrieb möglich ist. Daher wurden mit Vorliegen der Ergebnisse der Grobrasterung Messfahrzeuge zielgerichtet auf diesen Umläufen eingesetzt.

Im Rahmen des AP 6 wurden durch die HAW insgesamt 11 Datenlogger aufgebaut und für Messungen zur Verfügung gestellt. Seit Juli 2015 wurden die Geräte nach Fertigstellung in ausgewählte Messfahrzeuge eingebaut und für Messungen eingesetzt. Dabei wurde zudem darauf geachtet, dass die Messfahrzeuge über Systeme zur automatischen Fahrgastzählung verfügen, um diese Daten den erhobenen Messdaten gegenüberstellen zu können und so auch den Beladungszustand der Fahrzeuge in die Auswertung einfließen zu lassen.

Zu Anfang wurden die Messgeräte in Fahrzeuge verschiedener Kategorien (Standardbus, Gelenkbus) auf allen Betriebshöfen der HOCHBAHN installiert, um möglichst viele Linien bereits vor Abschluss des AP 3.2 vermessen zu haben. Nach Festlegung der weiter zu untersuchenden

Teilnetze im AP 3.3 wurden die Datenlogger gezielt auf diesen Linien bzw. Umläufen eingesetzt, um die erforderliche Datenlage für die weitere Untersuchung herzustellen.

Aufgrund der großen Anstrengungen zur Entwicklung und Herstellung von autonom arbeitenden Messgeräten durch die HAW konnte auf den Einsatz der Messtechnik des Fraunhofer IVI verzichtet werden.

AP 4.2 Detaillierte Betrachtung ausgewählter Linien

In AP 3.3 wurden zwei repräsentative Teilnetze ausgewählt, für welche unter Berücksichtigung der definierten Fahrzeugparameter, der festgelegten Nachladeregime, der vermessenen Linienfahrten sowie der möglichen Überliegeplätze je potentieller Ladestelle in diesem AP eine detaillierte energetische Betrachtung vorgenommen werden soll. Ziel dabei ist, die optimale Lage von Ladeinfrastruktur je Teilnetz und Szenario zu errechnen.

Die Vorteile der detaillierten Untersuchung gegenüber der Grobrasterung in AP 3 sind:

- Hinterlegung echter aufgezeichneter Geschwindigkeitsprofile der Stadt Hamburg,
- Berücksichtigung vielfältiger Verkehrssituationen und Fahrertypen,
- Erfassung realer Verspätungen und Wendezeiten,
- die Fahrzeuge können bis ins Detail konfiguriert werden,
- die Begrenzung der Lademasten je Ladestelle und eine Lademast-genaue Analyse sind möglich.

Dem gegenüber steht der erhebliche Messaufwand sowie eine sehr zeitintensive Datenaufarbeitung, Simulation und Berechnung. Ebenso traten durch die lange Messperiode von einem halben Jahr Verschiebungen bei den Fahrplanzeiten und den Fahrwegen auf.

Vorgehensweise

Die beiden ausgewählten Teilnetze wurden für die Szenarien A und B untersucht. Hierzu wurden aus den gemessenen Rohdaten der Fahrzeuge Fahrten von Linienendpunkt zu Linienendpunkt extrahiert, mit dem entsprechenden Höhenprofil unterlegt und um durchschnittliche haltstellengenaue Fahrgastzahlen der HOCHBAHN ergänzt.

Diese Eingangsdaten wurden mit dem am Fraunhofer IVI entwickelten Simulationsmodell *IVIsion* simuliert. Damit war sowohl die energetische Betrachtung von Einzelfahrten möglich, als auch die Auswertung der Verspätungslage und daraus abgeleitet die möglichen Ladezeiten am Linienendpunkt.

Die Auswertung von Einzelfahrten auf den Linien des Gelenkbusteilnetzes erlaubt noch keine Rückschlüsse auf die optimale Positionierung von Ladestellen und der Lademasten innerhalb des Hamburger Liniennetzes, da die einzelnen Linienfahrten in vielen verschiedenen Kombinationen zu Fahrzeugumläufen miteinander verbunden sind und keinem einheitlichen Schema unterliegen. Des Weiteren variieren die Wendezeiten an den Linienendpunkten je Umlauf und Verkehrszeit, sodass der gesamte Einsatztag aller Fahrzeuge innerhalb des Teilnetzes immer als Ganzes betrachtet werden muss. Hierzu wurde die von der HOCHBAHN bereitgestellte Tagesumlauf-tabelle als Ausgangsbasis für die weitere Untersuchung genutzt.

Die optimale Positionierung von Ladestellen und die Bestimmung der notwendigen Lademasten konnte rechenstechnisch ermittelt werden, indem für jede Ladestellen- und Lademastkombination die Anzahl der erfolgreichen Fahrzeugumläufe je Einsatztag errechnet wurde.

Gelenkbusteilnetz

In dem Gelenkbusteilnetz wurden alle Umläufe untersucht, die mindestens eine Linienfahrt auf einer der Linien des Teilnetzes (4, 6, 20, 25, 26 oder 109) beinhaltet; in Summe waren dies 191 Umläufe. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Untersuchung für das Szenario A. Der Linienendpunkt UAA (Überlieger Adenauerallee/Elektrobusterminal) wurde als idealer Standort für den Beginn des Ausbaus von Ladeinfrastruktur ermittelt, wobei die unmittelbar daran anliegenden Linienendpunkte ZAL (Hauptbahnhof/ZOB) und HBF (Hauptbahnhof/Steintordamm) diesem mit zugeordnet wurden. Durch Elektrifizierung dieser Ladestelle mit vier Lademasten können bereits durchschnittlich 60 Prozent aller Fahrzeugumläufe des Gelenkbusteilnetzes erfolgreich absolviert werden. Als zweite wichtige Ladestelle wurde ATH (Bahnhof Altona) mit zwei Lademasten und im weiteren Ausbau vier Lademasten ermittelt; als dritte wichtige Ladestelle wurde RAL (Bahnhof Rahlstedt) errechnet. Mit lediglich drei Ladestellen könnten somit durchschnittlich 84 Prozent aller Fahrzeugumläufe erfolgreich gefahren werden. Darüber hinausgehende Ausbaustufen führen zwar zu einem weiteren Anstieg an erfolgreichen Umläufen, müssen aber durch viele Lademasten „teuer erkaufte“ werden. Im Vollausbau von 16 Lademasten an sechs Ladestellen können durchschnittlich 98 Prozent aller Fahrzeugumläufe ohne Anpassungen an den auf Dieselbusse optimierten Umlaufplan erfolgreich befahren werden. Die verbleibenden drei Fahrzeugumläufe bewegen sich nur für sehr wenige Fahrten innerhalb der Linien des Gelenkbusteilnetzes und können damit von der gesetzten Ladeinfrastruktur nicht profitieren.

Ladestelle (Anzahl Masten)	Gesamtsumme Lademasten	Anzahl kritischer Umläufe*	Anteil erfolgreicher Umläufe [%]*
UAA (4)	4	71	60 %
ATH (2)	6	47	74 %
ATH (+2), RAL (2)	10	28	84 %
BOW (2)	12	18	90 %
BRT (2)	14	9	95 %
RPS (2)	16	3	98 %

* als Mittelwert über alle Tagesumlaufstabellen

Abbildung 4: Optimierte Aufbaureihenfolge der dezentralen Ladeinfrastruktur für das Gelenkbusteilnetz (Szenario A)

Für das Szenario B wurde nach der gleichen Methodik ebenfalls die optimale Lage von Ladestellen/-masten sowie deren Errichtungsreihenfolge ermittelt. Aufgrund des deutlich höheren spezifischen Energiebedarfs, welcher auf die elektrische Heizung des Fahrgastraums

zurückzuführen ist, wurde eine deutlich größere Anzahl an Ladestellen und Lademasten errechnet. Die Erfolgsquote liegt mit 87 Prozent selbst im Vollausbau mit 26 Lademasten unter den Werten von Szenario A.

Die Szenarien A und B wurden in den ersten Arbeitspaketen des Vorhabens mit dem Hintergrund entwickelt, dass sie den zukünftigen Fortschritt der Fahrzeugtechnologie berücksichtigen. Entsprechend war zu prüfen, ob die in der Detailuntersuchung für Szenario A ermittelten Ladestellen und die Anzahl der Lademasten im Rahmen des Szenarios B als sinnvolle Grundlage verwendet werden können. Die folgende Tabelle zeigt in der ersten Zeile die Vollausbaustufe des Szenario A mit sechs Ladestellen. Im Szenario B wurden in dieser Konfiguration im Durchschnitt 66 Prozent der Fahrzeugumläufe als erfolgreich bestimmt. Die Elektrifizierung der weiteren vier Linienendpunkte als Ladestelle bis zum Vollausbau erfolgt in den aufgeführten drei Schritten.

Ladestelle (Anzahl Masten)	Anzahl an Lademasten	Anzahl kritischer Umläufe*	Anteil erfolgreicher Umläufe [%]*
ATH (4), BOW (2), BRT (2), RAL (2), RPS (2), UAA (4)	16	61	66 %
RPS (+1), WDA (2)	19	43	76 %
SAC (2), WDA (+1)	22	33	82 %
UAL (4)	26	23	87 %

* als Mittelwert über alle Tagesumlaufstabellen

Abbildung 5: Optimierte Aufbaureihenfolge der dezentralen Ladeinfrastruktur für das Gelenkbusteilnetz (Szenario B aufbauend auf dem Vollausbau Szenario A)

Abschließend wurde für jeden Lademast sowohl die zeitliche als auch die energetische Auslastung bestimmt. Des Weiteren wurde die betriebliche Zuverlässigkeit einzelner Fahrzeugumläufe je Ladestelle- /Lademastkonstellation erfasst.

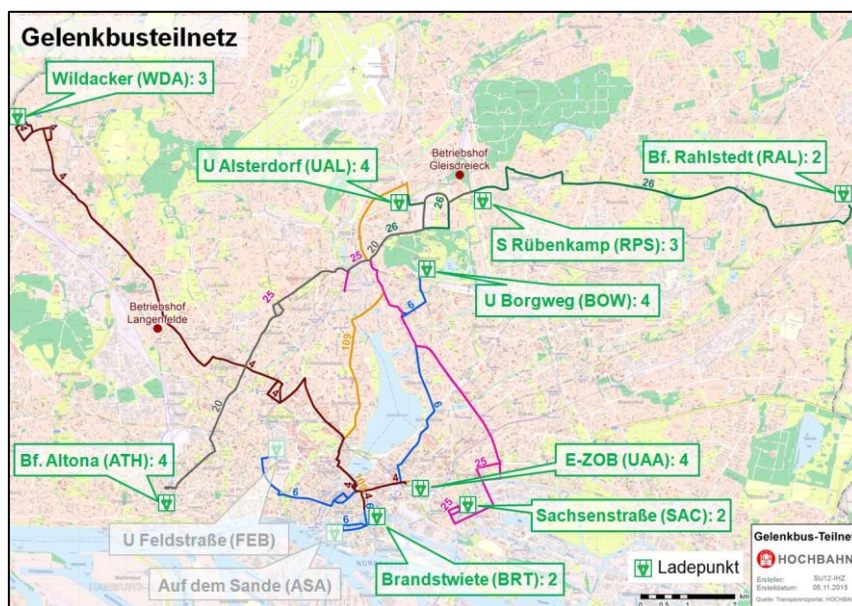


Abbildung 6: Für den elektrifizierten Betrieb des Gelenkbusteilnetzes erforderliche Ladestellen/ Lademasten in grün (Szenario B), im Rahmen der Grobrasterung ermittelte, aber nicht erforderliche Ladestellen in grau

Solobusteilnetz

In dem Solobusteilnetz wurden alle Umläufe untersucht, die mindestens eine Linienfahrt auf einer der Linien des Teilnetzes (116, 166, 167, 168, 171, 172, 173, 177 oder 277) beinhalten.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse liefert die in Abbildung 7 aufgeführten Anteile an erfolgreichen Umläufen. Viele Fahrzeugumläufe im Solobusteilnetz sind von Wechseln zu Linien geprägt, welche nicht Bestandteil des untersuchten Teilnetzes sind. Daher würde ein weiterer Ausbau der Ladeinfrastruktur lediglich zu einer geringfügigen Zunahme an erfolgreichen Umläufen führen. Würden nur die Umläufe, welche überwiegend innerhalb des Teilnetzes verlaufen, in der Betrachtung bewertet, entspräche die Erfolgsquote des Teilnetzes 96 Prozent.

Ladepunkt (Anzahl Masten)	Gesamtsumme Lademasten	Anzahl kritischer Umläufe*	Anteil erfolgreicher Umläufe [%]*
BAB (4)	4	78	58,1 %
MBR (2)	6	62	66,7 %
WKG (2)	8	47	74,7 %
BER (2)	10	35	81,2 %

* als Mittelwert über alle Tagesumlaufstabellen

Abbildung 7: Optimierte Aufbaureihenfolge der dezentralen Ladeinfrastruktur für das Solobus-Teilnetz (Szenario A)

Bei Verwendung der aus dem Szenario A ermittelten 4 Ladestellen wären im Szenario B lediglich 58,6 Prozent der Umläufe erfolgreich. Durch das Setzen von jeweils zwei Lademasten an den Linienendpunkten RAD (Bf. Rahlstedt – Doberaner Weg) und TMS (Thomas-Mann-Straße) können nahezu 70 Prozent der Umläufe erfolgreich verkehren (vgl. Abbildung 8). Auch in diesem Fall würde aufgrund der Wechsel auf außerhalb des Teilnetzes verlaufende Linien ein weiterer Anstieg der Erfolgsquote mit steigendem Lademastangebot nur mäßig ausfallen. Bei Berücksichtigung von überwiegend innerhalb des Teilnetzes verkehrenden Umläufen, ergibt sich eine Erfolgsquote von 91 Prozent.

Ladepunkt (Anzahl Masten)	Lademasten gesamt	Anzahl kritischer Umläufe*	Anteil erfolgreicher Umläufe [%]*
BAB (4), BER (2), MBR (2), WKG (2)	10	77	58,6 %
RAD (2)	12	63	66,1 %
TMS (2)	14	56	69,9 %

* als Mittelwert über alle Tagesumlaufstabellen

Abbildung 8: Optimierte Aufbaureihenfolge der dezentralen Ladeinfrastruktur für das Solobus-Teilnetz (Szenario B aufbauend auf dem Vollausbau Szenario A)

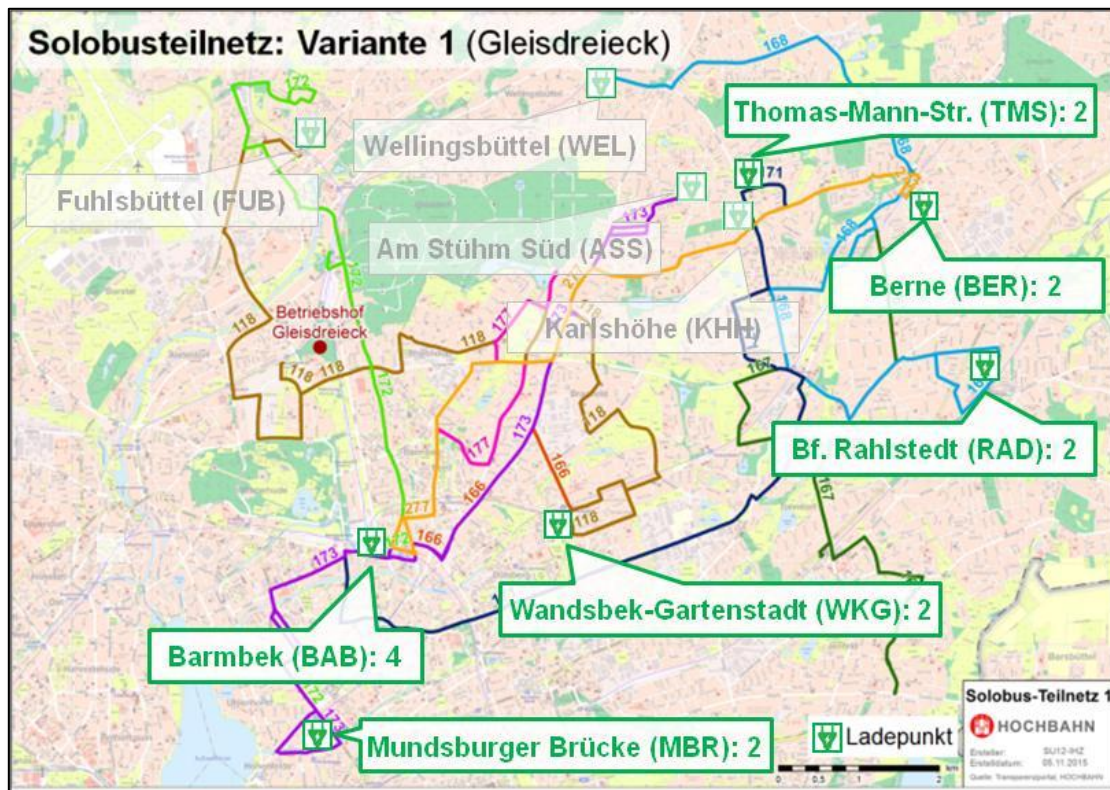


Abbildung 9: Für den elektrifizierte Betrieb des Solobus-Teilnetzes erforderliche Ladestellen/Lademasten in grün (Szenario B), im Rahmen der Grobrasterung ermittelte, aber nicht erforderliche Ladestellen in grau

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die folgende Tabelle zeigt zusammenfassend für die beiden Szenarien und Teilnetze die notwendige Anzahl an Ladestellen und -masten, die damit erreichbare Erfolgsquote der Umläufe sowie die Summe von deren Wegstrecke. Es wird deutlich, dass mit nur wenigen Ladestellen ein Großteil der hauptsächlich innerhalb des Teilnetzes verkehrenden heutigen Bestandsumläufe elektrifiziert werden kann. Somit wären 23 Prozent der Betriebsleistung des gesamten HOCHBAHN-Busnetzes mit

- 10 Ladestellen/26 Lademasten im Szenario A bzw.
- 15 Ladestellen/40 Lademasten im Szenario B umsetzbar.

