

# Metastudie Elektromobilität

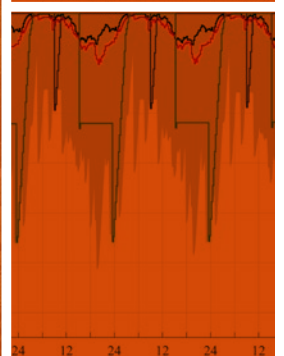
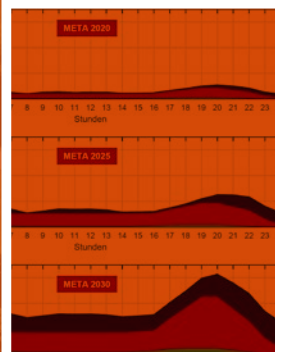
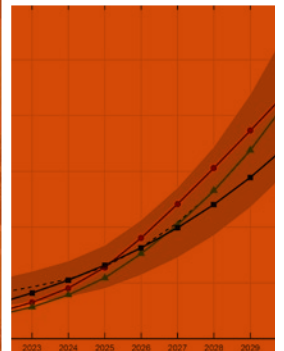
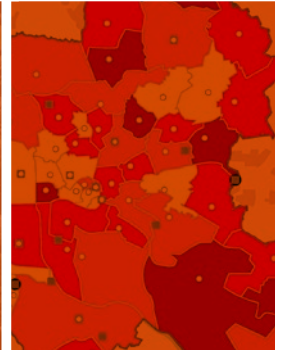
Hamburg · 9. Dezember 2016



HELMUT SCHMIDT  
UNIVERSITÄT  
Universität der Bundeswehr Hamburg

## Anforderungen an das Stromnetz durch Elektromobilität, insbesondere Elektrobusse, in Hamburg

Detlef Schulz (Hrsg.)



Projektpartner



ISBN 978-3-86818-095-4

Die Studie wurde veröffentlicht durch:  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Fakultät für Elektrotechnik  
Professur für Elektrische Energiesysteme

Adresse:  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

Telefonnummer:  
+49-6541-2757 (Detlef Schulz, *Hrsg.*)

E-Mail:  
detlef.schulz@hsu-hh.de

Bildnachweis Einband: Hintergrund Vorder- und Rückseite: Reinhard Scheiblich/HSU-HH

# **„Anforderungen an das Stromnetz durch Elektromobilität, insbesondere Elektrobusse, in Hamburg“**

Metastudie im Auftrag von Stromnetz Hamburg GmbH, Hamburger Hochbahn  
AG und Verkehrsbetriebe Hamburg Holstein GmbH

Autoren:

Markus Dietmannsberger, M.Sc.  
Marc Meyer, M.Sc.  
Marc Schumann, M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Schulz

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Professur für Elektrische Energiesysteme  
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

Tel.: +49 40 / 6541 2757

Fax.: +49 40 / 6541 3498

E-Mail: Detlef.Schulz@hsu-hh.de

Internet: <http://www.hsu-hh.de/ees>

ENDVERSION

09. Dezember 2016



# Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung und Ziel der Untersuchung.....	5
2	Entwicklung der Elektromobilität in Hamburg.....	7
2.1	Hochlaufszzenarien der Elektrofahrzeuge in Hamburg.....	7
2.2	Methodische Verteilung der Elektrofahrzeuge auf die Umspannungsgebiete.....	10
2.2.1	Private Fahrzeuge in Hamburg.....	11
2.2.2	Gewerbliche und kommunale Flotten.....	14
2.2.3	Pendler.....	16
2.2.4	Carsharing.....	18
2.2.5	Multi-Energie-Tankstellen.....	19
2.2.6	ÖPNV.....	21
2.3	Definition eines Tageslastganges.....	21
2.3.1	Private Fahrzeuge in Hamburg.....	22
2.3.2	Gewerbliche und kommunale Flotten.....	23
2.3.3	Pendler.....	24
2.3.4	Carsharing.....	25
2.3.5	Multi-Energie-Tankstellen.....	26
2.3.6	ÖPNV.....	27
2.3.7	Gesamttagelastgang.....	27
2.4	Betrachtung schnellladefähiger Fahrzeuge.....	28
2.5	Auswirkungen der Elektromobilität auf Hamburg.....	29
2.6	Auswirkungen der Elektromobilität auf die Umspannungsreserven.....	31
2.6.1	Entwicklung der zusätzlichen Lasten durch Elektromobilität.....	32
2.6.2	Entwicklung der Umspannungsreserven.....	33
3	Anschlusszenarien der Busbetriebshöfe.....	37
3.1	Modellbildung.....	37
3.1.1	Allgemeiner Ansatz.....	37
3.1.2	Modellierung von Umläufen.....	38
3.1.3	Modell eines Busses.....	38
3.1.4	Zuweisungsalgorithmus.....	38
3.1.5	Vorkonditionierung der Fahrzeuge.....	39
3.1.6	Ladung und Entladung der Busse.....	39
3.1.7	Modellierung von Wasserstofffahrzeugen und Range-Extendern.....	41
3.1.8	Sukzessives Ersetzen von Elektrobussen durch Wasserstoffbusse.....	41
3.1.9	Ermittlung des Energiebedarfs für die Wasserstoffbusse.....	41
3.1.10	Bestimmung des Gesamtenergieverbrauchs eines Busbetriebshofes.....	42

3.1.11	Hochrechnung der benötigten Anschlussleistung sowie des Gesamtenergiebedarfs auf das Jahr 2030.....	45
3.2	Ergebnisse.....	45
3.2.1	Gesamtenergiebedarf der Busbetriebshöfe.....	45
3.2.2	Tageslastgänge der Busbetriebshöfe .....	47
3.2.3	Anschlussleistung der Busbetriebshöfe .....	49
3.2.4	Vergleich mit freien Reserven der Umspannwerke .....	50
3.2.5	Ergänzende Ergebnisse zum Lade-Wirkleistungsbedarf der Busbetriebshöfe.....	51
3.2.6	Verlauf der Batterieladezustände der Busse.....	52
3.2.7	Benötigte Batteriekapazitäten der Busse.....	54
3.2.8	Potential einer Optimierung von Busumläufen .....	56
3.2.9	Auswirkungen auf die Anteile ladebedingter Stillstandszeiten von Bussen .....	57
3.2.10	Einsatz von Wasserstoffbussen .....	61
4	Zusammenfassung & Handlungsempfehlungen .....	65
4.1	Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen Teil 1 .....	65
4.2	Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen Teil 2 .....	67
4.2.1	Handlungsempfehlungen VHH .....	68
4.2.2	Handlungsempfehlungen HOCHBAHN .....	68
4.2.3	Handlungsempfehlungen Stromnetz Hamburg.....	69
5	Literaturverzeichnis.....	71
6	Anhang.....	75
6.1	Stadtteilkarten zur Bestimmung der Verteilung der privaten Fahrzeuge .....	75
6.2	UW-Gebietseinteilung im Sektor Carsharing .....	76
6.3	Gesamttageslastgänge für Hamburg.....	77
6.4	Entwicklung der zusätzlichen Lasten durch Elektromobilität .....	81
6.5	Entwicklung der Umspannwerksreserven.....	85
6.6	Umspannwerksreserven.....	89
6.7	Lade-Wirkleistungskurven der Busbetriebshöfe .....	92
6.8	Verlauf der Entladezustände .....	95
6.9	Notwendige Batteriespeichergößen .....	100
6.10	Busverfügbarkeit .....	106
6.11	Entwicklung der Anschlussleistung nach Anteil Wasserstoffbusse.....	116
6.12	Entwicklung der Lade-Wirkleistungskurven je nach Anteil Wasserstoffbusse .....	120

# 1 Aufgabenstellung und Ziel der Untersuchung

Mit der politisch geförderten und geforderten Umstellung der Fahrzeugantriebe auf emissionsfreie Antriebe im Straßenverkehr zur Reduzierung der Schadstoffemissionen rücken die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge zunehmend in den Fokus der Automobilhersteller. Ein wie gewünscht wachsender Marktanteil an Elektrofahrzeugen fordert dementsprechend künftig die elektrischen Netze, um die Leistung zum Aufladen der Batterien zu übertragen. In der vorliegenden Metastudie sollen die Auswirkungen einer verstärkten Durchdringung von Elektrofahrzeugen auf das Hamburger Stromnetz (die Auslastung der Umspannwerke) untersucht werden. Hierbei liegt ein zusätzlicher Fokus bei den Unternehmen Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN) und Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH (VHH) auf der Umstellung der Bus-Flotten auf Elektrobusse.

In dieser Studie erfolgt keine Einzelfalluntersuchung von Anschlüssen an einzelnen Stellen im Mittel- bzw. Niederspannungsnetz. Abbildung 1.1 zeigt grau hinterlegt den Untersuchungsbereich.

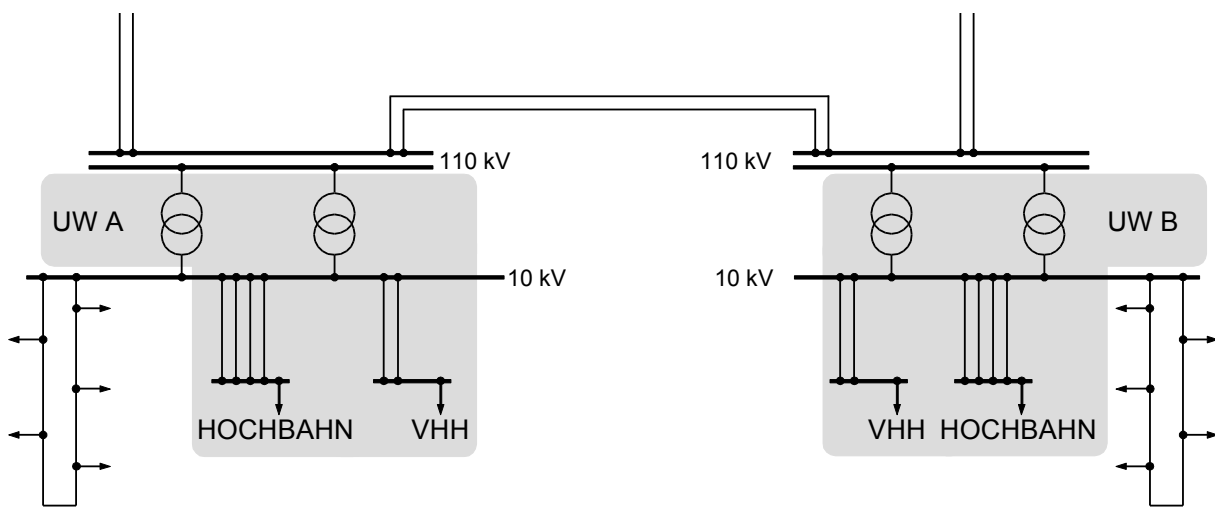


Abbildung 1.1: Veranschaulichung der Modellabgrenzung. Der Untersuchungsbereich dieser Studie ist grau hinterlegt.

Innerhalb des ersten Teils dieser Metastudie erfolgt eine Entwicklungsabschätzung der Elektromobilität in Hamburg (Netz der Stromnetz Hamburg GmbH – SNH). Abbildung 1.2 zeigt das Hamburger Stromnetz auf der Mittelspannungsebene mitsamt der Unterteilung in die einzelnen Umspannwerksgebiete (UW-Gebiete). Ein UW-Gebiet ist definiert als der Versorgungsbereich eines 110/10- bzw. 25/10-kV-Umspannwerks. Des Weiteren sind hier die bisherigen Reserven der Umspannwerke dargestellt.

Ziel des ersten Teils ist die Ermittlung künftiger Anforderungen an die Netzentwicklung durch die Umstellung des Busverkehrs (ÖPNV), sowie der Gewerbe- und Privatfahrzeuge in der Elektromobilität für das vorstehend definierte Gebiet. Zunächst wird eine Betrachtung für ganz Hamburg durchgeführt. Anschließend werden für eine detailliertere Analyse die Auswirkungen der Elektromobilität in den einzelnen Umspannwerksgebieten des Hamburger Stromnetzes untersucht. Hierfür müssen die Entwicklungen der einzelnen Bereiche in den verschiedenen UW-Gebieten betrachtet werden. Für die einzelnen Bereiche werden Entwicklungskorridore für die Jahre 2020, 2025 und 2030 jeweils mit einer Auslegung auf die minimalen, mittleren und maximalen Anforderungen aufgestellt. Die ermittelten Leistungsbedarfe in den UW-Gebieten werden abschließend mit den heute zur Verfügung stehenden Umspannwerksreserven ( $\hat{=}$  der freien Transformatorkapazität) verglichen und eventuelle Engpässe identifiziert. Weiterhin werden die Auswirkungen von schnellladefähigen Fahrzeugen auf das Netz untersucht.

Der zweite Teil der Metastudie beinhaltet eine Analyse der Auswirkungen auf die Energieversorgungsnetze und die Sicherstellung des Busbetriebs bei einer Umstellung der Bus-Flotten auf Elektrobusse in Hamburg.

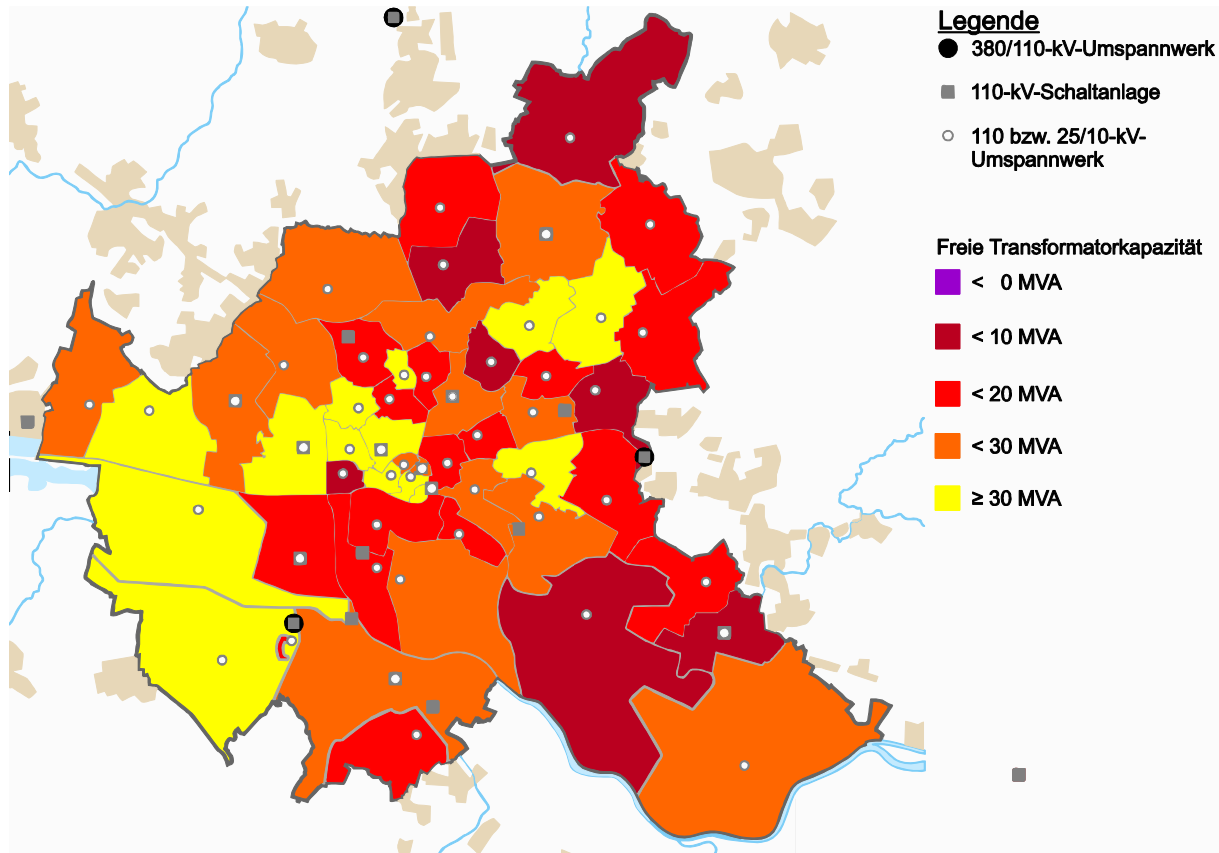


Abbildung 1.2: Übersicht der Hamburger Umspannungsgebiete auf der Mittelspannungsebene nach [1], Stand 2015

Zunächst erfolgt eine Ableitung benötigter Anschlusskapazitäten der Busbetriebshöfe der HOCHBAHN sowie der VHH für die Umstellung auf Elektrobusse. Anschließend wird das Einsparpotenzial der Anschlusskapazitäten durch die Nutzung von Wasserstoff-Bussen ermittelt. Hierbei wird sowohl vor Ort selbst erzeugter als auch angelieferter Wasserstoff berücksichtigt. Weiterhin werden die Batteriekapazitäten und Ladeleistungen bewertet und die Auswirkungen von Elektrobusen auf die Verfügbarkeit auf dem Busbetriebshof untersucht. Weiterhin werden die Gesamtenergiebedarfe für die Hamburger Busbetriebshöfe abgeschätzt.

Abschließend werden Handlungsempfehlungen, z. B. für den künftigen Netzausbau, aus den Ergebnissen der beiden Studienteile ausgearbeitet.



## 2 Entwicklung der Elektromobilität in Hamburg

Im Kapitel 2 werden die zukünftigen Anforderungen an die Netzentwicklung durch die Elektromobilität ermittelt. Nach einer Plausibilisierung des verwendeten Hochlaufszenarios werden die genutzten Verteilungsschlüssel und Tageslastgänge für die einzelnen Sektoren vorgestellt. Danach wird der Einfluss schnellladefähiger Fahrzeuge in einem Fallbeispiel untersucht. Abschließend werden die Ergebnisse der Tageslastgänge für ganz Hamburg und für die einzelnen UW-Gebiete präsentiert, sowie die sich damit ergebende Entwicklung der UW-Reserven aufgezeigt.

### 2.1 Hochlaufszenarios der Elektrofahrzeuge in Hamburg

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Definition eines Hochlaufszenarios für die Anzahl an Elektrofahrzeugen (EFZ) in Hamburg bis zum Jahr 2030. Als Grundlage hierfür dienen mit der Hamburger Behörde abgestimmte Zahlen, im Folgenden als Szenario „META“ bezeichnet, welche es zunächst zu plausibilisieren gilt. Der Elektrofahrzeughochlauf im Szenario „META“, sowie ein Min./Max.-Korridor von  $\pm 30\%$  ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Zur Plausibilisierung der Werte aus dem Szenario „META“ und dem gewählten Hochlaufkorridor wurde eine eigene Recherche zu Prognosen für den Elektrofahrzeughochlauf in Hamburg, sowie in Deutschland im Allgemeinen, durchgeführt. Folgende Quellen wurden hierbei betrachtet:

- Studie „Elektromobilität in Kommunen“, NOW GmbH, 2014 [2]
- Studie „Mit Elektrifizierung und Verbrennungsmotoren auf dem Weg in die Zukunft der Mobilität“, PriceWaterhouseCoopers Autofacts, 2016 [3]
- Studie: „Management des Übergangs in die Elektromobilität“, Kienbaum Management Consultants GmbH und Universität Duisburg-Essen, 2016 [4]
- Pressemitteilung von Bloomberg, 2016 [5]
- Aussagen der Volkswagen AG im Rahmen von „TOGETHER - Strategie 2025“ [6], [7]
- Aussagen des Vorstandschefs der Daimler AG, 2016 [8]

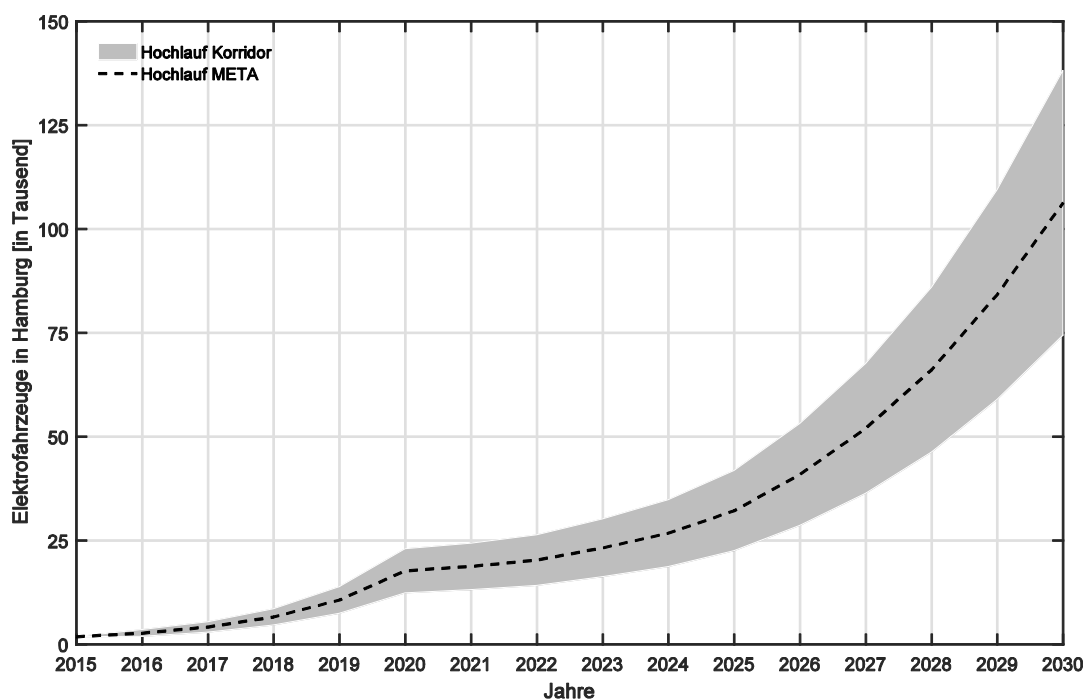


Abbildung 2.1: HochlaufszENARIO „META“ mit  $\pm 30\%$  Korridor

Tabelle 2.1 stellt dar, welche Ergebnisse bzw. Aussagen den einzelnen Quellen entnommen werden konnten. Wie aufgezeigt, konnten nur der Studie „Elektromobilität in Kommunen“ absolute Fahrzeugzahlen entnommen werden. Die restlichen Quellen dagegen geben Prognosen zu den Marktanteilen von EFZ auf dem europäischen bzw. Weltmarkt an. Um diese mit dem Szenario „META“ vergleichen zu können, wurde aus den Marktanteilangaben je ein HochlaufszENARIO für Hamburg modelliert (siehe Abbildung 2.3). Abbildung 2.2 zeigt die Methodik dieser Modellierung.

Als Datenbasis für die Entwicklung der Hochlaufszenarios dienen die Angaben zu den Marktanteilen von EFZ in 2020, 2025 und 2030 aus den in Tabelle 2.1 angegebenen Quellen. In [2] werden absolute

Tabelle 2.1: Ergebnisdarstellung aus der Literaturrecherche zum E-Fahrzeughochlauf

Quelle	Art der Angaben	Zeitangaben	Geltungsbereich
NOW GmbH [2]	Absolute Zahlen	2020, 2030	Hamburg
PwC Autofacts [3]	Marktanteile	2020, 2025, 2030	Europa
Kienbaum [4]	Marktanteile	2020, 2030	Europa
Bloomberg [5]	Marktanteile	2030, 2040	Weltweit
Volkswagen AG [6], [7]	Marktanteile	2025, 2030	Weltweit
Daimler AG [8]	Marktanteile	2025	Weltweit

Fahrzeugzahlen für Hamburg angegeben. Diese sind auf Basis der Ziele der Bundesregierung (1 Mio. EFZ in 2020 bzw. 6 Mio. EFZ in 2030, vgl. [9]) über die Autodichte auf Hamburg heruntergebrochen. Für 2020 werden hier 17.020 EFZ und für 2030 102.118 EFZ in Hamburg prognostiziert [2]. Die Werte weisen eine sehr hohe Übereinstimmung mit den Werten des Szenarios „META“ auf (vgl. Abbildung 2.1). Die Vermutung liegt nahe, dass diese hohe Übereinstimmung daher rührt, dass beiden Prognosen ähnliche Ausgangsdaten zugrunde liegen (Ziele der Bundesregierung). Daher galt es zunächst weitere Quellen ausfindig zu machen, vor allem solche, die aus der Wirtschaft, insbesondere dem Automobilsektor stammen und in denen andere Grunddaten als Basis genutzt werden. Die hierzu

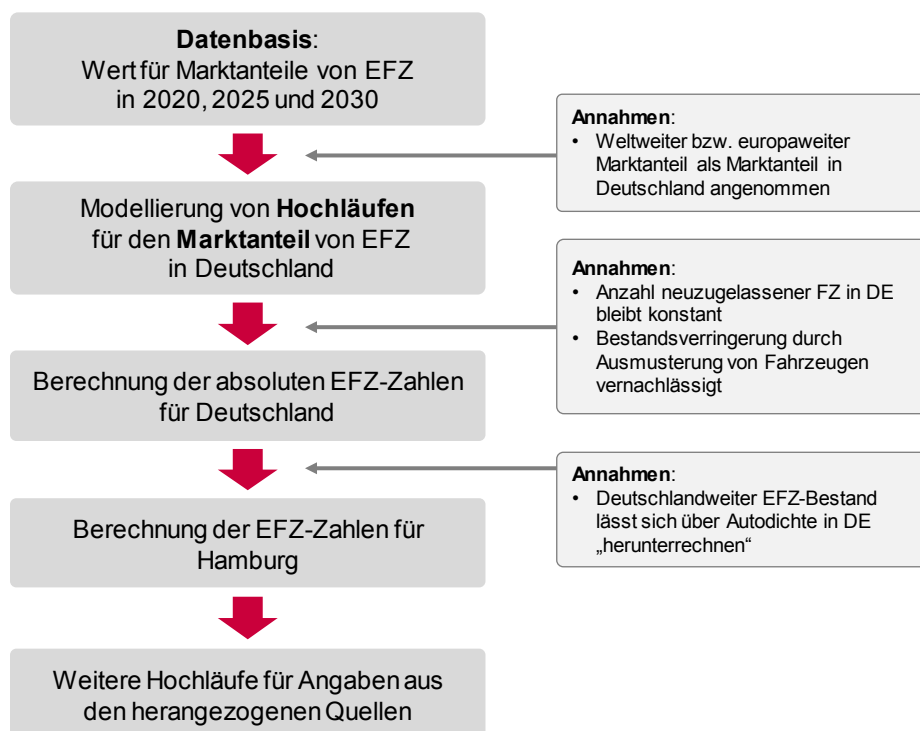


Abbildung 2.2: Methode für die Modellierung der EFZ-Hochläufe für Hamburg

gefundenen Quellen sind ebenfalls in Tabelle 2.1 aufgelistet. Diese geben allerdings, anstelle von absoluten Fahrzeugzahlen, Prognosen zu der Entwicklung des Marktanteils von EFZ in Europa bzw. auf dem Weltmarkt an. Den Quellen konnten zudem nur Marktanteilangaben für die Jahre 2020, 2025 und 2030 entnommen werden. Die dazwischenliegende Entwicklung galt es zu modellieren. Welche Quelle zu welchen Zeitpunkten Angaben macht, kann Tabelle 2.1 bzw. Tabelle 2.2 entnommen werden.

Tabelle 2.2: Marktanteilangaben nach [3], [4], [5], [6], [7] und [8]

Quelle	Marktanteilangaben [%]			Markt
	2020	2025	2030	
<b>PwC Autofacts [3]</b>	3,6	20,6	48,8	Europa
<b>Kienbaum [4]</b>	7,0	-	31,0	Europa
<b>Bloomberg [5]</b>	-	-	20,0	Weltweit
<b>Volkswagen AG [6], [7]</b>	-	25,0	33,3	Weltweit
<b>Daimler AG [8]</b>	-	20,0	-	Weltweit

Aus den einzelnen Angaben für 2020, 2025 bzw. 2030 wurden zunächst Hochlaufsznarien für die Entwicklung der Marktanteile der EFZ in Deutschland ermittelt. Hierfür wurde angenommen, dass die Angaben zu den Marktanteilen von EFZ für den europäischen bzw. weltweiten Markt ungefähr dem Marktanteil von EFZ auf dem deutschen Markt entsprechen (vgl. Abbildung 2.2). Abbildung 2.4 zeigt die modellierten Markthochläufe für die jeweiligen Quellen aus Tabelle 2.2. Aus den Angaben aus [5] wurde kein Markthochlauf modelliert, da hier nur Werte für 2030 bzw. 2040 angegeben sind und der Wert für 2030 deutlich unter den anderen Angaben liegt.

Die Interpolation zwischen den angegebenen Jahreszahlen erfolgte mit Hilfe von häufig für Wachstumsprozesse verwendeten Exponentialfunktionen. Beispielhaft soll im Folgenden kurz erläutert werden, wie dies im Szenario „VW“ umgesetzt wurde. Zwischen den Marktanteilen 2015 (heute) und 2025 wurde mit folgender e-Funktion interpoliert:

$$m_{VW}(Jahr) = m(2015) \cdot e^{0,353 \cdot Jahr} \quad (1)$$

Hierbei ist  $m_{VW}(Jahr)$  der Marktanteil im Szenario „VW“ im jeweiligen Jahr und  $m(2015)$  der heutige Marktanteil von EFZ in Deutschland. Aufgrund des deutlich geringeren Marktanteils in 2030 im Szenario „VW“ wurde für die Jahre 2025 bis 2030 logarithmisch interpoliert. Daraus ergibt sich folgende Funktion für den Marktanteil im Szenario „VW“:

$$m_{VW}(Jahr) = \begin{cases} m(2015) \cdot e^{0,353 \cdot Jahr} & , \text{für } 2015 < Jahr \leq 2025 \\ 3,338 \cdot \ln(Jahr - 2024,551) + 27,673 & , \text{für } 2025 < Jahr \leq 2030 \end{cases} \quad (2)$$

Abbildung 2.3 zeigt die Verläufe für den Marktanteil in den Szenarios „VW“, „Daimler“, „PwC“ und „Kienbaum“, welche aus den entsprechenden Quellen modelliert wurden.

Für die Bestimmung der absoluten Anzahl an EFZ in den oben dargestellten Szenarien wurde angenommen, dass die Anzahl an jährlich zugelassenen Fahrzeugen in Deutschland konstant bleibt. Für die jährlichen Neuzulassungen wurde hier ein Wert von 3,21 Mio. Fahrzeugen angenommen, was dem Stand von 2015 entspricht (Quelle: KBA). Hieraus wurde über den Marktanteil für das jeweilige Jahr die Anzahl an neuzugelassenen EFZ in Deutschland bestimmt:

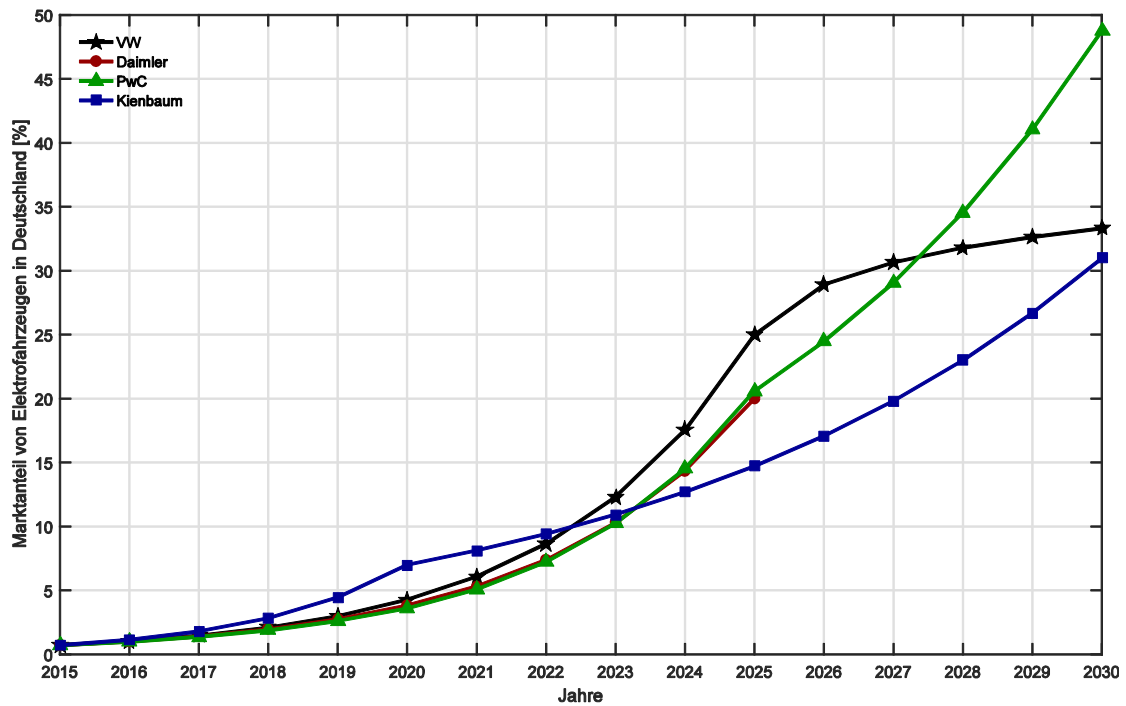


Abbildung 2.3: Modellerte Hochläufe der Marktanteile von Elektrofahrzeugen in Deutschland nach den Angaben aus den in Tabelle 2.1 angegebenen Quellen.

$$\Delta n_{EFZ}(\text{Jahr}) = n_{\text{Neuzulassungen}} \cdot m(\text{Jahr}) \quad (3)$$

Um aus der jährlich zugelassenen EFZ-Anzahl den EFZ-Bestand in einem Jahr zu bestimmen, wurde die Ausmusterung von bestehenden Fahrzeugen vernachlässigt. Die Anzahl von Kurzzulassungen pro Jahr wurde mit 3 % abgeschätzt, was sich nur auf die konstante Anzahl an Neuzulassungen auswirkt. Die absolute Anzahl an EFZ wird folglich als Integral der Markthochlaufkurven aus Abbildung 2.3 bestimmt:

$$n_{EFZ}(\text{Jahr}) = \sum_{k=2015}^{\text{Jahr}} \Delta n_{EFZ}(k) \quad (4)$$

Hierbei ist  $n_{EFZ}(\text{Jahr})$  die Anzahl der EFZ in Deutschland im jeweiligen Jahr. Die hieraus ermittelten EFZ-Hochläufe für Deutschland wurden über die Autodichte auf Hamburg heruntergebrochen (vgl. Abbildung 2.2). Die Ergebnisse der Szenarien, die sich aus den oben aufgeführten Quellen ergeben, sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

Die Ergebnisse der Hochlaufmodellierung zeigen, dass nach der hier vorgestellten Methodik die Prognosen für den EFZ-Hochlauf aus den verwendeten Quellen, innerhalb des oben definierten Hochlaufkorridors für die EFZ in Hamburg liegen. Dementsprechend wurde das Szenario „META“, sowie die Szenarien „MIN“ und „MAX“ als minimale und maximale Grenzen des EFZ-Hochlaufs aus Abbildung 2.1 für die weiteren Berechnungen verwendet.

## 2.2 Methodische Verteilung der Elektrofahrzeuge auf die Umspannungsgebiete

Für die Analyse der Auswirkungen der Elektromobilität auf die einzelnen UW-Gebiete werden die in Kapitel 2.1 vorgestellten Elektrofahrzeug-Hochläufe über Hamburg verteilt. Hierbei werden für die verschiedenen Sektoren unterschiedliche Methodiken genutzt. Prinzipiell erfolgt die Verteilung nach dem in Abbildung 2.5 gezeigten Schema.

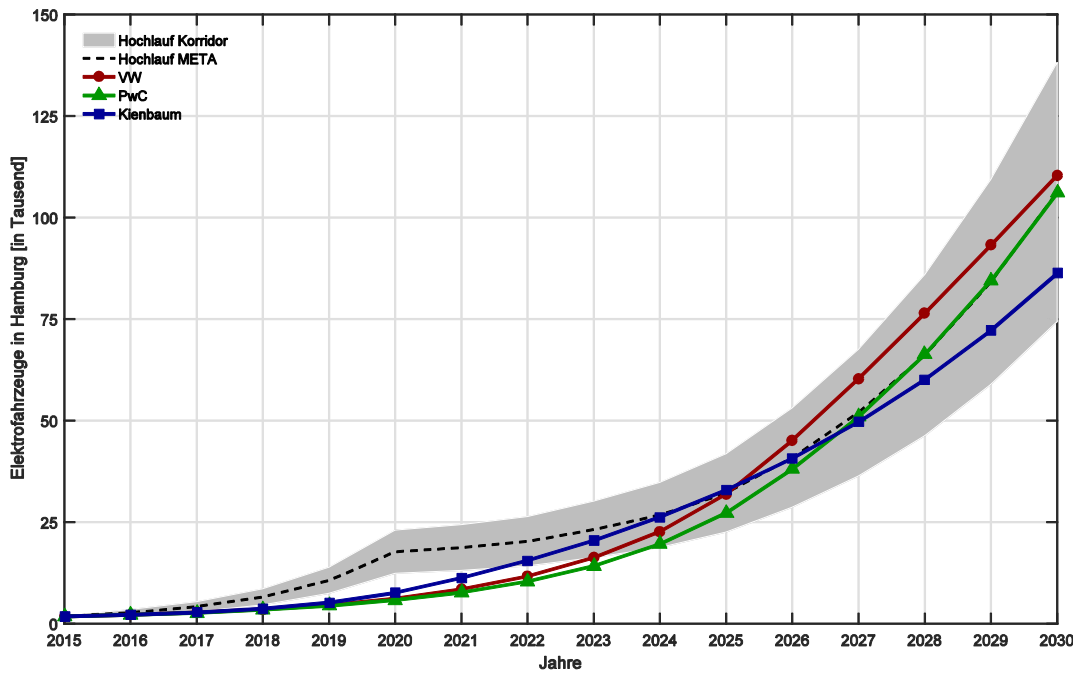


Abbildung 2.4: Hochlaufszenerien für die Elektromobilität in HH

Die vorhandenen Daten, z. B. zum Elektrofahrzeug-Hochlauf oder über heute gemeldete Fahrzeuge, werden über einen sektorspezifischen Verteilungsschlüssel zunächst auf die UW-Gebiete aufgeteilt. Anschließend wird durch Nutzung des in Kapitel 2.3 definierten sektorspezifischen Tageslastgangs ein Lastgang für jedes UW-Gebiet erzeugt. Durch Addition der Lastgänge aller Sektoren wird die zusätzliche Last des Umspannwerks durch die Elektromobilität bestimmt. Im Folgenden werden die Methodiken für die einzelnen Sektoren genauer erläutert.

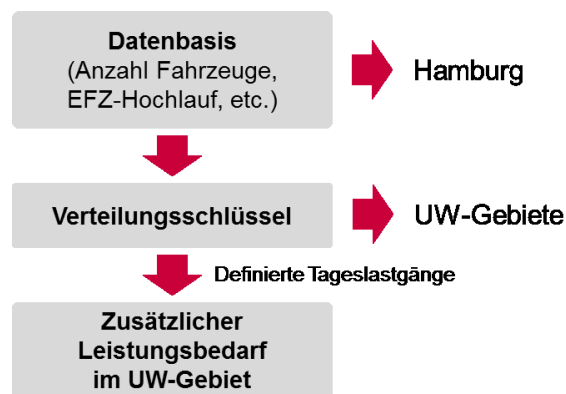


Abbildung 2.5: Allgemeine Methodik zur Bestimmung der zusätzlichen Lasten durch E-Mobilität in den UW-Gebieten

### 2.2.1 Private Fahrzeuge in Hamburg

Die Verteilung der in Hamburg gemeldeten privaten Elektrofahrzeuge auf die UW-Gebiete wird in der Abbildung 2.6 dargestellt.

Als Datengrundlage dient einerseits der mit den Hamburger Behörden abgestimmte Hochlauf für private Elektrofahrzeuge in Hamburg, andererseits die Anzahl der gemeldeten privaten Fahrzeuge in den Hamburger Stadtgebieten im Januar 2015 [10]. Die Verteilung der privaten Elektrofahrzeuge über Hamburg kann nicht als gleichverteilt angesehen werden. Insbesondere in den nächsten Jahren wird die persönliche Kaufentscheidung eines Elektrofahrzeugs durch Faktoren wie Fahrzeugpreis, das spezifische Einkommen und die Möglichkeit des Nachladens zu Hause beeinflusst werden. Deshalb werden die Hamburger Stadtteile sowohl auf das durchschnittliche Einkommen [11] hin untersucht,

als auch die Wohnstruktur [12] analysiert, da ein privater Abstellplatz für das eigene Fahrzeug (z. B. eine Garage) eine bessere Möglichkeit zum Nachladen der Fahrzeuge über Nacht bietet, als das Parken am Straßenrand. Dabei werden die etwa 100 Stadtteile Hamburgs vom Statistischen Amt jeweils zu gleichen Teilen in fünf Bereiche sortiert.

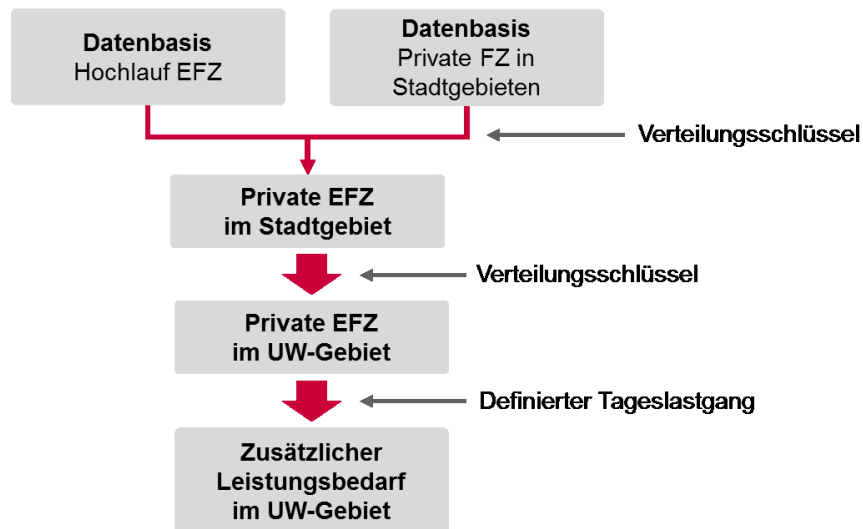


Abbildung 2.6: Methodik zur Verteilung der privaten Elektrofahrzeuge in Hamburg Wohnender

Für eine Verteilung der privaten Elektrofahrzeuge werden die Stadtteilfeaktoren „Einkommen“ und „Wohnungsstruktur“ mit 60 % zu 40 % gewichtet, da in den nächsten Jahren der Faktor „Einkommen“ als bedeutender eingestuft wird. Daraus resultierend werden die Stadtteile in fünf neue Bereiche eingeteilt. Abbildung 2.7 zeigt die Einteilung der Stadtteile in die definierten Bereiche zur Bestimmung des Elektrofahrzeug-Anteils im jeweiligen Stadtgebiet.

Diese Bereiche erhalten einen jeweiligen Anteil des Hamburger Hochlaufs privater Elektrofahrzeuge. In der Tabelle 2.3 sind die Bereiche und die dazugehörigen Anteile am Hochlauf dargestellt.

Tabelle 2.3: Bereichsanteil des Elektrofahrzeug-Hochlaufs

Bereich	Anteil
Sehr hohe Elektrifizierung	55 %
Hohe Elektrifizierung	25 %
Mittlere Elektrifizierung	10 %
Niedrige Elektrifizierung	7 %
Sehr niedrige Elektrifizierung	3 %

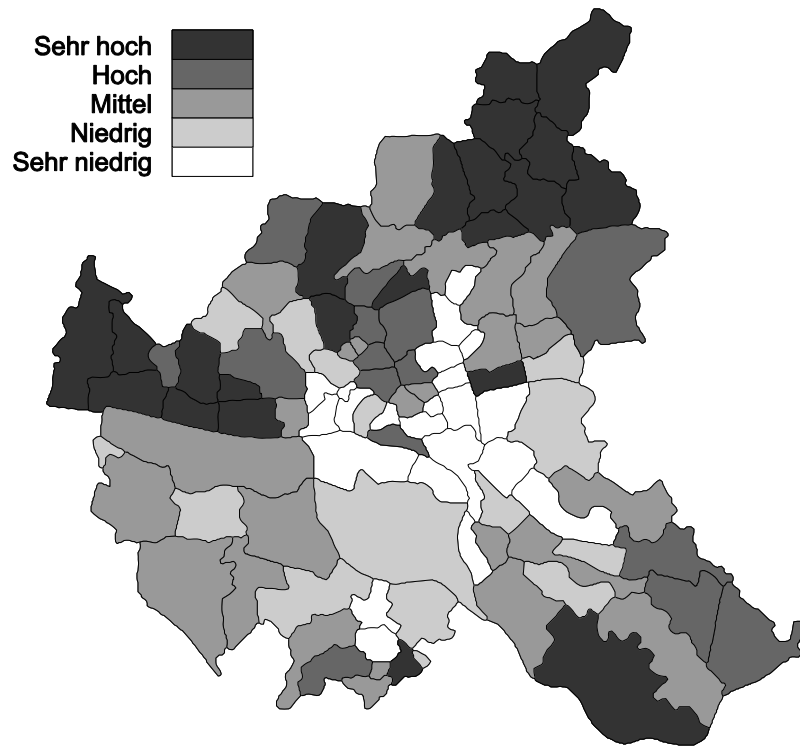


Abbildung 2.7: Stadtgebietseinteilung nach den definierten Bereichen zur Verteilung der privaten Elektrofahrzeuge

Der Stadtteilanteil am Bereichsanteil des Elektrofahrzeug-Hochlaufs ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen gemeldeten Fahrzeugen im Stadtgebiet zu insgesamt gemeldeten Fahrzeugen im jeweiligen Bereich. Die absolute Anzahl an Elektrofahrzeugen im Stadtgebiet berechnet sich nach der folgenden Formel:

$$n_{EFZ, \text{ Stadtgebiet}} = \text{Hochlauf} \cdot \text{Bereichsanteil} \cdot \frac{n_{FZ, \text{ Stadtgebiet}}}{n_{FZ, \text{ Bereich}}} \quad (5)$$

Nach der Verteilung der Elektrofahrzeuge auf die Stadtgebiete werden die Fahrzeuge auf die UW-Gebiete verteilt. Der hierfür genutzte Verteilungsschlüssel verwendet das Verhältnis der installierten Transformatorleistung zwischen Stadtgebiet und UW-Gebieten. Es wird angenommen, dass eine Erhöhung der Leistung in dem Stadtgebiet „A“ sich anteilig auf die UW-Gebiete „X“, „Y“ und „Z“ entsprechend dem Verhältnis der installierten Transformatorleistung auswirkt. Damit ergibt sich für die privaten Elektrofahrzeuge die in Abbildung 2.8 dargestellte Verteilung innerhalb Hamburgs.

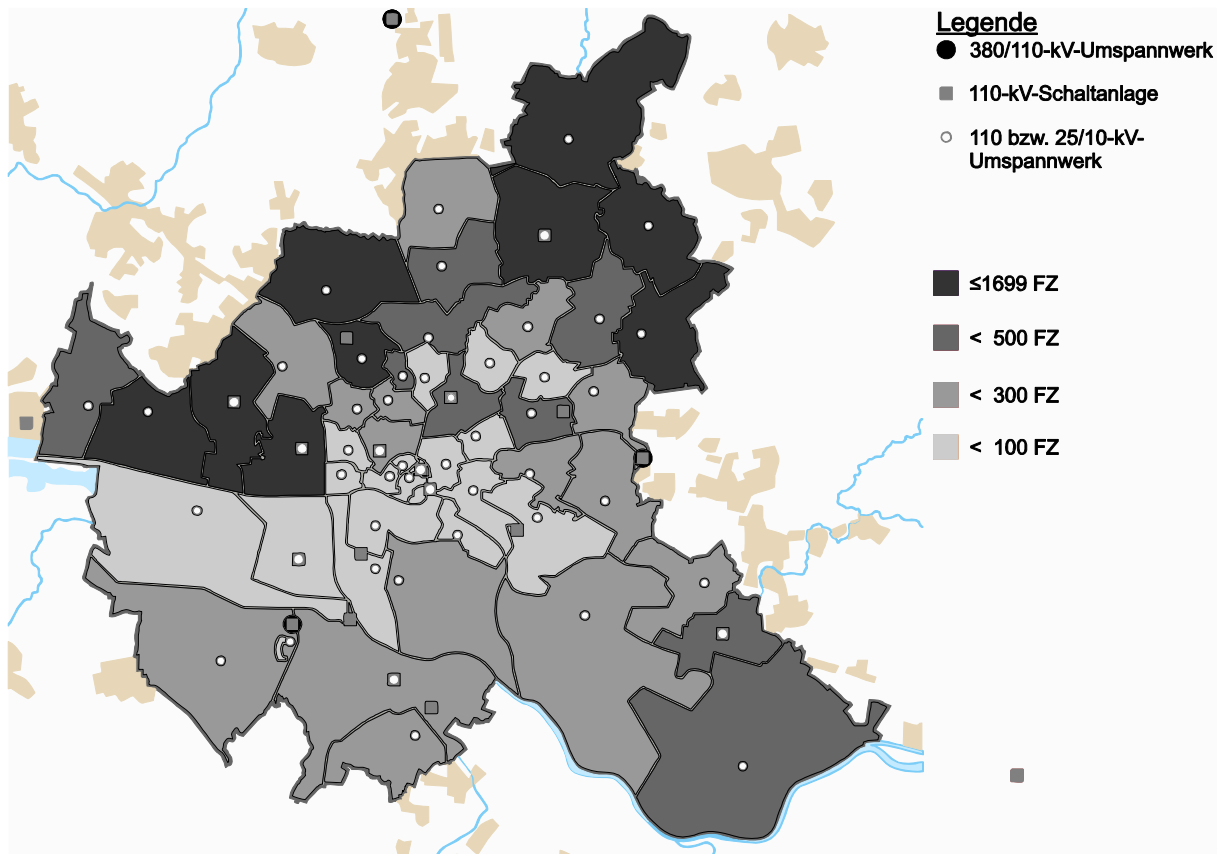


Abbildung 2.8: Verteilung der privaten Elektrofahrzeuge auf UW-Gebiete, „META“ 2030

### 2.2.2 Gewerbliche und kommunale Flotten

Den gewerblichen Flotten wird in den nächsten Jahren eine besondere Rolle zuteil. Durch die zumeist bekannten, täglichen Routenlängen, der relativ hohen Jahres-Fahrleistung und den steuerlichen Entlastungen bei der Anschaffung können Elektrofahrzeuge in diesem Sektor schon heute wirtschaftlich sein [13] [14]. Insbesondere die geringeren Betriebskosten eines Elektrofahrzeugs wirken hier positiv und können einen Kauf attraktiv gestalten. Deshalb wird der Markthochlauf der Elektrofahrzeuge in den nächsten Jahren insbesondere durch den Gewerbesektor beschleunigt werden.

Die kommunalen Flotten besitzen schon heute eine Vorreiterrolle bei der Umstellung der Fahrzeugflotten auf emissionslose Antriebe. Bei der Beschaffung von Fahrzeugen für öffentliche Einrichtungen werden in Hamburg nur noch emissionslose Fahrzeuge bestellt, solange kein besonderer Grund gegen die Anschaffung eines solchen Fahrzeugs spricht (z. B. Polizei, Notfalldienst).

Abbildung 2.9 zeigt die Methodik für die Verteilung der gewerblichen und kommunalen Flotten innerhalb Hamburgs. Als Datenbasis dient, neben dem Elektrofahrzeug-Hochlauf, die in den Postleitzahlen-Gebieten gemeldeten nichtprivaten Fahrzeuge des Landesbetrieb Verkehr Hamburgs.



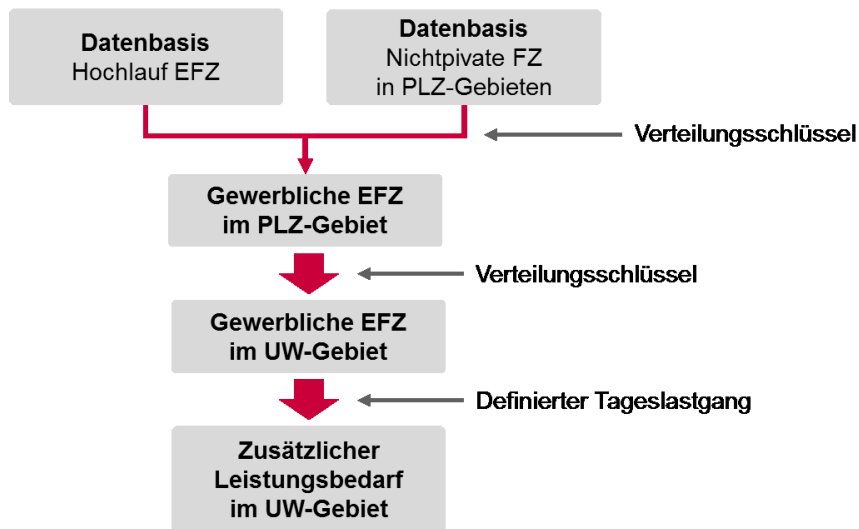


Abbildung 2.9: Methodik zur Verteilung der gewerblichen und kommunalen Elektrofahrzeuge

Die Elektrifizierung dieses Sektors wird als gleichverteilt in Hamburg angenommen, da aus den vorhandenen Daten nicht ersichtlich ist, wo welche Unternehmen sitzen und welche Unternehmen zuerst eine Umstellung der Fahrzeugantriebe anstreben. Deshalb werden die Verhältnisse der gemeldeten nichtprivaten Fahrzeuge im jeweiligen PLZ-Gebiet zur insgesamt in Hamburg gemeldeten Anzahl der nichtprivaten Fahrzeuge bestimmt. Die Anzahl der Elektrofahrzeuge im PLZ-Gebiet wird mithilfe des Hochlaufs für Hamburg und den Fahrzeug-Verhältnissen nach folgender Formel bestimmt:

$$n_{EFZ, PLZ} = Hochlauf \cdot \frac{n_{nichtprivate FZ, PLZ}}{n_{nichtprivate FZ, Hamburg}} \quad (6)$$

Mit dieser Methodik wird nicht berücksichtigt, dass die in einem PLZ-Gebiet gemeldeten Fahrzeuge nicht zwingend in diesem Gebiet im Einsatz sind. Insbesondere Unternehmen mit größeren Flotten melden oftmals ihre Fahrzeuge auf den Unternehmenssitz an, obwohl die Fahrzeuge in ganz Deutschland eingesetzt werden. Hiermit ergibt sich eventuell ein Fehler in der nach (6) bestimmten Verteilung der Elektrofahrzeuge auf die PLZ-Gebiete. Dieser wird in der vorliegenden Metastudie toleriert, da eine detaillierte Datenaufnahme der tatsächlich in den PLZ-Gebieten vorhandenen gewerblichen und kommunalen Flotten mit einem deutlich höheren Zeitaufwand verbunden ist.

Für die Verteilung der Elektrofahrzeuge auf die UW-Gebiete wird ein Verteilungsschlüssel ähnlich dem im privaten Sektor genutzt. Hierbei wird jedoch das Verhältnis der installierten Transformatorleistung zwischen PLZ-Gebiet und UW-Gebiet verwendet. Eine Erhöhung der Leistung in einem PLZ-Gebiet „A“ wirkt sich dementsprechend anteilig auf die UW-Gebiete „X“ und „Y“ nach dem Verhältnis der installierten Transformatorleistung aus. In der Abbildung 2.10 wird die resultierende Verteilung der gewerblichen und kommunalen Elektrofahrzeuge innerhalb Hamburgs abgebildet.

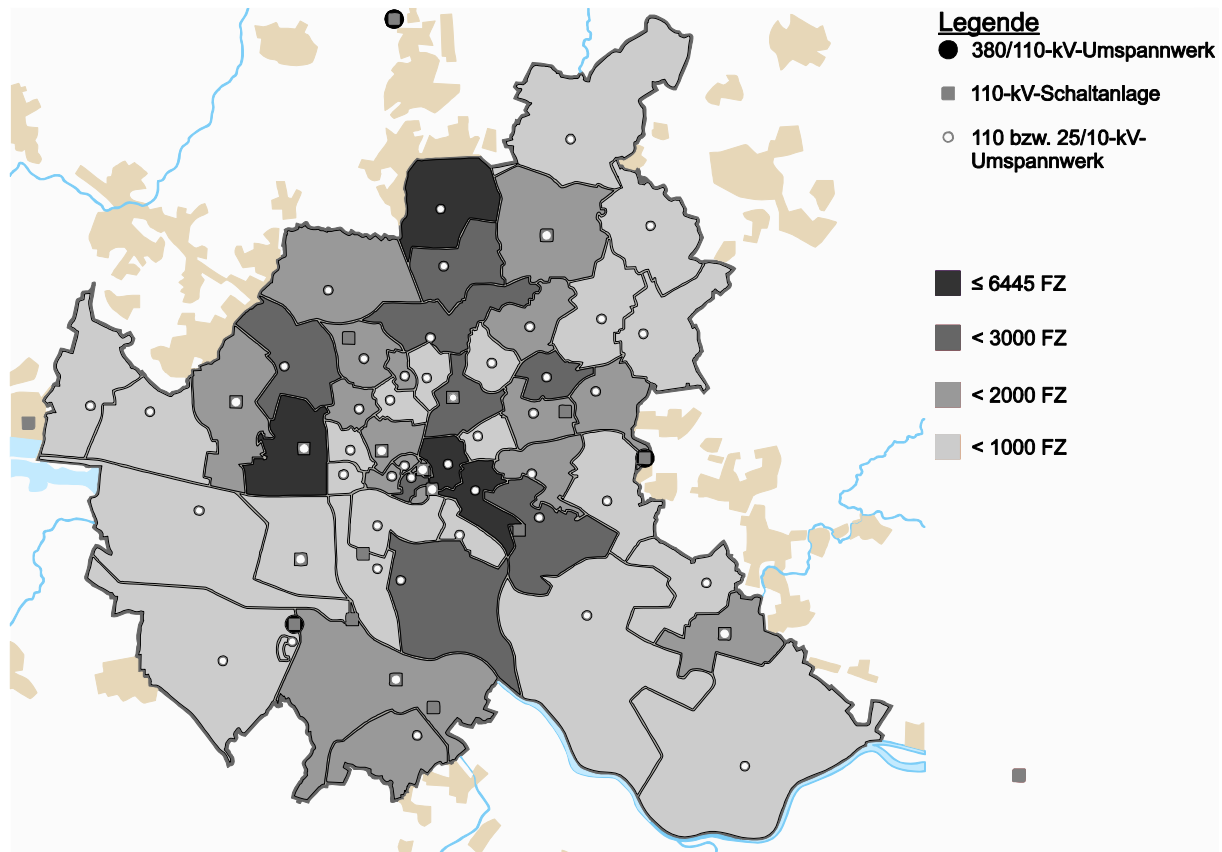


Abbildung 2.10: Verteilung der gewerblichen und kommunalen Elektrofahrzeug-Flotten auf UW-Gebiete, „META“ 2030

### 2.2.3 Pendler

Unter „Pendler“ werden in der vorliegenden Metastudie von außerhalb Hamburgs zur Arbeit nach Hamburg fahrende Berufstätige verstanden. Damit werden in Hamburg Wohnende, die mit dem Fahrzeug zur Arbeit innerhalb Hamburgs fahren, ausgeschlossen. Es wird davon ausgegangen, dass in Hamburg Wohnende nicht nach der kurzen Strecke zur Arbeit das Fahrzeug wieder aufladen müssen und das Fahrzeug zu Hause geladen werden kann. Das Laden von privaten Fahrzeugen am Arbeitsort ist deshalb ausschließlich den von außerhalb Hamburgs anfahrenen Pendlern vorbehalten.

Das Pendlerverhalten der Stadt Hamburg wird ausführlich in [15] untersucht. Laut [15] sind im Jahr 2012 ca. 321.000 Personen nach Hamburg gependelt, wobei ca. 40 % ( $\hat{=}$  128.400 Pendler) selbst mit einem PKW zur Arbeit gefahren sind. Des Weiteren legen nach [15], unabhängig vom Transportmittel, ca. 200.000 Pendler eine Strecke von weniger als 50 km, weitere 50.000 Pendler eine Strecke von weniger als 100 km täglich zur Arbeit zurück. Deshalb wird in dieser Studie angenommen, dass alle 128.400 PKW-Selbstfahrer eine Strecke von weniger als 100 km zur Arbeit zurücklegen. Weiterhin wird vereinfachend die Anzahl der Pendler über die Zeit als konstant angenommen, obwohl in den letzten Jahren ein Anstieg der Pendlerzahlen zu beobachten ist. Dies wird vor allem damit begründet, dass die Elektrifizierungsrate, wie folgend erklärt, als sehr gering angenommen wird. Zudem zeigt die Definition des Tageslastgangs in Kapitel 2.3 ein entgegengesetztes Ladeverhalten im Vergleich zu den meisten Sektoren. Dementsprechend wirken sie sich nicht auf die in den Abendstunden auftretende Spitzenlast aus.

Der Elektrofahrzeug-Hochlauf der Pendler wird mit der Elektrifizierungsrate der privaten Fahrzeuge der in Hamburg Wohnenden bestimmt. Die Elektrifizierungsrate entspricht dem Verhältnis der Elektrofahrzeuge in einem Jahr zu den insgesamt vorhandenen Fahrzeugen. Somit orientiert sich der Hochlauf der Pendler an dem Hochlauf der privaten Elektrofahrzeuge. Damit ergibt sich eine

Elektrifizierungsrate im Jahr 2020 von 0,4 %, im Jahr 2025 von 0,7 % und im Jahr 2030 von 2,5 % nach dem Szenario „META“.

In der Abbildung 2.11 wird die Methodik zur Verteilung der Pendler in Hamburg dargestellt.

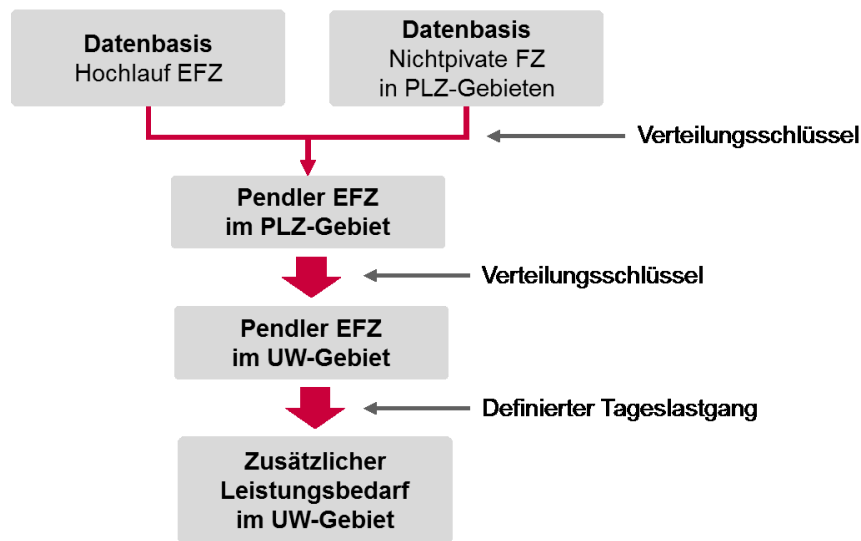


Abbildung 2.11: Methodik zur Verteilung der Pendler

Diese Methodik entspricht im Wesentlichen der Methodik zur Verteilung der gewerblichen und kommunalen Flotten, da das Fahrziel der Pendler ihr jeweiliger Arbeitsort ist. Es wird erneut das Verhältnis zwischen den gemeldeten nichtprivaten Fahrzeugen in einem PLZ-Gebiet zu den insgesamt gemeldeten nichtprivaten Fahrzeugen bestimmt und anschließend der Elektrofahrzeug-Hochlauf der Pendler dementsprechend über Hamburg verteilt. Es sei an dieser Stelle auf den bereits in Abschnitt 2.2.2 diskutierten Nachteil dieser Methodik hingewiesen. Über das Verhältnis der installierten Transformatorleistung von PLZ-Gebiet zu UW-Gebiet kann darauf folgend die Verteilung der Pendler auf die UW-Gebiete bestimmt werden (siehe Abbildung 2.12).