Die nicht elektrifizierbaren Umläufe erfordern andere Lösungen, wie betriebliche Maßnahmen, ergänzende Ladeinfrastruktur außerhalb des Teilnetzes oder Range-Extender-Konzepte.

		Gelenkbus- teilnetz	Solobus- teilnetz
Szenario A (chem. Heizen)	Anzahl Ladepunkte / -masten	6 / 16	4 / 10
	Anteil erfolgreicher Umläufe	98 %	81 %
	Wegstrecke der erfolgreichen Umläufe	22,2 Tkm	17,5 Tkm
Szenario B (elektr. Heizen)	Anzahl Ladepunkte / -masten	9 / 26	6 / 14
	Anteil erfolgreicher Umläufe	87 %	70 %
	Wegstrecke der erfolgreichen Umläufe	19,6 Tkm	14,3 Tkm

Abbildung 10: Übersicht der notwendigen Ladeinfrastruktur und der Elektrifizierungsquote in den betrachteten Szenarien und Teilnetzen

Die während der Projektlaufzeit gewonnenen Daten bieten sich als Grundlage für weiterführende Untersuchungen an. So könnten andere Fahrzeugkonfigurationen, wie alternative Heizungs- und Klimatisierungsvarianten, andere Batteriegrößen oder -technologien, eine veränderte Umlaufgestaltung oder Umgebungseinflüsse berechnet und den bisherigen Ergebnissen gegenüber gestellt werden.

AP 4.3 Infrastrukturplanung

Im Rahmen des AP 4.2 wurden für die beiden betrachteten Teilnetze geeignete Standorte für bis zu 14 Lademasten (Solobus-Teilnetz) bzw. 26 Lademasten (Gelenkbus-Teilnetz) ermittelt. Die Aufgabe des AP 4.3 bestand darin, zu prüfen, ob die erforderliche Anzahl an Lademasten in der Nahumgebung der identifizierten Ladestellen auch realisierbar ist. Hierbei waren zwei Aspekte zu berücksichtigen:

Erforderliche Flächen für Lademast und Überliegerflächen

Ausreichende Flächen im Straßenraum für den Aufbau der Ladeinfrastruktur müssen vorhanden sein. Grundlage für die Abschätzung war die räumliche Dimension der Lademasten, wie sie bereits heute an den Endhaltestellen der Linie 109 zum Einsatz kommen.



Abbildung 11: Lademast am Elektrobusterminal Hamburg

Für die Flächenanalyse wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Unabhängiges An- und Abfahren der Lademasten durch den Bus muss sichergestellt sein.
- Geradlinige und exakte Anfahrbarkeit zur Sicherstellung einer ausreichend genauen Positionierung des Fahrzeugs unter dem Lademast muss gewährleistet sein.
- An geeigneten Bestandsflächen müssen im Seitenraum ausreichende Freiflächen für den Aufbau des Lademastes vorhanden sein.
- Alternativ müssen ausreichende Freiflächen zur Herstellung neuer, für das Nachladen geeigneter Überliegerplätze mit entsprechender Ladeinfrastruktur verfügbar sein.

Erforderliche Flächen der Infrastruktur für Anschluss an das Mittelspannungsnetz

Weiterhin muss in einer Entfernung von maximal 150 m zur Ladeinfrastruktur eine geeignete Fläche für eine Trafostation zur Verfügung stehen. Die Trafostation mit Technik für zwei Lademasten hat einen Flächenbedarf von ca. 8x4 m und beinhaltet eine 10 kV-Schaltanlage zwei Transformatoren, zwei 300 kW-Ladegeräte, sowie sämtliche Kommunikationseinrichtungen.

Ergebnis – Flächenverfügbarkeit

Die Realisierbarkeit der für den Betrieb der beiden ausgewählten Teilnetze erforderlichen Ladeinfrastruktur wurde im Rahmen des Projektes in einer begrenzten Detailtiefe geprüft. Für Aussagen mit höherer Detailgenauigkeit ist eine genaue technische Planung des jeweiligen Standorts mitsamt einer Untersuchung des Untergrundes auf Leitungen, Kabel etc. erforderlich. Dies war im Rahmen des Projektbudgets und -zeitraums aufgrund der hohen Anzahl an potenziellen Ladestellen nicht leistbar.

Hingegen erfasste die Prüfung diejenigen Standorte, die im Rahmen der untersuchten Teilnetze in den vorangegangenen AP als erforderlich ermittelt wurde. Im Rahmen einer möglichen vollständigen Elektrifizierung des Busnetzes der HOCHBAHN mittels dezentraler Ladeinfrastruktur ist davon auszugehen, dass über die im Rahmen des Projekts ermittelte Anzahl an Lademasten weitere Ladeinfrastruktur – auch an den hier untersuchten Standorten – erforderlich wäre. Eine Prüfung der Realisierbarkeit weiterer Ladeinfrastruktur für die Voll-Elektrifizierung ist nicht erfolgt.

Grundsätzlich lässt sich im Ergebnis festhalten, dass an allen im AP 4.2 ermittelten Standorten die Flächen für die erforderlichen Lademasten sowie die Anforderungen an die Überliegerplätze der Busse bereitgestellt werden können. Einschränkend muss aber betont werden, dass für eine relevante Anzahl an Ladestellen ein Umbau des vorhandenen Straßenraums erforderlich würde. Die Schaffung der erforderlichen Flächen für die Ladeinfrastruktur würden in einigen Fällen andere, heutige Nutzungen (Parkplätze, Fahrbahn) ausschließen. Aus diesem Umstand können bei einer konkreten Planung Interessenskonflikte und damit verbundener Widerstand hervorgehen, die gegebenenfalls die Realisierung der erforderlichen Ladeinfrastruktur erschwert oder sogar ausschließt. Dies lässt sich aber erst im Rahmen einer konkreten Planung und der damit verbundenen Einbindung von Trägern öffentlicher Belange zweifelsfrei klären.

Abseits der technischen Umsetzbarkeit muss an dieser Stelle auch berücksichtigt werden, dass die Installation von dezentraler Ladeinfrastruktur auch eine städtebauliche Komponente hat. So muss damit gerechnet werden, dass die Realisierung dezentraler Ladeinfrastruktur als Flächenlösung für einen elektrifizierten Busverkehr durch Anwohner und andere direkt Betroffene auf Ablehnung stößt und dann auch eine politische Dimension bekommen kann. Dieses Risiko zu bewerten gestaltet sich allerdings als schwierig.

Ergebnis – Elektrischer Anschluss Ladeinfrastruktur

Die generelle technische Machbarkeit für die Strecke wurde anhand der Randparameter „verfügbare Technik“ und „verfügbare elektrische Energie“ an den aus AP 4.2 hervorgegangenen Standorten durch den Stromnetzbetreiber positiv bewertet. Alle ermittelten Standorte sind technisch umsetzbar und könnten aus dem Mittelspannungsnetz der Stromnetz Hamburg GmbH versorgt werden.

AP 4.4 Festlegung Verkehrskonzept und Fahrpläne

Die Bewertung der beiden betrachteten Teilnetze erfolgte auf Grundlage bestehender realer Umläufe aus dem Betrieb, die auch Grundlage der im AP 4.2 vorgestellten Ergebnisse waren. Die für die Teilnetzbildung relevanten Buslinien bilden allerdings nur einen Ausschnitt der Gesamtleistung eines Betriebshofes ab. Daher erbringen viele Umläufe nur einen Teil ihrer km-Leistung innerhalb des in diesem Projekt betrachteten Teilnetzes. Grund hierfür ist der sehr hohe Vernetzungsgrad der HOCHBAHN-Buslinien bei der Umlaufbildung. So liegt bei einem relevanten Anteil der betrachteten Umläufe ein signifikanter Weganteil außerhalb des gewählten Teilnetzes. Dieser kann im Rahmen der Simulation in AP 4.2 nicht ausreichend durch dezentrale Infrastruktur versorgt werden, da diese nur innerhalb des Teilnetzes unterstellt wurde. Dadurch fallen die Ergebnisse für das Teilnetz in der Regel „künstlich“ schlechter aus. Die prozentuale Verteilung der Wegstrecke der Umläufe innerhalb und außerhalb des Linienteilnetzes ist beispielhaft für das Solobus-Teilnetz in der folgenden Abbildung dargestellt.

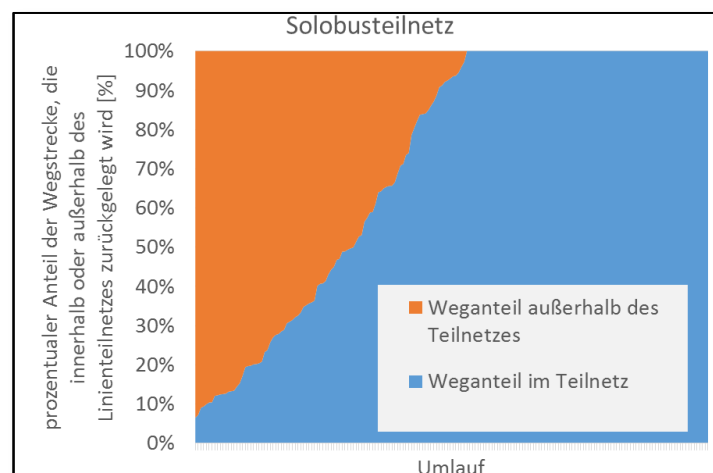


Abbildung 12: Weganteil außerhalb und innerhalb des Teilnetzes

Unter Berücksichtigung der Umläufe, die überwiegend innerhalb des Teilnetzes verlaufen (> 50 % der blau markierten Umläufe), könnten mehr als 90 Prozent der Umläufe im betrachteten Teilnetz elektrifiziert werden.

Eine Veränderung in Form von Kürzung oder Umgestaltung der Linien aufgrund der Simulationsergebnisse ist vor diesem Hintergrund nicht notwendig. Lediglich für einzelne Umläufe (weniger als 10 Prozent) sind geringfügige betriebliche Anpassungen erforderlich.

AP 5 Betriebliche Bewertung

AP 5.1 Umsetzbarkeit

Politischer Auftrag der HOCHBAHN ist es, ab dem Jahr 2020 nur noch emissionsfrei angetriebene Busse zu beschaffen. Vor diesem Hintergrund werden gegenwärtig die verschiedenen Möglichkeiten zur Realisierung eines vollelektrischen Bussystems in Hamburg durch die HOCHBAHN ermittelt und gegeneinander abgewogen. In diesem Zusammenhang spielen die Erkenntnisse aus dem Projekt BEEDeL zum Konzept der dezentralen Ladeinfrastruktur eine wesentliche Rolle.

Für eine endgültige Entscheidung, in welcher Form der Hamburger Busverkehr erfolgen soll (dezentrales Laden, Nachladen ausschließlich auf dem Betriebshof, Einsatz von Brennstoffzellen-Fahrzeugen etc.) muss auf Basis wirtschaftlicher, betrieblicher und politischer Kriterien bewertet werden. Es wurde daher durch den Steuerkreis beschlossen, eine Befassung von Politik und Behörden zu dieser Fragestellung erst im Nachgang des Projektes durchzuführen, wenn auch die Alternativen ausreichend untersucht wurden und eine technische Vorzugsvariante für die Elektrifizierung des Busverkehrs vorliegt.

AP 5.2 Gestaltungsbedarf

In diesem Arbeitspaket wird aufgezeigt, in welchen Bereichen Anpassungen und Aufwand im Zuge einer Elektrifizierung des Busverkehrs erforderlich werden. Zu dieser Betrachtung zählen im Wesentlichen

- die Ermittlung der in den Teilnetzen zu betreibenden Flottengröße,
- der Aufwand für die Umrüstung von Betriebshöfen,
- die Ausbildung von Fahr- und Werkstattpersonal sowie
- die Betrachtung der betrieblichen Stabilität bei Ausfall von Ladestellen und möglicher betrieblicher Konsequenzen.

Die oben genannten Punkte wurden aufbauend auf den Ergebnissen des AP 4.2 nur für die beiden untersuchten Teilnetze sowie die beiden davon betroffenen Betriebshöfe Gleisdreieck und Langenfelde beleuchtet. Verallgemeinerungen auf das gesamte Busnetz der HOCHBAHN sind nicht ohne Weiteres zulässig.

Ermittlung der Flottengröße für den Betrieb der betrachteten Teilnetze

Die Ermittlung der Flottengröße erfolgte auf Grundlage der Detailuntersuchung beider Teilnetze. Die Fahrzeugbedarfsrechnung erfolgt für die Höfe Langenfelde (Gelenkbusse) und Gleisdreieck (Solobusse und Gelenkbusse). Hierbei umfasst der zum heutigen Zeitpunkt noch nicht fertiggestellte Hof Gleisdreieck die relevante Leistung der Höfe Mesterkamp und Wandsbek. Im Gelenkbus-Teilnetz wird zusätzlich noch die heute durch den Betriebshof Billbrookdeich (Jasper) gefahrene Leistung zum Betriebshof Gleisdreieck verschoben.

Die öffentlichen Verkehrsbetriebe in Hamburg haben von Seiten der Stadtverwaltung inzwischen die Freigabe erhalten, in den ersten Jahren der Elektrobus-Beschaffung ab 2020 Fahrzeuge mit fossiler Heizung beschaffen zu dürfen. Vor diesem Hintergrund wird für die Ermittlung der für eine Umstellung auf Elektrobus-Betrieb erforderlichen Flottengröße daher das Szenario A (fossiles Heizen) betrachtet. Aufgrund des geringeren elektrischen Energieverbrauchs können in diesem Szenario mehr Umläufe elektrifiziert werden, was zu einer im Vergleich zum Szenario B (elektrisches Heizen) größeren einzusetzenden Flotte führt. Grundsätzlich ist bei dieser Bewertung jedoch zu beachten, dass alle gewählten Lösungen so auszulegen sind, dass sie auch den mittelfristig wachsenden Energiebedarf bei elektrischem Heizen abdecken können.

Der HOCHBAHN-Busbetrieb hat einen zwischen den beiden Fahrzeugspitzen in der Früh- und Spät-Hauptverkehrszeit (HVZ) ausgeglichenen Wagenbedarf, ein Bus muss also in beiden Spitzen eingesetzt werden. Dadurch müssen Umläufe, die sich nicht von vornherein über beide Spitzen erstrecken, sondern nur eine der beiden Hauptverkehrszeiten abdecken, zu Tagesprogrammen verknüpft werden. Hierzu erfolgte eine manuelle Verknüpfung der Früh- und Spätumläufe zu Tagesprogrammen nach dem „First In - First Out“-Prinzip. Dabei wird dem ersten Bus, der von seinem Frühumlauf zurückkehrt, auch der frühestbeginnende Spätumlauf zugewiesen, dem zweiten Rückkehrer der zweite Spätumlauf usw.

In den Abbildungen 13 und 14 sind die relevanten Umläufe, unterteilt nach den Fahrzeugspitzen, dargestellt. Das Potential an Umläufen, die elektrisch zu betreiben sind, fällt in der Früh-Spitze größer aus als nachmittags. Diese Tendenz für den Fahrzeugbedarf ist in beiden Teilnetzen ähnlich. Um weiterhin einen ausgeglichenen Fahrzeugbedarf morgens und nachmittags sicherzustellen, müssen daher einige für den Batteriebusseinsatz taugliche Früh-Umläufe weiterhin mit Dieselnissen betrieben werden.

Weiterhin gibt es Nachtumläufe, die vollständig außerhalb der Fahrzeugspitzen liegen und daher nicht relevant für den Fahrzeugbedarf sind.