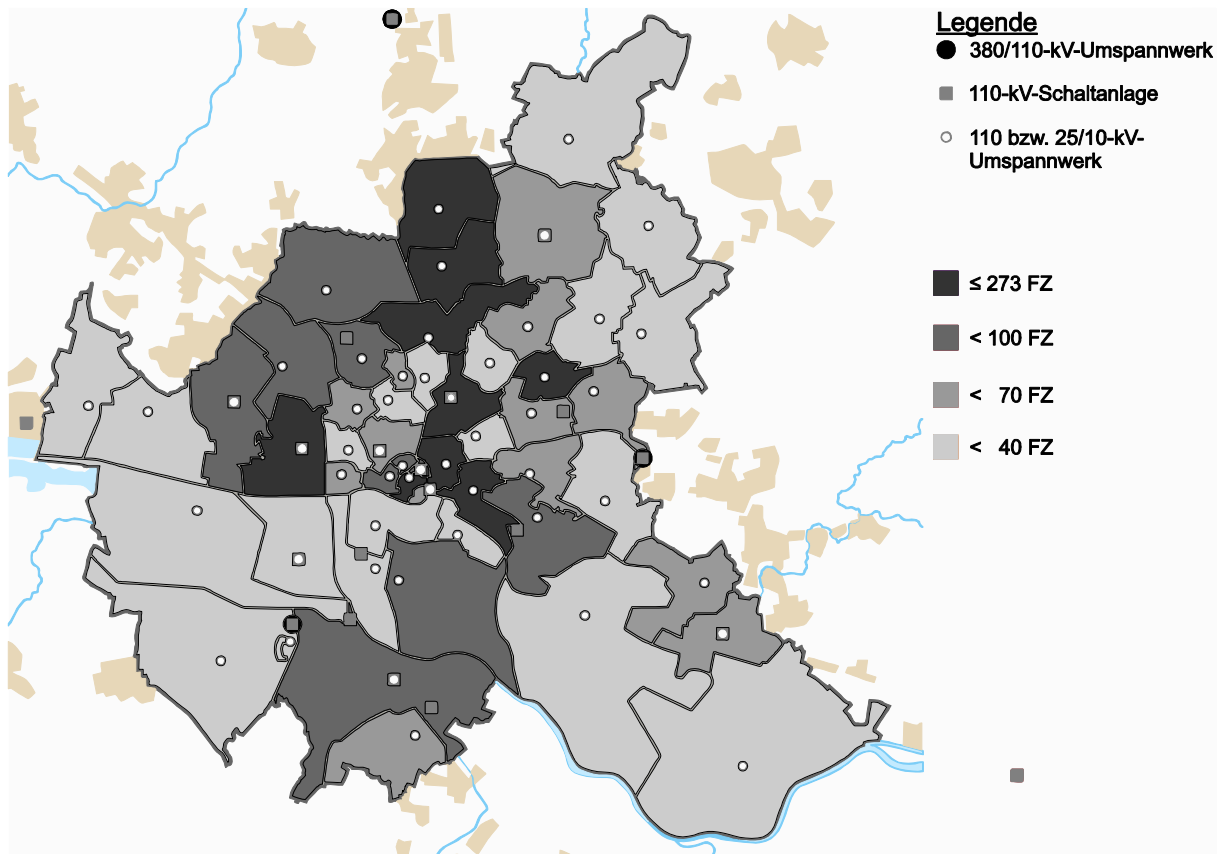


Abbildung 2.12: Verteilung der Pendler Elektrofahrzeuge auf UW-Gebiete, „META“ 2030

## 2.2.4 Carsharing

Der Sektor Carsharing beinhaltet sowohl das konventionelle als auch das flexible Modell. Da die konventionellen Fahrzeuge nur einen sehr geringen Anteil der insgesamt vorhandenen Carsharing-Fahrzeuge ausmachen, werden die einzelnen Stationen nicht weiter beachtet. Stattdessen werden die konventionellen Fahrzeuge mit den flexiblen Fahrzeugen zusammengefasst und auf das Geschäftsgebiet in Hamburg verteilt. Die Abbildung 2.13 stellt die methodische Verteilung der Carsharing-Fahrzeuge in Hamburg dar.

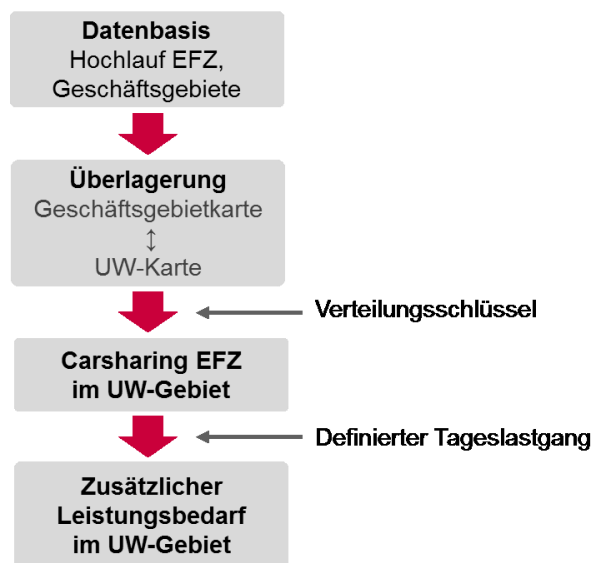


Abbildung 2.13: Methodik zur Verteilung der Carsharing-Fahrzeuge

Die beiden großen flexiblen Carsharing-Anbieter in Hamburg sind Car2Go und DriveNow. Ein Vergleich der Geschäftsgebiete zeigt eine große Deckung, das Gebiet von Car2Go ist jedoch ein wenig größer und wird deshalb für die weitere Betrachtung genutzt [16] [17]. Eine zukünftige Änderung des Geschäftsgebiets ist möglich, bisher hat die Vergangenheit aber sowohl eine Vergrößerung als auch eine Verkleinerung des Geschäftsgebiets gezeigt. Deshalb wird das aktuelle Geschäftsgebiet über die Jahre als konstant angenommen.

Das Geschäftsgebiet von Car2Go wird mit der UW-Karte Hamburgs verglichen. Für die Verteilung der Carsharing-Fahrzeuge aus dem abgestimmten Elektrofahrzeug-Hochlauf werden vier verschiedene Flächenfaktoren definiert. Diese ergeben sich aus ungefähr ähnlich großen Flächenüberschneidungen zwischen dem UW-Gebiet und dem Geschäftsgebiet von Car2Go. Während den meisten UW-Gebieten der Faktor 1 für die Verteilung zugeordnet wird, bekommen z. B. die vier Innenstadt UWs aufgrund der kleineren Fläche nur den Faktor 0,25. Eine Auflistung der vergebenen Verteilungsfaktoren der einzelnen UW-Gebiete ist in der Tabelle 6.1 im Anhang dargestellt. Abbildung 2.14 zeigt die Verteilung der Carsharing-Elektrofahrzeuge auf die UW-Gebiete.

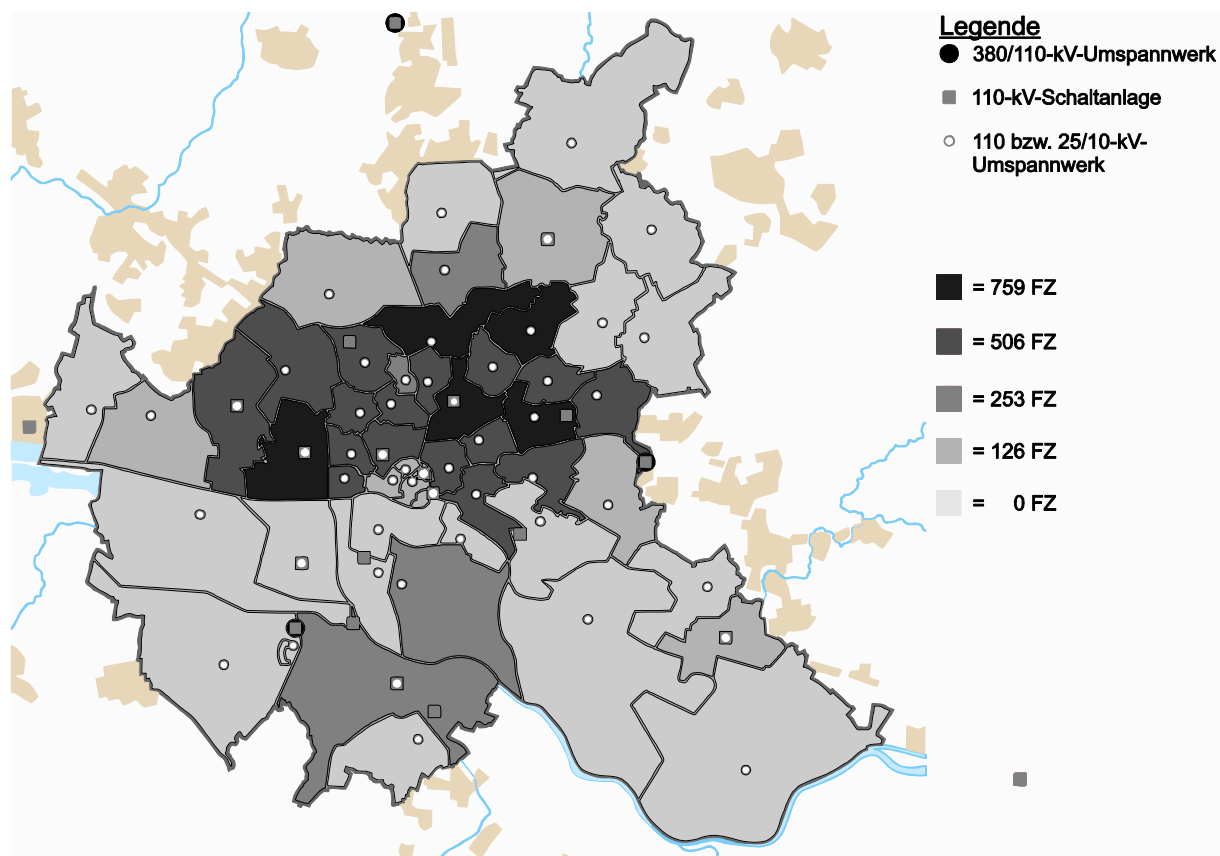


Abbildung 2.14: Verteilung der Carsharing-Elektrofahrzeuge auf UW-Gebiete, „META“ 2030

### 2.2.5 Multi-Energie-Tankstellen

Mit der Umstellung des Verkehrssektors auf emissionsfreie Antriebstechnologien wird sich in den nächsten Jahren auch das erhältliche Angebot an Energie an den Tankstellen anpassen. Zuzüglich zu dem heutigen Angebot besteht zukünftig ein Bedarf an Wasserstoff und elektrischer Energie. Deshalb wird für diese Metastudie eine Anpassung der heutigen Hamburger Tankstellen der fünf größten Betreiber (Shell [18], Esso [19], Total [20], Aral [21] und Jet [22]) an diesen Bedarf angenommen. Abbildung 2.15 stellt die prinzipielle Methodik dar.

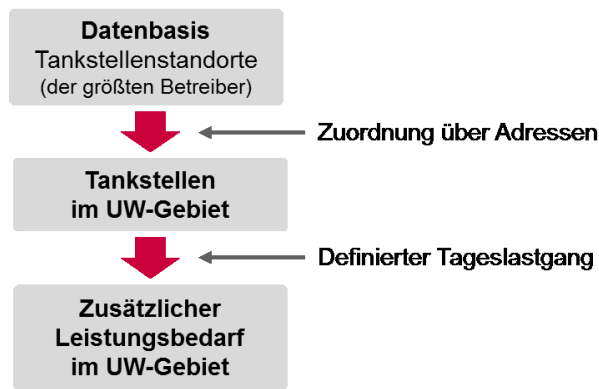


Abbildung 2.15: Methodik zur Verteilung der Multi-Energie-Tankstellen

Um zu prognostizieren, ab wann welche Multi-Energie-Tankstelle ausgebaut wird, wird die Anzahl an Taxisständen in den UW-Gebieten herangezogen [23]. Hierbei wird allerdings aus Mangel an Informationen vernachlässigt, wie groß die einzelnen Taxisstände sind. Befinden sich drei oder mehr Taxisstände in einem UW-Gebiet, wird angenommen, dass die hier befindlichen Tankstellen ab dem Jahr 2020 umgerüstet werden. Des Weiteren wird angenommen, dass alle restlichen Tankstellen ab dem Jahr 2025 zu Multi-Energie-Tankstellen umgerüstet sind. Hiermit wird berücksichtigt, dass Taxisstände insbesondere an wichtigen Umschlagplätzen vorhanden sind. Aus diesem Grund ist hier auch ein höheres Vorkommen an Fahrzeugen aus anderen Sektoren zu erwarten und die Dringlichkeit eines Ausbaus der Ladeinfrastruktur höher.

Die Verteilung der Tankstellen und ihr zeitlicher Ausbau werden in Abbildung 2.16 gezeigt.

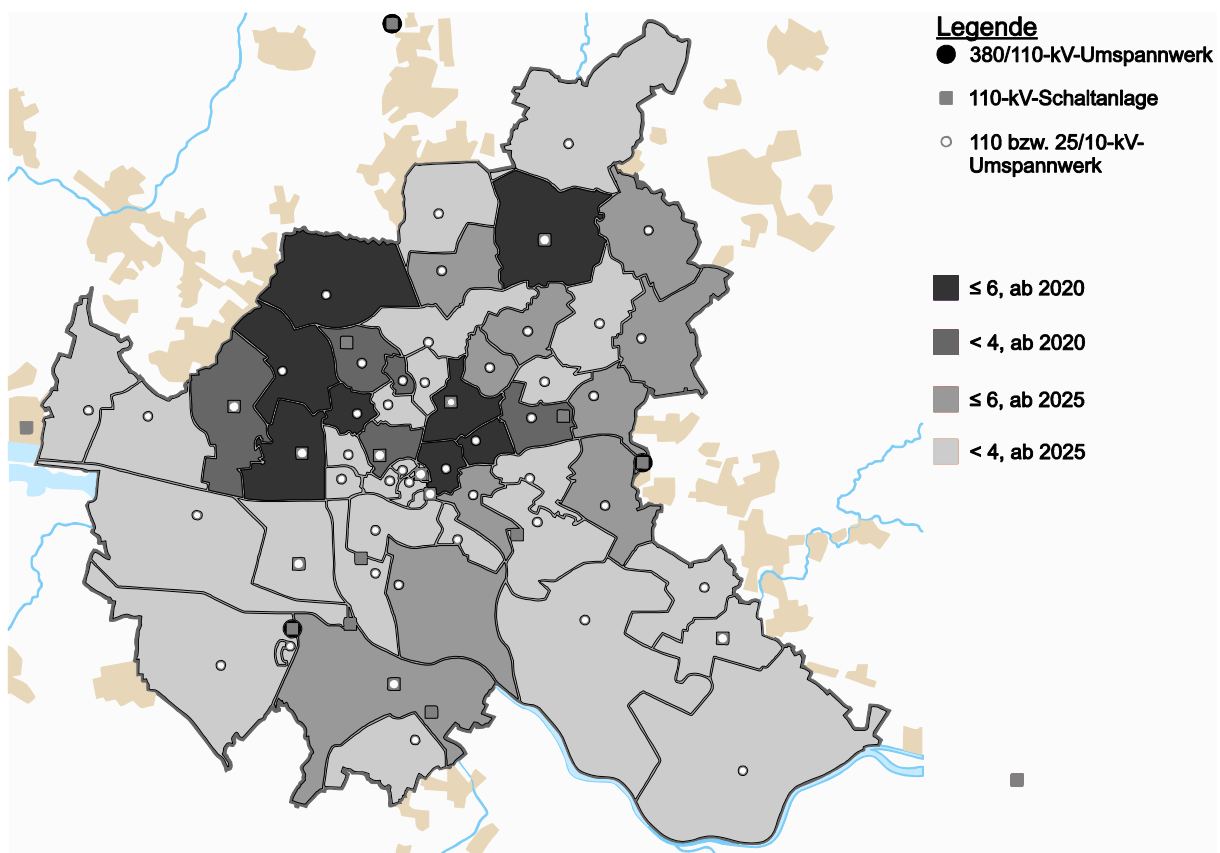


Abbildung 2.16: Verteilung und Entwicklung der Multi-Energie-Tankstellen in den UW-Gebieten

## 2.2.6 ÖPNV

In den Bereich ÖPNV fallen die Busbetriebshöfe der Hamburger Hochbahn AG und der Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH, da diese im Bereich des Hamburger Stromnetzes ihren Standort haben. Außerdem wird hier die geplante U-Bahn Linie U5 der Hamburger Hochbahn AG mitberücksichtigt. Die Adressen der Busbetriebshöfe und der U5-Unterwerke werden durch einen Kartenabgleich mit der Umspannwerks-Karte den jeweiligen UW-Gebieten zugeordnet. Zeitlich werden im Jahr 2020 zunächst die Tochterfirmen der Hamburger Hochbahn AG (Busbetriebshof Süderelbe und Billbrookdeich) und der Busbetriebshof der Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH in Bergedorf umgerüstet. Anschließend werden sukzessiv die restlichen fünf Busbetriebshöfe der Hamburger Hochbahn AG umgerüstet, sodass ab dem Jahr 2025 alle Busbetriebshöfe theoretisch die Routen mit Elektro-Bussen bedienen können. Auch wenn die Flottenumstellung dann noch nicht vollständig vollzogen sein wird, wird in der Metastudie direkt mit den Leistungen der Busbetriebshöfe bei einer 100 %-igen Elektrobus-Flotte gerechnet. So kann unabhängig von den genauen Umstellungsvorhaben der Verkehrsbetriebe überprüft werden, ob genügend Reserve im elektrischen Netz vorhanden ist.

Die Abbildung 2.17 zeigt die Verteilung der Busbetriebshöfe und der U-Bahn Linie U5 sowohl örtlich als auch zeitlich.

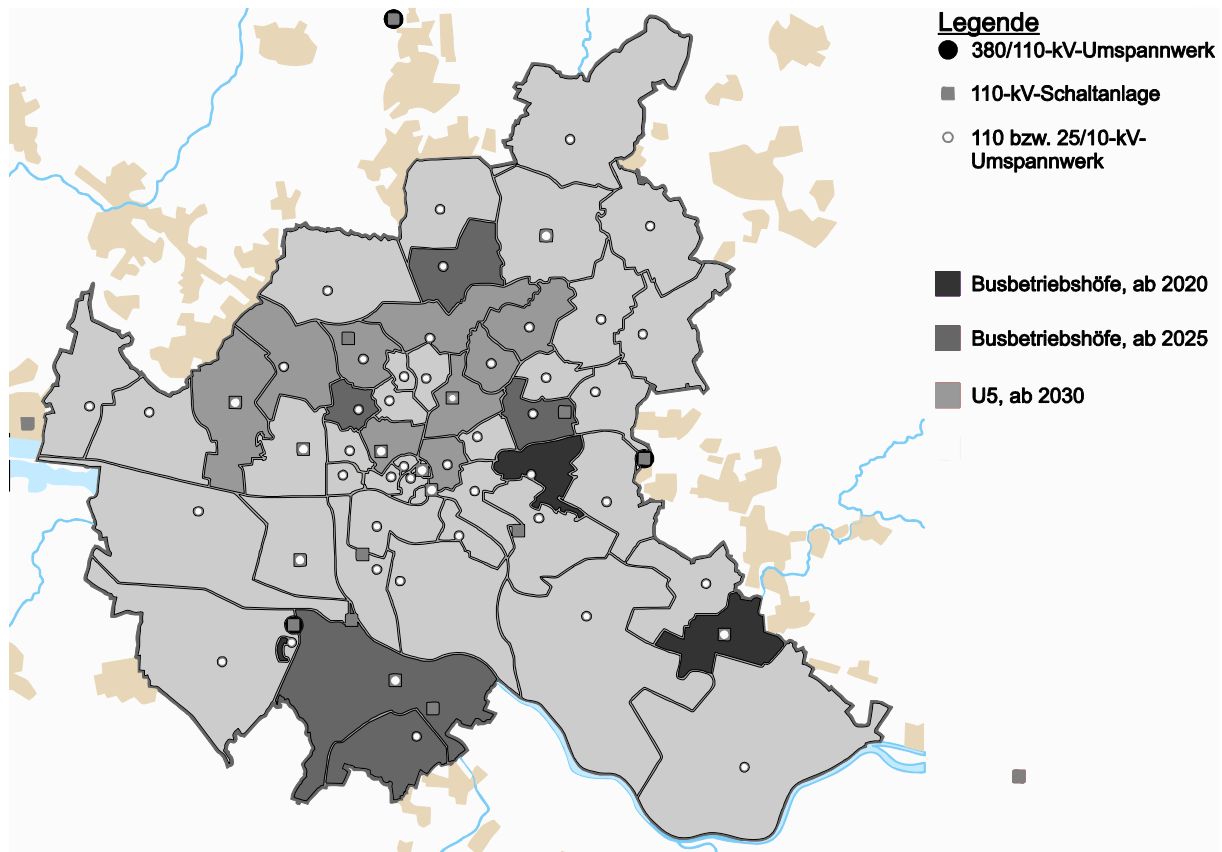


Abbildung 2.17: Verteilung und Entwicklung des ÖPNVs in den UW-Gebieten

## 2.3 Definition eines Tageslastganges

Für den Stromnetzbetreiber ist die Beantwortung der Frage wichtig, ob die bisherigen Netzkapazitäten auch mit der Umstellung des Verkehrssektors auf elektrische Antriebe ausreichend sind. Hierfür muss der bisherige Tageslastgang eines Umspannwerks mit dem zu erwartenden Tageslastgang der Elektromobilität – aufgrund der Ladevorgänge der Elektrofahrzeuge – verglichen werden. Die Addition dieser beiden Lastgänge kann entweder zu einer Erhöhung der heutigen Tagesspitzenlast oder zur

Identifizierung eines neuen Zeitpunkts führen, an dem die Tagesspitzenlast auftritt. Werden durch die neuen Spitzenlasten in den Umspannwerken die bisherigen Netzkapazitäten nahezu aufgebraucht, müssen rechtzeitig Strategien für den Netzausbau entwickelt und umgesetzt werden.

Für die in dieser Metastudie betrachteten Sektoren werden deshalb in diesem Abschnitt jeweils typische Tageslastprofile erstellt, deren Addition als Gesamttageslastgang der Elektromobilität definiert wird. Aus dem sich ergebenden Lastgang und den Elektrofahrzeug-Hochläufen in jedem einzelnen UW-Gebiet wird die zusätzliche elektrische Last ermittelt. Dabei wird für die meisten Sektoren vereinfachend ein Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 1$  angenommen, da Hersteller von Ladesäulen den Leistungsfaktor mit  $\geq 0,95$  bzw. sogar  $\geq 0,98$  bei Volllast angeben [24] [25]. Nur für den Leistungsbezug der Busbetriebshöfe wird sicherheitshalber ein Leistungsfaktor von  $\cos \varphi = 0,95$  verwendet.

Die Tageslastgänge der Sektoren werden durch das jeweils typische Fahr- und Parkverhalten und durch die Ergebnisse heutiger Modellregionen beeinflusst. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass das Fahr- und Parkverhalten sowohl im privaten als auch im gewerblichen Bereich nicht durch die neue Antriebstechnologie und den damit verbundenen zeitlichen Aufwand zum Nachladen verändert wird, sondern die heute schon vorhandenen Stillstandszeiten der Fahrzeuge zukünftig zum Laden genutzt werden.

### 2.3.1 Private Fahrzeuge in Hamburg

Durchschnittliche Fahrprofile von privaten Fahrzeugen zeigen eine Parkdauer von etwa 23 Stunden am Tag [26]. In [27] haben Befragungen ergeben, dass insbesondere die lange Stillstandszeit der Fahrzeuge in der Nacht zum Laden der Elektrofahrzeuge nutzbar ist. Etwa 70 % der Befragten gaben an, ihr Fahrzeug für mehr als sechs Stunden zum Laden zur Verfügung stellen zu können. Bei einer Ladung über eine Haushaltssteckdose können heute ohne zusätzliche Maßnahmen im Allgemeinen maximal 3,7 kW bezogen werden. Für den durchschnittlichen Verbrauch der Fahrzeuge wird in Anlehnung an [28] ein Verbrauch von 20 kWh/100 km angenommen. Weiterhin wird eine durchschnittliche tägliche Fahrleistung der Fahrzeuge von 55 km angesetzt.

Für das Ladeverhalten privater Fahrzeuge kann nach den Ergebnissen in [29] angenommen werden, dass ca. 80 % der Energie zu Hause nachgeladen wird. Dies deckt sich mit den langen Stillstandszeiten der Fahrzeuge Zuhause.

Für die Metastudie wird das in Tabelle 2.4 dargestellte Ladeprofil definiert:

Tabelle 2.4: Ladeprofil privater Elektrofahrzeuge in Hamburg Wohnender

Anteil EFZ	Ladezeit	Ort	Ladeleistung
70 %	Nachts	Zuhause	3,7 kW
15 %	Tagsüber	Zuhause	3,7 kW
15 %	Tagsüber	Öffentl. Ladesäule	150 kW

Weiterhin wird angenommen, dass die Fahrzeuge zu gleichen Teilen zwischen 16 Uhr und 20 Uhr nach Hause kommen. Dadurch ergibt sich das in Abbildung 2.18 dargestellte Lastprofil.



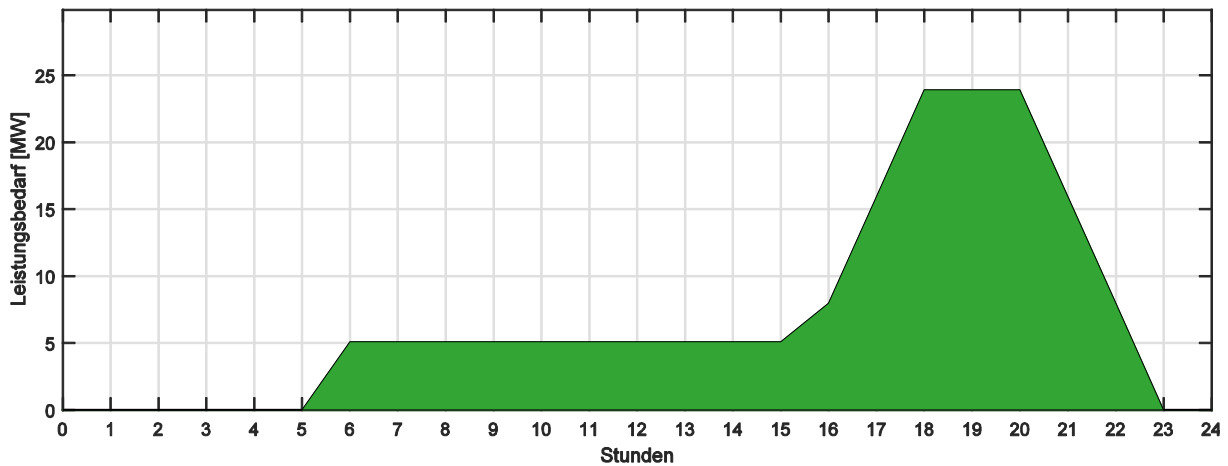


Abbildung 2.18: Tageslastgang privater Fahrzeuge von in Hamburg Wohnender, „META“ 2030

### 2.3.2 Gewerbliche und kommunale Flotten

Im intrastädtischen gewerblichen Sektor werden die meisten Fahrten tagsüber unternommen, da zumeist am Fahrtziel ein Kunde wartet. Dies gilt insbesondere für den typisch fahrintensiven KEP-Dienst (Kurier-, Express-, Paket-Dienst). Interstädtisches Gewerbe, z. B. der Warenumschlag von großen Ketten mit LKW, wird in dieser Studie vernachlässigt. Da es sich bei gewerblichen Fahrzeugen sowohl um PKW als auch um Transporter handeln kann, wird hier im Vergleich zu den privaten Fahrzeugen ein etwas höherer Verbrauch von 25 kWh/100 km angesetzt (vgl. [28]). Als durchschnittliche Fahrleistung wird in Anlehnung an [13] eine Strecke von 60 km/Tag angenommen.

Schon heute nutzen einige Firmen Elektrofahrzeuge, da sie sich bei hohen Fahrleistungen als wirtschaftlich erweisen. Ein Beispiel sind die Kurier- und Lieferdienste (KEP-Dienste). Innerhalb der Metastudie wurden Befragungen zum heutigen und geplanten Fahr- und Ladeverhalten von KEP-Diensten durchgeführt. Dabei hat sich einerseits gezeigt, dass heutige Batteriekapazitäten ausreichend sind, um die Fahrleistungen der Fahrzeuge zu gewährleisten und andererseits, dass die nächtliche Stillstandszeit genügt, um die Batterien wieder aufzuladen.

Vereinfachend wird angenommen, dass nachts ladende Fahrzeuge mit 3,7 kW ( $\cong$  Ladung an Haussteckdose) laden. In der Praxis können auch je nach Betrieb Ladesäulen mit höheren Ladeleistungen sinnvoll sein. Allerdings sollte hier ein Lademanagement einen zu großen Leistungsbezug über einen kurzen Zeitraum verhindern, wenn keine Notwendigkeit für eine schnelle Nachladung besteht, da sich dies im Strompreis widerspiegelt. Deshalb werden nur tagsüber größere Ladeleistungen eingesetzt, da das Laden am Tag mit einer gewissen Dringlichkeit für ein erneutes Fahrzeugaufrücken bewertet wird.

Für die Metastudie wird das in Tabelle 2.5 dargestellte Ladeprofil definiert:

Tabelle 2.5: Ladeprofil der gewerblichen und kommunalen Elektrofahrzeugflotten

Anteil EFZ	Ladezeit	Ort	Ladeleistung
70 %	Nachts	Betriebshof	3,7 kW
15 %	Tagsüber	Betriebshof	11 kW
15 %	Tagsüber	Öffentl. Ladesäule	150 kW

Auch hier wird angenommen, dass die Fahrzeuge zu gleichen Teilen zwischen 16 Uhr und 20 Uhr zurück zum Betriebshof kommen. Abbildung 2.19 zeigt das resultierende Lastprofil.

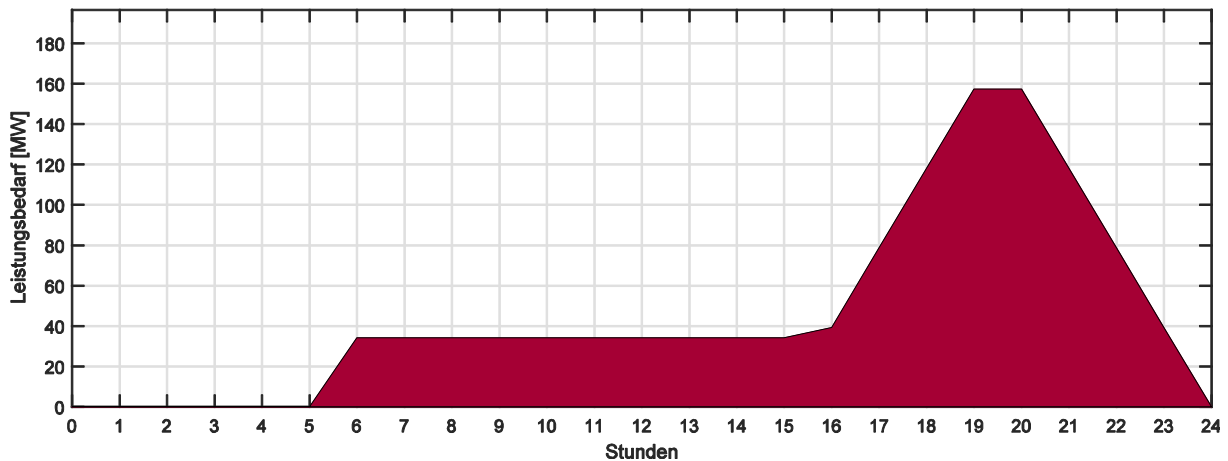


Abbildung 2.19: Tageslastgang der gewerblichen und kommunalen Flotten, „META“ 2030

### 2.3.3 Pendler

Zur Abschätzung der durchschnittlichen Fahrleistung der Pendler werden die Ergebnisse aus [15] verwendet. Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, legen ca. 200.000 Pendler eine Entfernung von weniger als 50 km zurück und 50.000 Pendler eine Entfernung von weniger als 100 km. Hier wird vereinfachend angenommen, dass die 200.000 Pendler genau 50 km und die 50.000 Pendler genau 100 km zur Arbeit zurücklegen. Das Pendlerverhältnis wird für die Betrachtung der 128.400 PKW-Selbstfahrer (vgl. [15]) beibehalten, sodass 4/5 der Pendler 50 km und 1/5 100 km fahren. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Fahrleistung von 60 km/Tag für einen Pendler. Für den Verbrauch werden hier, wie für die privaten Fahrzeuge der in Hamburg Wohnenden, 20 kWh/100 km angesetzt.

Neben der langen Fahrzeugstandzeit nachts zu Hause lässt sich auch eine lange Stillstandszeit am Arbeitsplatz identifizieren. Wenn die zur Verfügung stehenden Parkplätze teilweise mit Ladesäulen ausgerüstet werden, kann hier die bisher verbrauchte Energie wieder nachgeladen werden. Für den Fall, dass eine langsame Aufladung am Arbeitsort nicht möglich oder gewünscht ist, werden Zeitfenster vor bzw. nach der Arbeit definiert, in denen es vermehrt zu einer Schnellladung durch Pendler an öffentlichen Schnellladesäulen kommen könnte.

Für die Metastudie wird das in Tabelle 2.6 dargestellte Ladeprofil definiert:

Tabelle 2.6: Ladeprofil der Elektrofahrzeuge der Pendler

Anteil EFZ	Ladezeit	Ort	Ladeleistung
50 %	6 – 18 Uhr	Arbeitsort	3,7 kW
50 %	6 – 8 Uhr und 15 – 18 Uhr	Öffentl. Ladesäule	150 kW

Das sich ergebende Lastprofil stellt Abbildung 2.20 dar.

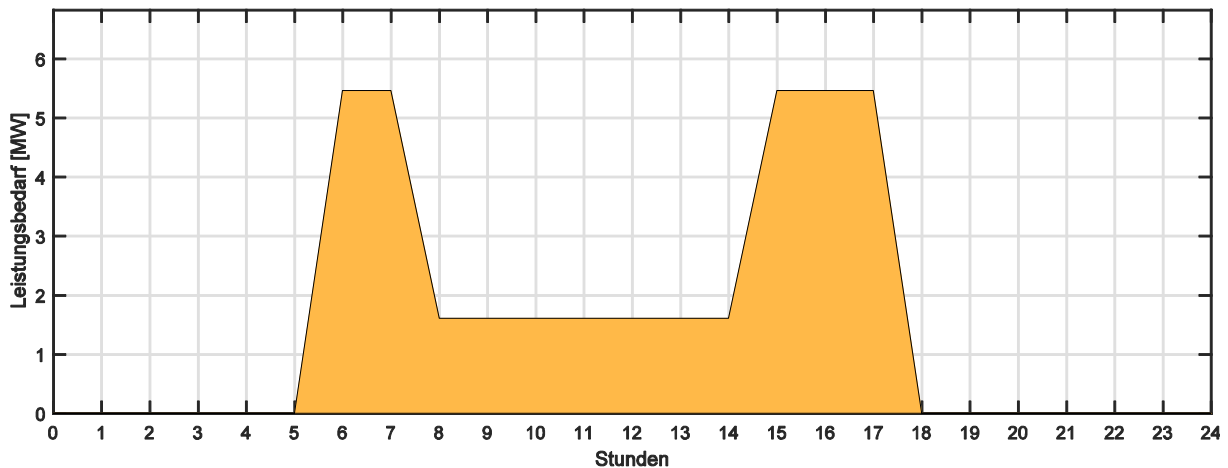


Abbildung 2.20: Tageslastgang privater Fahrzeuge der Pendler, „META“ 2030

### 2.3.4 Carsharing

Carsharing-Fahrzeuge fordern ab einer bestimmten Ladekapazität den Nutzer auf, das Fahrzeug wieder aufzuladen. Hierfür erhält der Nutzer als Belohnung z. B. Freiminuten für die nächste Carsharing-Fahrt gutgeschrieben. Hierfür geeignet sind nur die öffentliche Ladeinfrastruktur und Tankstellen, wobei bei Tankstellen die Anwesenheit des Nutzers während des Nachladens erforderlich ist.

Die Ergebnisse in [29] zeigen unter anderem die Auslastung der öffentlichen Ladesäulen durch Carsharing-Fahrzeuge. Neben einer durchweg bestehenden Grundlast zeigt sich hier ein verstärktes Laden in der Mittagszeit und am Abend. Dies könnte im Nutzungsverhalten begründet sein: davon ausgehend, dass ein Nutzer morgens mit einem Carsharing-Fahrzeug zur Arbeit bzw. nach der Arbeit zur Freizeitaktivität bzw. nach Hause fährt und beim Abstellen des Fahrzeugs (und bei einer Aufforderung zum Nachladen) an einer öffentlichen Ladesäule parkt, erscheinen die sich ergebenden Ladefenster plausibel. Deshalb orientiert sich das Profil in der Metastudie an den in [29] dargestellten Ergebnissen. Auch hier wird in Anlehnung an [28] ein Verbrauch von 20 kWh/100 km angenommen. Außerdem wird für diesen Sektor eine tägliche Fahrleistung von 60 km pro Fahrzeug angesetzt. Dieser Wert ist relativ hoch, soll aber die in Zukunft zunehmende Nutzung von Carsharing-Fahrzeugen berücksichtigen.

Für die Metastudie wird das in Tabelle 2.7 dargestellte Ladeprofil definiert:

Tabelle 2.7: Ladeprofil der Carsharing-Elektrofahrzeuge

Anteil EFZ	Ladezeit	Ort	Ladeleistung
40 %	8 – 16 Uhr	Öffentl. Ladesäule	22 kW
30 %	19 – 1 Uhr	Öffentl. Ladesäule	22 kW
30 %	Restl. Zeit	Öffentl. Ladesäule	22 kW

Damit ergibt sich folgendes Lastprofil:

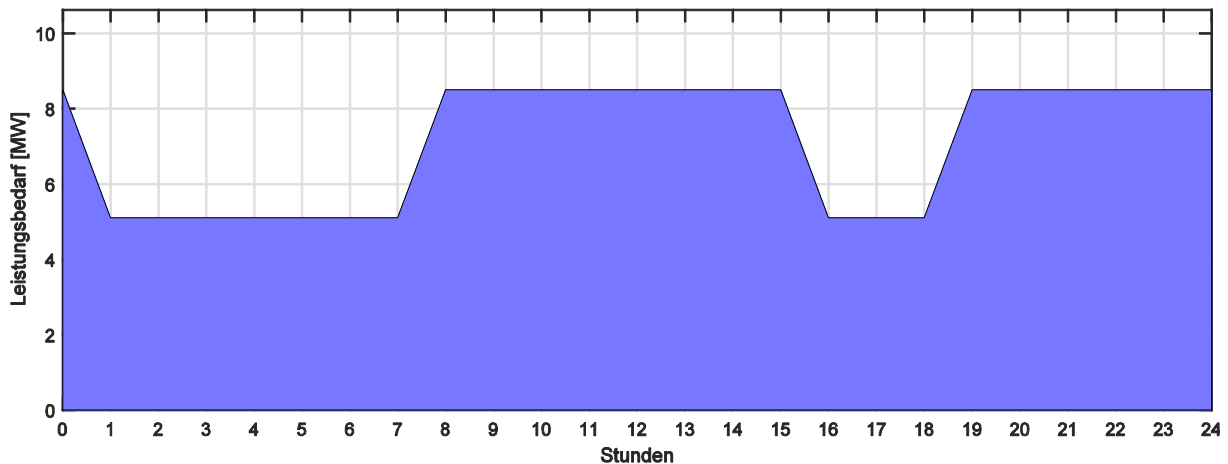


Abbildung 2.21: Tageslastgang der Carsharing-Fahrzeuge, „META“ 2030

### 2.3.5 Multi-Energie-Tankstellen

Wie in Kapitel 2.2 bereits beschrieben, wird in der vorliegenden Metastudie angenommen, dass alle Tankstellen der fünf größten Tankstellenbetreiber Hamburgs auf Multi-Energie-Tankstellen umgerüstet werden. Jede Tankstelle wird mit vier Ladesäulen ausgestattet, die jeweils 150 kW Ladeleistung für Elektrofahrzeuge bereitstellen können. Hierfür muss zukünftig jede Tankstelle mit einer 630 kVA Netzstation ausgerüstet werden.

Die Multi-Energie-Tankstellen decken hiermit den größten Bedarf an Schnellladesäulen in Hamburg. Zusätzlich hierzu wird noch eine öffentliche Schnellladesäuleninfrastruktur in Hamburg aufgebaut werden, deren Ausbauentwicklung in der Metastudie nicht abgeschätzt werden kann. Die Leistungsbedarfe durch das Laden an öffentlichen Schnellladesäulen wurde trotzdem in den Tageslastgängen der einzelnen Sektoren anteilig berücksichtigt.

Schnellladesäulen werden insbesondere für die kurze Aufladung zwischendurch benötigt, um schnell wieder viele Kilometer Fahrleistung zur Verfügung zu haben. Diese Anforderung deckt sich mit den Anforderungen von Elektro-Taxen, die nach einer Schicht wieder ihre Batterie aufladen müssen, bevor die nächste Schicht mit diesem Fahrzeug angetreten werden kann. Deshalb wird in der Metastudie angenommen, dass der elektrische Energiebedarf der Elektro-Taxen mit den Tankstellen gedeckt wird. Diese Annahme ist verwendbar, da insbesondere der erwartete Hochlauf der Elektro-Taxen im Vergleich zu den anderen Sektoren nur einen geringen Anteil an Elektrofahrzeugen ausmacht. Außerdem wird ein relativ hoher Gleichzeitigkeitsfaktor für die Tankstellen angenommen, um eine zu geringe Bedeutsamkeit der Schnellladesäulen zu vermeiden. Damit wird mehr elektrische Energie bereitgestellt, als geladen wird. Allerdings dient die Metastudie einer Untersuchung der möglichen Bereitstellung von elektrischer Leistung über die Umspannwerke. Um zu jedem Zeitpunkt die bereitzustellende Leistung zur Verfügung stellen zu können, wird in der Untersuchung ein relativ hohes Leistungsband angenommen.

Für die Metastudie wird das in Tabelle 2.8 dargestellte Ladeprofil definiert:

Tabelle 2.8: Ladeprofil der Multi-Energie-Tankstellen

Gleichzeitigkeitsfaktor	Ladezeit	Ladeleistung
0,5	6 – 23 Uhr	4 x 150 kW
0,25	23 – 6 Uhr	4 x 150 kW

Das Lastprofil wird in Abbildung 2.22 gezeigt.

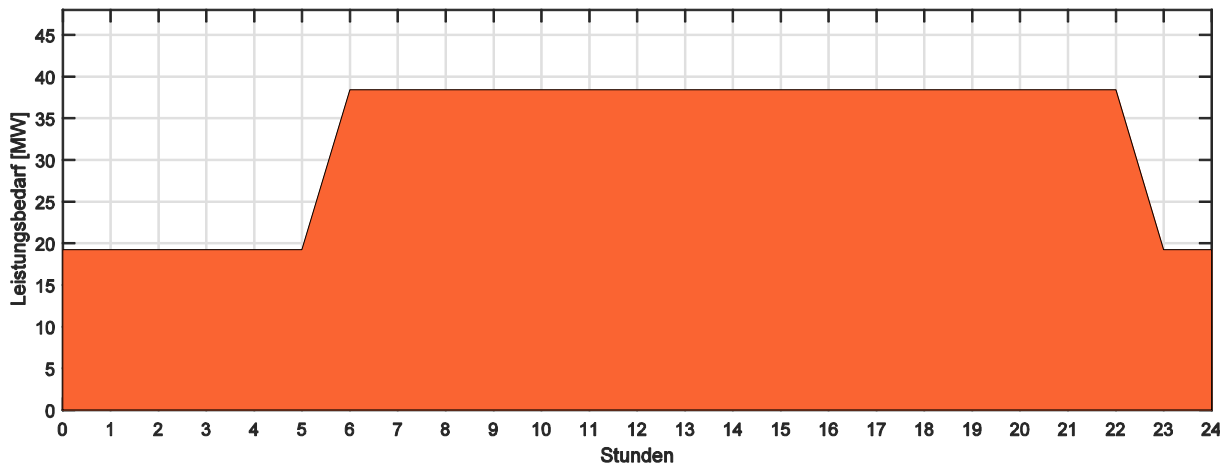


Abbildung 2.22: Tageslastgang der Multi-Energie-Tankstellen ab dem Jahr 2025

### 2.3.6 ÖPNV

Im Bereich ÖPNV werden die Lastprofile der Busbetriebshöfe und der U-Bahn Linie U5 genutzt. Die Profile der Busbetriebshöfe werden in Kapitel 3 mit den dort getroffenen Annahmen zur Umstellung der Busflotten für jeden einzelnen Busbetriebshof berechnet.

Die Unterwerke der U5 werden mit einer Leistung von maximal 5 MW versorgt. Diese Spitzenlast wird für die Anfahrvorgänge der Bahnen benötigt und nicht dauerhaft bezogen. Da jedoch ein Unterwerk mehr als eine Station versorgt und bei den U-Bahnen eine relativ hohe Taktdichte vorhanden ist, müssen die 5 MW zu jeder Zeit verfügbar sein. Insbesondere in der Nacht weicht das tatsächliche Lastprofil davon ab, dennoch wird vereinfachend eine 5 MW Last pro Unterwerk über den ganzen Tag angenommen.

Damit ergibt sich der in der Abbildung 2.23 gezeigte Tageslastgang.

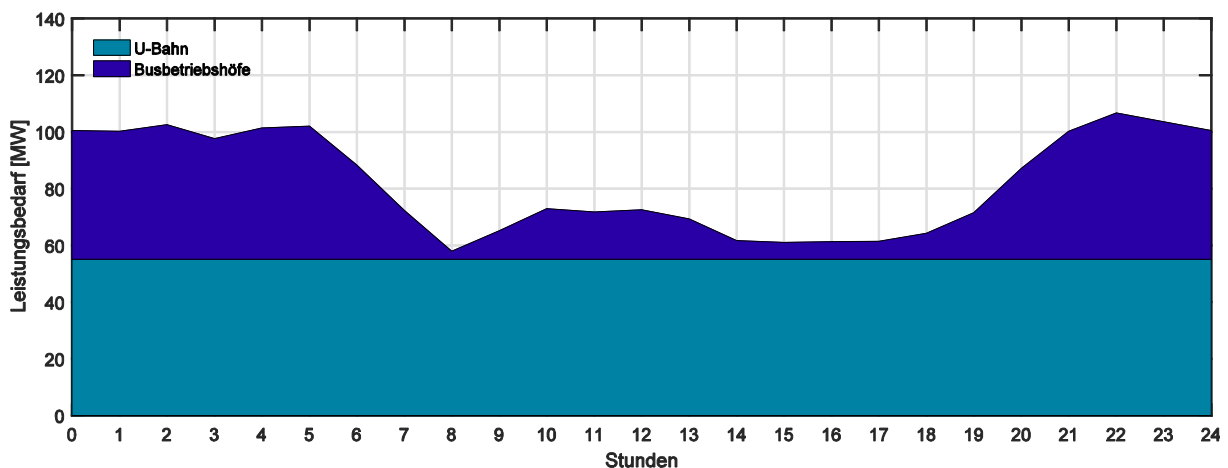


Abbildung 2.23: Tageslastgang der Hamburger Busbetriebshöfe und der U5 im Jahr 2030

### 2.3.7 Gesamttageslastgang

Die Überlagerung aller sektorspezifischen Tageslastgänge führt zu dem Gesamttageslastgang. Dieses wird in der Abbildung 2.24 für ganz Hamburg im Szenario „META“ für das Jahr 2030 dargestellt. Während das Profil prinzipiell für alle Szenarien und UW-Gebiete ähnlich aussieht, ergeben sich durch die verschiedenen Hochläufe unterschiedliche Spitzenlasten in den UW-Gebieten.

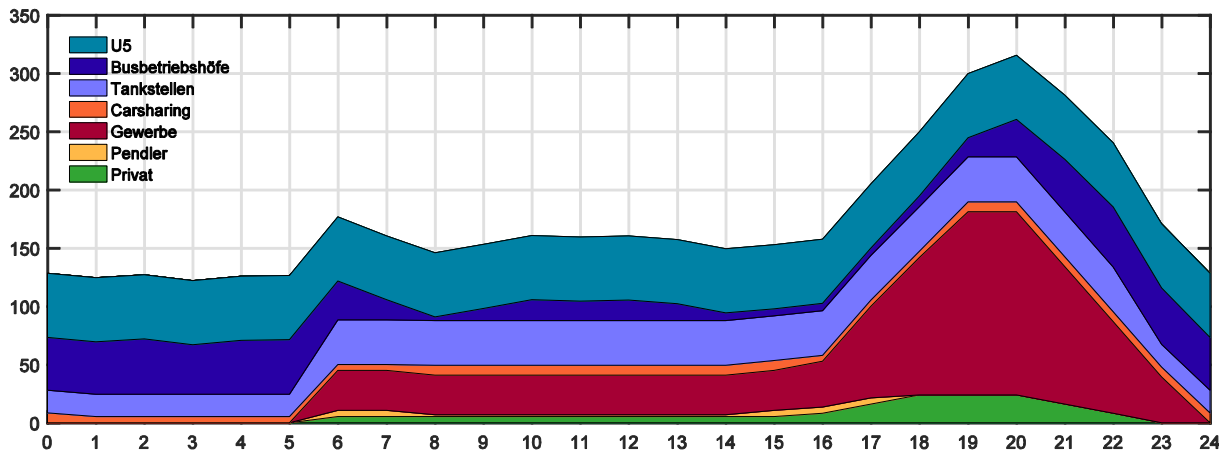


Abbildung 2.24: Gesamttageslastgang durch Elektromobilität

## 2.4 Betrachtung schnellladefähiger Fahrzeuge

Zur Abschätzung der Auswirkungen schnellladefähiger Fahrzeuge auf die freien Netzkapazitäten wird in dieser Metastudie ein Fallbeispiel konstruiert. Hierbei werden 10 % der vorhandenen Parkplätze in der Hamburger Innenstadt mit Schnellladesäulen ausgestattet ( $\cong$  1252 Parkplätzen) [30].

Beim gleichzeitigen Laden aller 1252 Parkplätze mit 150 kW entsteht eine zusätzliche Last von etwa 188 MW in den vier Umspannungsgebieten Großneumarkt, Rathaus, Neustadt und Mitte. Die freie Kapazität der vier Umspannwerke beläuft sich auf 119,5 MW. Damit würde das gleichzeitige Schnellladen der 1252 Fahrzeuge die Transformatoren zu Starklastzeiten überbeanspruchen.

Allerdings ist das gleichzeitige Laden aller Fahrzeuge unrealistisch. Das Beispiel wird erweitert um den Verbrauch eines Fahrzeuges (20 kW/100 km) und die Fahrleistung eines Fahrzeuges (50 km). Damit ergibt sich ein Gesamtenergiebedarf von 12.520 kWh.

Für das Beispiel wird ein Zeitfenster von zwei Stunden betrachtet. In der Praxis kommen nicht alle Fahrzeuge gleichzeitig an, um zu parken, sondern es findet ein kontinuierlicher Wechsel ein- und ausparkender Fahrzeuge statt. Wer in einem Parkhaus in der Hamburger Innenstadt parkt, wird höchstwahrscheinlich einkaufen wollen, hat sich zum Essen verabredet oder möchte auf dem Weihnachtsmarkt bummeln. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass sich die Parkzeiten auf zwischen 20 Minuten und zwei Stunden belaufen. Mit den angenommenen 50 km Fahrleistung und der Ladeleistung von 150 kW benötigt ein Fahrzeug vier Minuten, um das Fahrzeug wieder aufzuladen. Die Ladezeit ist dementsprechend wesentlich kleiner als die Parkzeit.

In der Abbildung 2.25 wird gezeigt, wie sich die Ausnutzung des Parkzeitfensters auf die Spitzenlast auswirkt. Hierbei sind zwei Interpretationen möglich: einerseits können alle 1252 Fahrzeuge gleichzeitig mit einer geringeren Leistung über eine längere Zeit laden, z. B. mit 5 kW über zwei Stunden, andererseits laden nicht alle Fahrzeuge gleichzeitig, sondern immer nur Gruppen von Fahrzeugen für jeweils vier Minuten. Das Minimum für den zweiten Fall entsteht bei Gruppen bestehend aus 42 Fahrzeugen, die jeweils für vier Minuten laden und den gesamten betrachteten Zeitraum nutzen.

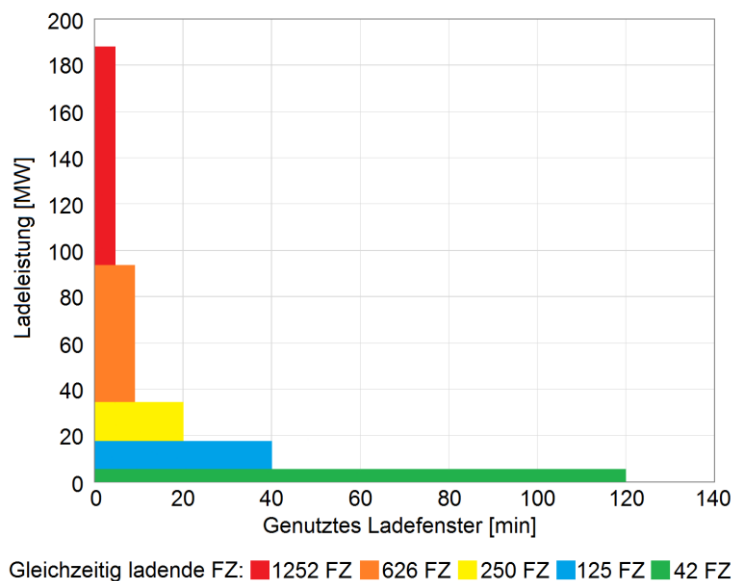


Abbildung 2.25: Darstellung des zu ladenden Energiebedarfs in Abhängigkeit von Leistung und Zeit

Mit den heutigen Transformatorreserven in der Innenstadt könnten zu Starklastzeiten etwa 800 Fahrzeuge gleichzeitig schnellladen, wenn die Reserven nur für die Elektromobilität genutzt werden. Bezogen auf das Fallbeispiel ergibt sich damit ein Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,6.

Es soll deutlich werden, dass nicht zwingend eine Schnellladung benötigt wird, da ein Fahrzeug im Parkhaus in der Regel eine etwas längere Standzeit hat und mit geringeren Leistungen die fehlende Energie nachladen kann. Außerdem zeigt die zweite Interpretation, wie sich der Gleichzeitigkeitsfaktor auf die maximale Last auswirkt. Insbesondere durch die längeren Standzeiten und den kontinuierlichen Fahrzeugwechsel kann davon ausgegangen werden, dass realistische Gleichzeitigkeitsfaktoren eher im Bereich  $\leq 0,2$  liegen ( $\hat{=}$  der gelben Ladung in Abbildung 2.25). Dies bedeutet, dass ein Fahrzeug im Schnitt fünfmal länger auf dem Parkplatz steht, als für eine Vollladung notwendig wäre. Die Schnellladung von Fahrzeugen bedarf insofern keiner speziellen Betrachtung, solange der Marktanteil schnellladefähiger Fahrzeuge nicht stark anwächst und das Ladeverhalten der Nutzer nicht auf Schnellladung fokussiert ist, sondern hauptsächlich die langen Stillstandszeiten zum Laden genutzt werden.

## 2.5 Auswirkungen der Elektromobilität auf Hamburg

In diesem Abschnitt werden die sich mit den in Kapitel 2.3 definierten, sektorspezifischen Tageslastgängen ergebenden Ergebnisse in Form von Gesamttageslastgängen für ganz Hamburg vorgestellt. Daraus ableitbar ist der Zeitpunkt, zu dem die Spitzenlast aufgrund von Elektromobilität auftritt.

Abbildung 2.26 zeigt die zeitliche Entwicklung der Gesamttageslastgänge für die Jahre 2020, 2025 und 2030 nach dem Szenario „META“. Die einzelnen Sektoren sind hierbei den drei großen Bereichen „Privat“, „Gewerbe“ und „ÖPNV“ zugeordnet (siehe Tabelle 2.9).

Tabelle 2.9: Bereichseinteilung der Sektoren

Privat	In HH Wohnende, Pendler
Gewerbe	Gewerbl. & kommunale Flotten, Carsharing, Tankstellen
ÖPNV	HB-Busbetriebshöfe, VHH-Busbetriebshof, U5

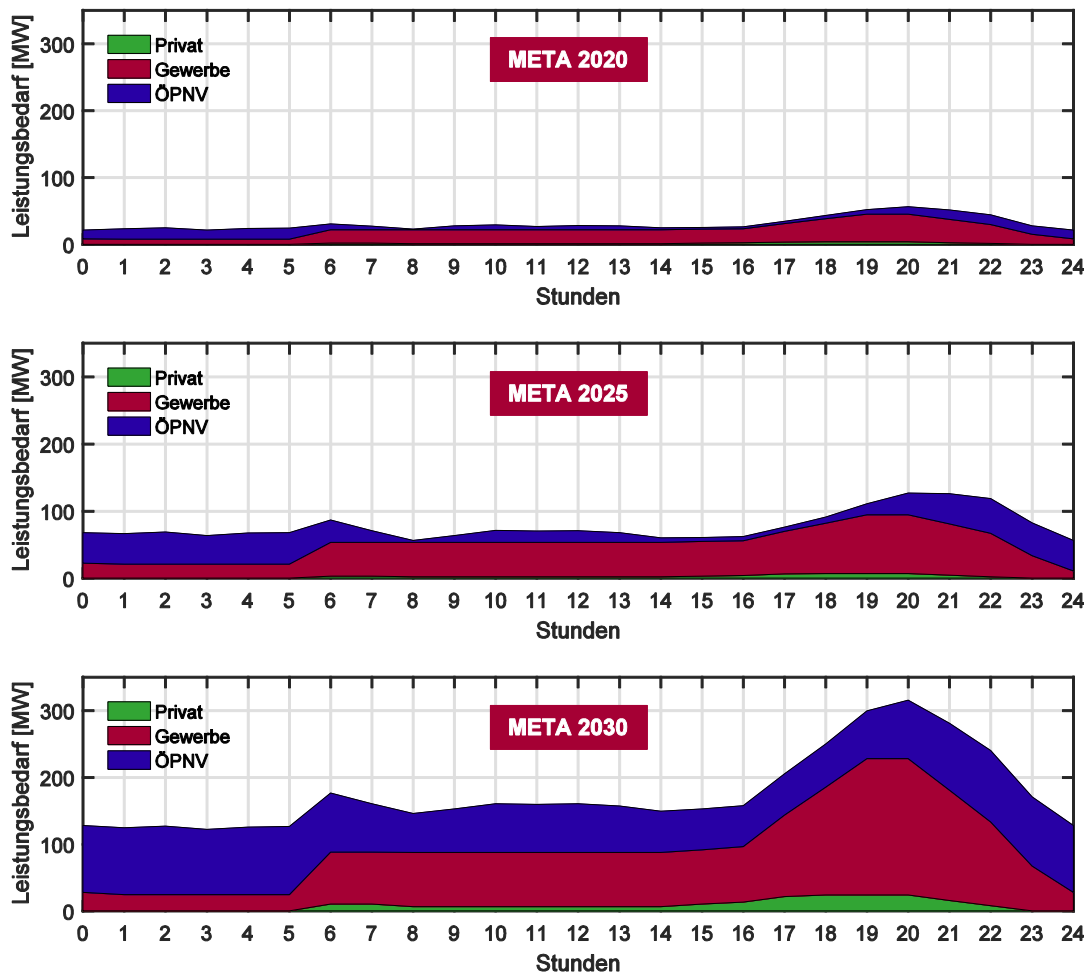


Abbildung 2.26: Gesamttageslastgänge durch Elektromobilität in Hamburg – Szenario „META“

Die zu erkennende signifikante Steigerung des Bereichs ÖPNV resultiert aus dem stetigen Umbau der Hamburger Busbetriebshöfe. Zudem wird im Jahr 2030 ein 55 MW Lastband durch die elf Unterwerke der U-Bahn Linie U5 hinzugerechnet.

Tabelle 2.10 fasst die wichtigsten Zahlen für diese Tageslastgänge zusammen. Die Spitzenlasten liegen jeweils in den Abendstunden um 20 Uhr herum. Während die Spitzenlast in Tabelle 2.10 die höchste Last durch Elektromobilität darstellt, beinhaltet der Energiebedarf nur den Energiebedarf der Fahrzeuge, nicht jedoch den Bereich ÖPNV und den Sektor Multi-Energie-Tankstellen.

Tabelle 2.10: Wichtige Zahlen der Tageslastgänge in der zeitlichen Entwicklung im Szenario „META“

Jahr	Anzahl E-Fahrzeuge	Spitzenlast	Energiebedarf
2020	18.000	56 MW	0,25 GWh/d
2025	32.000	127 MW	0,46 GWh/d
2030	110.000	315 MW	1,48 GWh/d

Als nächstes wird untersucht, wie sich die Hochlauf-Szenarien in den Auswirkungen auf Spitzenlast und Energiebedarf unterscheiden. Abbildung 2.27 stellt einen Vergleich der Szenarien „META“, „MIN“ und „MAX“ für das Jahr 2030 dar.



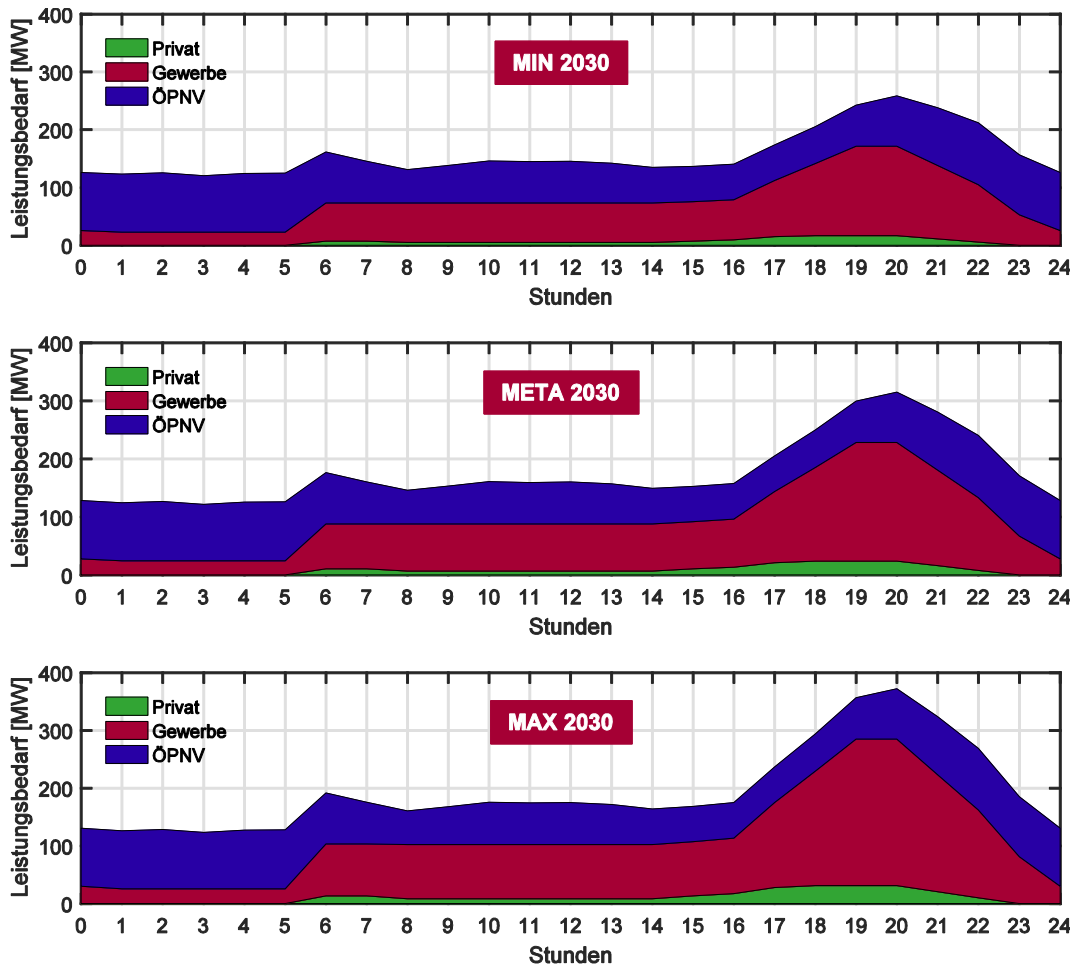


Abbildung 2.27: Gesamttageslastgänge durch Elektromobilität in Hamburg – Szenarienvergleich 2030

Tabelle 2.11 beinhaltet die wichtigen Zahlen des Szenarienvergleichs.

Tabelle 2.11: Wichtige Zahlen der Tageslastgänge im Szenarienvergleich für das Jahr 2030

Szenario	Anzahl E-Fahrzeuge	Spitzenlast	Energiebedarf
MIN	76.000	258 MW	1,06 GWh/d
META	109.000	315 MW	1,48 GWh/d
MAX	141.000	372 MW	1,97 GWh/d

## 2.6 Auswirkungen der Elektromobilität auf die Umspannwerksreserven

Mit den in Kapitel 2.2 vorgestellten, sektorspezifischen Verteilungsschlüsseln und den in Kapitel 2.3 definierten, sektorspezifischen Tageslastgängen werden in diesem Abschnitt die daraus resultierenden zusätzlichen Lasten durch Elektromobilität in jedem UW-Gebiet aufgezeigt. Anschließend werden die jeweiligen Spitzenlasten urchzeitunabhängig mit den Reserven der UW-Gebiete verrechnet, um die neuen Reserven zu bestimmen. Da ein direkter Vergleich der Tageslastgänge „Elektromobilität“ und „Umspannwerk“ in der vorliegenden Metastudie nicht erfolgt, werden die resultierenden Reserven eher negativ abgeschätzt. Allerdings liegt sowohl die Spitzenlast von „Elektromobilität“ als auch vom „Umspannwerk“ in den Abendstunden, wodurch der Fehler relativ gering ist.