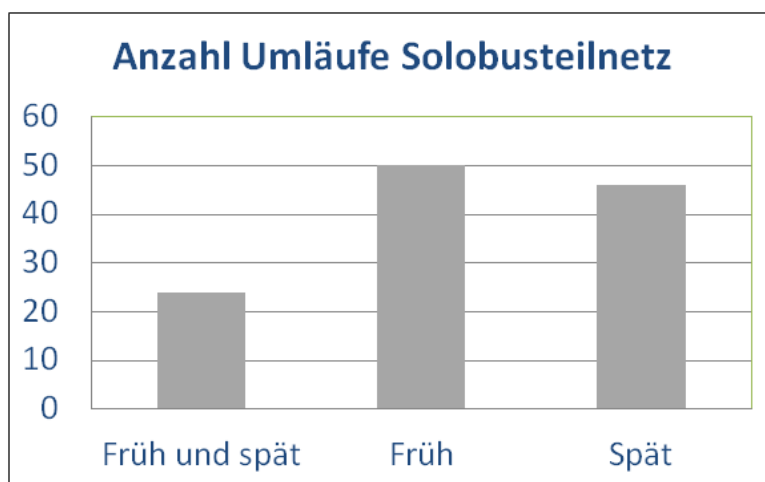


Abbildung 13: Fahrzeugbedarf für den Betriebshof Gleisdreieck unterteilt nach Tageszeit

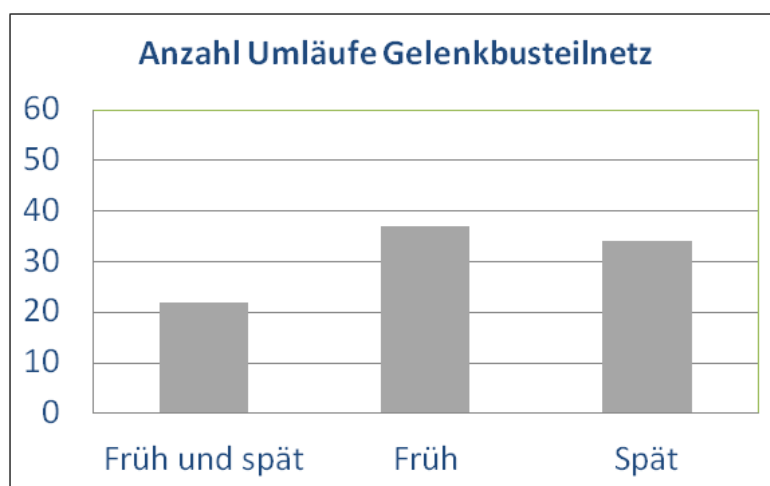


Abbildung 14: Fahrzeugbedarf für den Betriebshof Gleisdreieck unterteilt nach Tageszeit

Energetische Überprüfung der Umlaufverknüpfungen

Durch die erforderlichen Umlaufverknüpfungen müssen viele Fahrzeuge zwei Umläufe pro Tag bewältigen. In der Simulation in AP 4.2 wurde als Grundannahme unterstellt, dass Fahrzeuge den Betriebshof immer mit einer vollgeladenen Batterie verlassen. Im Rahmen der Verknüpfung muss daher sichergestellt werden, dass die Batterie auch zu Beginn des zweiten Umlaufs vollgeladen oder zumindest soweit geladen ist, dass der zweite Umlauf sicher geleistet werden kann.

Bei der Erstellung der Tagesprogramme wurde die Aufenthaltsdauer der Fahrzeuge auf dem Betriebshof zwischen Morgen- und Nachmittagsumlauf bestimmt. Gleichzeitig konnte anhand des Energieverbrauchs des Früh-Umlaufs die benötigte Zeit für eine Vollauffüllung der Batterie im Anschluss an den Früh-Umlauf ermittelt werden. Dabei wurde die Vereinfachung getroffen, dass

das Fahrzeug gleich nach dem Eintreffen auf dem Betriebshof mit einer konstanten Leistung in Höhe von 120 Kilowatt geladen wird.

Die Umläufe, deren Aufenthalte auf dem Betriebshof kleiner sind als die eigentlich für das Vollladen der Batterie notwendige Zeit, wurden als kritisch bezeichnet. Die Ergebnisse der Ladevorgänge sind in Abbildung 15 dargestellt. Für den Betriebshof Gleisdreieck ergeben sich insgesamt 88 Ladevorgänge, von denen nur sieben kritisch sind. Dies entspricht etwa acht Prozent der Ladevorgänge. Auf dem Betriebshof Langenfelde ist von elf Ladevorgängen nur ein einziger kritisch.

Teilnetz	Solobus Gleisdreieck	Gelenkbus Gleisdreieck	Gelenkbus Langenfelde
Ladevorgänge	50	38	11
Davon kritisch	0	7	1

Abbildung 15: Anzahl der Ladevorgänge auf dem Betriebshof Gleisdreieck und Langenfelde

Für die kritischen Umläufe wurde mit dem Simulationsmodell des Fraunhofer IVI überprüft, ob das Fahrzeug den Umlauf in der zweiten Fahrzeugspitze auch mit einer nur teilweise geladenen Batterie vollständig leisten kann. Als Ergebnis im Rahmen des Szenarios A folgt, dass nur ein Umlauf aufgrund der zu niedrigen Batterieladung nicht bewältigt werden kann.

Die Fahrzeugzahlen, die maximal in den Teilnetzen eingesetzt werden können und die Anzahl der Fahrzeuge, die beide Bedarfsspitzen abdecken, sind in Abbildung 16 dargestellt. Die Anzahl der Fahrzeuge, die in der Morgen- und Abendfahrzeugspitze eingesetzt werden können, ist um etwa 5 bis 35 Prozent geringer als die mögliche Maximalanzahl an Fahrzeugen auf dem jeweiligen Hof.

Teilnetz	Solobus Gleisdreieck	Gelenkbus Gleisdreieck	Gelenkbus Langenfelde
Fahrzeuge maximal	74	72	31
Fahrzeuge in beiden Spitzen	70	68	20

Abbildung 16: Maximale Fahrzeuganzahl und eingesetzte Anzahl der Fahrzeuge in beiden Fahrzeugspitzen

Auf den Höfen Gleisdreieck und Langenfelde kann die Fahrzeugflotte weitgehend mit der ermittelten dezentralen Ladeinfrastruktur betrieben werden. Die Ergebnisse der beiden Teilnetze sind in Abbildung 17 zusammengefasst und dem HOCHBAHN-Gesamtnetz

gegenübergestellt. Kriterien sind Anzahl der Umläufe, Anzahl der Fahrzeuge in den beiden Fahrzeugspitzen, zurückgelegte Entfernung pro Werktag sowie die Betriebsdauer pro Werktag .

Teilnetz	Gelenkbus-Teilnetz	Solobus-Teilnetz	HOCHBAHN gesamt
Anzahl Umläufe	161	134	1.129
Fahrzeuge Gleisdreieck	68	70	-
Fahrzeuge Langenfelde	20	-	-
Entfernung/Werktag (km)	16.778	13.874	135.944
Dauer/Werktag (h)	1.061	766	9.531

Abbildung 17: Gegenüberstellung der Kennzahlen der betrachteten Teilnetze im Vergleich zum HOCHBAHN Gesamtnetz.

Mit dem im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten Fahrzeugeinsatz- und Ladekonzept kann ohne weitere Eingriffe in die Leistungsplanung ca. 23 Prozent der Gesamtfahrleistung der HOCHBAHN elektrisch betrieben werden.

Aufwand Umrüstung Betriebshöfe

Um die **Busbetriebshöfe** mit der nötigen Ladeinfrastruktur auszurüsten, werden ein passender Netzanschluss, eine entsprechende Energieverteilung, sowie Technikzentralen in ausreichender Stückzahl benötigt.

- Der **Netzanschluss** beschreibt dabei die Versorgung des Betriebshofes mit elektrischer Energie aus dem Hoch- oder Mittelspannungsnetz des Versorgungsnetzbetreibers (Stromnetz Hamburg GmbH).
- Die **Energieverteilung** beschreibt die Mittelspannungs-Schaltanlage zur Verteilung der elektrischen Energie auf die Technikzentralen.
- Die **Technikzentralen** beschreiben eine Fläche, welche Transformatoren, Mittel- und Niederspannungsschaltanlagen, sowie Ladegeräte beinhaltet.

Die generelle technische Machbarkeit für die Betriebshöfe Gleisdreieck und Langenfelde wurde in den Randparametern „verfügbare Technik“ und „verfügbare elektrische Energie“ am jeweiligen Standort positiv bewertet. Beide Standorte sind technisch umsetzbar und können aus dem Netz der Stromnetz Hamburg GmbH versorgt werden. Eine finanzielle Bewertung des Aufwands für die gegebenenfalls erforderliche Erweiterung der Stromversorgung beider Betriebshöfe ist im Rahmen dieses Projektes nicht erfolgt. Dieses gilt auch für eine alleinige Versorgung beispielsweise in der Nacht, wenn künftig größere Batterien verfügbar sind.

Für die ermittelten elektrisch zu betreibenden Fahrzeugflotten werden auf dem Betriebshof Gleisdreieck 138 Stellplätze und in Langenfelde 20 Stellplätze mit Ladeinfrastruktur benötigt. Dies hat zur Folge, dass im Gleisdreieck drei Technikzentralen und in Langenfelde eine Technikzentrale a' 15,5 x 28 m, sowie die Erweiterungen der Stromversorgung errichtet werden müssen.

Aufwand Ausrüstung Strecke

Um die **Strecke** mit der nötigen Ladeinfrastruktur auszurüsten, werden jeweils ein Netzanschluss, eine entsprechende Trafostation, sowie Lademasten in ausreichender Stückzahl benötigt.

- Der **Netzanschluss** beschreibt dabei die Versorgung der Trafostation und Lademasten auf der Strecke mit elektrischer Energie aus dem Mittelspannungsnetz des Versorgungsnetzbetreibers (Stromnetz Hamburg GmbH).
- Die **Trafostation** beschreibt die Mittelspannungsschaltanlage zur Verteilung der elektrischen Energie auf die Ladegeräte, sowie die nötigen Transformatoren.
- Die **Lademaste** beschreiben die Kontaktierung der Busse zur Energieübertragung.

Ausbildung Werkstattpersonal

Aus der Anzahl der elektrifizierbaren Umläufe ergeben sich pro Betriebshof die bereits dargestellten Fahrzeugbedarfe. Diese Bedarfe sind so hoch, dass, unter Berücksichtigung der üblichen Werkstattprozesse und insbesondere der Personalplanung, alle Mitarbeiter der jeweiligen Betriebshofwerkstatt zur Instandhaltung eines Elektrofahrzeuges in der Lage sein müssen. Aus dieser Anforderung ergibt sich ein Schulungsbedarf für ca. 60 Mitarbeiter.

Das bei der FFG verfolgte Schulungskonzept sieht vor, dass zumindest die fahrzeugspezifische Schulung der Mitarbeiter durch die Fahrzeughersteller erfolgt. Der allgemeine Schulungsteil, welcher die Teilnehmer berechtigt, an Fahrzeugen zu arbeiten, die mit einer Hochvolt-Anlage ausgestattet sind, kann durch die Fahrzeughersteller oder unabhängige Schulungsorganisationen erfolgen.

Ausbildung Fahrpersonal

In der Praxis bei der HOCHBAHN hat es sich bewährt, dass auf dem Betriebshof zwei bis drei feste Betreuer als Ansprechpartner für das Fahrpersonal zur Verfügung stehen. Sie sind Trainer und erste Ansprechpartner hinsichtlich aller technischen Fragen. Über diese Schnittstelle können die Erfahrungen und Fragen aus dem operativen Busbetrieb Richtung Werkstätten, Leistungsplanung, Hersteller etc. koordiniert und kanalisiert werden. Gleichfalls kann das Fahrpersonal bei kurzfristigen Neuerungen an der Technik gezielt durch die Trainer angesprochen und informiert werden.

Die Trainer sind an mehreren Tagen u.a. in den Werkstätten der FFG, an den Fahrzeugen und den Ladestationen durch externe Mitarbeiter (u.a. durch den Hersteller) auszubilden. Neben der Hochvolt-Sensibilisierung erfolgen schwerpunktmäßig Einweisungen in das Lademanagement, ein Überblick über den Fahrerarbeitsplatz und Handlungsanweisungen zu Störmeldungen, insbesondere möglichen Gelb- und Rotmeldungen.

Die Fahrerinnen und Fahrer werden innerhalb von acht Stunden sowohl über theoretische (Technologie, Projektinhalt, Kommunikation mit den Fahrgästen) als auch praktische Inhalte (Fahrverhalten, Sicherheitsaspekte) informiert. Schwerpunktmäßig erfolgt eine Einweisung in das Fahrzeug und die Technik der Ladestation. Zum praktischen Teil der Schulung gehört u. a. das genaue Positionieren des Busses unter dem Lademast.

Im Rahmen eines größeren Teilnetzes ist es sinnvoll, alle Fahrdienstmitarbeiter eines Betriebshofes mit der neuen Technik vertraut zu machen. Dies ermöglicht in der Dienstplanung einen flexiblen Einsatz der Mitarbeiter.

Ebenfalls ist zu beachten, dass bei einer Betriebshofgröße von ca. 350 Mitarbeitern, allein aufgrund der Fluktuation, eine Ausbildung von rund 30 bis 40 neuen Mitarbeitern pro Jahr erfolgen muss. Gründe für die Fluktuationsrate der Mitarbeiter sind Renteneintritt, Arbeitgeberwechsel, Versetzung auf andere Betriebshöfe etc.).

Neben der Neuausbildung von Mitarbeitern ist eine situativ betriebsbegleitende Weiterbildung aller bereits ausgebildeten Busfahrerinnen und Busfahrer durch die Trainer notwendig, da erfahrungsgemäß die Technik der Ladestation und der Busse durch die Hersteller weiterentwickelt werden.

Neben dem Fahrpersonal ist das Personal der Betriebslenkung zu schulen. Die Betriebsaufseher müssen typische Störungen an den Lademasten und Fahrzeugen erkennen und beheben können. Die Disponenten der Busleitstelle werden zu Eingriffsmöglichkeiten bei Störungen an Fahrzeugen und Infrastruktur sowie den Prozessschritten bei nicht mehr ausreichender Batteriekapazität unterwiesen.

Betriebliche Stabilität

Um die betriebliche Stabilität der dezentralen Ladeinfrastruktur zu überprüfen, wurde durch das Fraunhofer IVI ein längerfristiger Ausfall von Ladestellen simuliert.

Für den möglichen Ausfall einer Ladestelle kommen sowohl technische als auch betriebliche Ursachen in Frage. Während punktuell auftretende Ladeprobleme, wie Verspätungen einzelner Fahrten bereits berücksichtigt wurden, werden Ausfälle wie Nichterreichbarkeit der Ladestellen durch Umleitungen, kurzfristiger Baumaßnahmen, Polizei- und/oder Feuerwehreinsätze in diesem Kapitel näher untersucht.

Es wurde beispielhaft das Gelenkbusteilnetz betrachtet und ein zweistufiger Ausfall abgebildet. Zuerst wurde der Ausfall der gesamten Ladestelle am Bahnhof Altona (alle vier Lademasten)

simuliert. Im zweiten Schritt wurde zusätzlich zur Ladestelle Bahnhof Altona auch der Ausfall der Ladestelle an der Haltestelle S Rübenkamp (beide Lademasten) in Betracht gezogen. Der Ausfall wurde werktags für den Zeitraum zwischen 9 und 14 Uhr simuliert. Dieser Zeitabschnitt ist insofern betrieblich sensibel, da im Anschluss an die morgendliche Hauptverkehrszeit, die weitgehend ohne nennenswerte Unterbrechungen durchgeführt wird, dem Fahrpersonal Pausen gewährt werden, die dann auch zum Laden genutzt werden können.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Ladestellen des Gelenkbus-Teilnetzes durchaus redundant im Netz verteilt sind. Der Ausfall der Ladestelle am Bahnhof Altona führt dazu, dass nur fünf Umläufe kritisch werden. Hier wäre dann operativ eine manuelle Disposition erforderlich. Dies könnte zum Beispiel einen Wagentausch, ein Ausweichen auf andere Ladestellen oder einen Bereitschaftswagen-Einsatz bedeuten. Ein Ausfall der beiden Ladestellen an Bf. Altona und S Rübenkamp gleichzeitig führt zu 15 kritischen Umläufen, die dann manuell disponiert werden müssen. Immerhin würden in diesem Szenario für einen Zeitraum von fünf Stunden beide Endpunkte der im Gelenkbusnetz berücksichtigten MetroBus-Linie 20 gleichzeitig von einem Ausfall betroffen sein.