## 2.6.1 Entwicklung der zusätzlichen Lasten durch Elektromobilität

Für die Bestimmung der zusätzlichen Lasten durch Elektromobilität in den UW-Gebieten wird im Folgenden immer die maximal auftretende Last verwendet. Abbildung 2.28 stellt die zeitliche Entwicklung der zusätzlichen Lasten im Szenario „META“ dar.

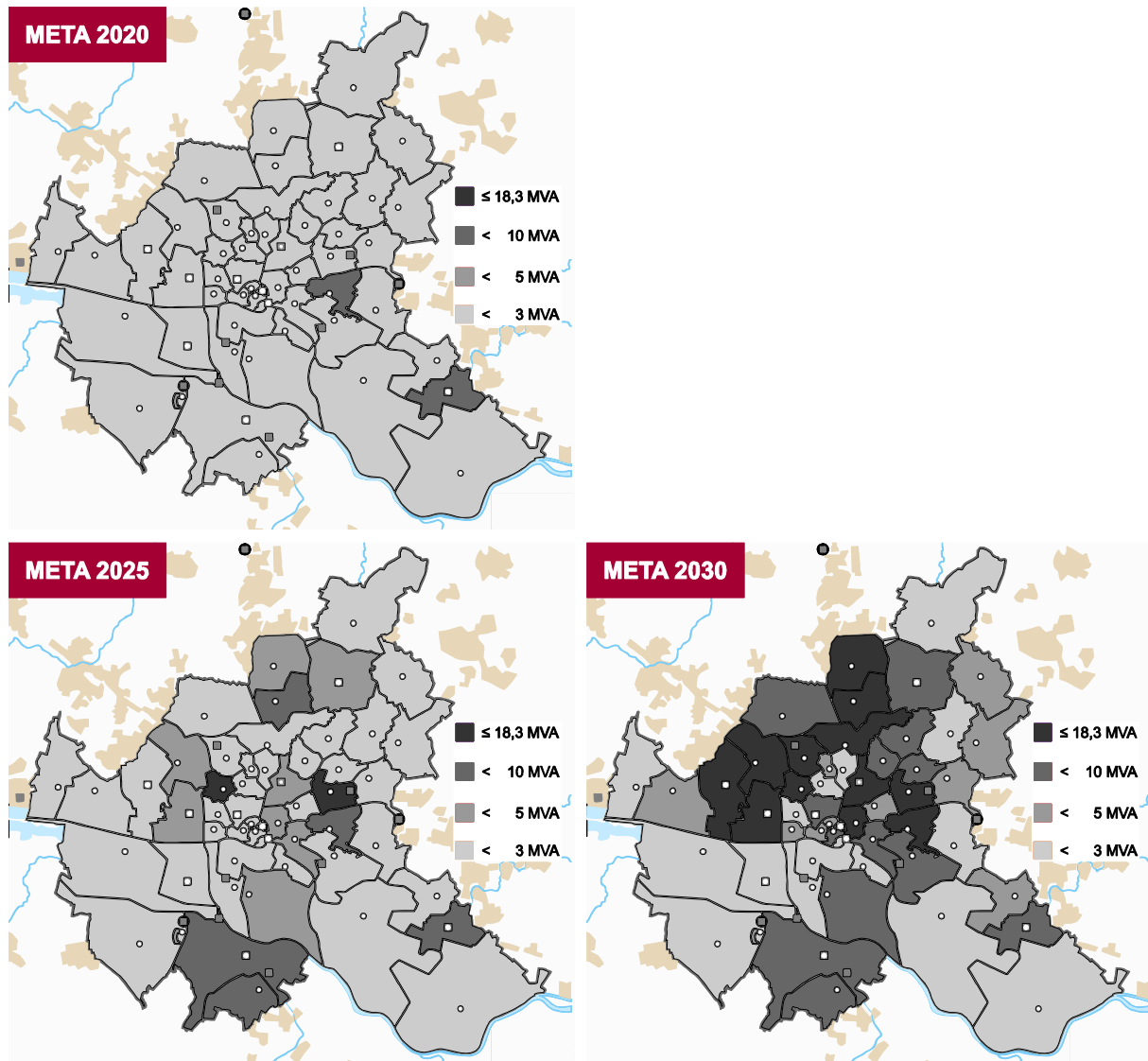


Abbildung 2.28: Zeitliche Entwicklung der zusätzlichen Lasten im Szenario "META"

Es zeigt sich insbesondere eine große zusätzliche Last in den UW-Gebieten, in denen die Busbetriebshöfe und die Unterwerke der U5 liegen. Dies liegt an der größeren Konzentration des Bereichs ÖPNV auf wenige UW-Gebiete im Vergleich zum Bereich Gewerbe, welcher sich über ganz Hamburg verteilt. Die maximale zusätzliche Last beträgt 16,7 MVA und tritt im UW Eidelstedt auf.

Abbildung 2.29 stellt einen Vergleich der Szenarien für das Jahr 2030 dar. Hiermit wird gezeigt, wie sich eine Abweichung des Hochlaufs in den Bereichen „Gewerbe“ und „Privat“ um  $\pm 30\%$  auf die zusätzlichen Lasten in den UW-Gebieten auswirkt. Der Bereich ÖPNV und der Sektor „Multi-Energie-Tankstellen“ aus dem Bereich „Gewerbe“ bleiben hierbei konstant.

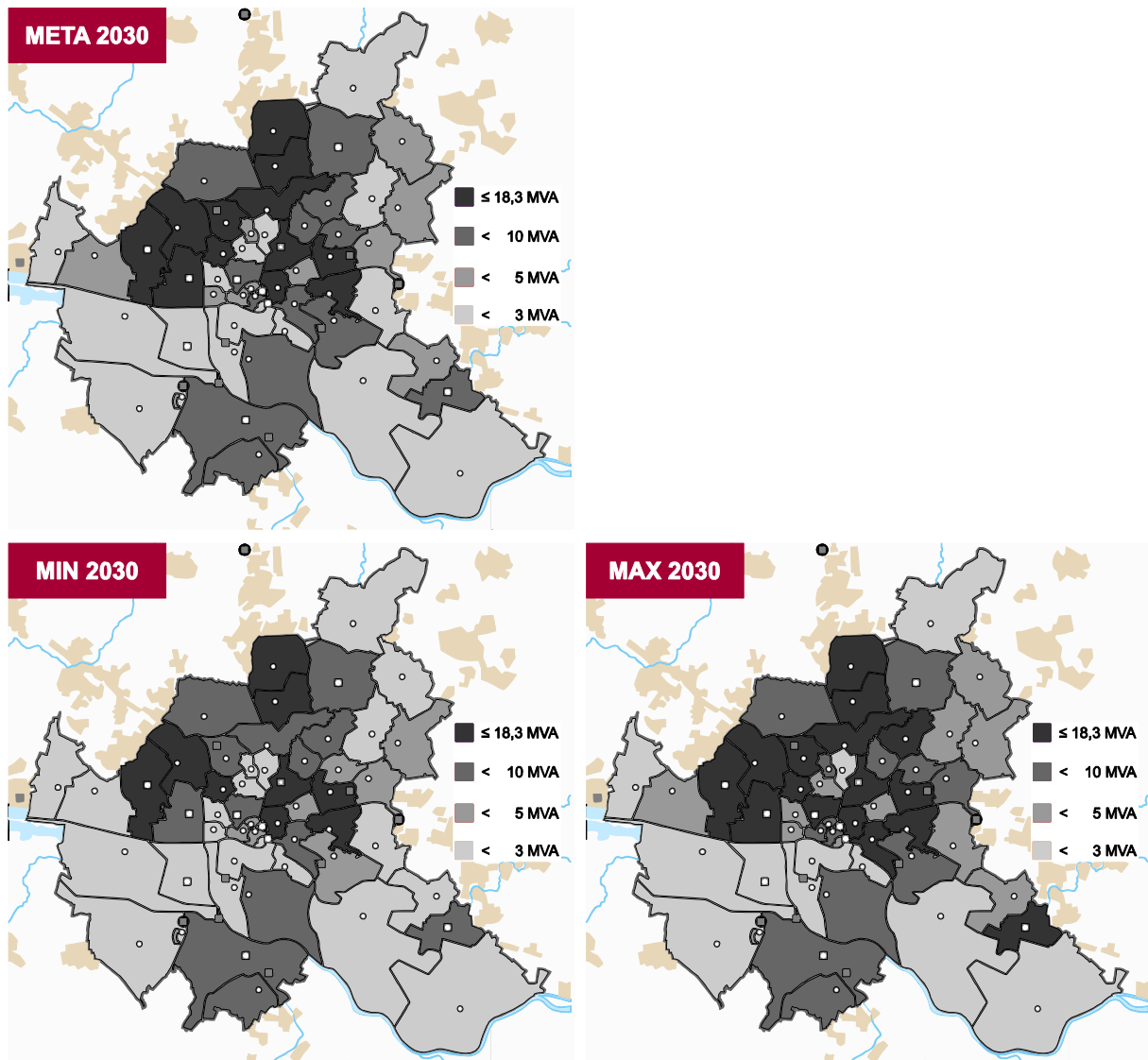


Abbildung 2.29: Szenarienvergleich der zusätzlichen Lasten im Jahr 2030

Zu sehen ist insbesondere eine geringere Last im Szenario „MIN“ in vielen UW-Gebieten, in denen Unterwerke der U5 liegen. Generell ist in einigen UW-Gebieten von „MIN“ über „META“ zu „MAX“ ein Wechsel der zur Einteilung genutzten Leistungsbereiche erkennbar. Damit werden in der Abbildung 2.29 die UW-Gebiete ersichtlich, die nach der genutzten Methodik am ehesten von einer Abweichung des Elektrofahrzeug-Hochlaufs betroffen sind. Die maximale zusätzliche Last beträgt 18,3 MVA und tritt im UW Langenhorn auf. Dies resultiert aus dem großen Anteil gemeldeter gewerblicher Fahrzeuge in den PLZ-Gebieten im UW Langenhorn und der verwendeten Methodik.

## 2.6.2 Entwicklung der Umspannwerksreserven

Mit den berechneten Spitzenlasten in den UW-Gebieten kann nun, ausgehend von der jeweiligen Reserve im Jahr 2015, die neue Reserve der einzelnen UW-Gebiete bestimmt werden. Hierzu wird die zusätzliche Last durch Elektromobilität von der heutigen UW-Reserve subtrahiert. Abbildung 2.30 zeigt die zeitliche Entwicklung der verfügbaren UW-Reserven nach dem Szenario „META“.

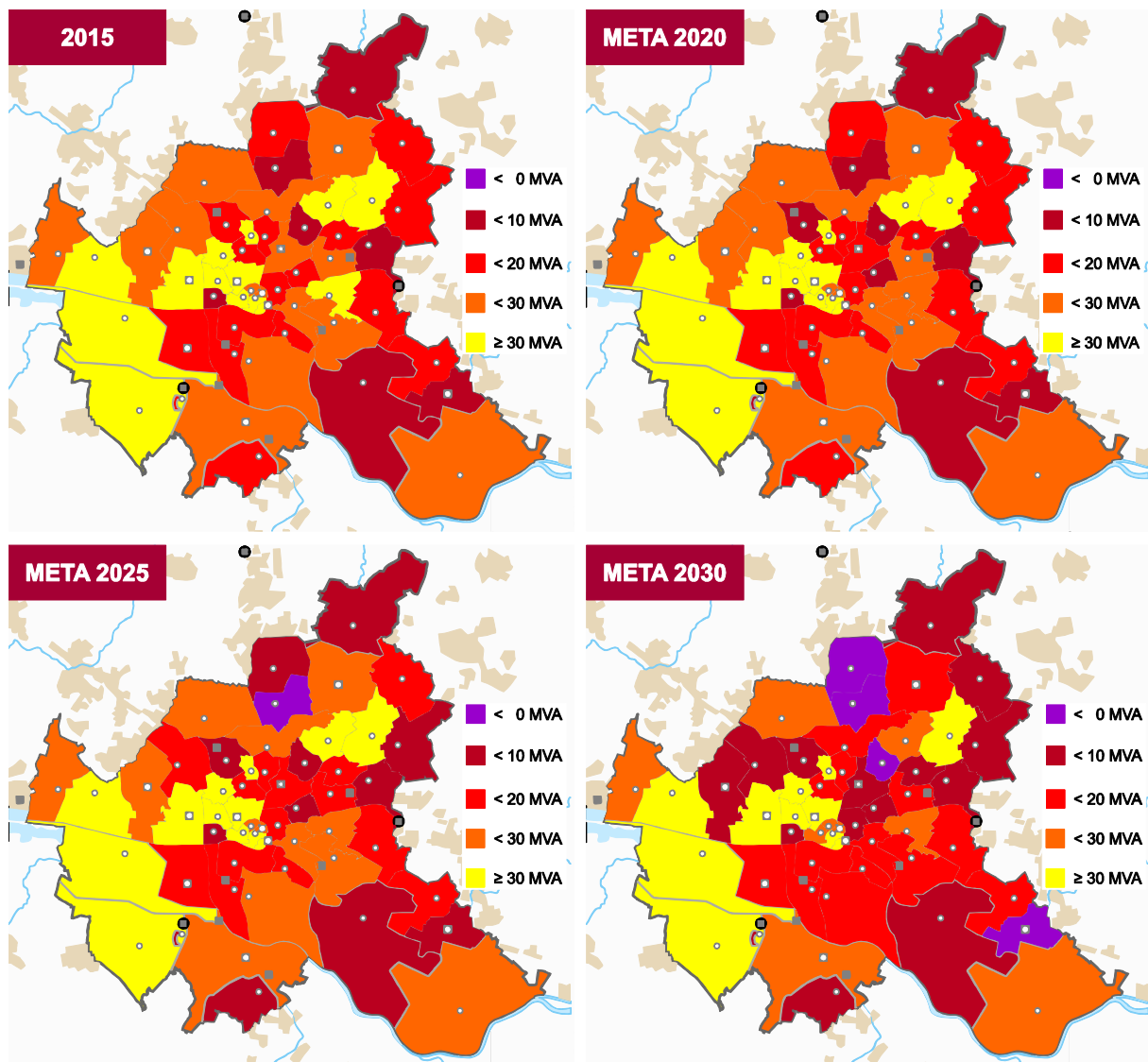


Abbildung 2.30: Zeitliche Entwicklung der UW-Reserven im Szenario "META"

Ein UW wird als kritisch eingestuft, wenn seine Reserve aufgebraucht ist bzw. sogar mehr als die bisherige Reserve benötigt wird. Mit dieser Definition lassen sich nach der verwendeten Methodik vier kritische UW-Gebiete im Szenario „META“ im Jahr 2030 identifizieren:

- UW Bergedorf
- UW Fuhlsbüttel
- UW Hellbrook
- UW Langenhorn

Das UW Fuhlsbüttel befindet sich schon im Jahr 2025 in einem kritischen Zustand. Zuzüglich zu den vier kritischen UW-Gebieten ergeben sich 15 Gebiete mit einer Reserve < 10 MVA, wovon elf Gebiete durch die Betrachtung der Elektromobilität hinzugekommen sind. Um die Auswirkungen einer Abweichung des Elektrofahrzeug-Hochlaufs auf die UW-Reserven zu analysieren, wird in Abbildung 2.31 ein Szenarienvergleich für das Jahr 2030 dargestellt.

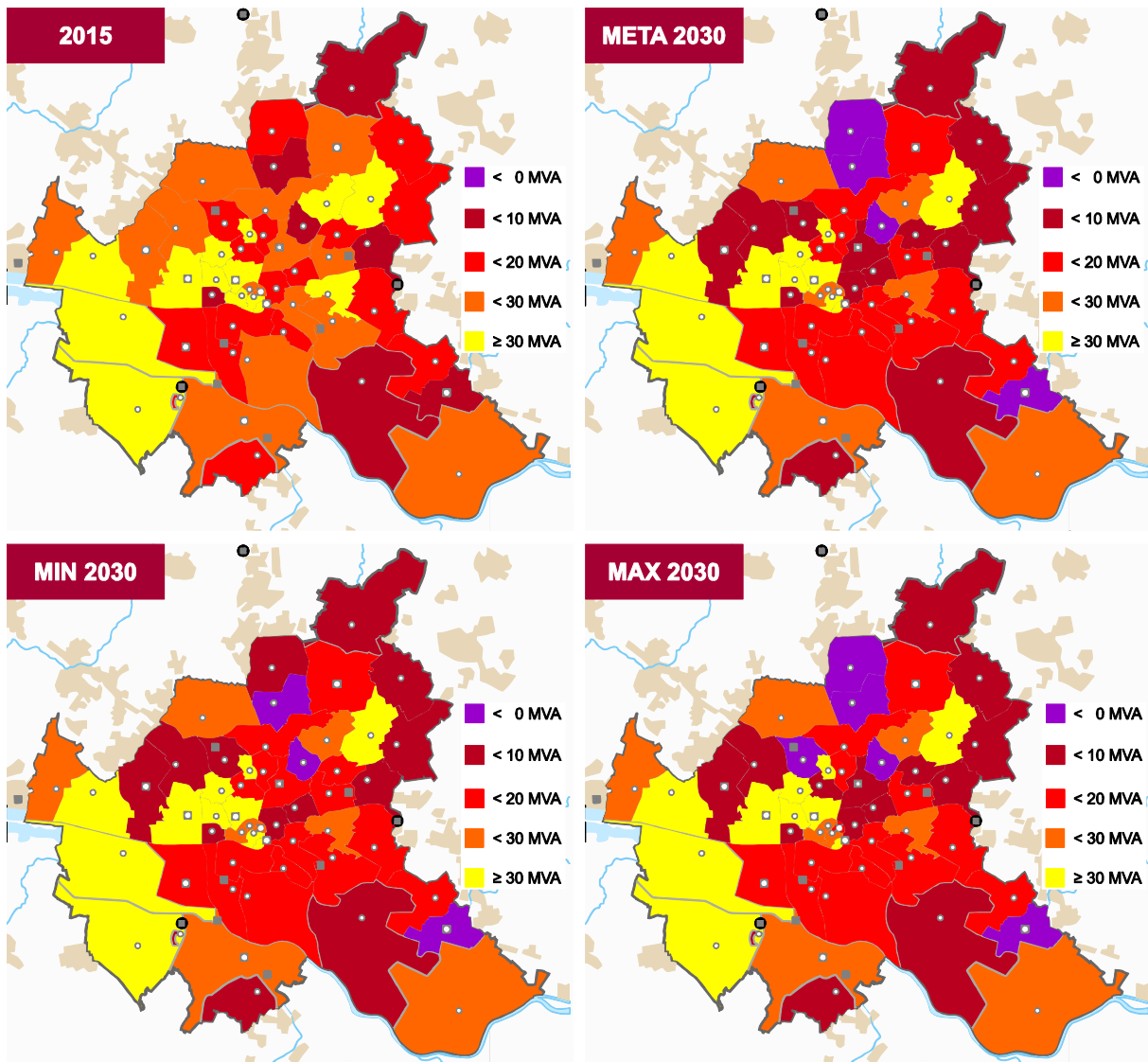


Abbildung 2.31: Szenarienvergleich der UW-Reserven im Jahr 2030

Nach dem Szenario „MIN“ werden nur drei kritische UW-Gebiete identifiziert, das UW Langenhorn ist noch nicht kritisch. Außerdem befinden sich nur 14 Gebiete bei einer Reserve < 10 MVA. Das Szenario „MAX“ führt sogar zu einem zusätzlichen kritischen UW-Gebiet (UW Siemersplatz) und zu einem weiteren UW-Gebiet (UW Hohe Luft) mit sehr geringer Reserve.



### 3 Anschlusszenarien der Busbetriebshöfe

Das Kapitel 3 beinhaltet die Analysen zu den Anschlusszenarien der Busbetriebshöfe der VHH und HOCHBAHN. Zunächst wird die verwendete Modellierung vorgestellt und anschließend die daraus resultierenden Ergebnisse präsentiert.

#### 3.1 Modellbildung

##### 3.1.1 Allgemeiner Ansatz

Im Folgenden wird zur Modellierung der Anschlussleistung zunächst nur die reine Ladung der Busse zur Erbringung der planmäßigen Fahrleistung betrachtet. Folgende Parameter werden vorerst nicht berücksichtigt:

- Werkstattreserven
- Schienenersatzverkehr bzw. Sonderverkehr
- Grundlastbedarf des Hofes, z.B. für Infrastruktur

Die Anschlussleistung eines Busbetriebshofes hängt folglich im Wesentlichen von der Energiemenge ab, die die Fahrzeuge benötigen um den Busbetrieb sicherzustellen.

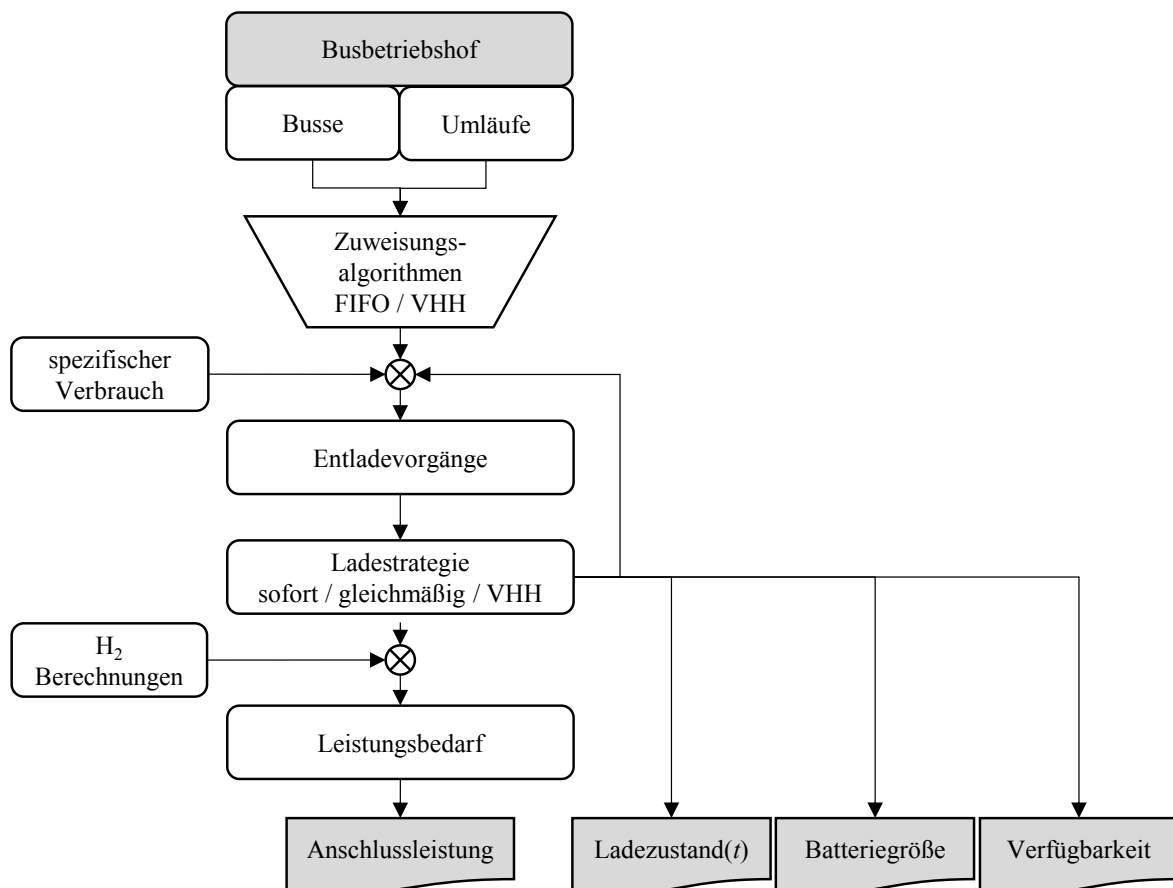


Abbildung 3.1: Methodik zur Ermittlung der Ergebnisse im Rahmen dieser Untersuchungen.

Abbildung 3.1 zeigt einen Überblick über die Methodik, die im Rahmen der Untersuchungen für die Berechnung der Ergebnisse verwendet wurde. Für jeden Busbetriebshof existieren definierte Busumläufe, die die tägliche Laufleistung in Kilometern enthalten. Die Umläufe werden über einen Zuweisungsalgorithmus auf die vorhandenen Busse verteilt. Über den spezifischen Verbrauch der Busse werden dadurch die benötigten Energiemengen, die in der Batterie zu Entladevorgängen führen,

ermittelt. Durch verschiedene Ladestrategien lässt sich der Leistungsbedarf für ein Zeitintervall bestimmen (siehe 3.1.6). Folglich kann für jeden Busbetriebshof ein Tages- bzw. Wochenlastgang erzeugt werden. Der Maximalwert des Leistungsbedarfs definiert die benötigte Anschlussleistung vom Netzbetreiber. Darüber hinaus können über die Ladestrategien Aussagen über den Verlauf der Ladezustände, die notwendigen Batteriegrößen sowie die Verfügbarkeit von Fahrzeugen getroffen werden.

### 3.1.2 Modellierung von Umläufen

Die HOCHBAHN sowie die VHH stellten für die Bearbeitung umfangreiche Daten zu den zu bedienenden Busumläufen bereit. Ein Umlauf enthält folgende Daten:

- Startzeitpunkt
- Endzeitpunkt
- Fahrzeugtyp
- Gefahrene Kilometer

Für jeden Busbetriebshof gilt, dass alle Umläufe an einem Betriebstag vom entsprechenden Fahrzeugtyp bedient werden müssen. Bereitgestellt wurden Daten für einen normalen Werktag (Montag bis Donnerstag) sowie für einen Freitag, der aufgrund der zusätzlichen Nachtumläufe in der Nacht zum Samstag eine erhöhte Belastung darstellt. Samstags und sonntags müssen wesentlich weniger Umläufe bedient werden. Aus diesem Grund ist das Wochenende für eine Abschätzung des maximalen Leistungsbedarfs nicht von Bedeutung.

### 3.1.3 Modell eines Busses

Ein Bus bedient die im Busbetriebshof definierten Umläufe. Sobald er zurück auf dem Hof ist, wird der Bus nach einem kurzen Puffer von 15 min geladen. Dieser Puffer deckt beispielsweise Verspätungen oder Fahrzeugbewegungen auf dem Hof ab. Jeder Bus kann nach seiner Rückkehr (Ende des vorherigen Umlaufs) einen neuen Umlauf starten, auch wenn die Ladedauer nicht zur Vollladung der Batterie ausgereicht hat. Die Batterie wird zunächst so modelliert, dass sie beliebig tief entladen werden kann. Im Umkehrschluss lässt sich nach Durchlauf der Berechnung ermitteln, wie groß die Batterie hätte sein müssen, damit der Bus über eine ganze Woche seine zugewiesenen Umläufe hätte bedienen können.

### 3.1.4 Zuweisungsalgorithmus

Jeder Umlauf muss von einem Bus (geeigneter Fahrzeugtyp) bedient werden. Die Zuordnung erfolgt auf zwei verschiedene Arten:

**First In First Out (FIFO):** Bei der HOCHBAHN existiert keine fixe Zuweisung von Umläufen auf Busse. Vielmehr wird durch ein Betriebsmanagementsystem jeweils ein geeigneter Bus ausgewählt, der den Umlauf bedient. Da im Rahmen dieser Studie keine Modellierung des Betriebsmanagementsystems erfolgen kann, wurde das FIFO-Prinzip implementiert. Der Bus, der als erstes zurückgekommen ist (also bereits am längsten wieder auf dem Hof steht), bekommt den nächsten Umlauf zugeteilt. Dabei ist unerheblich, ob dieser Bus bereits vollgeladen wurde oder bereits viele Betriebskilometer gefahren hat. Damit lässt sich im Umkehrschluss auch für jeden Betriebshof die Mindestzahl der Fahrzeuge ermitteln. Es müssen genau so viele Busse auf dem Hof sein, dass gerade alle Umläufe bedient werden können (Werkstattreserve etc. nicht betrachtet).

Die Verwendung des FIFO-Prinzips stellt eine Abschätzung zur sicheren Seite dar, da ein Betriebsmanagement in jedem Fall in der Lage ist, eine sinnvollere Zuteilung von Umläufen auf die Busse vorzunehmen und damit auch notwendige Batteriekapazitäten und Ladleistungen reduziert werden könnten. Weiterhin kann es durch die Zuteilung der Umläufe dazu kommen, dass einige Busse besonders ungünstige Kombinationen von Umläufen zugeteilt bekommen. Beispielsweise kommen



Busse von einem besonders langen Umlauf (z.B. 300 km) zurück und müssen nach zwei Stunden bereits wieder auf einen sehr langen Umlauf. Die Tatsache, dass in der kurzen Pause die Batterie nicht wieder aufgeladen werden kann führt dazu, dass die benötigten Batteriegrößen besonders konservativ abgeschätzt werden. Diese können im realen Einsatz wesentlich kleiner ausfallen, wenn eine entsprechende Disponierung vorgenommen wird.

**Feste Zuordnung der Busse (VHH):** Die VHH hat im Vorfeld der Untersuchungen bereits ermittelt, dass besonders lange Umläufe (mehr als 250 km) vermutlich mit aktuell verfügbaren Batteriekapazitäten nicht bedient werden können. Aus diesem Grund wurden lange Umläufe aufgetrennt und ein Mehrbedarf an Fahrzeugen bestimmt. Zudem erfolgt eine genaue Zuteilung, welcher Bus an welchem Tag welche Umläufe bedient. Damit ist die Belastung für jeden Bus vorgegeben und an jedem betrachteten Tag identisch.

### 3.1.5 Vorkonditionierung der Fahrzeuge

Busse müssen vor dem Auslaufen auf Betriebstemperatur vorgeheizt (vorkonditioniert) werden. Die VHH führt dies durch eine zusätzliche Heizung durch, die mit Heizöl betrieben wird. Damit kann dieser Vorgang für die Betrachtung des elektrischen Leistungsbedarfs unberücksichtigt bleiben.

Die HOCHBAHN verwendet eine elektrische Vorkonditionierung. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Bus im ungünstigsten Fall für eine Stunde konstant mit einer Leistung von 65 kW geheizt werden muss. Dies geht in der Modellrechnung zu Lasten der Batterieladung. Das heißt, ist die Batterie zum Startzeitpunkt der Konditionierung noch nicht voll, kann nur noch mit  $(150 - 65) \text{ kW} = 85 \text{ kW}$  geladen werden.

Für die Berechnung der Anschlussleistung wird davon ausgegangen, dass ein Bus eine Stunde mit 65 kW vorkonditioniert werden muss, sobald er mehr als zwei Stunden auf dem Hof steht. Hintergrund ist die Annahme, dass der Bus im Winter binnen zwei Stunden von den ursprünglich 20 °C wieder auf die winterliche Umgebungstemperatur (-15 °C) abgekühlt ist. Dies ist eine Schätzung und wurde nicht mit Temperaturmodellen ermittelt. In der Realität kann dieser Wert stark abweichen.

### 3.1.6 Ladung und Entladung der Busse

Für die Aufladung der Batterien werden folgende Rahmenbedingungen angenommen:

- Zu Beginn der Woche startet der Bus mit voller Batterie (Entladung = 0).
- Nach Abschluss eines Umlaufs wird der Bus entsprechend der Laufleistung multipliziert mit dem spezifischen Verbrauch (abhängig vom Fahrzeugtyp) entladen.
- Die Zeit bis zum nächsten Umlauf wird der Bus über verschiedene Ladestrategien wieder geladen.
- Die Ladung erfolgt abzüglich eines 15-minütigen Puffers zu Beginn (z.B. Verspätung des Busses, Überhitzung der Batterie, Verzögerung im Betriebsablauf etc.), sowie der elektrischen Konditionierung.
- Die maximale Ladeleistung beträgt konstant 150 kW. Der Wirkungsgrad der Ladung wird mit 90% angenommen.

#### Ladestrategie sofortige Ladung

Diese Ladestrategie lädt einen Bus nach seiner Rückkehr und dem Zeitpuffer (15 min) mit voller Ladeleistung (150 kW) bis die Batterie wieder vollgeladen ist (Entladung = 0), der Bus vorkonditioniert wird (reduzierte Ladeleistung 85 kW) oder den Hof verlässt. Die Batterietechnologie bleibt unberücksichtigt. Eventuelle Reduktionen der tatsächlichen Ladeleistung werden über den Zeitpuffer zu Beginn sowie durch einen konservativen Ladewirkungsgrad von 90% abgedeckt.