AP 5.3 Zeitliche Abläufe

Für die Inbetriebnahme eines Bus-Teilnetzes mit elektrisch betriebenen Bussen und dezentraler Ladeinfrastruktur sind folgende Systemelemente anzupassen:

Bauliche Umrüstung von Linienendpunkten für die Herstellung dezentraler Ladeinfrastruktur

Insbesondere zur Herstellung ausreichender Flächen für eine ausreichend gute Anfahrbarkeit der Haltestelle als auch zur Bereitstellung der erforderlichen Flächen für die Ladeinfrastruktur müssen einige Endhaltestellen baulich umgestaltet werden. Für Planung, Genehmigung und Bau einer Haltestelle sind je nach Aufwand ca. 1 - 1,5 Jahre Zeitaufwand einzuplanen. Grundsätzlich können mehrere Endhaltestellen parallel bearbeitet werden, so dass der erforderliche zeitliche Vorlauf in erster Näherung unabhängig von der Größe des in einem Bauabschnitt herzustellenden Teilnetzes ist. Allerdings gibt es natürlich Grenzen bei der vorhandenen Personalkapazität aller beteiligten Institutionen.

Planung, Genehmigung und Bau der dezentralen Ladeinfrastruktur

Für die Errichtung der nötigen Infrastruktur auf der Strecke wird je Standort ca. ein Jahr als Realisierungszeitraum angenommen. Die verschiedenen Standorte können parallel errichtet werden. Für Planung und Genehmigung können sich Synergien ergeben.

Sofern neben der reinen Installation der Ladeinfrastruktur auch die Haltestelle selbst umgebaut werden muss, können Teile von Planung und Umsetzung der beiden Gewerke parallel organisiert werden.

Umrüstung eines Betriebshofs

Für die Versorgung von Elektrobussen muss jeder involvierte Betriebshof entsprechend umgerüstet werden. Neben einem ausreichend leistungsstarken Anschluss an das Stromnetz der

Stadt für die Bereitstellung der erforderlichen Leistung zum parallelen Nachladen der Fahrzeuge über Nacht müssen die Abstellplätze der Busse mit Ladeinfrastruktur ausgerüstet werden. Hierfür sind neben der eigentlichen Ladetechnik auch die baulichen Rahmenbedingungen (Carports) bereitzustellen, um die Fahrzeuge auf den Abstellsträngen versorgen zu können. Für die Errichtung der nötigen Infrastruktur auf den Betriebshöfen werden je Standort ca. zwei Jahre als Realisierungszeitraum angenommen. Die verschiedenen Standorte können parallel errichtet werden. Für Planung und Genehmigung können sich Synergien ergeben.

Fahrzeugbeschaffung

Für die Beschaffung der Elektrobusse ist insgesamt ein zeitlicher Vorlauf von ca. 1,5 Jahren bis zum Betriebseinsatz einzuplanen. In diesem Zeitraum erfolgen die Ausschreibung, die Produktion seitens des Herstellers, die Lieferung und der Inbetriebnahmeprozess.

Parallelität der Prozesse

Die Herstellung der genannten einzelnen Systemelemente kann grundsätzlich parallel erfolgen, so dass die genannten erforderlichen Zeitbedarfe nicht aufaddiert werden müssen.

Im Rahmen des AP 4.2 wurden bereits geeignete Ausbaustufen für die beiden betrachteten Teilnetze ausgewiesen. Aufgrund der Dezentralität des Systems können viele Systemkomponenten in variabel zu gestaltenden Ausbausritten realisiert werden. Je nach den politischen Vorgaben für die Elektrifizierung des Gesamtnetzes können diese Ausbaustufen wie vorgeschlagen umgesetzt werden oder auch mehrere Ausbaustufen gleichzeitig in Angriff genommen und somit das Umsetzungstempo erhöht werden.

Davon ausgenommen sind die Betriebshöfe, die voraussichtlich jeweils vollständig umgerüstet werden würden. Vor diesem Hintergrund sollte angestrebt werden, die ersten Ausbaustufen des Liniennetzes möglichst so auszuwählen, dass diese vom gleichen Betriebshof versorgt werden können.

Aufgrund der hohen betrieblichen Flexibilität der Dieselflote und der Größe der Dieselflotte gerade zu Beginn der Umstellung sind bei der schrittweisen Umstellung von Umläufen auf den elektrischen Betrieb keine größeren Einschränkungen zu berücksichtigen.

AP 5.4 Wirtschaftliche Gesamtbewertung

Die Ermittlung der wirtschaftlichen Auswirkungen einer Umstellung des konventionellen Dieselbus-Betriebs auf einen Elektrobus-Betrieb mit dezentraler Ladeinfrastruktur erfolgte im Rahmen dieses AP bezogen auf die beiden zuvor untersuchten Teilnetze. Damit verbunden ist auch die Begrenzung der Betrachtung auf die beiden im Rahmen der Teilnetze betrachteten Betriebshöfe Gleisdreieck und Langenfelde.

5.4.1 Investitionen Infrastruktur

(...)

5.4.2 Investitionen Fahrzeuge

Wie bereits in AP 5.2 dargestellt, würde der Betrieb der beiden betrachteten Teilnetze im Szenario A eine Flotte von 70 Solobussen (12 m) und 88 Gelenkbussen (18 m) erforderlich machen.

Betriebskosten Fahrzeuge

Eine Veränderung der jährlichen Betriebskosten ergibt sich bei Aufrechterhaltung der heutigen Umläufe ausschließlich aus den veränderten Instandhaltungssätzen von Elektrobussen sowie dem Verzicht auf Diesel als Energieträger. Elektrischer Strom als Energieträger ist deutlich günstiger als Diesel. Durch die weitgehende Beibehaltung der Bestandsumläufe sind die betrieblichen Produktivitätsverluste durch die neue Technologie vernachlässigbar.

Betriebskosten Infrastruktur

Mit der Neueinführung eines Elektrobus-Systems mit dezentraler Ladeinfrastruktur muss ein erheblicher Kostenaufwand für die Bereitstellung der Infrastruktur sowie der Fahrzeuge in Kauf genommen werden. Auch wenn diese Kosten zum heutigen Zeitpunkt noch nicht benannt werden können, ist zudem davon auszugehen, dass auch für die Instandhaltung der Infrastruktur laufende Kosten eingeplant werden müssen.

Schulungsaufwand Werkstatt und Fahrpersonal

Wie in den entsprechenden Abschnitten zu AP 5.2 bereits dargestellt, wird auf den jeweiligen Höfen aufgrund der Flottengröße das gesamte Personal entsprechend geschult werden müssen.

AP 5.5 Übertragbarkeit

Für Regionen, deren Struktur mit der Hamburgs vergleichbar ist, haben sich folgende Erkenntnisse im Projektverlauf herauskristallisiert:

- Ein hoher Linien-Vernetzungsgrad bei der Umlaufbildung, wie er in Hamburg sehr ausgeprägt ist, ist kein Hinderungsgrund für das hier untersuchte System mit dezentraler Ladeinfrastruktur. Der Umstand, dass Fahrzeuge während ihrer Umläufe immer wieder die Linien wechseln, hat sich bei der Untersuchung der betrieblichen Stabilität des Systems im AP 5.2 durchaus als Vorteil herausgestellt, da die Fixierung einzelner Umläufe auf einen speziellen Ladestelle deutlich reduziert ist.
- Für eine aussagekräftige Analyse in einem ähnlich zu Hamburg aufgebauten Umlaufgefüge ist die Fixierung auf einzelne Linien nicht ausreichend. Stattdessen muss als Untersuchungsgegenstand in jedem Fall ein Bündel an Linien bzw. Umläufen betrachtet werden, um belastbare Aussagen hinsichtlich der erforderlichen Ladeinfrastruktur sowie der Robustheit des Systems ermitteln zu können.
- Bei der Betrachtung von Busnetzen der gleichen Größenordnung ist die Voruntersuchung durch eine Grobrasterung unverzichtbar. Die im Rahmen der

Simulation anfallenden Datenmengen und der Berechnungsaufwand sind so erheblich, dass dies nicht für ein gesamtes Busnetz dieser Größe mit einem vertretbaren Zeitaufwand geleistet werden kann.

- Detailergebnisse sind in jedem Falle stadtspezifisch und daher auch nicht auf ähnliche Regionen übertragbar. Hierbei spielt die Umlaufgestaltung bei der HOCHBAHN eine besondere Rolle. Diese ist geprägt von vergleichsweise vielen Umläufen mit einer Länge zwischen 100 und 200 km. In Busnetzen vergleichbarer Größe ist dies eher selten zu finden.

Als allgemeingültige Erkenntnisse lassen sich folgende Punkte festhalten:

- Gerade zum jetzigen Zeitpunkt entwickeln sich im Bereich der Batteriebusse einige Technologien sehr zügig weiter (z.B. Batterietechnik, Heiztechnik). Vor diesem Hintergrund ist es sehr schwer, zu Beginn eines Projektes die Fahrzeugkenndaten (Batteriekapazität, Energieverbrauch etc.) qualifiziert abzuschätzen. Vor diesem Hintergrund ist eine Szenarienbetrachtung mit variierenden Eingangsgrößen durchaus empfehlenswert. In diesem Zuge lassen sich bei Bedarf auch unterschiedliche Zeithorizonte betrachten.
- Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Messungen von Fahrprofilen über einen Zeitraum von mehreren Monaten war für die Auswertung von unterschiedlichen Eingangsgrößen wie z.B. Einfluss des Fahrers, verschiedene Verkehrssituationen und Bauphasen auf dem Linienweg sehr von Vorteil. Durch die langfristige Realdatenerfassung konnten viele unterschiedliche Betriebssituationen erfasst werden, die dementsprechend auch Eingang in die im Anschluss durchgeführte Simulation gefunden haben. Dies sorgt für deutlich realistischere Ergebnisse.

AP 6 Kosteneffiziente Messtechnik

AP 6.1 Analyse der vorhandenen Messtechnik

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde ein Lastenheft für die zu installierende Messtechnik entwickelt, das auf der am Fraunhofer IVI existierenden Messtechnik basierte. Neben technischen Anforderungen an das Datenaufnahmegerät, wurde auch der Datenaustausch spezifisch festgelegt und vorab umfangreich getestet. Durch dieses Vorgehen wurde im Zuge des Projektes sichergestellt, dass ein reibungsloser Austausch der ermittelten Messdaten erfolgen konnte. Das Lastenheft bildete die Basis für die folgenden Arbeitspakete.

AP 6.2 Konzeption einer maßgeschneiderten, kosteneffizienten Messtechnik

Auf Basis des Lastenheftes wurde ein Messsystem konzipiert und das Gesamtsystem festgelegt. Die Realisierung des Systems erfolgte im AP6.3.

Abbildung 18 zeigt das Blockdiagramm des Messsystems („Datenlogger“) und Abbildung 19 das Gesamtsystem mit 12 Datenloggern.

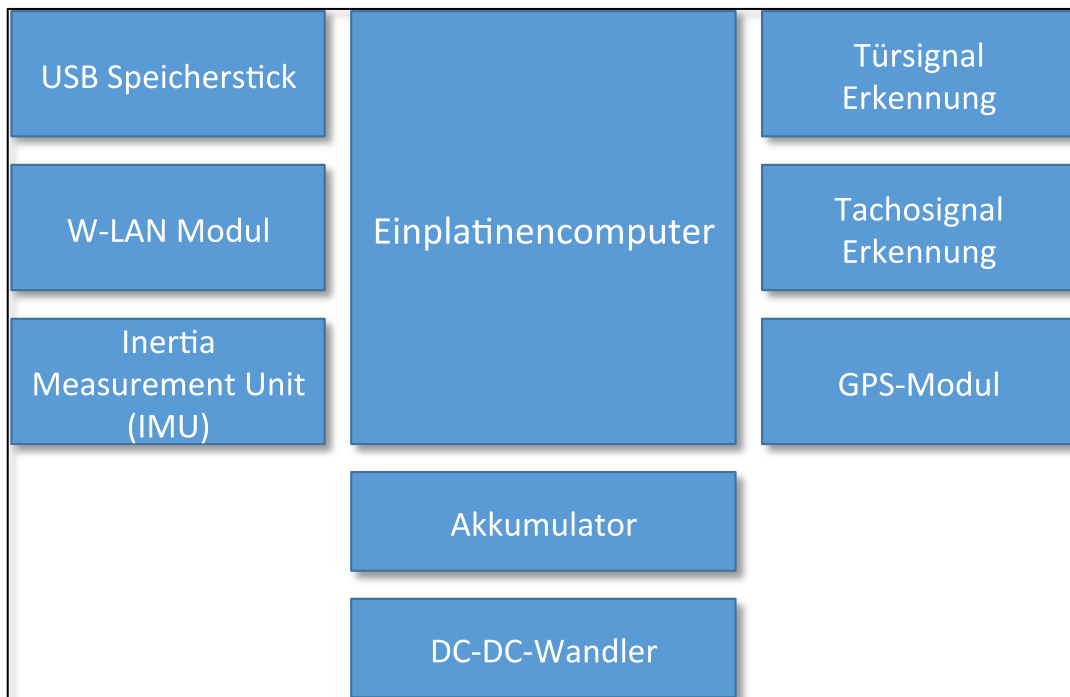


Abbildung 18: Blockdiagramm des Messsystems mit seinen Komponenten

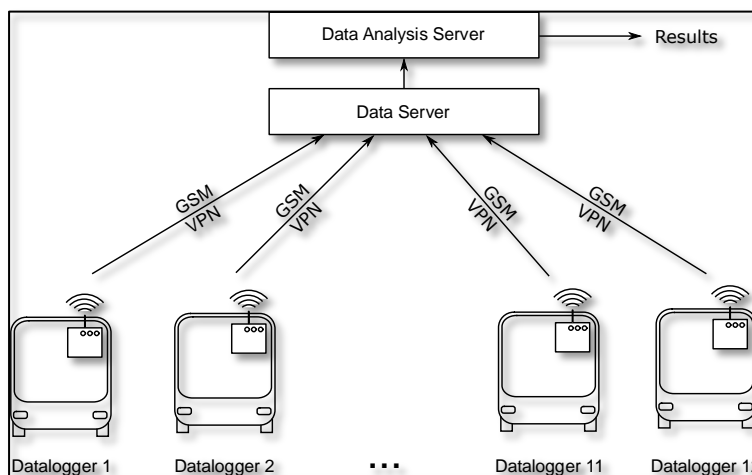


Abbildung 19: Aufbau des Gesamtsystems aus 12 Dataloggern mit sicherer, drahtloser Datenverbindung zum Daten-server.

AP 6.3 Aufbau der Prototypgeräte

Neben zwei Prototypen wurden insgesamt 12 Datenlogger realisiert und in Bussen der HOCHBAHN eingesetzt. Die Datenlogger wurden mehrfach verbessert und die eingeführten Maßnahmen sukzessive in alle Geräte eingeführt. Abbildung 20 zeigt einen aufgebauten Datenlogger, Abbildung 21 den Einbau im Bereich des Fahrersitzes eines Nahverkehrsbusse.

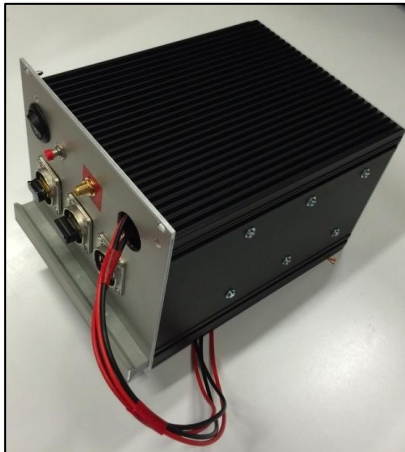


Abbildung 20: Datenlogger Kleinserie (Foto: M. Wegner, HAW-Hamburg)

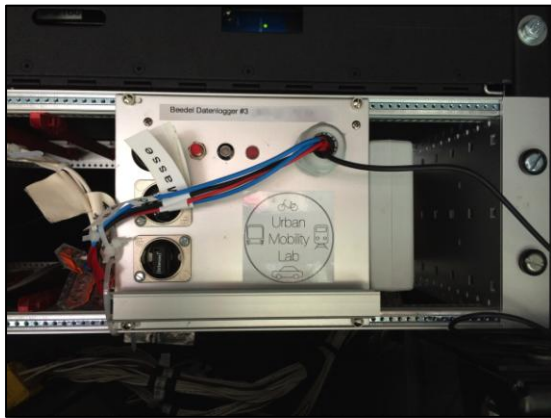


Abbildung 21: Datenlogger in der Einbauposition im Nahverkehrsbus

AP 6.4 Evaluierung der kosteneffizienten Messtechnik

Insgesamt wurde zwischen dem 1.9.2015 und 30.06.2016:

- eine **Gesamtfahrtstrecke von 300.881 km** erfasst und automatisiert an das Fraunhofer IVI übermittelt. Dies entspricht
- einer **Gesamtfahrzeit von 26.148 Stunden**
- in **2.749 Datensätzen**
- mit **941 Millionen Datenpunkten**.

In Abbildung 22 ist die geografische Länge und Breite der GPS-Koordinaten jeder gültigen Messung mit einem Punkt dargestellt. Dies veranschaulicht die beinahe vollständige Abdeckung des Hamburger Stadtgebietes.

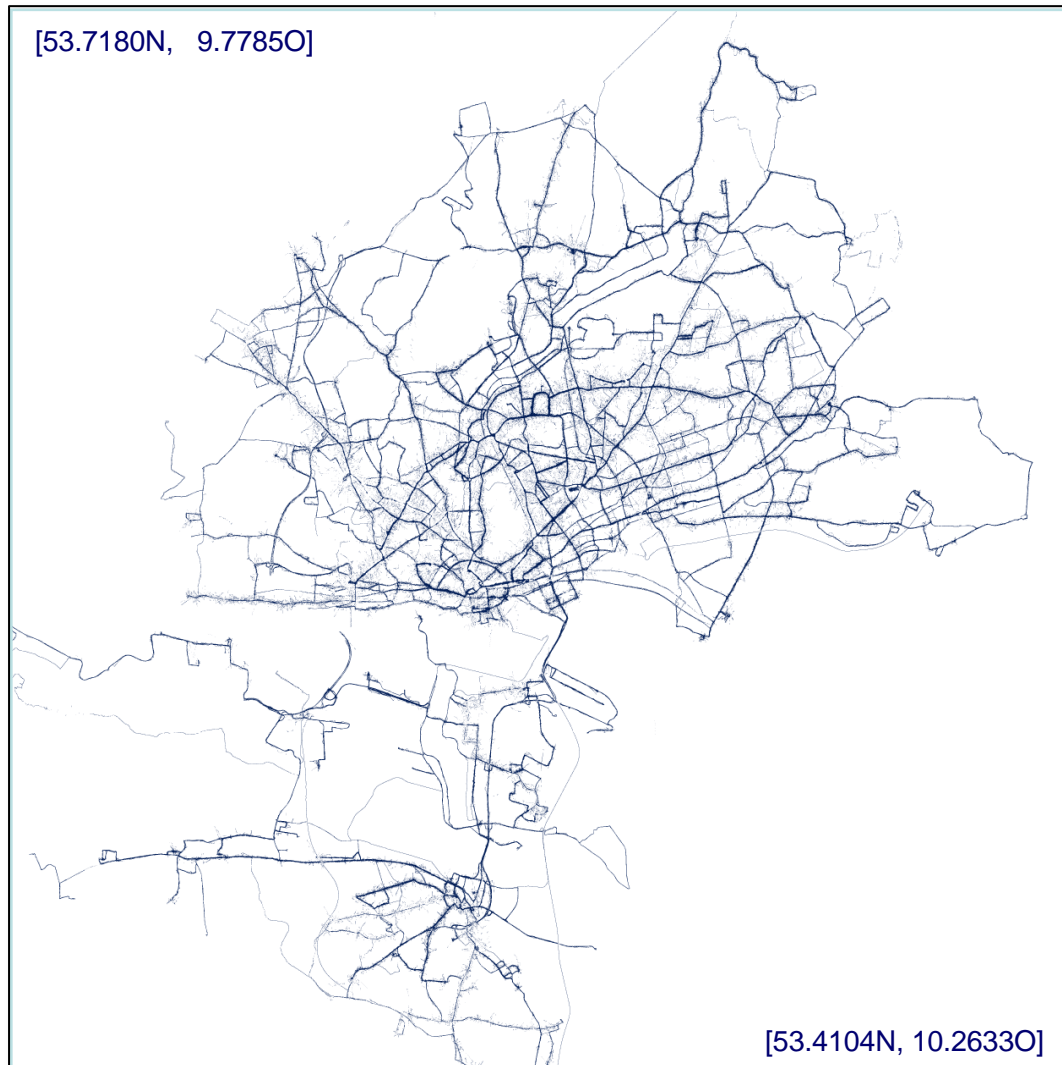


Abbildung 22: Überblick der Messungen im Hamburger Stadtgebiet

Der GPS-Empfang und die exakte Positionsbestimmung waren im Innenstadtbereich mit durchgängig hoher Bebauung rechts und links der Fahrwege häufig schlechter, als in niedrig bebauten Stadtgebieten. Im Rahmen des Projektes wurde daher ein Verfahren entwickelt, um auch bei systematisch verfälschten GPS-Koordinaten mit Hilfe der im Datenlogger integrierten Inertialsensoren die tatsächliche Position des Busses zu ermitteln. Die Wirksamkeit des Verfahrens belegt Abbildung 23.

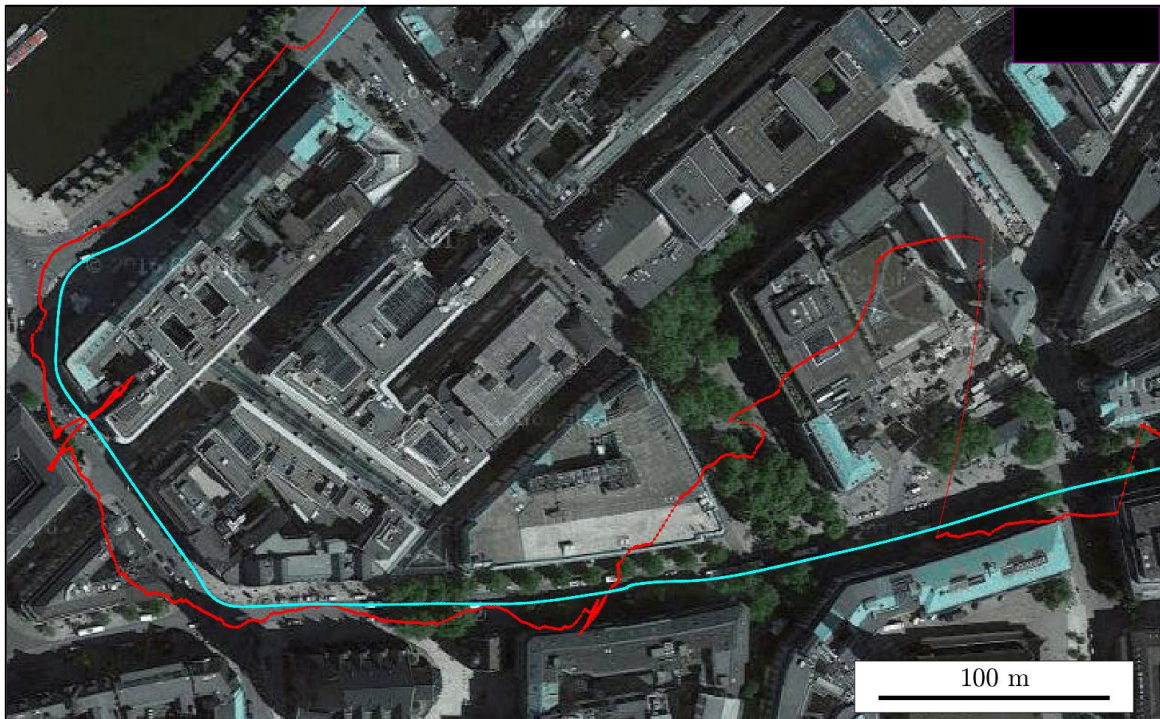


Abbildung 23: GPS-Signal (rot) und korrigiertes Signal (türkis)

Nach bis zu 12 Monaten Betrieb in den Bussen der HOCHBAHN wurden alle Datenlogger aus den Fahrzeugen ausgebaut und systematisch auf Schwachstellen überprüft. Hierbei wurde der eingesetzte USB-Stick als Speichermedium für Langzeiteinsatz als nicht geeignet identifiziert. Die Verfügbarkeit der Messdaten wurde durch den automatischen Upload auf den Datenserver sichergestellt, sodass die identifizierte Schwachstelle keinen negativen Einfluss auf die Projektergebnisse hatte.

Der an der HAW Hamburg entwickelte Datenlogger erfüllt daher neben den technischen Anforderungen des Projektes auch den Anspruch einer kosteneffizienten Messtechnik und ermöglicht die Anpassung an eine Vielzahl weiterer Anwendungen.

AP 7 Batterieeffizienter Betrieb

Das Arbeitspaket 7 gliedert sich in vier Teilpakete, welche die Erfassung von Messdaten, die Grundlagenanalyse für die Auslegung der Experimente an Einzelzellen und die gerätetechnische Vorbereitung umfassen. Zu letzterem gehört die beschleunigte Zellenalterung (Zeitraffer) durch Temperaturüberhöhung sowie die Einrichtung eines automatisierten Zyklrierprüfstands. Der Messbetrieb nutzt die erfassten Messdaten aus den Bussen und beobachtet die Einzelzellen in den Parametern Spannung, Strom und Zelltemperatur. Eine anschließende Auswertung der aufgezeichneten Messdaten sowie eine Messung der Restkapazität ist erfolgt und es werden Bewertungen, die für den Busbetrieb relevant sein können, abgeleitet (s. Abbildung 24).

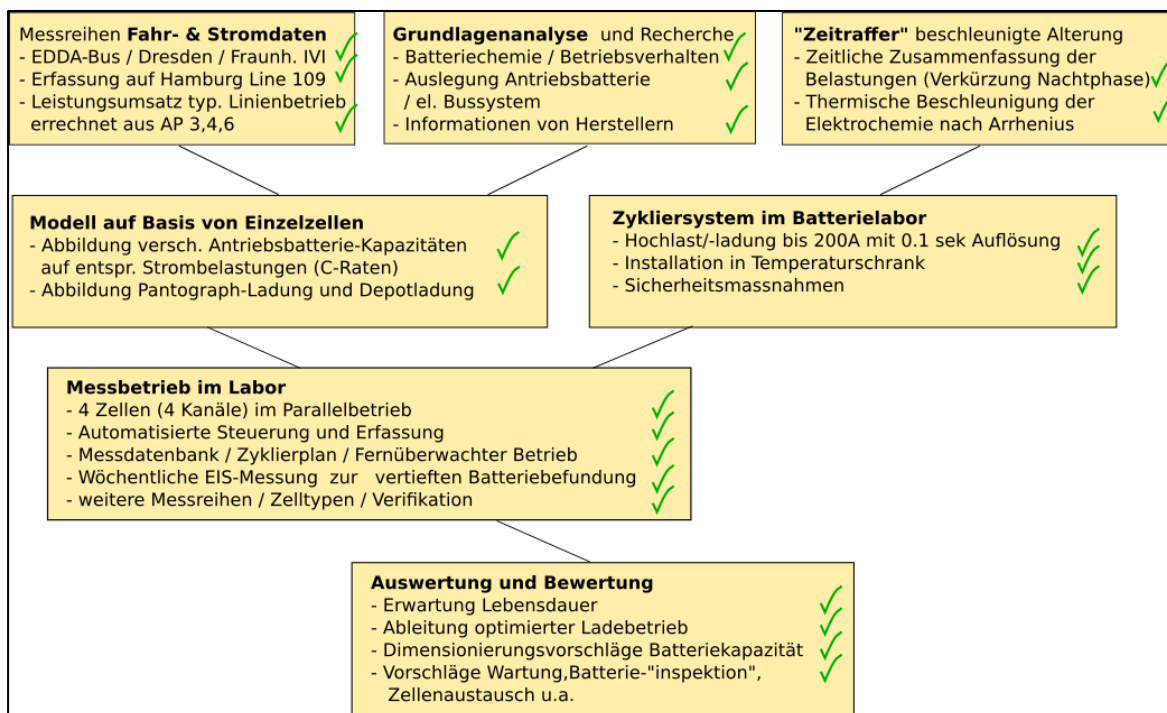


Abbildung 24: Übersicht über die in AP 7 durchgeführten Arbeiten

AP 7.1 Analyse der durchgeführten Messungen

Um den Projektfortschritt zu beschleunigen, wurden die Rahmenbedingungen der Messwerterfassung frühzeitig verifiziert. Hierzu wurde in diesem Teilpaket eine Analyse der ersten Messungen durchgeführt. Von großem Vorteil war, dass bestehende Messungen des Fraunhofer IVI Dresden an einem vollelektrischen Bus (EDDA-Bus) vorlagen. Diese wurden zu Beginn des Projektes im Hinblick auf die Durchschnitts- und Maximalbelastungen sowie den zeitlichen Wechsel von Entladung und Rekuperation betrachtet.

Von vorrangiger Bedeutung ist die Relation zwischen der auftretenden Strombelastung (Ampere, A) und der Gesamtkapazität (Amperestunden, Ah) der Batterie, da dieses Verhältnis (als C-Rate bezeichnet) großen Einfluss auf die Belastung und damit auf die Alterung der Batterie hat. Die Annahmen über die zukünftig im Bus zu erwartenden Batteriegrößen (>60kWh) und die betrieblichen Erfordernisse zu dem kurzen Zeitfenster (6-10min) für die Zwischenladung sind

zwischen den Projektpartnern abgestimmt worden. Die Abstimmung hat zur konkreten Auslegung der Langzeitexperimente beigetragen. So konnte die Maximalbelastung für das Laborzyklersystem spezifiziert werden (200 A) und die hohe zeitliche Auflösung der Belastungs- und Messdaten als erforderlich bestätigt werden.

Als zweite Datenquelle - nach dem Aufbau von Messdatenloggern an der HAW - dienten Messfahrten mit dem Batteriebus mit Brennstoffzelle als Range-Extender (Solaris Urbino 18,75 m) der HOCHBAHN auf der Innovationslinie 109. Während der Fahrten im Batteriebetrieb wurden Beschleunigung, Geschwindigkeit und GPS-Position sowie Batteriestrom und -spannung aufgezeichnet. Diese Daten wurden anschließend genutzt, um Lastprofile für Batteriezellen nachzubilden. Weil die Dresdner und Hamburger Daten sich zu diesem Zweck gut eignen, wurde übereinstimmend festgelegt, dass dieser Projektteil überwiegend auf dieser Basis durchgeführt werden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Voruntersuchung sind gut geeignet, Vorentscheidungen für die nachfolgenden Teilpakete zu treffen.

Weiterhin wurden Literaturrecherchen und Einschätzungen zum aktuellen Stand und der zukünftigen Entwicklung von Batterietechnologien erarbeitet und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. In diesem Rahmen wurde auch eine fachliche Abstimmung zu den Parametern des Batterie-Simulationsmodells am Fraunhofer IVI durchführt. Dazu wurden über 20 Berechnungsparameter und Kennlinienverläufe zum Batteriemodell im Detail abgeglichen bzw. die vorhandenen Angaben mit entsprechenden Rechercheergebnissen bestätigt. Die Ergebnisse sind in die Berichte zu deren Arbeitspaketen eingeflossen.

AP 7.2 Durchführung Basisuntersuchungen an Einzelzellen

Die Kenntnis über das Alterungsverhalten der Batterie ist von wirtschaftlicher Bedeutung, da die Lebensdauerkosten (Total Cost of Ownership) des Elektrobusbetriebs in hohem Maße von der Zuverlässigkeit und den Kosten für Wartung (Einzelzellen-Ersatz) und/oder der notwendigen Ersatzbeschaffung der Antriebsbatterie beeinflusst wird. Eine realistische Alterungsbeurteilung ist auch für die Bewertung von Kostenansätzen für die Auslagerung des wirtschaftlichen Risikos (Batterie-Leasing o.ä.) wertvoll. Davon unabhängig hat die verminderte Zuverlässigkeit und verbleibende Restkapazität einer gealterten Batterie mögliche Auswirkungen auf die betriebliche Verfügbarkeit.



Abbildung 25: Prüfstand bestehend aus der Temperaturkammer (links) und dem Zykliegerät (rechts). Die Temperaturkammer kann Temperaturen von -40-+185°C abbilden, das Zykliegerät kann auf vier Kanälen bis zu je 200 A bereitstellen.

Für eine präzise Alterungsuntersuchung sind streng definierte und reproduzierbare Rahmenbedingungen erforderlich. Dies ist im täglichen Fahrbetrieb nicht umsetzbar, sondern nur auf Laborprüfständen. Eine solche Laboruntersuchung der Alterung einer Gesamtbatterie eines Stadtbusses (typisch >1000 Zellen, >50000 Euro) war im Projektrahmen nicht umsetzbar. Sowohl die Batteriekosten als auch der Aufwand für Laborausrüstung und den Prüfstand übersteigen die verfügbaren Mittel erheblich. Messtechnisch ist die Verwendung von einer Gesamtbatterie mit vielen Zellen in Reihenschaltung – besonders jedoch bei Parallelschaltung – zudem wesentlich ungünstiger, als die Experimente mit separierten Einzelzellen durchzuführen. Daher wurden für Untersuchungen Einzelzellen herangezogen. Es wurden für diese Zellen die äquivalenten Belastungen (Stromverläufe, C-Raten) wie im tatsächlichen Busbetrieb verwendet.