## Ladestrategie gleichmäßige Ladung

Nach der Zuweisung der Umläufe auf die Busse ist für jeden Bus genau bekannt, wie lange er auf dem Hof steht, bis er zum nächsten Umlauf ausrücken muss. Eine Ladung mit kleineren Leistungen ist für die meisten Batterietechnologien schonender, was potentiell die Lebensdauer erhöhen kann. Weiterhin besteht die Annahme, dass die Belastung für das Netz geringer ist, wenn das gesamte Zeitfenster für die Ladung in Anspruch genommen wird und nicht sofort mit voller Leistung über einen kürzeren Zeitraum geladen wird. Die Ladung eines zurückgekehrten Busses erfolgt also mit konstanter Leistung bis zum nächsten Auslaufen (bzw. bis zum Start der Vorkonditionierung). Ist die Batterie bereits sehr weit entladen, sodass die Batterie bis zum nächsten Umlauf nicht wieder vollgeladen werden kann, so wird das gesamte Zeitfenster mit voller Ladeleistung geladen (äquivalent zu sofortiger Ladung).

## Ladestrategie der VHH

Die VHH plant für die Ladung ihrer Busse eine Kombination aus sofortiger und gleichmäßiger Ladung. Die Batterie wird zu Beginn mit einer verringerten Leistung (50 kW) geladen. Anschließend mit voller Ladeleistung (150 kW) und zum Ende hin wieder mit der verringerten Leistung (50 kW). Die Anteile der drei Zeitfenster betragen 20, 60 und 20%. Ist bereits absehbar, dass der Bus bis zum nächsten Umlauf nicht wieder vollständig aufgeladen werden kann, so wird er die ganze Zeit mit der reduzierten Leistung von 50 kW geladen.

Im Verlauf der Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich die gesamte Ladeleistungskurve der VHH-Ladung kaum von der Ladeleistungskurve bei sofortiger Ladung unterscheidet.

## Modellierung des Verbrauchs der Busse

Bei der HOCHBAHN kommen drei Typen von Bussen zum Einsatz: Solobusse, Gelenkbusse und Doppelgelenkbusse. Die VHH nutzen nur Solo- und Gelenkbusse. Für die Berechnungen werden modellhafte Abschätzungen von Verbrauchswerten der HOCHBAHN sowie der VHH verwendet. Diese entsprechen den Annahmen der Hersteller über die Höhe des Verbrauchs zukünftiger Busse. Tabelle 3.1 enthält die in den Modellen verwendeten Verbrauchsdaten der Bustypen.

Tabelle 3.1: Spezifische Verbrauchswerte der Busse bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen

Spezifischer Verbrauch [kWh/km]		Umgebungstemperatur		
		-15 °C	20 °C	28 °C
HOCHBAHN	Solobus	2,11	1,42	1,60
	Gelenkbus	3,25	2,05	2,40
	Doppelgelenkbus	4,50	2,68	3,17
VHH	Solobus	(2,55)	1,70	
	Gelenkbus	(3,30)	2,20	

## Bestimmung der benötigten Batteriekapazitäten

Die Modellierung der Busse erfolgte ohne eine vorherige Dimensionierung der Batterie. Ziel war vielmehr die Bestimmung der notwendigen Größen des Speichers aufgrund der notwendigen Energieverbräuche entsprechend der zugewiesenen Umläufe. Für die Abschätzung der notwendigen Batteriegrößen wurde der Verlauf der Entladetiefe über eine Woche berechnet und die tiefste Entladung definiert die notwendige Batteriegröße.

Bei der Verwendung des FIFO-Prinzips für die Zuweisung von Umläufen auf Busse stößt das hier verwendete Modell an seine Grenzen. Eine realistische Einschätzung der Batteriegrößen ist damit nur bedingt möglich. Sie stellt jedoch eine Worst-Case Abschätzung dar. Bei dem Zuweisungsprinzip der VHH hingegen dürften sich die berechneten besser mit den zu erwartenden Werten decken, da die Busse hier im Vorfeld schon geeignet und gleichmäßig mit Umläufen belegt wurden. Die tatsächliche zu erwartende Nutzung der Busse im Feld sollte sich also zum Großteil mit den Annahmen in der Studie decken.

### **3.1.7 Modellierung von Wasserstofffahrzeugen und Range-Extendern**

Als Alternative sowie als Ergänzung zu reinen Elektrobussen soll für die HOCHBAHN untersucht werden, inwiefern Wasserstoffbusse (Brennstoffzellenfahrzeuge) oder Range-Extender Busse (Kombination einer elektrischen Batterie mit einer kleineren Brennstoffzelle) eingesetzt werden können.

Die Modellierung der Wasserstoffbusse erfolgte ähnlich zu den rein elektrischen Bussen. Es erfolgt ebenfalls eine Vorkonditionierung nach dem gleichen Verfahren. Der spezifische Verbrauch pro Kilometer wird bei Solobussen auf 9 kgH<sub>2</sub>/100km, bei Gelenkbussen auf 14 kgH<sub>2</sub>/100km und bei Doppelgelenkbussen auf 19 kgH<sub>2</sub>/100km geschätzt. Somit werden Wasserstoffbusse nicht elektrisch geladen oder entladen, sondern tanken jeweils nur die benötigte Menge an Wasserstoff. Eine Berücksichtigung der Tankgröße erfolgte nicht. Es wurde angenommen, dass die Wasserstoffbusse alle Umläufe bedienen können.

Eine Modellierung von Range-Extender (RE) Bussen erfolgte aufgrund von Zeitgründen nicht im Rahmen dieser Studie. Vielmehr wurden die von den Herstellern angegebenen Verbrauchsdaten von RE Bussen herangezogen um ein Verhältnis zu berechnen, dass die Deckung des Energiebedarfs eines RE Busses auf Wasserstoff und elektrische Energie aufteilt. RE Busse benötigen 3 kgH<sub>2</sub>/100km (Solobus) sowie 5,6 kgH<sub>2</sub>/100km (Gelenkbus). Es wird vereinfachend angenommen, dass RE Busse während der Fahrt konstant Wasserstoff in der Brennstoffzelle verbrauchen und damit die Entladung der Batterie reduzieren. Da RE Busse ca. ein Drittel des Wasserstoffbedarfs von reinen Wasserstoffbussen haben, beziehen sie damit folglich ihre Energie in etwa zu einem Drittel aus Wasserstoff und zu zwei Dritteln aus der Batterie. Weiterhin wird daraus gefolgert, dass RE Busse folgendermaßen abgeschätzt werden können:

$$3 \text{ RE Busse} \approx 1 \text{ H}_2 \text{ Bus} + 2 \text{ Elektrobusse}$$

Damit entspricht ein Szenario mit 100% RE Bussen in etwa einem Szenario von 33% (30%) Wasserstoffbussen und 66% (70%) Elektrobussen.

### **3.1.8 Sukzessives Ersetzen von Elektrobussen durch Wasserstoffbusse**

Der Ersatz von Elektrobussen durch Wasserstoffbusse erfolgt in Stufen von 10% der Gesamtanzahl der Busse auf einem Busbetriebshof. Es wird dabei angenommen, dass die Elektrobuse als erstes durch Wasserstoffbusse ersetzt werden, die laut der vorangehenden Berechnungen (Zuweisungsalgorithmus und Ladealgorithmus) die größten Batteriekapazitäten benötigt hätten.

### **3.1.9 Ermittlung des Energiebedarfs für die Wasserstoffbusse**

Es werden zwei Szenarien betrachtet. Zunächst wird angenommen, dass der für die Busse benötigte Wasserstoff mit Elektrolyseuren auf dem Busbetriebshof erzeugt wird. Die Daten für den Leistungs- und Energiebedarf stellte die HOCHBAHN zur Verfügung. Ein Modul kann pro Tag 2.143 kgH<sub>2</sub> erzeugen. Dafür wird eine Anschlussleistung von 7.400 kVA benötigt (inklusive der Nebenaggregate). Damit ergibt sich für ein Kilogramm Wasserstoff ein Energiebedarf von 78,7 kWh elektrischer Energie. Der Elektrolyseur soll 24 Stunden pro Tag mit einer konstanten Leistung betrieben werden. Folglich muss für jedes kg Wasserstoff der Elektrolyseur mit 3,3 kW Anschlussleistung betrieben werden.

Der Wasserstoff kann alternativ auch per Tanklastzug auf den Busbetriebshof geliefert werden. In diesem Fall entfällt der Leistungs- und Energiebedarf für die Wasserstoffproduktion. Stattdessen wird nur noch die notwendige Infrastruktur mit elektrischer Energie versorgt. Die HOCHBAHN geht derzeit von einem Leistungsbedarf von 500 kW im Zeitraum von 22 Uhr bis 4 Uhr aus.

### 3.1.10 Bestimmung des Gesamtenergieverbrauchs eines Busbetriebshofes

Für die Abschätzung des jährlichen Gesamtenergiebedarfs eines Busbahnhofs wurde ein Temperaturmodell erstellt. Dieses ermöglicht es, den spezifischen Verbrauch der Busse sowie den Bedarf an Vorkonditionierung zu quantifizieren.

Die von der HOCHBAHN sowie der VHH bereitgestellten Daten zu temperaturabhängigen Verbräuchen ergeben bei mittleren Temperaturen (20 °C) ein Minimum. Für heißere Tage muss ein Mehrbedarf für die Klimaanlage mit einberechnet werden. Bei kälteren Tagen muss zusätzlich geheizt werden. Die drei Stützstellen aus Tabelle 3.1 ergeben den in Abbildung 3.2 dargestellten Verlauf. Zwischen den Stützstellen erfolgt eine lineare Interpolation. Dies ist eine konservative Abschätzung, da in der Realität der Verlauf der Kurve eher einer Badewannenform entsprechen sollte.

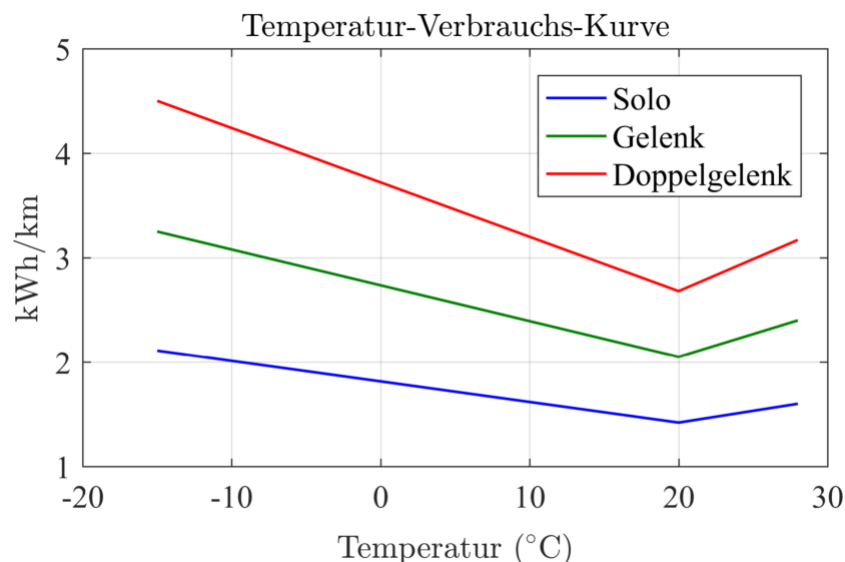


Abbildung 3.2: Verbrauch der unterschiedlichen Fahrzeugtypen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Stützstellen entsprechen den Werten aus Tabelle 3.1.

Mithilfe von Datensätzen des Deutschen Wetterdienstes wurden für Hamburg Temperaturkurven erzeugt. Diese enthalten jeweils die maximale bzw. minimale Tagestemperatur (siehe Abbildung 3.3).

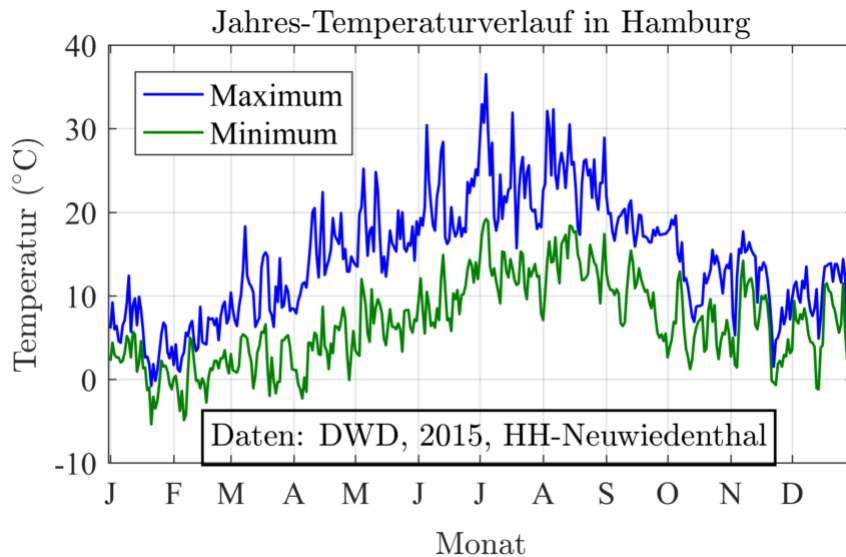


Abbildung 3.3: Verlauf der Temperaturkurve in Hamburg im Jahr 2015 nach Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

Damit lässt sich für jeden Tag ein spezifischer Verbrauch in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur für die Busse ermitteln. Für die Vorkonditionierung wurde der Tagesminimalwert verwendet, da davon ausgegangen wird, dass die Busse in den kühleren Morgenstunden vorgeheizt werden müssen. Beim spezifischen Verbrauch wurde jeweils der Temperaturwert verwendet, der einen höheren Verbrauch erzeugt. Im Sommer ist dies in der Regel der Maximalwert, im Winter der Minimalwert. Die Ergebnisse dieser Modellierung sind in Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 dargestellt.

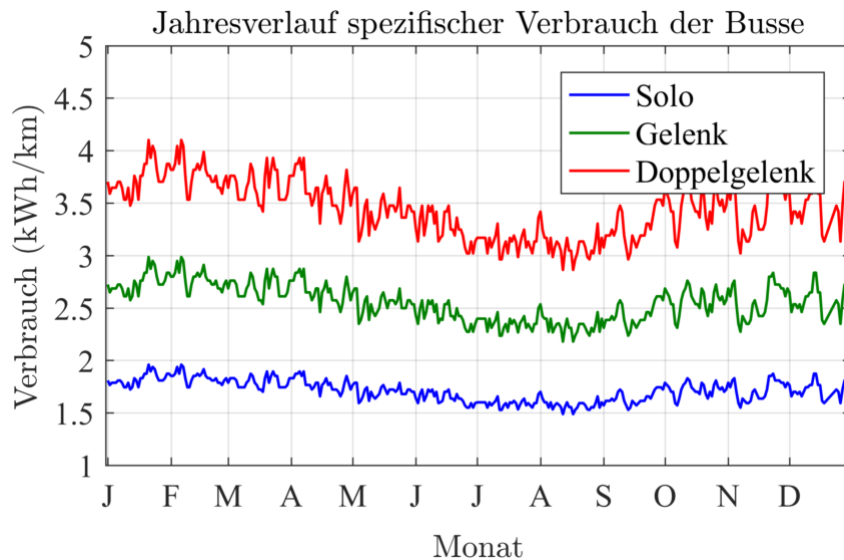


Abbildung 3.4: Verlauf des spezifischen Verbrauchs der Busse über das Jahr 2015.

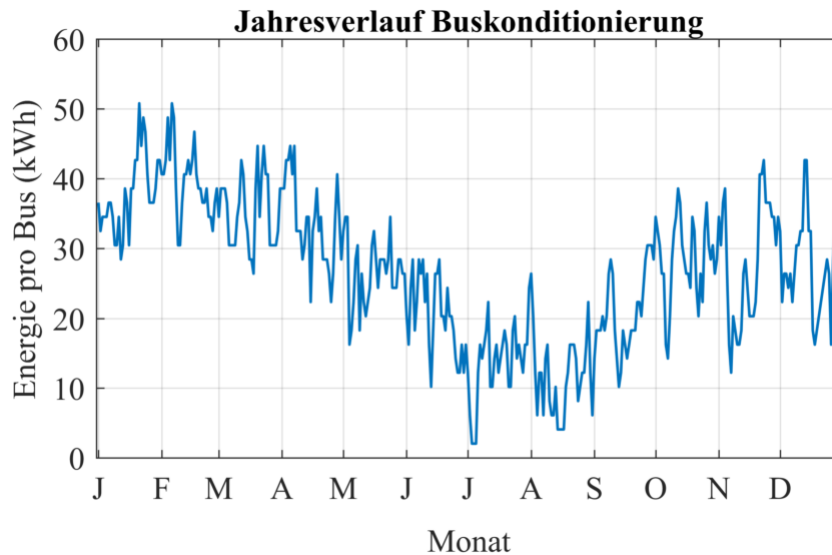


Abbildung 3.5: Verlauf der täglichen Konditionierungsenergie für einen Elektrobus über das Jahr 2015.

Es wird weiterhin angenommen, dass die von der HOCHBAHN sowie der VHH zur Verfügung gestellte jährliche Gesamtleistung der Busse auf das ganze Jahr gleichmäßig verteilt werden kann. Damit bleiben Unterschiede zwischen Wochenenden, Feiertagen und Werktagen unberücksichtigt. Die Vereinfachung sollte jedoch durch den langen Betrachtungszeitraum (365 Tage) nur geringe Abweichungen verursachen. Abbildung 3.6 zeigt eine Gesamtübersicht über die temperaturbasierte Modellierung des Gesamtenergieverbrauchs eines Busbetriebshofes.

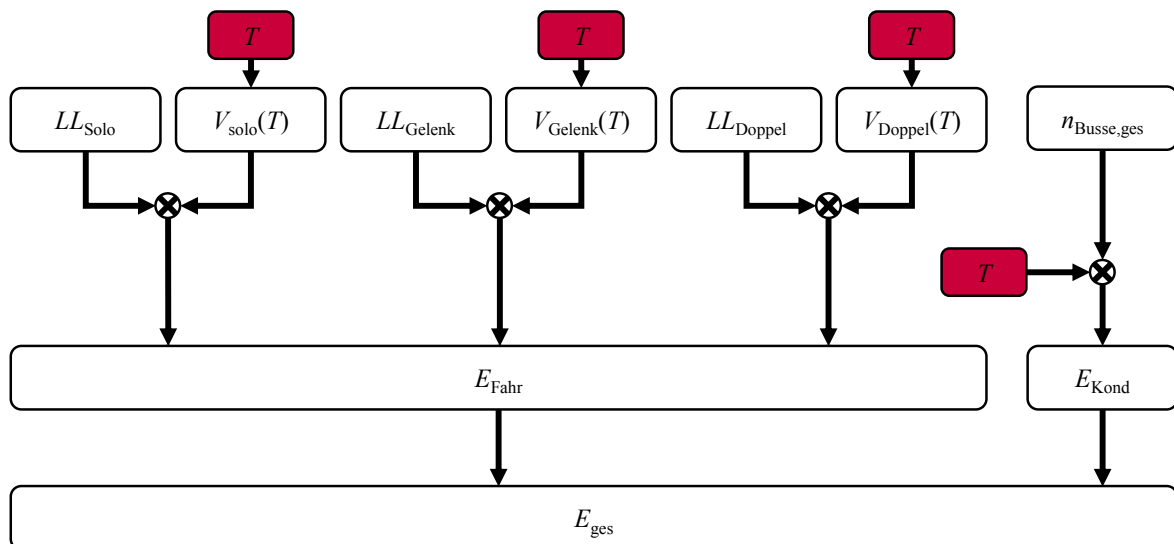


Abbildung 3.6: Modell zur temperaturabhängigen Berechnung der benötigten Energie

Um auszuschließen, dass der betrachtete Zeitraum der Wetterdaten (Jahr 2015) nicht repräsentativ für einen typischen Temperaturverlauf ist, wurden weitere Jahre betrachtet (2011-2014). Zusätzlich wurde untersucht, wie sich der Jahresgesamtenergiebedarf verändert, wenn die mittlere Jahrestemperatur um 5 °C steigt oder sinkt.

### 3.1.11 Hochrechnung der benötigten Anschlussleistung sowie des Gesamtenergiebedarfs auf das Jahr 2030

Die von der HOCHBAHN sowie der VHH bereitgestellten Daten zu Busumläufen und Jahresgesamtleistung basieren auf Daten für das Jahr 2015. Um eine Übertragung auf das Jahr 2030 vorzunehmen, muss ein geeigneter Faktor ermittelt werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die benötigte Gesamtenergiemenge eines Busbetriebshofes im Wesentlichen von der jährlichen Laufleistung der Busse abhängt. Basierend auf dieser Annahme, wird der Umrechnungsfaktor für die Veränderung vom Jahr 2015 ins Jahr 2030  $k_{30}$  folgendermaßen ermittelt:

$$k_{30} = \frac{E_{2030}}{E_{2015}} = \frac{E_{S30} + E_{G30} + E_{DG30}}{E_{S15} + E_{G15} + E_{DG15}} = \frac{LL_S \cdot V_S \cdot \frac{n_{S30}}{n_{S15}} + LL_G \cdot V_G \cdot \frac{n_{G30}}{n_{G15}} + LL_{DG} \cdot V_{DG} \cdot \frac{n_{DG30}}{n_{DG15}}}{LL_S \cdot V_S + LL_G \cdot V_G + LL_{DG} \cdot V_{DG}} \quad (7)$$

$E_{2030}$  ist die Energiemenge im Jahr 2030,  $E_{2015}$  die Energiemenge im Jahr 2015.  $E_S$  der Anteil der Solobusse,  $E_G$  der Anteil der Gelenkbusse,  $E_{DG}$  der Anteil der Doppelgelenkbusse.  $LL$  bezeichnet die Laufleistung des jeweiligen Fahrzeugtyps für Solo  $LL_S$ , Gelenk  $LL_G$  und Doppelgelenk  $LL_{DG}$ .  $V_S$  ist der Verbrauch eines Solobusses,  $V_G$  der eines Gelenkbusses,  $V_{DG}$  der eines Doppelgelenkbusses,  $n_{30}$  ist die geplante Anzahl an Bussen eines bestimmten Typs auf dem Hof,  $n_{15}$  die aktuelle Anzahl des Typs.

Mit obiger Formel wird berücksichtigt, dass eine Verdoppelung der Gelenkbusse auf einem Busbetriebshof stärkere Auswirkungen auf den Energieverbrauch hat als die Verdoppelung der Solobusse, da der spezifische Verbrauch der Gelenkbusse höher ist.

Für die Anschlussleistung eines Busbetriebshofes wird der gleiche Hochrechnungsfaktor verwendet wie für die Hochrechnung des Gesamtenergiebedarfs:

$$P_{\text{Anschluss,2030}} = P_{\text{Anschluss,2015}} \cdot k_{30} \quad (8)$$

Die Ergebnisse sind in diesem Fall weniger belastbar und deshalb mit höheren Unsicherheiten behaftet. Zwar haben auch hier die Gelenkbusse bzw. Doppelgelenkbusse stärkeren Einfluss auf die gesamte Anschlussleistung des Hofes, da jedoch alle Busse mit der gleichen maximalen Anschlussleistung von 150 kW ausgestattet sind, werden sich in Realität eher abweichende Werte ergeben.

## 3.2 Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse basieren auf den Annahmen, die in Abschnitt 3.1 getroffen wurden.

### 3.2.1 Gesamtenergiebedarf der Busbetriebshöfe

Abbildung 3.7 zeigt für die Busbetriebshöfe die benötigten Energiemengen. Die Energiemengen für die Vorkonditionierung sind im Vergleich zur Energie, die für die Fahrt benötigt wird, deutlich geringer. Der jährliche Gesamtenergiebedarf aller Busbetriebshöfe der HOCHBAHN beläuft sich auf ca. 132 GWh. Bei der VHH beläuft sich der Gesamtenergiebedarf auf ca. 49 GWh.

Bei einer durchschnittlich 5 °C höheren Temperatur sinkt der Energiebedarf um 7,5%. Bei einer durchschnittlich 5 °C tieferen Temperatur steigt der Energiebedarf um 8,8%. Mit den Wetterdaten der Jahre 2011 bis 2014 hätte sich eine Schwankung des Energiebedarfs von ± 2% ergeben. Das Wetterjahr 2015 scheint also repräsentativ.

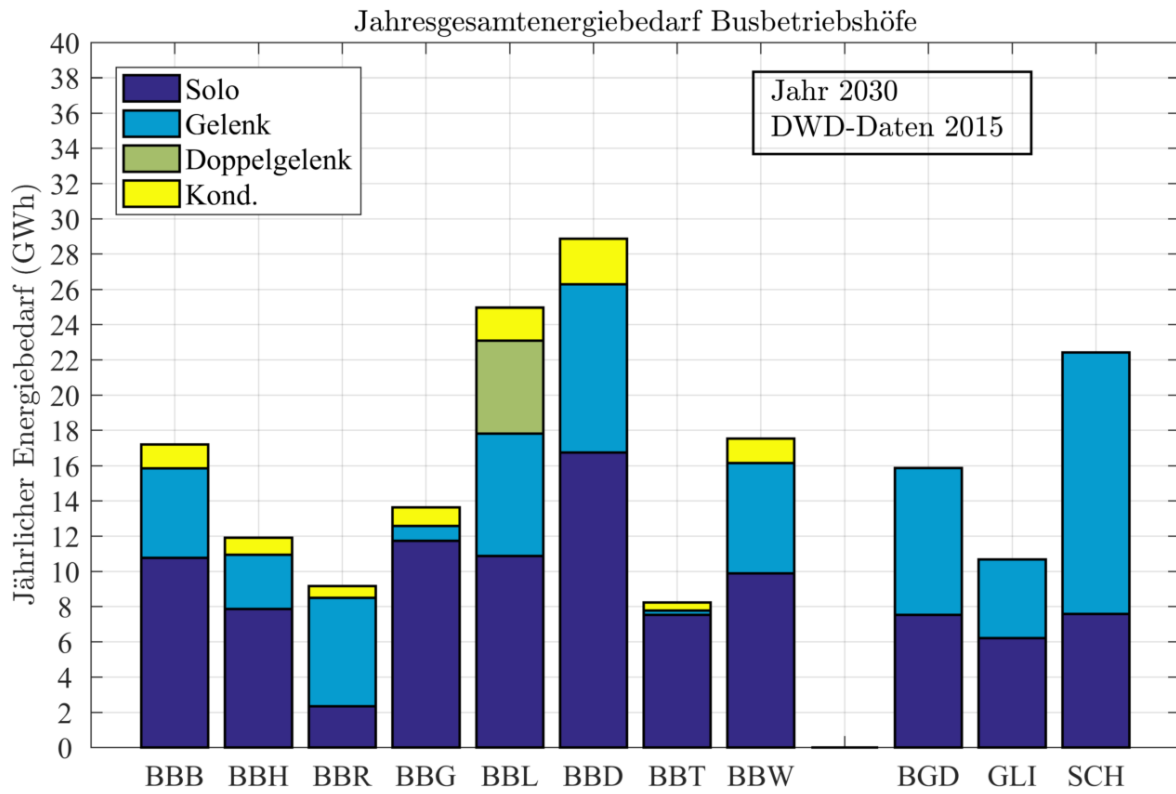


Abbildung 3.7: Jahresgesamtenergiebedarf der Busbetriebshöfe hochgerechnet auf das Jahr 2030.



### 3.2.2 Tageslastgänge der Busbetriebshöfe

#### Typischer Wochenlastgang der HOCHBAHN

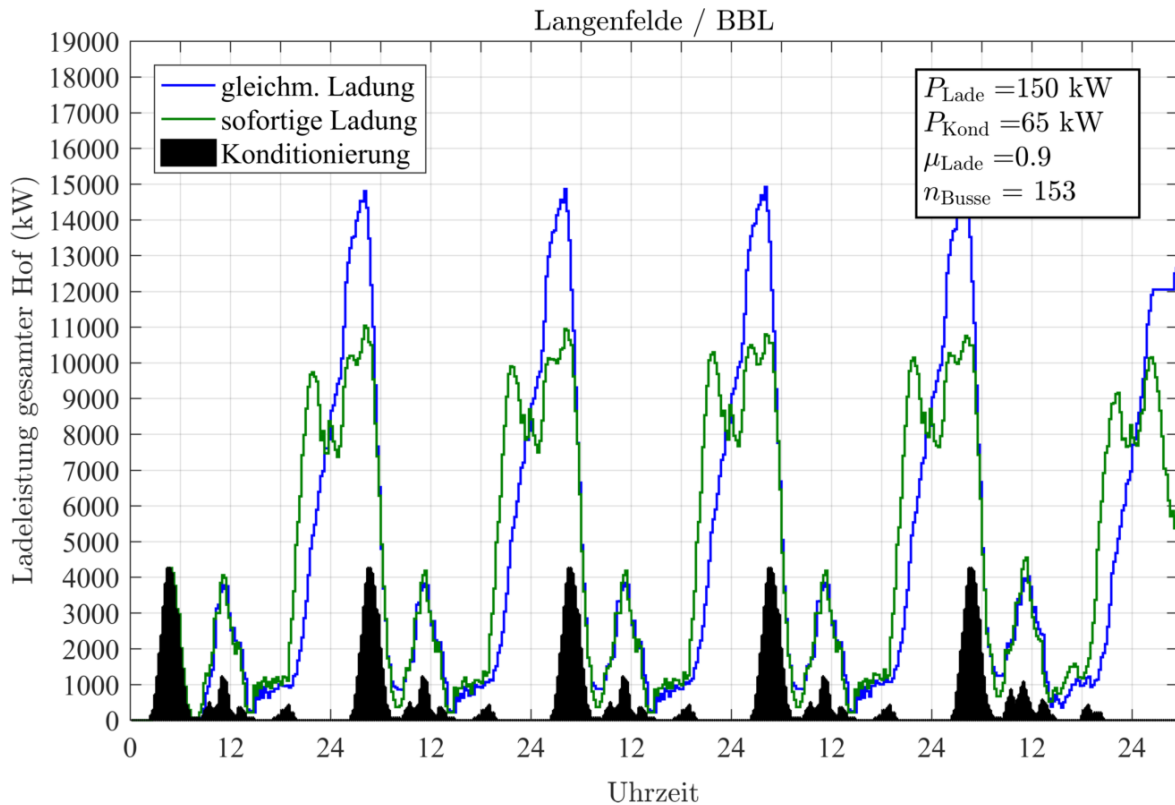


Abbildung 3.8: Verlauf einer typischen Ladeleistung einer Woche an einem Busbetriebshof der HOCHBAHN. Lade-Wirkungsgrad 90%, Ladeleistung 150 kW, Vorkonditionierung mit 65 kW, Verbrauchswerte für Busse im Winter.

Abbildung 3.8 zeigt exemplarisch den Lade-Wirkleistungsverlauf des Busbetriebshofes Langenfelde für die Umlaufdaten des Jahres 2015. Die grüne Kurve zeigt den Leistungsbedarf, wenn alle zurückgekehrten Busse sofort mit einer Leistung von 150 kW geladen werden. Die blaue Kurve zeigt den Leistungsbedarf, wenn die Ladung auf das zur Verfügung stehende Zeitfenster verteilt wird. Der schwarze Bereich zeigt den Anteil der Vorkonditionierung. In beiden Fällen tritt die Leistungsspitze ca. um 4 Uhr früh auf.

Es zeigt sich, dass eine gleichmäßige Ladung der Busse nicht zwangsläufig zu einer Reduktion der Anschlussleistung führt. Das liegt daran, dass die ersten Rückkehrer am Abend bei voller Ladeleistung bereits in kürzerer Zeit vollgeladen werden können. Sie haben in den Nachtstunden keinen Leistungsbedarf mehr. Folglich hängen bei einer vergleichmäßigten Ladung kurz vor der Abfahrt des ersten Busses am Morgen noch alle Busse an der Ladebuchse. Die Leistung jedes einzelnen Busses wird somit zwar reduziert, in Summe über alle Busse führt dies jedoch zu einer Erhöhung. Ein Optimum liegt vermutlich in einer gemischten Strategie. Diese könnte es ermöglichen, die Busse schonend zu laden und gleichzeitig die Nacht für die späteren Rückkehrer freizuhalten.

Die Vorkonditionierung stellt einen erheblichen zusätzlichen Leistungsbedarf dar. Wäre es möglich, die Ladung der Batterien abzuschließen, bevor die Vorkonditionierung beginnt, so könnte dies die Anschlussleistung reduzieren.