Abbildung 26: Vier 15-Ah-Zellen in LFP-Technologie eingebaut in einer Metallbox für die Prüfstandsuntersuchung

Im Batterielabor der HAW wurden daher Einzelzellen verschiedener Technologien und Kapazitäten mit den in AP 7.1 gewonnenen Profilen belastet. In Langzeitversuchen wurden Lithiumeisenphosphat-Zellen (LFP) mit 2,5 Ah und 16 Ah und Lithiumtitanat-Zellen (LTP) mit 20 Ah geprüft. Kurzzeitversuche erfolgten auch mit anderen Zelltypen. Die Messungen wurden nach der manuellen Erstellung der Zyklrierprofile aus den Fahrprofilen vollautomatisch durchgeführt. Hierfür wurde ein Batterietestsystem der Firma Digatron genutzt, das Batteriezyklen mit genauer Nachbildung von Last- und Ladephasen im 10-Hertz-Raster ermöglicht. Der Prüfstand verfügt über vier unabhängige Messkanäle. Eine der Anforderungen gemäß der Analyse in AP 7.1 an das Gerät war, die Maximalleistung so auszulegen, dass auch für große Batteriezellen die entsprechenden Spitzenströme nachgebildet werden können. Mit einem Maximalstrom bis zu 200 A pro Kanal kann für alle Zellgrößen, die in Bussen zum Einsatz kommen, sowohl die realistische (<3C) als auch die grenzwertige (>3C) Belastung im Labor

umgesetzt werden. Das Batterietestsystem ist mit einer großen 680-l-Temperaturkammer gekoppelt, die die Arbeitstemperaturprofile der Busbatterien nachbilden kann.

Langzeitversuche umfassten typisch ca. 20 Wochen Messzeit, während derer die Batteriezellen im Temperaturschrank bei 55 °C betrieben wurden. Sie wurden zeitlich mit den gleichen Belastungs- und Ladungsprofilen beaufschlagt, jedoch mit einer abgestuften Stromstärke (siehe auch AP 7.3), um unterschiedliche Batteriegesamtgrößen zu simulieren. Der Temperaturwert von 55 °C wurde gewählt, da dieser an der Obergrenze der vom Hersteller spezifizierten zulässigen Temperatur liegt und, entsprechend dem Arrhenius-Gesetz, eine Beschleunigung der Alterungsvorgänge in der Batterie um etwa einen Faktor 5 ermöglicht. Dieser Faktor wurde Literaturwerten entnommen.

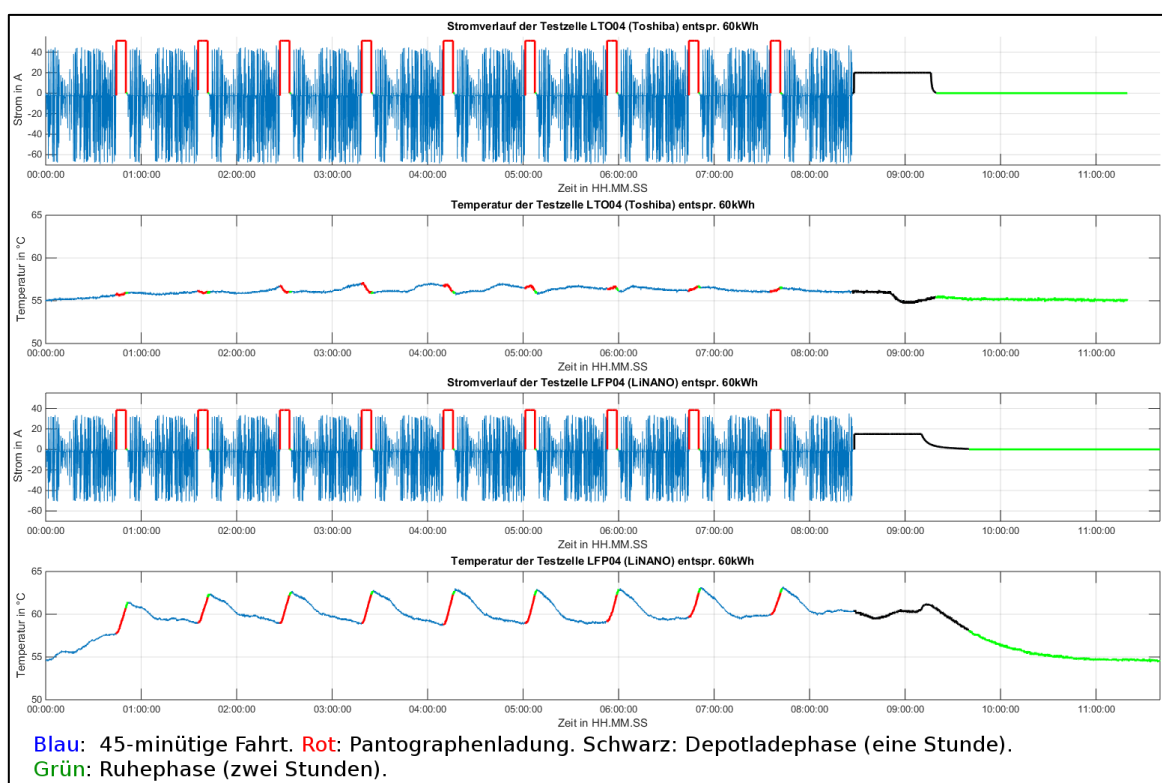


Abbildung 27: Strom- und Temperaturverlauf für eine LTO-Zelle (20 Ah) und eine LFP-Zelle (15 Ah) mit an die Zellgröße angepasster Strombelastung

Es wurden Umläufe zu je zehn Fahrten von Endhaltepunkt zu Endhaltepunkt der Linie 109 (ca. 45 Minuten) durchgeführt und an den Endhaltepunkten jeweils Pantographen-Zwischenladungen simuliert. Die Ruhe- und Ladephase im Betriebshof wurde auf insgesamt drei Stunden verkürzt, so dass pro Messtag zwei typische vollständige Betriebstage simuliert werden konnten. Dies diente einer besseren Auslastung des Zyklersystems und der zur Verfügung stehenden Projektzeit und führte zu einer weiteren Beschleunigung der Messungen um einen Faktor 2.

Jeweils nach Ablauf einer Messwoche wurden an den Zellen halbautomatische Kapazitätsmessung und elektrochemische Impedanzspektren (EIS) aufgenommen. Diese

Kapazitätsmessungen zeigten je nach Testparametern teilweise deutliche Verringerungen der Kapazität. EIS-Messungen beschreiben dagegen das charakteristische Ansteigen des Zellinnenwiderstands über die Nutzungsdauer. Dabei sind die aufgenommenen Änderungen stark von den verwendeten Zelltechnologien und Zellgrößen abhängig. Als Ergebnis wurde eine sehr hohe Langlebigkeit von Lithiumtitanat-Zellen auch bei hoher Belastung festgestellt. Lithiumeisenphosphat-Zellen zeigten abhängig von der Zellgröße sehr starke Unterschiede (Vgl. Abb. 30). Die Messwerte erbringen eine deutliche relative Aussage, sind aber absolut nur bedingt interpretierbar, da die kalendarische Alterung wegen der Beschränkungen durch die Projektlaufzeit nur eingeschränkt nachbildbar war.

Die vorher definierten Betriebsszenarien wurden als Datensätze über die Datenbanksteuerung des Prüfstandes dem Batteriezyklriergerät zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden so aufbereitet und skaliert, dass jeder Kanal eine unterschiedliche Batteriegröße nachbildet. Gewählt wurden hierfür zunächst Batteriegrößen von 30, 40, 60 und 120 kWh. Im Langzeitversuch zeigte sich eine deutliche Belastung der Batteriegrößen 30 und 40 kWh, die zu sehr schnellen Alterungseffekten führten. Die Batteriegrößen 60 und 120 kWh hingegen waren wesentlich schwächer von Alterungseffekten betroffen und alterten um bis zum Faktor 2 langsamer. Die Kapazitätsabnahme wurde über 19 Wochen bis zu maximal 20% Kapazitätsverlust beobachtet und zeigte sich stabil linear.

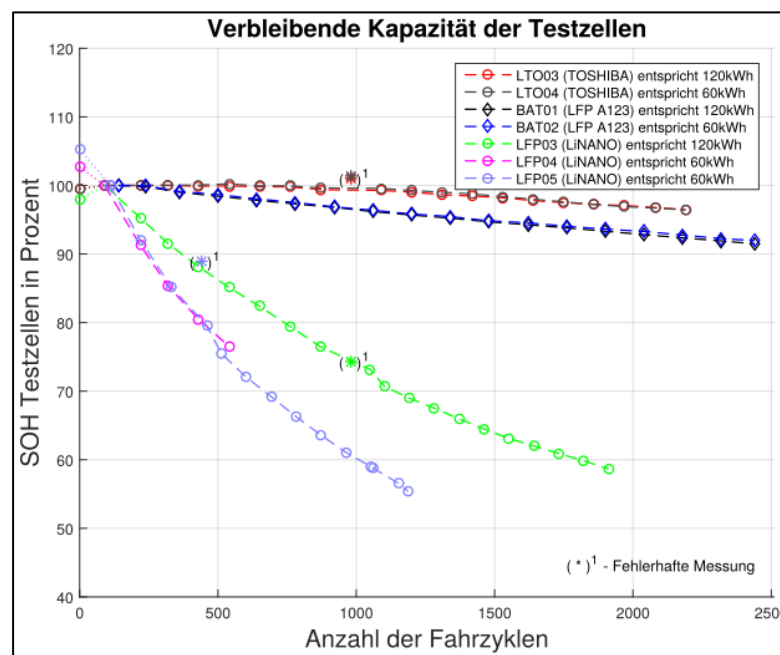


Abbildung 28: Verringerung der nutzbaren Kapazität (SOH) von verschiedenen Batteriezellen während der Langzeittests⁴.

⁴ Ein Fahrzyklus entspricht theoretisch einem halben Nutzungstag (Referenz Linie 109) bei einem angenommenen temperaturbedingten Beschleunigungsfaktor von 5. Die Messwerte erbringen eine deutliche relative Aussage, sind aber absolut nur eingeschränkt interpretierbar, da kalendarische Alterung nur eingeschränkt nachbildbar ist

Den Messdaten ist zu entnehmen, dass Batterien, die mit stärkeren Ladeströmen belastet wurden (30 und 40 kWh), reproduzierbar eine Temperaturerhöhung während der Zwischenladungen aufwiesen. Diese ist unterschiedlich für die verwendeten Batterietechnologien und beträgt beispielsweise für die LFP-Zelle bis zu 8 K, während sie bei der LTO-Zelle maximal 2 K beträgt. Dies ist eine Folge des höheren Innenwiderstands der LFP-Zelle. Die Temperaturerhöhung überschritt im Laborbetrieb teilweise die laut Datenblatt zulässige Temperaturgrenze. Auch wenn im Realbetrieb von einem größeren Abstand zu dieser Obergrenze auszugehen ist, muss auf die besondere Belastung in dieser Situation hingewiesen werden. Es wird eingeschätzt, dass die notwendige Nachladung bei den kleineren Batterievarianten nicht in der vorgesehenen Zeit (typisch 6 Minuten) erreicht werden kann, da die Belastung (C-Rate) in Relation zur Batteriegröße zu hoch wird. Hingegen halten größere Batterien einer entsprechenden Schnellladung bei gleichem Strom mit weit weniger Alterungseffekten stand, da die entsprechende C-Rate geringer ist.

Bezogen auf die Versuchsdurchführung musste festgestellt werden, dass Alterungsversuche trotz der Maßnahmen im Labor (Temperaturbeschleunigung, betriebliche Einsparung der nächtlichen Depotphase) kaum über den Faktor 10 hinaus zu beschleunigen sind.

Es ist daher auch für zukünftige Untersuchungen davon auszugehen, dass nutzbare Ergebnisse etwa 20 Wochen kontinuierlichen Versuchsbetriebs benötigen und der Umfang der möglichen Ergebnisse stark von den zur Verfügung stehenden Messplätzen abhängt. Auch aus diesem Grund war die Stichprobengröße gering, so dass Ergebnisse exemplarisch zu sehen sind. Die gute Übereinstimmung von Untersuchungen mit identischen Parametern zeigt jedoch, dass die Ergebnisse keiner großen statistischen Streuung unterliegen. Das Augenmerk muss daher auf einem automatisierten Betrieb, sorgfältiger Versuchsplanung und strenger Durchführung liegen. Bei der Planung muss eine Priorisierung der Zielsetzung vorgenommen werden.

AP 7.3 Ableitung von Lade-/Entlade-Szenarien

Aus den Ergebnissen in AP 7.2 konnten Aussagen zur Batteriegröße bzw. Ladegeschwindigkeit im Busbetrieb gewonnen werden. Insbesondere muss, um eine möglichst lange Nutzung der Batterie sicherzustellen, die Strombelastung als Relation zur Batteriegröße (C-Rate) gewählt werden. C-Raten über 3C führen zu stark beschleunigter Alterung und damit zu verringerter Kapazität im Betrieb einem Verlust der Schnellladefähigkeit über einen größeren Ladezustandsbereich und erhöhtem Ausfallrisiko.

Kleinere Batterien müssen aus diesem Grund mit geringeren Strömen, d.h. mit längeren Zwischenladezyklen geladen werden, so ist als Beispiel ein Zwischenladen mit über 180 kW für Batteriegrößen unter 60 kWh nicht geeignet. Wenn die Batterieabnutzung minimiert werden soll, wären für diese Batteriegröße sogar Leistungen unter 60 kW zu empfehlen. Werden die gleichen Rahmenbedingungen für eine große 200-kWh-Batterie angenommen, wären die Empfehlungen entsprechend 600 kW für einen Betrieb in Grenzlage und 200 kW für einen batterieschonenden Betrieb. Als Vergleichsgrößen seien hier die Maximalleistung der Pantographen (150 kW bzw. 300 kW in der Ausbaustufe 2) und der Verbrauch pro Kilometer Fahrleistung (bis zu 2 kWh/km im Winter) genannt.

Es zeigte sich, dass LFP-Zellen verschiedener Hersteller deutliche Alterungsunterschiede aufweisen. Dies kann auf unterschiedliche Fertigungsprozesse, Materialqualitäten und Detailrezepturen (Korngrößen, Schichtdicken, Binder, Leitmittel/Separator etc.), aber auch auf die Zellgrößen zurückgeführt werden. In großen Batteriezellen ist es schwieriger, die bei Stromfluss entstehende Wärme aus der Zelle abzuführen, so dass die Zelle bei Schnellladung länger in einem materialschädigenden Temperaturzustand betrieben wird. LTO-Zellen alterten während der Untersuchung wesentlich langsamer und zeigten ein etwa um den Faktor 2 besseres Alterungsverhalten als die besten LFP-Zellen. Die Energiedichte ist jedoch geringer, so dass das benötigte Gewicht im Fahrzeug entsprechend höher oder die mitgeführte Energiemenge geringer ist. Schlussfolgerungen aus diesen Erkenntnissen sind auch in AP 7.4 ausgeführt.

In den jeweils 20 Wochen Messzeit konnte die kalendarische Alterung nur eingeschränkt untersucht werden. Vergleichsmessungen an gelagerten Zellen ohne Zyklenbelastung zeigen jedoch, dass bei Zellen mit geringer Zyklenalterung die kalendarische Alterung der dominierende Prozess des Kapazitätsverlustes war. Dies galt während der Messungen in besonderem Umfang, da die kalendarische Alterung besonders temperaturabhängig ist. Dies muss bei Stillstandszeiten und Lagerung Berücksichtigung finden.

Bei allen bei erhöhter Temperatur geprüften LTO-Zellen traten nach etwa 20 Wochen Gasbildung als Verformung der Zellen auf. Die Ursachen sind nicht geklärt. Da eine bei 25°C betriebene Zelle keine Auffälligkeiten zeigte, ist dies als ein Hinweis auf besondere Temperaturempfindlichkeit zu werten.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine geringe Strombelastung relativ zur Batteriegröße (C-Rate) die Lebensdauer von großen Lithiumeisenphosphatzellen signifikant erhöhen kann. Zudem ist für LFP die Zyklenalterung stärker ausgeprägt als für LTO. Für dieses Material sind also große Energiespeicher sinnvoll, die möglichst lange Strecken ohne Ladevorgang abdecken können.

Die bessere Zyklenfestigkeit bei LTO-Zellen ermöglicht häufigere Ladevorgänge bei kleineren Batterien. Hierbei muss allerdings die erlaubte Zelltemperatur beachtet werden. Gegebenenfalls muss das Laderegime für den Betrieb im Sommer angepasst werden, wenn das beschaffte Fahrzeug über keine ausreichende Kühlung des Batteriesystems verfügt.

Prüfling	Lithiumtitanat, hochwertiges Markenprodukt	Lithiumeisenphosphat, kostengünstiges Noname-Produkt	Lithiumeisenphosphat, hochwertiges Markenprodukt
Bezeichnung/Hersteller	LTO Toshiba	LFP LiNANO	LFP A123
Nennkapazität	20 Ah	15 Ah	2,5 Ah*
Nennspannung**	2,3 V	3,2 V	3,2 V
Energiegehalt	46 Wh	48 Wh	8 Wh
Energiedichte***	90 Wh/kg (niedrig)	100 Wh/kg (mittel)	105,3 Wh/kg (mittel)
Innenwiderstand	0,53 mΩ	4 mΩ	6 mΩ
Kapazitätsverlust nach 1000 Fahrzyklen	-0,7%****/-0,4%*****	-27%****/-41%*****	-3,6****/-3,8*****
Lebensdauerbewertung im Busbetrieb	Geeignet für sehr hohe Zyklenzahl	Ungeeignet für hohe Zyklenzahl	Geeignet für mittlere Zyklenzahl
Typischer Anwendungsfall	Viele Zwischenladungen, Kurzstrecken	Für kurzzeitige Nutzung (Privat-PKW-Betrieb o.ä.)	Für tägliche Ladung mit begrenzter C-Rate, mittlere Streckenlänge
Kosten	Hoch	Niedrig	Niedrig-Mittel

*) stellvertretend für Markenbatterien, die in Bussen verwendet werden, jedoch in größerer Bauart.
 **) Die Anzahl der benötigten Zellen steigt mit sinkender Nennspannung.
 ***) Verglichen mit anderen Batterietechnologien wie NCA, haben LFP mittlere und LTO geringe Energiedichten, bieten aber höhere Lebenserwartung und bessere Sicherheitseigenschaften.
 ****) Bei der Simulation einer großen 120-kWh-Batterie.
 *****) Bei der Simulation einer kleinen 60-kWh-Batterie.

Abbildung 29: Kenndaten zu den getesteten Batterietypen aus den Datenblättern der Hersteller und aus eigenen Messungen⁵

AP 7.4 Ableitung von Vorschlägen zur verbesserten Linienführung

Ein Teil dieses Arbeitspaketes umfasste die Lieferung von in Messungen und in Literaturrecherche ermittelten Batterieparametern an das Fraunhofer IVI für die Simulationsrechnung (vgl. AP 4). Diese Simulationen erfolgten Anfang 2016 mit einem detaillierten Batteriemodell mit dem Ziel quantifizierte Ergebnisse mit verbesserter Aussagekraft zur geplanten Linienführung mit E-Bussen zu erhalten. Hierfür standen außerordentlich große Datensätze zur Verfügung, die sehr detaillierte betriebliche Informationen enthalten. Um ähnlich präzise Unterstützung der Simulation auf Seiten des Batterieverhaltens zuzulassen, strebte das Fraunhofer IVI an, ein komplexes rechnerisches Batteriemodell für sämtliche Simulationsläufe einzusetzen. Daher wurden ca. 30 Parameter und Angaben für die Batteriemodellierung durch die HAW im Rahmen dieses Arbeitspaketes zugeliefert. Hierzu gehören die Zahl und die Größe der parallelen Batteriestränge, die typische Zellnennkapazität, die Kennlinien für die Zellspannung über den Ladezustand, Angaben zu den Innenwiderständen,

⁵ Vgl. auch Eugen Weizel: „Prüfstandserprobung von Antriebsbatterien unter dem Lastprofil von E-Bussen - Vergleich von Lithium-Titanat- und Lithium-Eisenphosphatzellen“ (2016, Bachelorarbeit an der HAW Hamburg)

die Schnellladefähigkeit sowie Temperatur- und zulässiges Hochstromverhalten. Die Ergebnisse der Simulation sind im Berichtsteil zu dem AP 4 zusammengefasst.

Zusätzlich zu den in der Simulation gewonnenen Daten konnten aus den in den Arbeitspaketen 7.1 bis 7.3 einige Hinweise im Hinblick auf optimierte Linienführung ermittelt werden. Da die Linienführung durch die Einführung von Batteriebussen jedoch nicht beeinträchtigt und möglichst nicht modifiziert werden soll, können diese Hinweise in Betriebsneuplanungen sowie in die Umlaufplanung einfließen. Beispielsweise könnten die Zwischenladezeiten den Parametern Batteriegröße, Ladezustand und Temperatur angepasst werden. Die Erkenntnisse zu den erreichten Lebensdauern der geprüften Batteriezellen zeigen in hohem Maße, dass ein wirtschaftlich optimierter Betrieb Batterietechnologie und Laderaten berücksichtigen muss, da ein deutlicher Verlust der Langlebigkeit bei nicht optimalem Betrieb auftritt.

Weitere Untersuchungen beispielsweise in Folgeprojekten sollten eine differenzierte Ausstattung der Busse unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten abwägen. Hier könnten beispielsweise Linien und Umläufe in der Innenstadt kleine Batteriegrößen nutzen, die sehr häufig aufgeladen werden. Hier bietet sich Lithiumtitanat als Batterietechnologie an, die auch häufiges Nachladen ohne Einbußen in der Langlebigkeit erlaubt. Für Umläufe, die überwiegend im Umland fahren und daher keine regelmäßigen Ladevorgänge (u.a. wegen fehlender Ladeinfrastruktur) ermöglichen, könnten größere Batterien bspw. in Lithium-Eisenphosphat-Technologie eingesetzt werden, die eine höhere Energiedichte aufweisen, jedoch nur ein- bis zweimal pro Tag geladen werden.

Eine darüber hinausgehende zusätzliche Untersuchung hinsichtlich der betrieblichen Reserven sowohl des Einzelfahrzeugs als auch in der Flotte ist langfristig anzuregen. Hierfür wären verschiedene Parameter zu variieren, unter anderem kurze und lange Linienstrecken mit Zwischenladungen bzw. Depotladung, verschiedene Batterietypen (Hersteller), verschiedene Batterietechnologien sowie eine besondere Betrachtung der Temperaturgänge (Klimatisierung der Batterie) im Hinblick auf Betriebstemperatur und Verhalten bei sehr hohen (Sommer) und niedrigen (Winter) Außentemperaturen.

Die Ergebnisse des AP 7 werden wie folgt kompakt zusammengestellt:

Aussagen zur Batteriegröße bzw. Ladegeschwindigkeit

- Strombelastung muss als Relation zur Batteriegröße (C-Rate) gewählt werden.
- C-Raten über 3C führen zu stark beschleunigter Alterung.
- Kleinere Batterien müssen mit geringeren Strömen, d.h. mit längeren Zwischenladezyklen geladen werden (Beispiel: 6 Minuten Zwischenladen ist nicht geeignet für Batteriegrößen unter 60kWh).

Aussage zu Batterietypen

- LFP-Zellen verschiedener Hersteller zeigen deutliche Alterungsunterschiede.
- LTO-Zellen altern langsamer als die besten LFP-Zellen bei niedrigerer Energiedichte.

- Daher Pauschalabschätzung: LTO-Batteriesysteme können mit vielen Zwischenladungen eingesetzt werden, während LFP für längere Streckenführung geeignet erscheint.

Weitere Alterungseffekte

- Kalendarische Alterung konnte in den 20 Wochen Messzeit nur eingeschränkt untersucht werden.
- Bei Zellen mit geringer Zyklenalterung war die beobachtete kalendarische Alterung dominant.
- Die kalendarische Alterung ist besonders temperaturabhängig (Berücksichtigung bei Stillstandszeiten und Lagerung).
- Bei allen bei erhöhter Temperatur geprüften LTO-Zellen traten nach etwa 20 Wochen Gasbildung (Verformung der Zellen) auf. Ursachen sind nicht abschließend geklärt.

Aussagen zum Busbetrieb

- Die Linienführung soll durch die Einführung von Batteriebusen nicht grundsätzlich verändert werden. Die in den AP 4.3, 7.2 und 7.3 gewonnenen Erkenntnisse können jedoch in die Umlaufplanung, Ladezeiten etc. einfließen. Beispielsweise könnten die Zwischenladezeiten den Parametern Batteriegröße, Ladezustand und Temperatur angepasst werden.
- Ein wirtschaftlich optimierter Betrieb muss auch Batterietechnologie und Laderaten berücksichtigen (deutlicher Verlust der Langlebigkeit bei zu hohen Laderaten).
- Weitere Untersuchungen sollten eine differenzierte Ausstattung der Busse unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten abwägen (Batterietechnologie, Batteriekapazität u.a.).

Empfehlungen für Folgeuntersuchungen

- Belastungsuntersuchungen für kurze und lange Linienstrecken mit Zwischenladungen bzw. Depotladung.
- Ausweitung der Prüflinge auf mehrere Batterietypen, Batterietechnologien und Hersteller, da erhebliche Unterschiede erkannt wurden.
- Untersuchung auf weitere spontane Schädigung bei grenzwertigen Temperaturzuständen (Gasbildung bei hoher Temperatur, Ausfällung des Leitsalzen bei niedrigen Temperaturen), ggf. Zellenanalyse nach Zerlegung.
- Langzeituntersuchungen im Hinblick auf die Temperaturgänge bei Schnellladung oder Niedrigtemperaturen.

A.2.2 Zahlenmäßiger Nachweis sowie Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

A.2.2.1 Zahlenmäßiger Nachweis

(...)

A.2.2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Freie und Hansestadt Hamburg hat sich zum Ziel gesetzt, von 2020 an im Rahmen des städtischen Linienbusverkehrs ausschließlich lokal emissionsfreie Busse zu beschaffen. Daher sind die städtischen Verkehrsbetriebe aufgefordert, die erforderlichen Vorbereitungen zu treffen, um dieses Ziel erfolgreich umsetzen zu können.

Zum Berichtszeitpunkt ist ersichtlich, dass aufgrund der begrenzten Kapazitäten heutiger Batteriespeichertechnologie ein direkter Ersatz von konventionellen Dieselnissen durch batterie-elektrische Busse nicht ohne betriebliche oder infrastrukturelle Maßnahmen möglich ist.

Vor diesem Hintergrund besteht der dringende Bedarf, die grundsätzlich verfügbaren technischen oder betrieblichen Lösungen für eine vollständige Elektrifizierung des Busnetzes detailliert zu untersuchen, um verlässliche Aussagen zu den wirtschaftlichen, betrieblichen und technischen Rahmenbedingungen zu generieren. Das Projekt BEEDeL hatte die Aufgabe, die Auswirkungen einer möglichen Elektrifizierung des Hamburger Busnetzes mittels dezentraler Ladeinfrastruktur aufzuzeigen. Die Ergebnisse werden dringend benötigt, um die nun erforderlichen Entscheidungen zu treffen.

A.2.3 Verwertbarkeit und Anschlussfähigkeit

Die Erkenntnisse aus dem Vorhaben BEEDeL bilden für die HOCHBAHN die Grundlage für die Bewertung alternativer Strategien zur anstehenden vollständigen Elektrifizierung des städtischen Linienbusverkehrs in Hamburg.

Weiterhin wurden im Rahmen des Projektes wichtige Daten zu Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Verzögerungswerten von Bussen auf verschiedenen Umläufen und zu unterschiedlichen Verkehrszuständen gesammelt, welche eine wichtige Grundlage für weitere Untersuchungen zu Energieverbräuchen darstellen.

Die Erkenntnisse zu den Folgen des dezentralen Ladens auf die Batterielebensdauer in Abhängigkeit der gewählten Zellchemien und der Ladeströme können in die technische Auslegung dezentraler Ladeinfrastruktur mit einbezogen werden.

Beim Fraunhofer IVI können die im Rahmen des Projektes BEEDeL durchgeführten Arbeiten in vielen weiteren Projekten und Analysen angewandt werden. Dabei liegt hier das Augenmerk weniger auf den konkreten Ergebnissen der Untersuchungen für die Region Hamburg, sondern vielmehr auf den im Projekt entwickelten Werkzeugketten und Methoden.

Im Projekt wurde mit dem Werkzeug der Grobrasterung eine hochleistungsfähige Methode gefunden, große und komplexe Liniennetze auf Basis der bestehenden Umlaufpläne zu

analysieren und energetisch zu bewerten. Dieses Vorgehen bildet die Grundlage für weitergehende simulative Untersuchungen von ausgewählten Linien und Teilnetzen, die ohne die effiziente Vorbewertung der Grobrasterung rechenzeitlich keinesfalls durchführbar gewesen wären.

Des Weiteren wurden im Projekt große Mengen von realen Messdaten der im Linieneinsatz befindlichen Busse durch den Projektpartner HAW erfasst, aufgezeichnet und durch das Fraunhofer IVI ausgewertet. Auch hier wurden im Rahmen des Projektes effiziente Datenverarbeitungsmethoden und Verfahren zur synthetischen, repräsentativen statistischen Kopplung von realen Messdaten entwickelt, die es ermöglichen die betreffenden Fahrzeuge simulativ hunderte typische Bewegungsprofile absolvieren zu lassen und somit die Robustheit einer Linie oder eines Umlaufs mit einer hohen Qualität realistisch bewerten zu können.

Darüber hinaus wurden am Fraunhofer IVI Algorithmen entwickelt die Energiebedarfe an potentiellen Nachladepunkten im Liniennetz sowie die Auslastung und die zeitliche Abfolge der Belastung an einzelnen Ladepunkten prognostizieren können. Diese Auswertungen können sehr leicht für verschiedene Situationen des Liniennetzes durchgeführt werden. In Kombination mit den Ergebnissen der Grobrasterung und der teilweise detaillierten simulativen Untersuchungen können so einzelne sinnvolle, zeitlich gestaffelte Netzausbaustufen ermittelt werden, die für die Betreiber die Basis eines Investitions- und Umsetzungsplans darstellt.

Die im Projekt entwickelten Werkzeuge und Methoden lassen sich im Ganzen mit dann erforderlichen spezifischen Adaptionen sehr gut für die E-Bus-Einführungskonzeption in anderen Metropolregionen wie z. B. Berlin, München oder im Ruhrgebiet einsetzen was in einigen Fällen auch bereits durchgeführt wurde. Einzelne Werkzeuge oder Auswertemethoden können und konnten auch separat im Rahmen vieler kleinerer Projekte zur E-Bus-Einführungskonzeption in ganz Europa eingesetzt werden.

In den nächsten Monaten und Jahren werden die im Projekt gewonnen Erkenntnisse und Werkzeuge in einer Vielzahl von unterschiedlichen E-Bus-Einführungskonzeptionen verwendet und vor dem Hintergrund sehr individueller Randbedingungen bei verschiedenen Verkehrsbetrieben kontinuierlich ausgebaut und verbessert.

Auch bei der HAW können die gewonnenen Erkenntnisse durchgängig in weitere Forschungsprojekte einfließen. Für die kontinuierliche Überwachung von Bussen im Nahverkehr steht seitens der HAW eine Infrastruktur für die umfängliche Messdatenerfassung bereit. Insbesondere die automatisierte Auswertung großer Datenmengen wurde als methodische Basisfähigkeit etabliert und ist im Kontext weiterer Projekte im Bereich „Big Data“ nutzbar. Umfangreiche Laborausrüstung für weitere Zellentests ist an der HAW verfügbar.

A.2.4 Bekanntgewordener Fortschritt bei anderen Stellen während der Projektlaufzeit

Im Rahmen eines weiteren Forschungsprojekts werden bei der HOCHBAHN umfangreiche Erfahrungen mit dem praktischen Einsatz dezentraler Ladeinfrastruktur im Busbetrieb gesammelt. Mittlerweile zeigt sich im Praxiseinsatz, dass das Konzept des dezentralen Ladens mit Pantographen technisch gut beherrschbar und betrieblich zuverlässig ist. Die bisher

gewonnenen Erkenntnisse bekräftigen die Einschätzung, dass das Konzept des dezentralen Ladens im Grundsatz eine praktikable Lösung für die Umstellung auf rein elektrischen Busverkehr darstellen kann.

Es zeigt sich, dass die von den Herstellern in Aussicht gestellten Batteriekapazitäten für die ersten serienmäßig verfügbaren batterie-elektrischen Busse größer sind, als dies 2014 mit Festlegung der Projekt-Eingangsdaten abzusehen war, unter anderem wurden LTO-Batteriezellen kommerziell verfügbar und in Batteriebussen eingesetzt. Daher sind LTO-Zellen in die Messungen einbezogen worden. Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass die im Projekt BEEDeL ermittelten Aussagen zu Lage und Anzahl dezentraler Ladeinfrastruktur unter Berücksichtigung neuester Erkenntnisse bei der Fahrzeugentwicklung sich nochmals leicht verändert darstellen würden.