Weiterhin ist erkennbar, dass die Busse, die um die Mittagszeit von ihrem ersten Umlauf zurückkehren, hier bereits einen Teil ihrer Energie wieder aufladen können. Sie entlasten damit die Nachtstunden, weil sie bei der Rückkehr nach dem nächsten Umlauf kürzer an der Ladebuchse sein müssen. Teilweise

können Busse in der Mittagszeit vollständig wieder aufgeladen werden und haben sogar noch zeitliche Reserven. Das bietet die Möglichkeit, einen Bus in den Nachtstunden bewusst nicht voll aufzuladen, wenn bereits klar ist, dass er am nächsten Tag ein relativ großes Zeitfenster für eine Mittagsladung besitzt.

Insgesamt ist die Darstellung in Abbildung 3.8 als Worst-Case Betrachtung für die reine Lade-Wirkleistung zu verstehen. Es besteht noch erhebliches Potential durch geeignete Ladestrategien die Anschlussleistung während des Betriebs zu reduzieren. Damit kann einerseits der Leistungspreis (abhängig von der Jahresspitze) gesenkt werden. Weiterhin kann damit eine Entlastung des Netzes oder eine Optimierung des Energieverbrauchs hinsichtlich Kosten (Börsenpreis) oder Klimaverträglichkeit (verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien) erzielt werden.

Die Ladeleistungskurven der anderen Betriebshöfe der HOCHBAHN finden sich im Anhang.

### Typischer Wochenlastgang der VHH

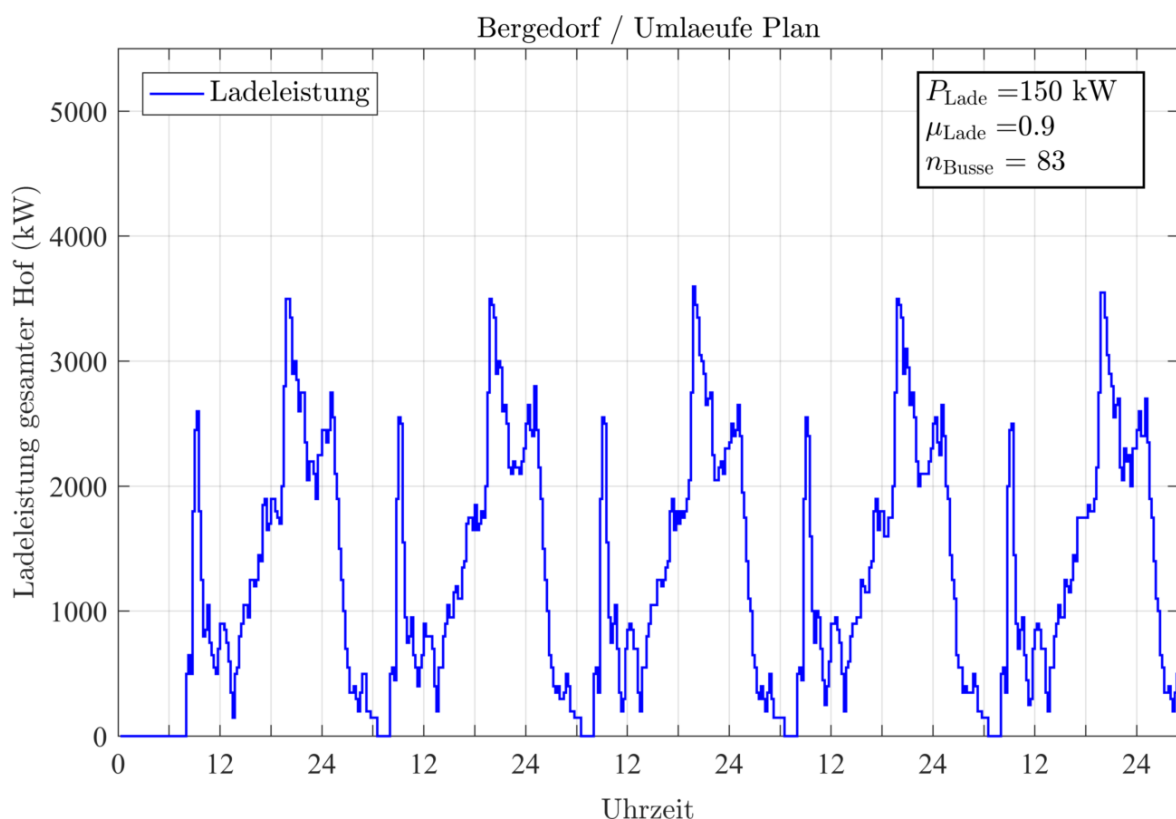


Abbildung 3.9: Verlauf einer typischen Ladeleistung einer Woche an dem Busbetriebshof Bergedorf. Lade-Wirkungsgrad 90%, Ladeleistung 150 kW, keine elektrische Vorkonditionierung, Ölheizung

Abbildung 3.9 zeigt exemplarisch den Wochenverlauf einer typischen Lade-Wirkleistungskurve des Busbetriebshofs Bergedorf. Zu erkennen ist, dass die Ladeleistung am frühen Morgen auf 0 sinkt. Alle Busse werden also bereits vor ihrer Abfahrt vollgeladen. Kommen Busse am Vormittag zurück, kann auch hier wieder ein Teil der benötigten Energie geladen werden. Die Mittagsspitze ist im Vergleich zur Nachtspitze wesentlich höher als am Busbetriebshof Langenfelde. Die Nachtspitze tritt im Vergleich zur HOCHBAHN auch wesentlich früher auf, ca. gegen 20 Uhr.

Da bei der VHH die Busse nicht elektrisch vorkonditioniert werden, ist die Netzbelastung in den Morgenstunden vor dem Ausrücken dadurch auch geringer. Des Weiteren werden die Busse im Winter

mit einer Ölheizung betrieben, was den spezifischen Energiebedarf über das Jahr hin weitestgehend konstant hält.

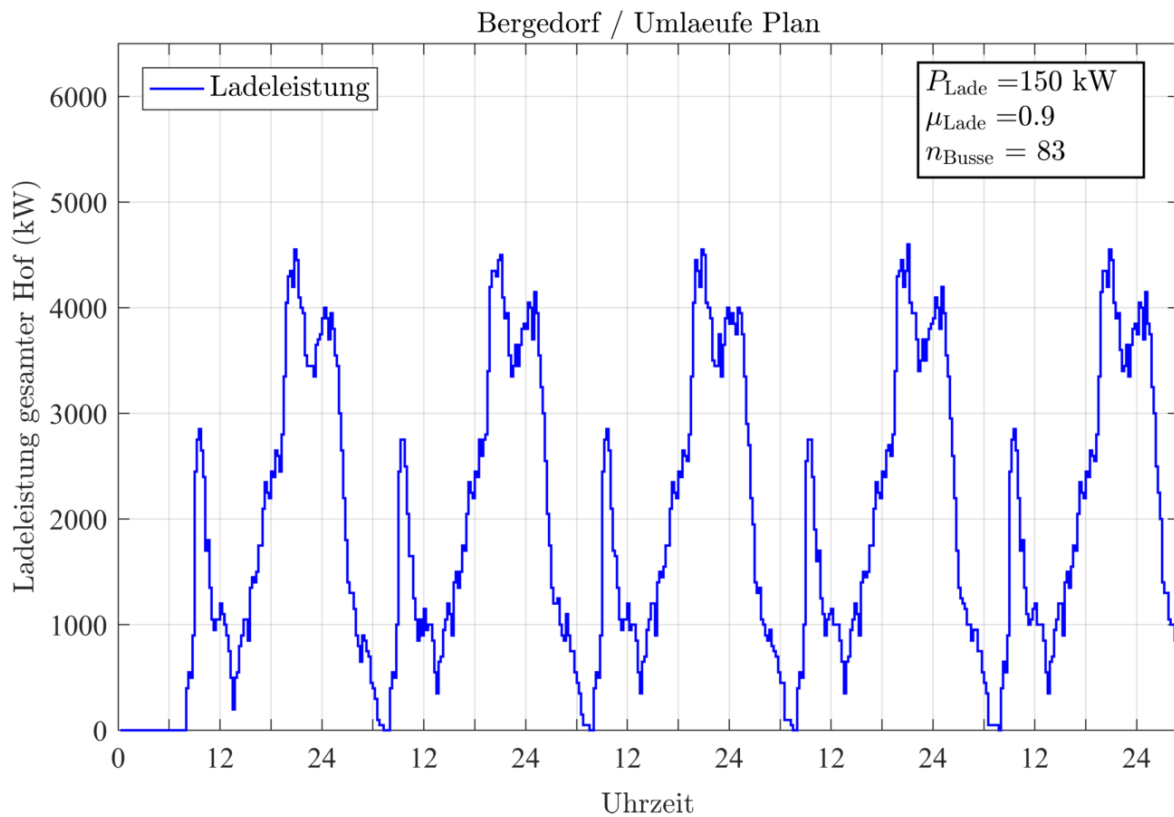


Abbildung 3.10: Verlauf einer typischen Ladeleistung einer Woche an dem Busbetriebshof Bergedorf. Lade-Wirkungsgrad 90%, Ladeleistung 150 kW, keine elektrische Vorkonditionierung, elektrische Heizung

Sollte es in Zukunft notwendig sein, auf elektrisch geheizte Busse umzusteigen, wird sich der Lade-Wirkleistungsbedarf erhöhen. Abbildung 3.10 zeigt den Verlauf der Lade-Wirkleistungskurve für den Fall, dass die Busse während der Fahrt elektrisch geheizt werden müssen, jedoch auf dem Busbetriebshof weiterhin mit Öl geheizt werden. In diesem Fall wird ein erhöhter spezifischer Verbrauch angenommen. Die Ladespitze steigt von 3,6 kW auf ca. 4,5 kW an.

### 3.2.3 Anschlussleistung der Busbetriebshöfe

Aus den Verläufen für die Lade-Wirkleistungskurve der einzelnen Betriebshöfe wird nun jeweils der Spitzenwert ermittelt. Dieser definiert die maximale Anschlussleistung des Busbetriebshofes in MW. Für die Umrechnung in die erforderliche Anschlussleistung in MVA wird ein  $\cos \varphi = 0,95$  angesetzt. Dies stellt im Vergleich zu aktuellen Ladetechnologien einen konservativen Wert dar.

Tabelle 3.2: Übersicht über alle Busbetriebshöfe der HOCHBAHN sowie VHH.  $k_{30}$  ist der Umrechnungsfaktor vom Jahr 2015 auf das Jahr 2030.  $P_{\max,15}$  ist der Maximalwert der Lade-Wirkleistungskurven.  $S_{\max,30}$  ist die Scheinleistung ( $\cos \varphi = 0,95$ ) hochgerechnet ins Jahr 2030. Grundlast Betriebshof ist die aktuell vorhandene Anschlussleistung.  $S_{\Sigma}$  ist die in Summe erforderliche Anschlussleistung des gesamten Hofes inklusive Blindleistung und Nebenverbrauchern im Jahr 2030. Die Netzebene gibt an, auf welcher Spannungsebene der Hof vermutlich angeschlossen werden muss (Maximalwert für die Mittelspannung: 14 MVA).

Busbetriebshof	$k_{30}$	$P_{\max,15}$ [MW]	$S_{\max,30}$ [MVA]	Grundlast Betriebshof	$S_{\Sigma}$ [MVA]	Netzebene
Billbrook	1	9,3	9,8	0,8	<b>10,7</b>	MS
Harburg 1	0,97	5,5	5,6	0,4	<b>6,0</b>	MS
Harburg 2	1,78	3,2	5,9	0,8	<b>6,7</b>	MS
Hummelsbüttel	0,91	7,3	7,0	1,2	<b>8,2</b>	MS
Langenfelde	1,01	11,0	11,7	1,6	<b>13,3</b>	MS
Gleisdreieck	1,74	8,7	15,9	0,4	<b>16,3</b>	HS
SBG	n.v.	4,4	4,5	0,15	<b>4,6</b>	MS
Wandsbek	0,86	10,4	9,4	0,4	<b>9,8</b>	MS
Bergedorf	1,57	3,6	5,9	0,4	<b>6,4</b>	MS
Glinde	1,54	2,8	4,5	0,4	<b>4,9</b>	MS
Schenefeld	1,06	9,1	10,2	0,63	<b>10,8</b>	MS

Die Maximalwerte aus den Lade-Wirkleistungskurven werden mit dem Faktor  $k_{30}$  für das Jahr 2030 hochgerechnet. Im Zuge dessen wurde die Datenbasis des Busbetriebshofes Mesterkamp in den neuen Busbetriebshof Gleisdreieck überführt. Zusätzlich werden die aktuell schon existierenden Anschlussleistungen der Busbetriebshöfe (bisher verwendet für Büroräume, Werkstatt, sonstige Infrastruktur etc.) addiert.

Tabelle 3.2 zeigt die Gesamtergebnisse. Die Busbetriebshöfe Billbrook, Harburg 1, Harburg 2, Hummelsbüttel, SBG, Wandsbek, Bergedorf, Glinde und Schenefeld können an die Mittelspannung angeschlossen werden. Ihre Netzanschlussleistung liegt unterhalb der Obergrenze für die Mittelspannungsebene von 14 MVA. Die Anschlussleistung für Langenfelde liegt knapp an dieser Grenze. Gegebenenfalls muss geprüft werden, ob weitere Puffer notwendig sind, ob die Scheinleistung durch einen verbesserten  $\cos \varphi$  reduziert werden kann oder ob möglicherweise ein zweiter Anschluss gelegt wird. Ein Anschluss von Langenfelde auf der Hochspannung erscheint nicht sinnvoll.

Die notwendige Anschlussleistung für Gleisdreieck liegt bereits oberhalb der Grenze. Ein Anschluss auf der Hochspannungsebene erscheint deshalb notwendig.

### 3.2.4 Vergleich mit freien Reserven der Umspannwerke

Tabelle 3.3 zeigt den Vergleich zwischen notwendigen Anschlussleistungen der Busbetriebshöfe und freien Umspannwerksreserven. Nicht berücksichtigt wurde die bereits heute benötigte Leistung der Busbetriebshöfe. Diese ist bereits in den Reserven 2015 enthalten. Eine Ausnahme ist der neu geplante Betriebshof Gleisdreieck. Hier wurde die Grundlast des Betriebshofes entsprechend Tabelle 3.2 angesetzt.

Es ist zu erkennen, dass die Busbetriebshöfe Billbrook, Harburg 1, Harburg 2, Langenfelde, SBG und Wandsbek in Umspannwerksgebieten liegen, die auch in 2030 entsprechend der Prognosen aus Teil 1 und der Berechnungen aus Teil 2 dieser Studie ausreichend Reserven haben.

Am Busbetriebshof Hummelsbüttel werden vermutlich ab 2025 die Reserven aufgebraucht. Allerdings ist ein linearer Anstieg der tatsächlich benötigten Leistung am Busbetriebshof zu erwarten. Die Busse

werden sukzessive ersetzt. Sollten nicht bereits in 2025 alle Busse in Hummelsbüttel elektrisch betrieben sein, so wird auch der Spitzenbedarf an Anschlussleistung noch unterhalb der für 2030 prognostizierten 7,0 MVA liegen.

Der Busbetriebshof Gleisdreieck würde in der Mittelspannung ab 2030 die Reserven des Umspannwerks überschreiten. Da er jedoch aller Voraussicht in der Hochspannung angeschlossen wird, bleiben die Umspannwerksreserven in der Mittelspannung davon unberührt.

In Bergedorf kann es zwischen 2025 und 2030 zu einer Überschreitung der Reserven kommen.

Tabelle 3.3: Vergleich zwischen notwendigen Anschlussleistungen der Busbetriebshöfe und freien Umspannwerksreserven

Busbetriebshof	Umspannwerk	Reserve 2015 [MVA]	Reserve 2020 [MVA]	Reserve 2025 [MVA]	Reserve 2030 [MVA]	Anschluss $S_{30}$ [MVA]
Billbrook	Horn	32,3	31,7	30,4	<b>28,0</b>	<b>9,8</b>
Harburg 1	Wilstorf	12,6	12,0	11,4	<b>9,2</b>	<b>5,6</b>
Harburg 2	Harburg	29,3	28,7	27,1	<b>24,6</b>	<b>5,9</b>
Hummelsbüttel	Fuhlsbüttel	8,6	7,5	<b>5,1</b>	<b>0,2</b>	<b>7,0</b>
Langenfelde	Eimsbüttel	80,1	78,4	67,7	<b>66,9</b>	<b>11,7</b>
Gleisdreieck	Alsterdorf	23,7	22,8	21,2	<b>12,0</b>	<b>16,3</b>
SBG	Hausbruch	10,2	10,2	10,2	<b>10,2</b>	<b>4,5</b>
Wandsbek	Wandsbek	24,9	23,3	22,8	<b>19,8</b>	<b>9,4</b>
Bergedorf	Bergedorf	7,8	7,3	6,4	<b>4,4</b>	<b>5,9</b>

### 3.2.5 Ergänzende Ergebnisse zum Lade-Wirkleistungsbedarf der Busbetriebshöfe

Da mehrere Busbetriebshöfe untersucht wurden, besteht die Möglichkeit einer statistischen Auswertung. Es kann untersucht werden, ob der Zusammenhang zwischen der Größe eines Busbetriebshofes und der notwendigen Anschlussleistung quantifizierbar ist.

Tabelle 3.4: Zusammenhang zwischen Anzahl von Bussen auf einem Betriebshof und der ermittelten Anschlussleistung

	BBB	BBH	BBR	BBG	BBL	BBM	SBG	BBW	BGD	GLI	SCH
$P_{15}$ [MW]	9,3	5,5	3,2	7,3	11,0	8,7	4,4	10,4	3,6	2,8	9,1
$n_{\text{Busse}}$	127	82	40	104	153	127	47	137	83	60	155
$P/n$ [kW]	73	67	80	70	72	69	94	76	43	47	59
$g$	<b>0,49</b>	<b>0,45</b>	<b>0,53</b>	<b>0,47</b>	<b>0,48</b>	<b>0,46</b>	<b>0,62</b>	<b>0,51</b>	<b>0,29</b>	<b>0,31</b>	<b>0,39</b>

Setzt man die Anschlussleistung im Jahr 2015 ins Verhältnis zur Anzahl der Busse auf einem Hof (unabhängig davon, ob Solo, Gelenk oder Doppelgelenk), so lässt sich eine Abschätzung für einen Gleichzeitigkeitsfaktor treffen.

Tabelle 3.4 zeigt, dass bei den Busbetriebshöfen der HOCHBAHN im Schnitt ein zusätzlicher Bus mit einer Ladeleistung von 150 kW einen Mehrbedarf in der Anschlussleistung von ca. 75 kW bedeutet. Das entspricht einem Gleichzeitigkeitsfaktor  $g$  von ca. 0,5. Dieser Wert kann beispielsweise für neu geplante Busbetriebshöfe verwendet werden. Im Normalfall stehen die geplanten Umläufe für den neuen Busbetriebshof noch nicht fest, jedoch bereits die ungefähre Anzahl der Busse. Daraus kann

folglich in einem ersten Schritt abgeschätzt werden, in welchem Bereich sich die notwendige Anschlussleistung bewegen könnte.

Bei Busbetriebshöfen der VHH ergibt sich insgesamt ein niedrigerer Wert von 0,3 bis 0,4. Das ist plausibel, weil die VHH mit zusätzlichen Bussen die Busumläufe aufgeteilt hat. Folglich wird jeder Bus nicht mehr so stark ausgelastet wie vorher. Der Mehrbedarf an Bussen führt zu einer Vergleichmäßigung und somit zu einem geringeren Gleichzeitigkeitsfaktor.

### 3.2.6 Verlauf der Batterieladezustände der Busse

Abbildung 3.11 zeigt den Verlauf der Entladetiefe der modellierten Busse. Die Busse wurden zu Beginn mit einer unendlich großen Ladekapazität angenommen. Dadurch kann im Umkehrschluss ermittelt werden, wie groß die Batterie hätte sein müssen, um die Umläufe einer ganzen Woche (Mo-Fr) bedienen zu können.

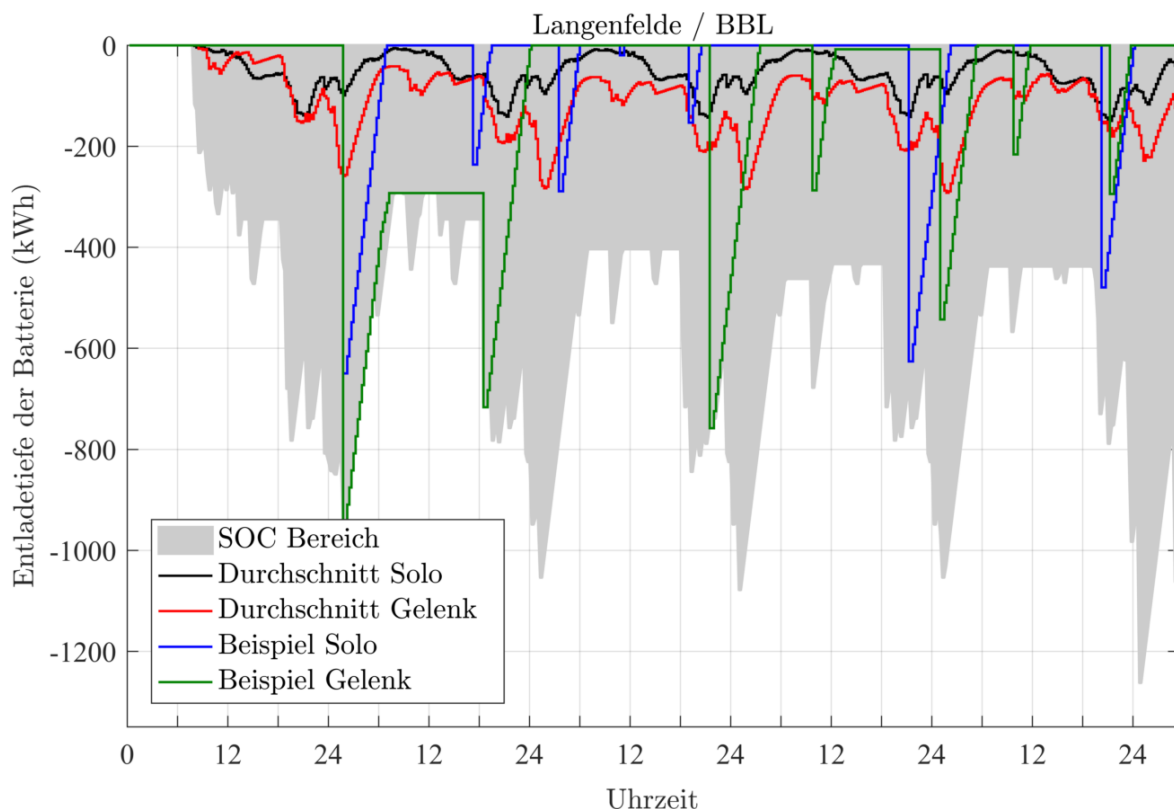


Abbildung 3.11: Verlauf der Batterieladezustände aller Busse am Busbetriebshof Langenfelde. Darstellung des am tiefsten entladenen Busses (grauer Bereich), Durchschnittswerte für Solo und Gelenkbus sowie jeweils ein Beispiel.

Der graue Bereich in Abbildung 3.11 zeigt zu jedem Zeitpunkt jeweils den Bus, der am tiefsten entladen ist. Die schwarze Kurve zeigt den Durchschnitt aller Solobusse, die rote Kurve den Durchschnitt aller Gelenkbusse an. Da sich auch nachts immer noch Busse im Einsatz befinden, gehen die Durchschnittskurven folglich nicht auf 0 zurück, auch wenn alle auf dem Busbetriebshof anwesenden Busse bereits vollgeladen sind. Es ist zu erkennen, dass die rote Kurve beständig unterhalb der schwarzen Kurve verläuft. Die Gelenkbusse sind also insgesamt tiefer entladen bzw. können im Umkehrschluss zu einem geringeren Grad wieder vollgeladen werden. Dieses Problem tritt verstärkt am Busbetriebshof Harburg auf.

Abbildung 3.12 zeigt die Ergebnisse für den Betriebshof Harburg. Es ist deutlich zu erkennen, dass der graue Bereich zum Freitag hin beständig größere Entladetiefen anzeigt. Ein ähnliches Bild zeichnet die rote Durchschnittskurve für die Gelenkbusse. Man erkennt deutlich, dass die Standzeiten auf dem

Busbetriebshof nicht ausreichen, um die Gelenkbusse wieder vollzuladen. Damit sammeln diese über die Woche eine immer tiefere Entladung auf.

Eine Lösung könnte darin bestehen, die Ladeleistung der Busse zu erhöhen, z.B. auf 200 kW. Dies ist jedoch nur bedingt sinnvoll und technisch realisierbar. Vielmehr müssen für die Busse wohl geeignetere Zuweisungen von Umläufen erfolgen oder eine zusätzliche Reserve vorgehalten werden.

Die Situation bei der HOCHBAHN ist auf jedem Betriebshof unterschiedlich und hängt stark davon ab, welche Umläufe tatsächlich auf welche Busse zugewiesen werden. Das FIFO-Prinzip stößt hier bereits an die Grenzen und es können nur bedingt belastbare Aussagen für den Verlauf der Batteriespeichergrößen getroffen werden. Für eine realistischere Abschätzung des Verlaufs der Entladetiefen wäre eine Modellierung eines intelligenten Betriebsmanagementsystems, mindestens jedoch eine intelligente Zuweisung von Umläufen auf die Busse notwendig.

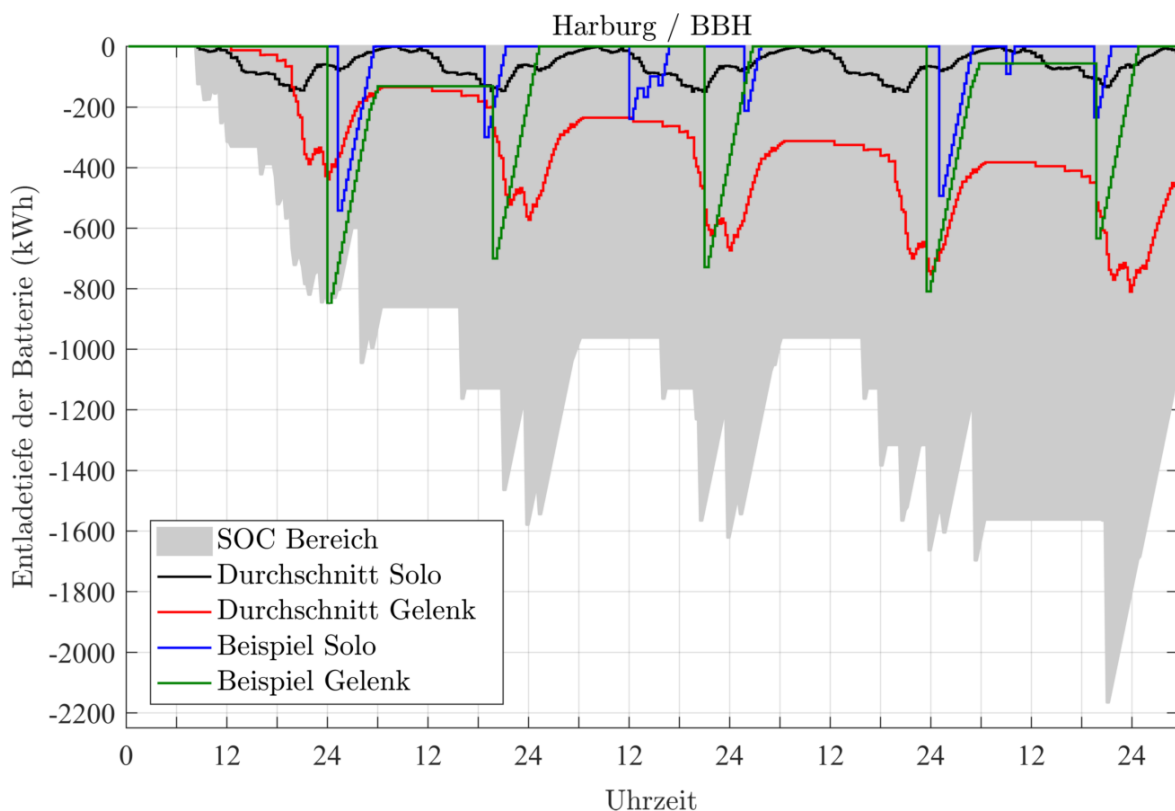


Abbildung 3.12: Verlauf der Batterieladezustände aller Busse am Busbetriebshof Harburg. Darstellung des am tiefsten entladenen Busses (grauer Bereich), Durchschnittswerte für Solo und Gelenkbus sowie jeweils ein Beispiel.

Abbildung 3.13 zeigt den Verlauf des Busbetriebshofes Bergedorf der VHH. Die Busbetriebshöfe Glinde und Schenefeld zeigen analoge Ergebnisse. Die fixe Zuweisung von Umläufen auf Busse hat mehrere Folgen.

Die Busse können alle mindestens einmal pro Tag wieder vollgeladen werden. Damit ergibt sich für jeden Tag ein identisches Bild bzw. ein identischer Verlauf der Entladekurven. Weiterhin wird damit verhindert, dass ein Bus über die Woche eine Entladung sammelt und die geschätzte Batteriegröße damit unnötig steigt.

Das verwendete Modell ist daher für den Zuweisungsalgorithmus der VHH (feste Busse, feste Umläufe) besser geeignet. Der tatsächliche Verlauf der Entladung dürfte dem im Modell prognostizierten besser entsprechen. Die Ergebnisse der weiteren Busbetriebshöfe finden sich im Anhang.

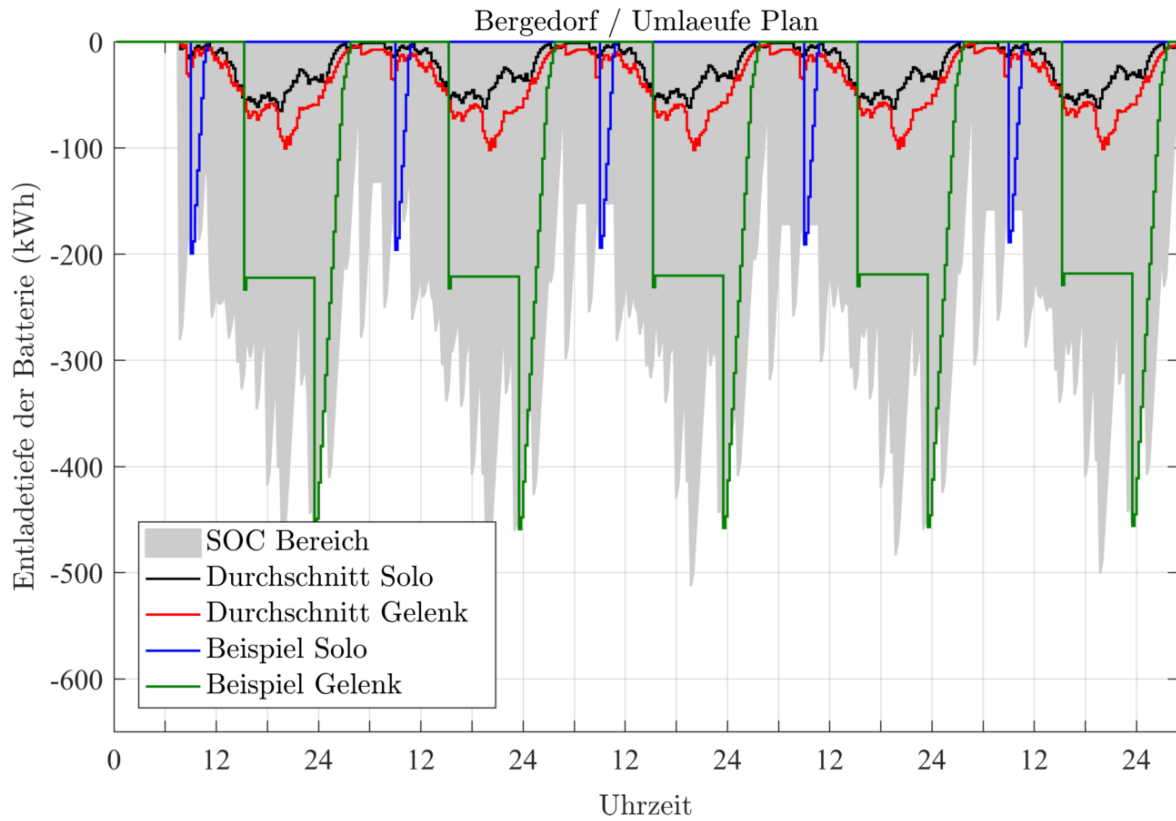


Abbildung 3.13: Verlauf der Batterieladezustände aller Busse am Busbetriebshof Bergedorf. Darstellung des am tiefsten entladenen Busses (grauer Bereich), Durchschnittswerte für Solo und Gelenkbus sowie jeweils ein Beispiel.