A.2.5 Veröffentlichung von Ergebnissen

Im Rahmen von Vorträgen aller Projektpartner auf Fachkonferenzen wurde über die geplante Elektrifizierung des Busnetzes in Hamburg berichtet. Eine Veröffentlichung zentraler Ergebnisse des Projekts auf Basis des vorliegenden Schlussberichts wird in Betracht gezogen.

Die Ergebnisse der Arbeitsgruppen an der HAW-Hamburg wurden in Form von studentischen Abschlussarbeiten veröffentlicht, die z.T. öffentlich einsehbar sind. Hier sind zu nennen:

- Felix Attila Groth: Datenlogger für Elektrobusse mit Mikrocontrollersteuerung, Inertialmesssystem sowie GPS- und GSM-Modulen, 2015; http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/frontdoor.php?source_opus=3575
- Oliver Alexander Schmidt: Auslegung und Erprobung eines Lithiumbatterie-Prüfstands für typische Lade- und Lastprofile von Elektrobussen, 2015; edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/frontdoor.php?source_opus=3579
- Alexander Priven: Erfassung, Prüfstandserprobung und Bewertung von Lade- und Lastprofilen bei elektrischen Stadtbussen zur Optimierung der Batterielebensdauer, 2016; http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/frontdoor.php?source_opus=3516
- Eugen Weizel: Prüfstandserprobung von Antriebsbatterien unter dem Lastprofil von E-Bussen - Vergleich von Lithium-Titanat- und Lithium-Eisenphosphatzellen, 2016; Veröffentlichung erfolgt demnächst.
- Mario Wegner: „Entwicklung eines autonom arbeitenden GPS-Datenloggers mit hoher Updatefrequenz für die Anwendung in Nahverkehrsbussen“ (Bachelorarbeit Elektrotechnik, 2015)
- Christoph Schöne: „Entwicklung eines integrierten Messsystems für einen GPS-Datenlogger mit verbesserter Höheninformation durch Sensorfusion“ (Bachelorarbeit Elektrotechnik, 2015)
- Björn Lüdtke: „Entwicklung eines Positionsdaten-Loggers mit Live-Daten-Übertragung für den Einsatz in Rettungsfahrzeugen“ (Bachelorarbeit Elektrotechnik, 2015)

- Richard Günther: „Entwicklung eines Management- und Analysesystems für mobile eingebettete Datenerfassungssysteme“ (Masterarbeit Mikroelektronische Systeme, 2016); <http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/volltexte/2016/3541/>
- Roman Kray: „Entwicklung einer selbstüberwachten und robusten Systemarchitektur für einen Positionsdatenlogger“ (Bachelorarbeit Mechatronik, 2016)
- Philipp Mohr: „Development of a Kalman filter for multiple-sensor embedded systems in urban public transportation applications“ (Bachelorarbeit Elektrotechnik, 2016)

Darüber hinaus wurden weitere internationale, wissenschaftliche Veröffentlichungen erstellt oder befinden sich in der Vorbereitung:

- R. Günther, M. Wegner, T. Wenzel, R. Rettig: “Big Data Driven Dynamic Driving Cycle Development for Buses in Urban Public Transportation”, *Transportation Research Part D* 51 (2017) 276–289
- T. Wenzel, R. Günther, M. Wegner, R. Rettig: “Automatic measurement and statistical analysis of the impact of kneeling operations on stop and dwell times of buses in urban transportation”, in preparation
- T. Wenzel, R. Günther, M. Wegner, R. Rettig: “Development and implementation of a street quality indicator based continuous monitoring of public buses”, in preparation

B. Erfolgskontrollbericht

Zuwendungsempfänger: Hamburger Hochbahn AG (Projektleiterin für BEEDeL) Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme Hochschule für Angewandte Wissen- schaften Hamburg	Förderkennzeichen: 03EM0205A 03EM0205B 03EM0205C
Vorhabensbezeichnung: <p style="text-align: center;">„BEEDeL - Bewertung des Einsatzes von Elektrobussen mit dezentraler Ladeinfrastruktur in Metropolen am Beispiel der HOCHBAHN “</p>	
Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2014 – 31.12.2016

B.1 Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen

Die Projektergebnisse machen deutlich, dass eine Elektrifizierung des Hamburger Busnetzes mittels dezentraler Ladeinfrastruktur grundsätzlich möglich ist und auch mit einem vertretbaren Aufwand in absehbarer Zukunft realisierbar scheint. Die Stadt Hamburg plant, ihren Busverkehr ab 2020 konsequent zu elektrifizieren. Auf Basis der Ergebnisse des Projektes wird das Prinzip des dezentralen Ladens derzeit als eine von drei möglichen Varianten angesehen. Aktuell steht jedoch vor dem Hintergrund der wachsenden Batteriekapazitäten das Konzept des Ladens auf dem Betriebshof im Fokus der weiteren Ausrichtung.

Vor diesem Hintergrund bilden die Projektergebnisse eine wichtige Basis für eine zügige Elektrifizierung des Busverkehrs der Stadt. Dies entspricht allen förderpolitischen Zielen des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität.

B.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Zentrale Ergebnisse des Vorhabens

Im Gesamtergebnis des Projekts lässt sich festhalten, dass ein Betrieb der im Rahmen des Projekts untersuchten Bus-Teilnetze unter den angenommenen Rahmenbedingungen über ein E-Bus-System mit dezentraler Ladeinfrastruktur grundsätzlich möglich und umsetzbar scheint.

Unter Beibehaltung des heutigen Umlaufgefüges konnten in den beiden betrachteten Szenarien in zwei untersuchten Teilnetzen zwischen 70 % und 98 % des Betriebs elektrifiziert werden. Ein Großteil der in der Betrachtung als nicht elektrifizierbar identifizierten Umläufe ist vor allem an den künstlich gezogenen Betrachtungsgrenzen der Teilnetze gescheitert. Eine vollständige Elektrifizierung der Teilnetze ist grundsätzlich möglich, es wäre aber erforderlich, Bestandumläufe aufzubrechen und neu zuzuschneiden. Die daraus erwachsenden Auswirkungen wurden hier nicht ermittelt.

Vor diesem Hintergrund kann davon ausgegangen werden, dass mit wachsender Netzgröße auch der Elektrifizierungsgrad bei ansonsten gleichbleibenden Rahmenbedingungen steigen dürfte, da die Flexibilität des Netzes dadurch steigt.

Die Herstellung der erforderlichen Infrastruktur im öffentlichen Straßenraum erscheint unter den Aspekten Flächenverfügbarkeit und elektrische Versorgung nach erster Prüfung als grundsätzlich technisch machbar.

Einschränkungen

Bei der Bewertung der zuvor getroffenen Aussagen müssen allerdings folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Es muss gegenüber dem Status Quo (Dieselbusbetrieb) **mit einem deutlichen Kostenmehraufwand** für Fahrzeugbeschaffung und Strecken- bzw. Betriebshofinfrastruktur gerechnet werden.
- Insbesondere beim Aufbau der Ladeinfrastruktur im öffentlichen Straßenraum kann eine **Bewertung der Umsetzbarkeit nicht allein auf technischen Kriterien fußen**. Es ist zum Einen mit Interessenkonflikten zu rechnen, da der Verkehrsraum begrenzt ist und zahlreiche Begehrlichkeiten (Fußgängerverkehr, Radverkehr, motorisierter Individualverkehr – fahrend und ruhend, Sondernutzungen etc.) bestehen. Weiterhin zeigt die Erfahrung, dass gegen den flächendeckenden Aufbau einer solchen Ladeinfrastruktur auch Widerstände aus der Bevölkerung erwachsen können.
- Für eine Vollelektrifizierung der betrachteten Teilnetze ist eine **Anpassung des bestehenden Umlaufgefüges** erforderlich. Hieraus erwachsen **Produktivitätsverluste**, die zu steigenden Betriebskosten führen.
- Es muss berücksichtigt werden, dass bei einer Elektrifizierung über die im Rahmen des Projekts betrachteten Teilnetze hinaus **zusätzliche Ladeinfrastruktur** (in anderen Bereichen der Stadt, aber ggf. auch an bereits vorgesehenen Ladestellen in den betrachteten Teilnetzen) erforderlich wird. Dies wurde nicht im Rahmen der Überprüfung der Machbarkeit berücksichtigt.

B.3 Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben

Alle Arbeiten führten zu Ergebnissen und haben damit zur Lösung der Aufgabenstellung im Sinne des Projektauftrages geführt.

B.4 Fortschreibung des Verwertungsplans

Die Stadt Hamburg plant, ab 2020 in wachsendem Umfang Busse mit emissionsarmen oder vollständig emissionsfreien Antrieben einzusetzen. Vor diesem Hintergrund kommt der Erprobung und Weiterentwicklung von Fahrzeugen mit innovativen Antrieben eine zentrale Bedeutung zu. Die Ergebnisse des Vorhabens BEEDeL zeigen, unter welchen Rahmenbedingungen der Einsatz von Elektrobussen mit Gelegenheitsladen und dezentraler Ladeinfrastruktur in Hamburg möglich ist. Unter Zuhilfenahme von Kriterien wie der betrieblichen Umsetzbarkeit, Sicherung der Attraktivität des Angebotes und der Wirtschaftlichkeit werden die Ergebnisse des Vorhabens in eine umfassende Bewertung und Strategieentwicklung bei der HOCHBAHN einfließen.

Die Verwertung der Projektergebnisse seitens des Fraunhofer IVI erfolgt gemäß der Angaben in Abschnitt A.2.3.

Die Aufgabe der HAW Hamburg im Rahmen der Verwertung der Ergebnisse besteht in der Veröffentlichung der wissenschaftlichen Arbeitsergebnisse. Dies ist bereits in weiten Teilen geschehen (vgl. Abschnitt 2.5). Es ist vorgesehen, auch weiterführende Auswertungen und Analysen, die auf Basis der hier erhobenen Daten erfolgten, zu veröffentlichen. Weitere Verwertungsmöglichkeiten sind in Abschnitt 2.3 beschrieben.

B.5 Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Kostenplanung

(...)

Zeitplanung

Aufgrund einer gegenüber der ursprünglichen Zeitplanung verzögerten Projektgenehmigung konnten die inhaltlichen Arbeiten erst zum März 2015 aufgenommen werden. Aus diesem Grund wurde die Projektlaufzeit nachträglich um zwei Monate bis zum 31.12.2016 verlängert. In diesem Rahmen konnten die vorgesehenen Projektinhalte erfolgreich abgearbeitet werden.

C.1 Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	entfällt	2. Berichtsart	Schlussbericht
3a. Titel des Berichts	„BEEDeL - Bewertung des Einsatzes von Elektrobussen mit dezentraler Ladeinfrastruktur in Metropolen am Beispiel der HOCHBAHN “		
3b. Titel der Publikation	entfällt		
4a. Autoren des Berichts	s. C.1 Berichtsblatt Anhang	5. Abschlussdatum des Vorhabens	31.12.2016
		6. Veröffentlichungsdatum	Noch offen
4b. Autoren der Publikation	entfällt	7. Form der Publikation	entfällt
		9. Berichtsnummer der durchführenden Institution	entfällt
8. Durchführende Institution(en)	Hamburger Hochbahn AG Steinstraße 20 20095 Hamburg Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI Zeunerstraße 38, 01069 Dresden Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Berliner Tor 7 20099 Hamburg	10. Förderkennzeichen	03BV223A/B/C
		11a. Seitenzahl Bericht	65
		11b. Seitenzahl Publikation	entfällt
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Invalidenstr. 44 10115 Berlin	12. Literaturangaben	keine
		14. Tabellen	keine
		15. Abbildungen	29
16. Zusätzliche Angaben			
keine			
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)			
Technische Informationsbibliothek (TIB), Welfengarten 1B, 30167 Hannover http://www.tib.uni-hannover.de			
18. Kurzfassung			
Das Vorhaben BEEDeL hatte die Ermittlung und die Bewertung der Einsatzpotenziale sowie die Ausgestaltung von Einsatzszenarien für Elektrobusse mit dezentraler Ladeinfrastruktur in Hamburg zum Inhalt. Nach einer umfangreichen Datenaufnahme über mehr als 300.000 km Fahrtstrecke im gesamten Liniennetz der Hamburger Hochbahn AG wurden ausgewählte Fahrprofile unter Berücksichtigung typischer Variationen durch Simulation auf ihre Anforderungen an die erforderliche Ladeinfrastruktur bewertet. Es wurde analysiert, inwieweit ein flexibler Einsatz der elektrisch betriebenen Busse möglich ist und in welchem Umfang und an welchen Punkten im Liniennetz Ladeinfrastruktur erforderlich ist, um einen robusten Betrieb zu erreichen. Der Einfluss auf die heutigen Fahr- und Umlaufpläne wurde geprüft und die zu erwartende Dimensionierung der Ladestellen ermittelt.			

Zwei Teilnetze wurden bewertet und es zeigt sich, dass ein großer Teil der Buslinien ausreichend elektrisch versorgt werden kann, ohne dass eine Anpassung der Umlaufpläne notwendig ist. Dem gegenüber steht das Erfordernis, entsprechende Ladestellen im öffentlichen Straßenraum herzustellen, verbunden mit den dafür benötigten Flächen und der Bereitstellung der erforderlichen Stromversorgung. Auf betriebliche Anpassungen, die zu Mehraufwand und geringerer Produktivität führen können, konnte weitgehend verzichtet werden.

Parallel zu diesen Arbeiten wurden Untersuchungen zur Alterung von unterschiedlichen Batterien durchgeführt, wie sie in elektrisch betriebenen Bussen eingesetzt werden, um ihre Dauerfestigkeit zu bewerten und Empfehlungen für den Einsatz zu erarbeiten.

19. Schlagwörter	Batteriebus, Teilnetz, dezentrales Laden		
20. Verlag	entfällt	21. Preis	entfällt

C.1 Berichtsblatt Anhang

4a. Autoren des Berichts

Hamburger Hochbahn AG

Gerhard Schenk
 Christian Trahms
 Carola Thimm

Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme

Matthias Bretkopf
 Dr. Frank Steinert

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Prof. Dr. Karl-Ragmar Riemschneider
 Prof. Dr. Rasmus Rettig
 Valentin Roscher

C.2 Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	Not applicable	2. Type of report	Final report
3a. Title of report	„BEEDeL - Bewertung des Einsatzes von Elektrobussen mit dezentraler Ladeinfrastruktur in Metropolen am Beispiel der HOCHBAHN “		
3b. Title of the publication	Not applicable		
4a. Author(s) of the report	See Annex C.2	5. End of project	31.10.2016
		6. Publication date	Not applicable
4b. Author(s) of the publication	Not applicable	7. Form of publication	Not applicable
		9. Originator's report no.	Not applicable
8. Performing organization(s)	Hamburger Hochbahn AG Steinstraße 20 20095 Hamburg Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI Zeunerstraße 38, 01069 Dresden Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Berliner Tor 7 20099 Hamburg	10. Reference no.	03BV223A/B/C
		11a. No. of pages (report)	65
		11b. No. of pages (publication)	Not applicable
13. Sponsoring agency	Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure Invalidenstr. 44 10115 Berlin	12. No. of references	Not applicable
		14. No. of tables	none
		15. No. of figures	29
16. Supplementary notes: None			
17. Presented at (title, place, date)			
German National Library of Science and Technology, Welfengarten 1B, 30167 Hannover (Germany) http://www.tib.uni-hannover.de			
18. Abstract			
<p>Focus of the BEEDeL project has been the identification and assessment of potential applications and the design of deployment scenarios for electric buses with decentralized charging infrastructure in Hamburg. Based on a comprehensive data collection of more than 300,000 km of the entire line network of the Hamburger Hochbahn AG, selected driving profiles have been evaluated taking into account typical variations by simulating their requirements on the necessary charging infrastructure. It was analyzed to what extent the flexible use of electric buses is possible and to what extent and at which points charging infrastructure is necessary to achieve robust operation. The influence on today's driving and scheduling plans has been examined and the expected dimensioning of the charging points has been determined. Two parts of the line network have been evaluated and it could be shown that large parts of the bus lines can be supplied with sufficient electrical power without the need to adapt scheduling plans. This needs to be compared to the requirement to provide corresponding charging points on public roads, taking into account the required areas and provision of adequate</p>			

power supply. Operational adaptations, which can lead to increased costs and lower productivity, can largely be dispensed with. Parallel to this work, studies on the aging of various batteries such as are used in electrically operated buses have been carried out to evaluate their fatigue strength and to develop recommendations for their use.

19. Key words	battery bus, parts of the line network, decentralized charging		
20. Publisher	Not applicable	21. Price	Not applicable

C.2 Document Control Sheet

Annex

Hamburger Hochbahn AG

Gerhard Schenk
Christian Trahms
Carola Thimm

Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme

Matthias Breitkopf
Dr. Frank Steinert

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Prof. Dr. Karl-Ragmar Riemschneider
Prof. Dr. Rasmus Rettig
Valentin Roscher