### 3.2.7 Benötigte Batteriekapazitäten der Busse

Abbildung 3.14 zeigt die benötigten Batteriespeicherkapazitäten für die Solo- und Gelenkbusse am Busbetriebshof Langenfelde. Sie wurden berechnet, indem die maximale Entladetiefe jedes Busses ermittelt wurde. Es zeigt sich, dass Gelenkbusse tendenziell eine größere Batterie als Solobusse benötigen. Darüber hinaus ist die Streuung der Batteriegrößen relativ groß. Durch die Zuweisung der Umläufe nach dem FIFO-Prinzip bekommen manche Busse sehr kurze Umläufe und manche Busse sehr lange Umläufe zugewiesen. Die Spreizung verstärkt sich, wenn die Busse über Nacht nicht wieder voll aufgeladen werden können, wie z.B. in Harburg 1.



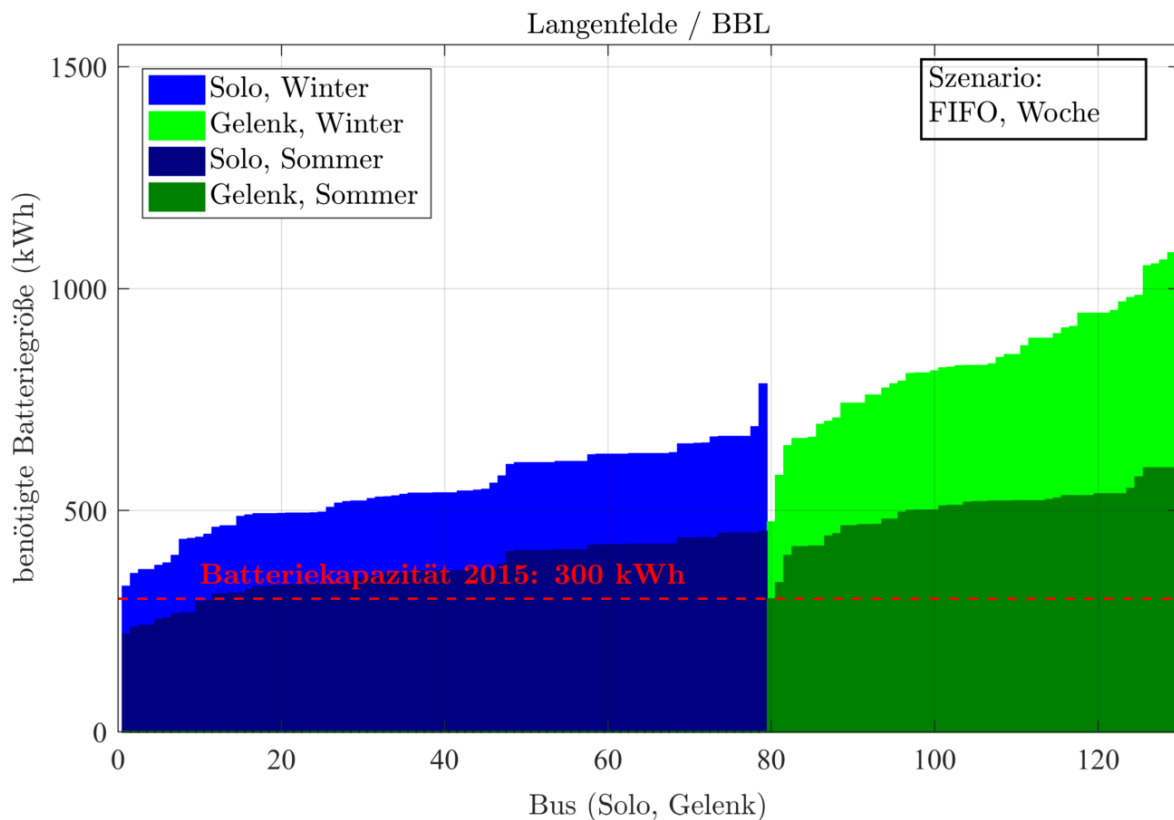


Abbildung 3.14: Benötigte Batteriespeicherkapazitäten am Busbetriebshof Langenfelde getrennt nach Solo (blau) und Gelenkbussen (grün) für Verbrauchswerte im Winter (hell) und Sommer (dunkel). Ein Balken entspricht einem Bus.

Die rote Linie kennzeichnet nach Aussagen der HOCHBAHN die von Herstellern aktuell zugesicherte nutzbare Batteriekapazität von 300 kWh. Die benötigten Batteriespeichergößen liegen fast ausschließlich oberhalb der Linie. Werden die Verbrauchswerte für den Sommer angesetzt (jeweils dunkle Färbung), so reduziert sich die benötigte Batteriespeichergöße und sinkt vereinzelt unter die Grenze von 300 kWh. Doch selbst dann sind noch keine Reserven und Sicherheitsabschläge berücksichtigt.

Das verwendete Modell lässt vermuten, dass mit einer Batterie von 300 kWh gesicherter Speicherkapazität der Busbetrieb nicht ohne eine Anpassung der Umläufe und eine geeignete Zuweisung von Umläufen auf die Busse bewerkstelligt werden kann. Das verwendete Modell ist nicht geeignet um tiefergehende Betrachtungen durchzuführen. Die Ergebnisse können jedoch als Indikator verwendet werden.

Abbildung 3.15 zeigt die benötigten Batteriespeichergößen für den Busbetriebshof Bergedorf. Die Betrachtung schließt hier eine elektrische Heizung aus, da die Busse mit einer Ölheizung ausgestattet sind. Die rote Linie kennzeichnet erneut die 300 kWh Grenze. Der Großteil der Solobusse und ca. die Hälfte der Gelenkbusse liegen unterhalb dieser Grenze. Bei den Busbetriebshöfen Glinde und Schenefeld zeigen sich ähnliche Ergebnisse. Insgesamt ist die Spreizung der benötigten Batteriespeichergößen geringer (abgesehen von den Ersatzfahrzeugen mit besonders geringen errechneten Speichern). Die Werte sind ähnlich zu den Sommerverbräuchen der HOCHBAHN.

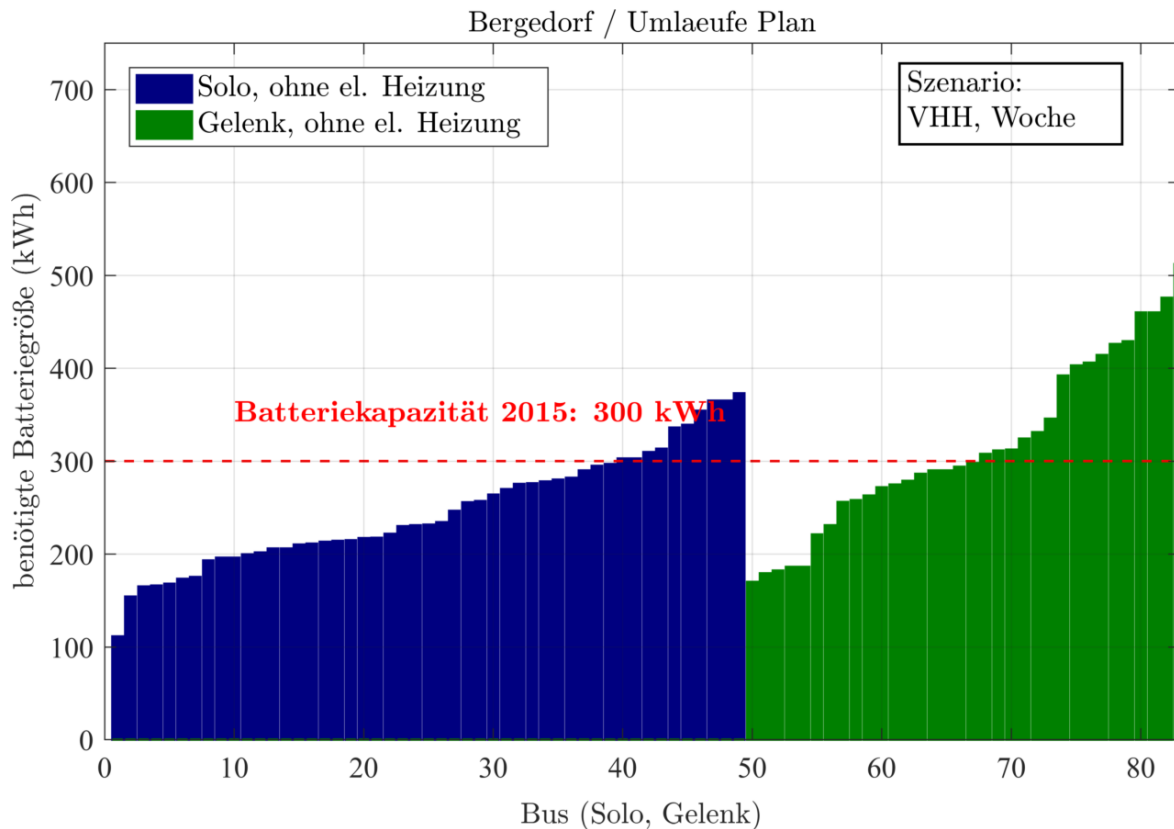


Abbildung 3.15: Benötigte Batteriespeicherkapazitäten am Busbetriebshof Bergedorf getrennt nach Solo (blau) und Gelenkbussen (grün), Verbrauch ohne elektrische Heizung und Vorkonditionierung. Ein Balken entspricht einem Bus.

Trotz der Umstellung der Umläufe und den Aufbau einer Busreserve (mehr Fahrzeuge) scheint es jedoch insbesondere bei Gelenkbussen so, als müssten die Hersteller noch größere Batterien bzw. Reichweiten zur Verfügung stellen. Es sollte geklärt werden, ob und zu welchem Zeitpunkt die Hersteller entsprechende Fahrzeugmodelle anbieten können.

Eine Ursache dafür kann sein, dass die Berechnungen der VHH, aufgrund derer die Umläufe umstrukturiert wurden, auf km-Basis erfolgten. Beispielsweise geben die Fahrzeughersteller eine Reichweite an, die sich unter Umständen nicht mit den Annahmen zum spezifischen Verbrauch der Fahrzeuge deckt. Wird der spezifische Verbrauch der Fahrzeuge in dem hier verwendeten Modell zu hoch angesetzt, so reichen 300 kWh nicht aus, obwohl keiner der Busse seine maximale Umlauflänge überschreitet (aktuell 250 km). Die Ergebnisse der weiteren Busbetriebshöfe finden sich im Anhang.

### 3.2.8 Potential einer Optimierung von Busumläufen

Die VHH hat im Zuge der Umstellung auf Elektrobusse eine Änderung der Umläufe vorgenommen. Lange Umläufe (größer 250 km) wurden aufgeteilt. Für diese Umgestaltung ist ein Mehrbedarf an Bussen notwendig. Dieser wurde bei der VHH auf ca. 16% quantifiziert.

In einer Vergleichsuntersuchung wurde abgeschätzt, welche Auswirkungen ein Vorhalten von zusätzlichen Bussen hat. Ziel ist, die vorhandene Batterietechnologie mit der begrenzten Reichweite nutzbar zu machen.

Abbildung 3.16 zeigt einen Vergleich zwischen dem FIFO-Prinzip und dem Ansatz der VHH. Das FIFO-Prinzip ist so definiert, dass jeweils nur die minimal notwendige Anzahl an Solo- und Gelenkbussen eingesetzt wird um die Umläufe zu bedienen. Unabhängig davon, ob ein Bus kurz nach der Rückkehr und einer hohen Entladung sofort wieder auf einen nächsten langen Umlauf geschickt wird. Das VHH

Prinzip teilt einem Bus fixe Umläufe zu, die jeden Tag identisch sind und von vorneherein auf einen geringeren Bedarf an Batteriekapazitäten ausgelegt sind.

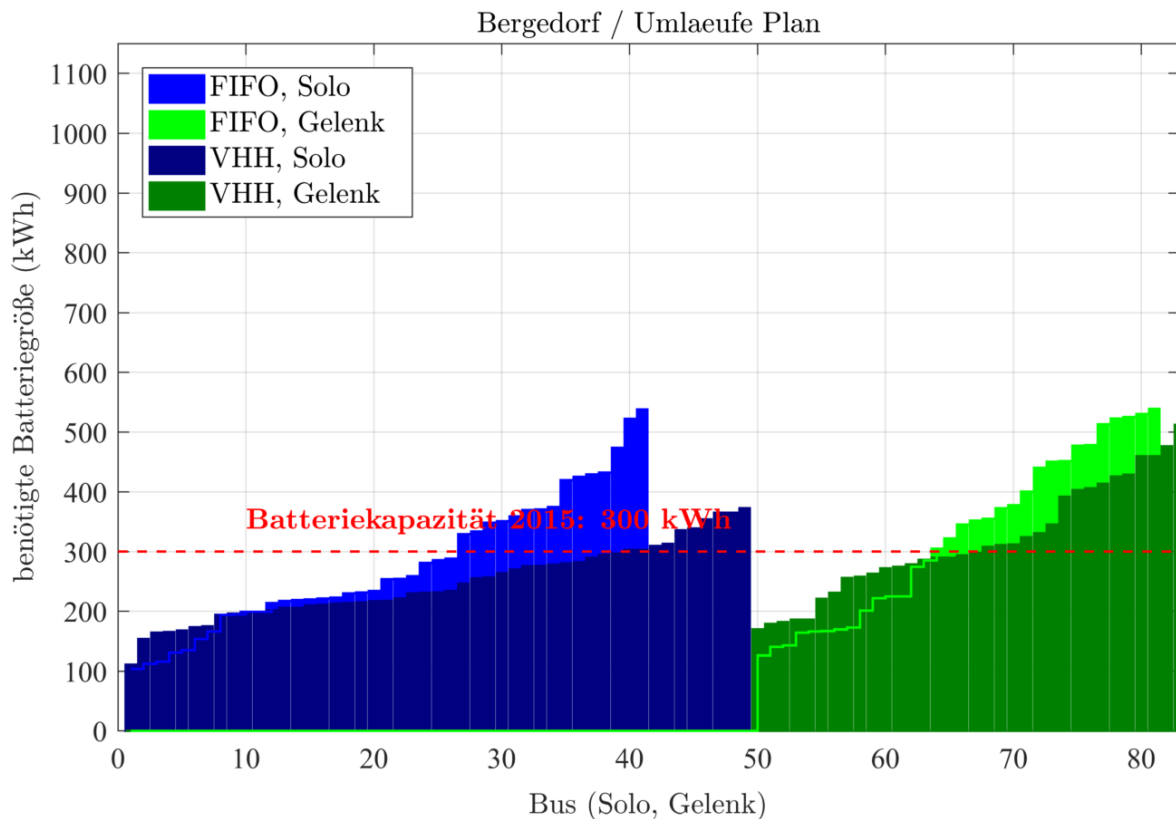


Abbildung 3.16: Vergleich zwischen den Zuweisungsalgorithmen für HOCHBAHN (FIFO) und VHH. Mehrbedarf an Bussen gekennzeichnet durch die Anzahl der Balken. Ein Balken entspricht einem Bus.

Der Vergleich zeigt, dass das Prinzip der VHH am Busbetriebshof Bergedorf 8 Solobusse und 2 Gelenkbusse mehr benötigt. Dafür sinkt der Maximalwert an benötigter Batteriegröße von 530 kWh auf 370 kWh bei Solobussen. Insgesamt sinkt die Streuung der Batteriegrößen, der Bedarf wird vergleichmäßigt. Bei den Gelenkbussen tritt ein ähnlicher Effekt auf, jedoch ist die Reduktion des Spitzenwertes von 530 kWh auf 510 kWh deutlich geringer. Der Vergleich ermöglicht es, die Vor- und Nachteile von zusätzlichen Bussen gegenüberzustellen.

### 3.2.9 Auswirkungen auf die Anteile ladebedingter Stillstandszeiten von Bussen

Beim Einsatz von Elektrobussen statt der bisher eingesetzten Dieselmotoren stellt sich die Frage, ob die Busse noch freie Zeitfenster besitzen, in denen Wartungs- oder Reinigungsarbeiten durchgeführt werden können.

Abbildung 3.17 zeigt den Verlauf für jeden Bus über die betrachtete Woche. Von oben nach unten sind zunächst alle Solobusse aufgeführt, anschließend die Gelenkbusse. Schwarz zeigt an, dass der Bus auf dem Hof steht und nicht geladen oder vorkonditioniert werden muss (verfügbar). Mittelgrau kennzeichnet die Ladefenster des Busses und hellgrau zeigt an, dass sich ein Bus auf einem Umlauf befindet.

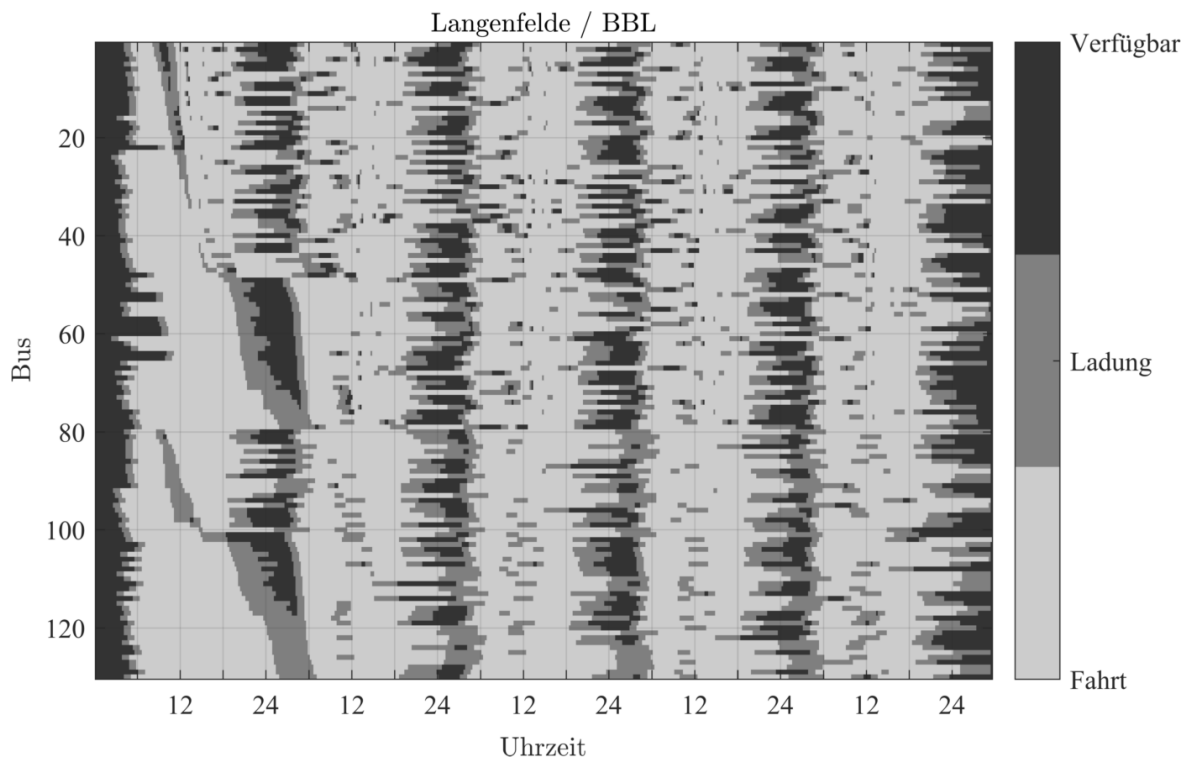


Abbildung 3.17: Anteile ladebedingter Stillstandszeiten der Busse am Busbetriebshof Langenfelde. Zeitlicher Verlauf über eine Woche von Montag bis Freitag.

Es zeigt sich, dass einige Gelenkbusse über mehrere Tage hinweg keine freien Zeitfenster (verfügbar) mehr besitzen (z.B. Bus 125). In diesem Fall können die Batterien in den Pausen zwischen den Umläufen nicht wieder aufgeladen werden. Diese Darstellung unterstützt die Ergebnisse der Untersuchungen zum Verlauf der Entladetiefe der Busse.

Abbildung 3.18 zeigt eine sortierte und aggregierte Darstellung für die Busse in Langenfelde. Von oben nach unten sind zunächst die Solobusse, dann die Gelenkbusse aufgelistet. Diese sind wiederum von oben nach unten so sortiert, dass der Bus mit der höchsten Verfügbarkeit (schwarz) oben steht und der Bus mit der geringsten Verfügbarkeit unten. Die Grenze zwischen Solo und Gelenkbussen (Bus Nr. 80) ist somit gut ersichtlich. Die x-Achse ist normiert und zeigt an, wieviel Prozent der Zeit (Montag bis Freitag) der Bus verfügbar ist, geladen wird oder unterwegs ist.

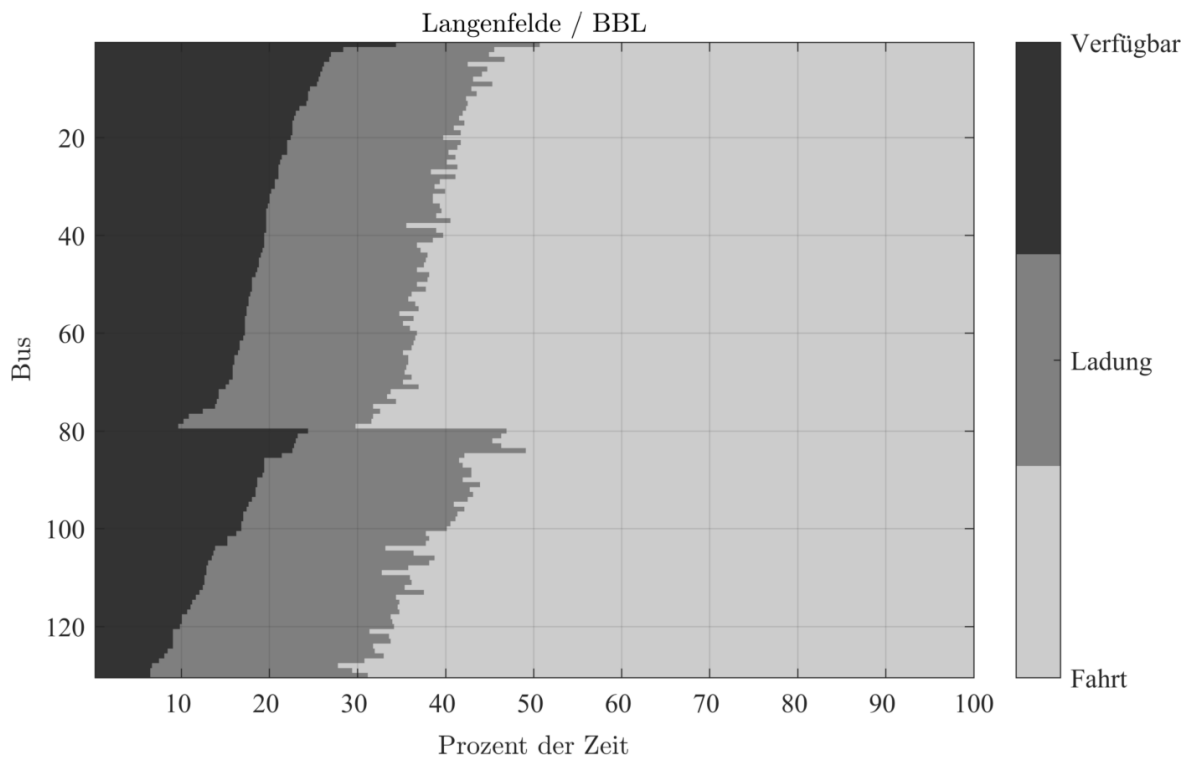


Abbildung 3.18: Anteile ladebedingter Stillstandszeiten der Busse am Busbetriebshof Langenfelde. Sortiert nach Zustand (links nach rechts) und Bus (oben nach unten). Vertikale Sortierung erfolgt anhand der verfügbaren Zeit. Solobusse oben, Gelenkbusse unten.

Die Zeit in der die Busse auf dem Busbetriebshof stehen und nicht geladen werden müssen reduziert sich im Vergleich zu Dieselbussen (bei denen der Bereich „Ladung“ ebenfalls „verfügbar“ wäre) je nach Bus um 30 bis 70%. Dabei entfallen ca. 5% auf die Vorkonditionierung.

Die Reduktion der Verfügbarkeit kann bedingt als Indikator dafür herangezogen werden, wie hoch der Mehrbedarf an Bussen ist. Allerdings würde in diesem Fall davon ausgegangen, dass der Bus für keine anderen Tätigkeiten zur Verfügung stünde, während er geladen wird. Beispielsweise können Reinigungsarbeiten höchstwahrscheinlich auch während des Ladevorgangs durchgeführt werden. Auch ein Teil der Reparatur- und Wartungsarbeiten kann während des Ladens durchgeführt werden, sofern die Fahrspur der Werkstatt mit einer Ladeinfrastruktur ausgestattet ist.

Reduziert sich der schwarze Bereich (verfügbar) in Abbildung 3.17 bzw. Abbildung 3.18 sehr stark und geht gegen 0, so ist dies erneut ein Indikator, dass der Bus nicht genügend Zeit für eine Wiederaufladung der Batterie hat.

Für die Busse der VHH lassen sich ähnliche Ergebnisse beobachten. Abbildung 3.19 zeigt die nicht-sortierten, Abbildung 3.20 die sortierten Ergebnisse. Insgesamt ist die prozentuale Reduktion der Verfügbarkeit geringer, da die Busse zum einen weniger ausgelastet sind und zum anderen die Umläufe kürzer und damit auch die Ladezeiten kürzer sind.

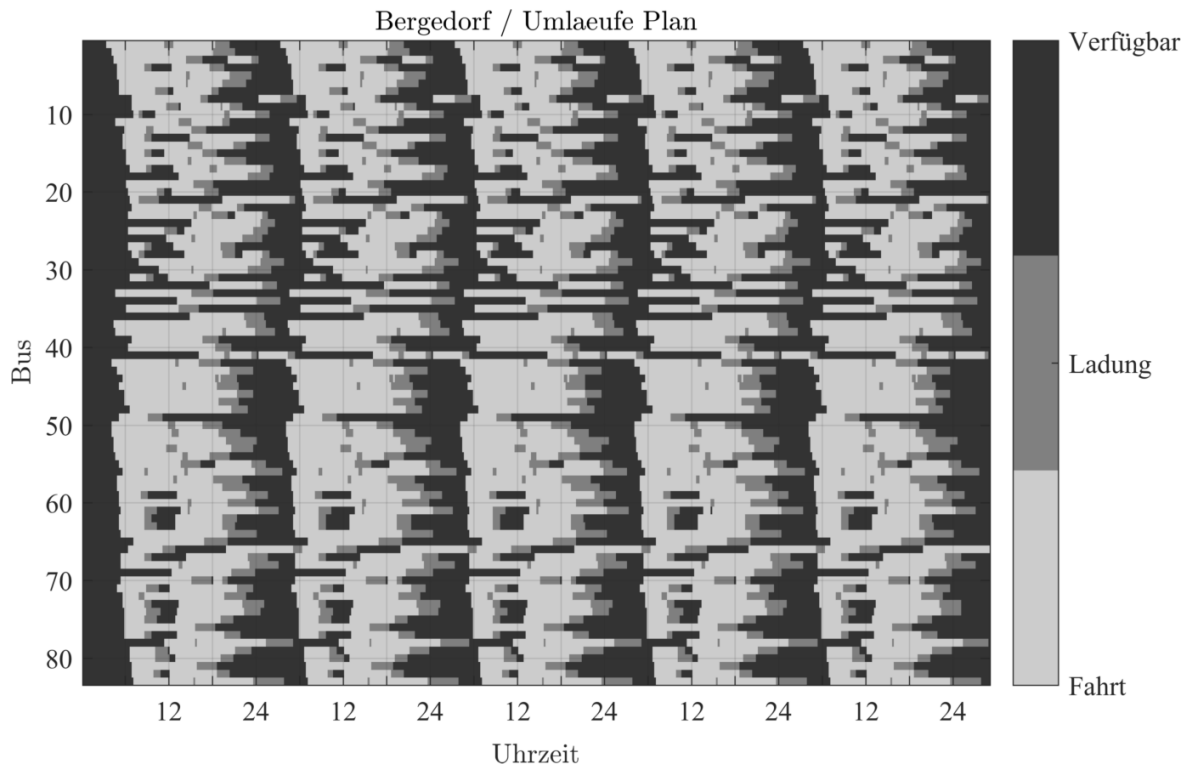


Abbildung 3.19: Anteile ladebedingter Stillstandszeiten der Busse am Busbetriebshof Bergedorf. Zeitlicher Verlauf über eine Woche von Montag bis Freitag.

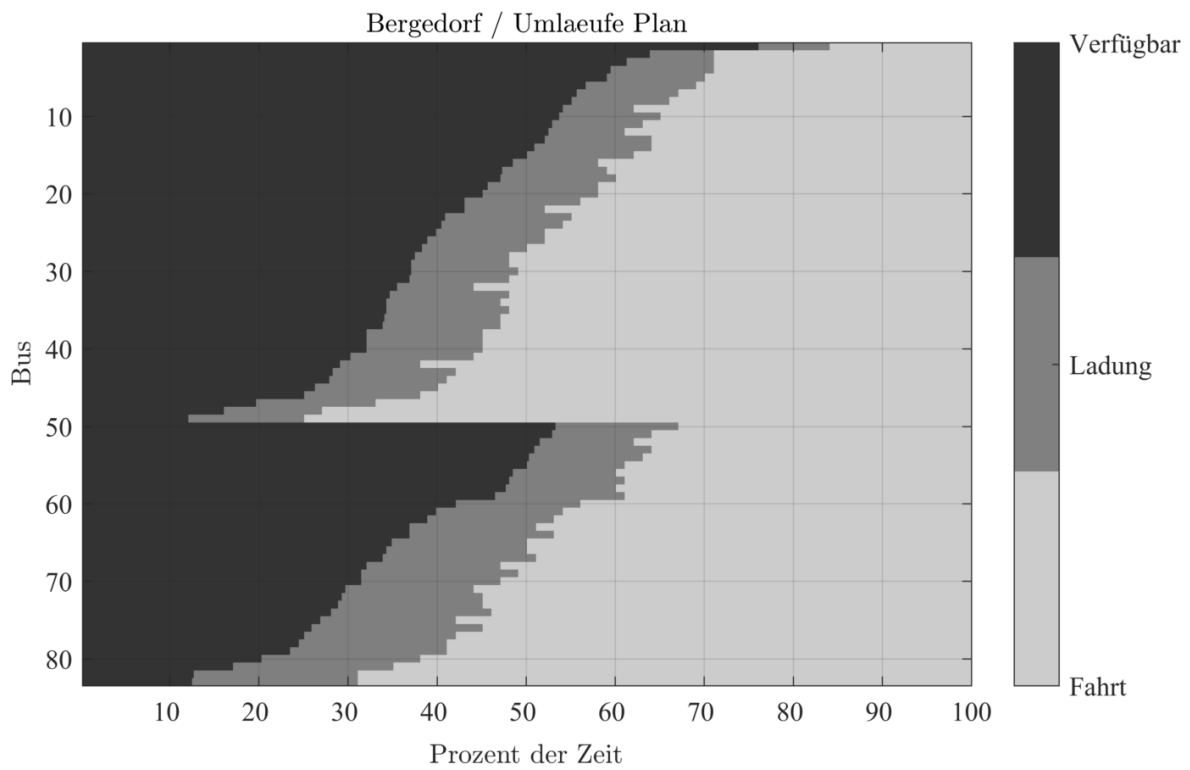


Abbildung 3.20: Anteile ladebedingter Stillstandszeiten der Busse am Busbetriebshof Bergedorf. Sortiert nach Zustand (links nach rechts) und Bus (oben nach unten). Vertikale Sortierung erfolgt anhand der verfügbaren Zeit. Solobusse oben, Gelenkbusse unten.

### 3.2.10 Einsatz von Wasserstoffbussen Benötigte Wasserstoffmengen

Abbildung 3.21 zeigt die Wasserstoffmengen, die pro Busbetriebshof benötigt würden, wenn die gesamte Busflotte auf Wasserstoffantrieb umgestellt würde. Den größten Bedarf haben die Busbetriebshöfe Gleisdreieck sowie Langenfelde. Insgesamt benötigt die HOCHBAHN ca. 21.000 kg Wasserstoff täglich.

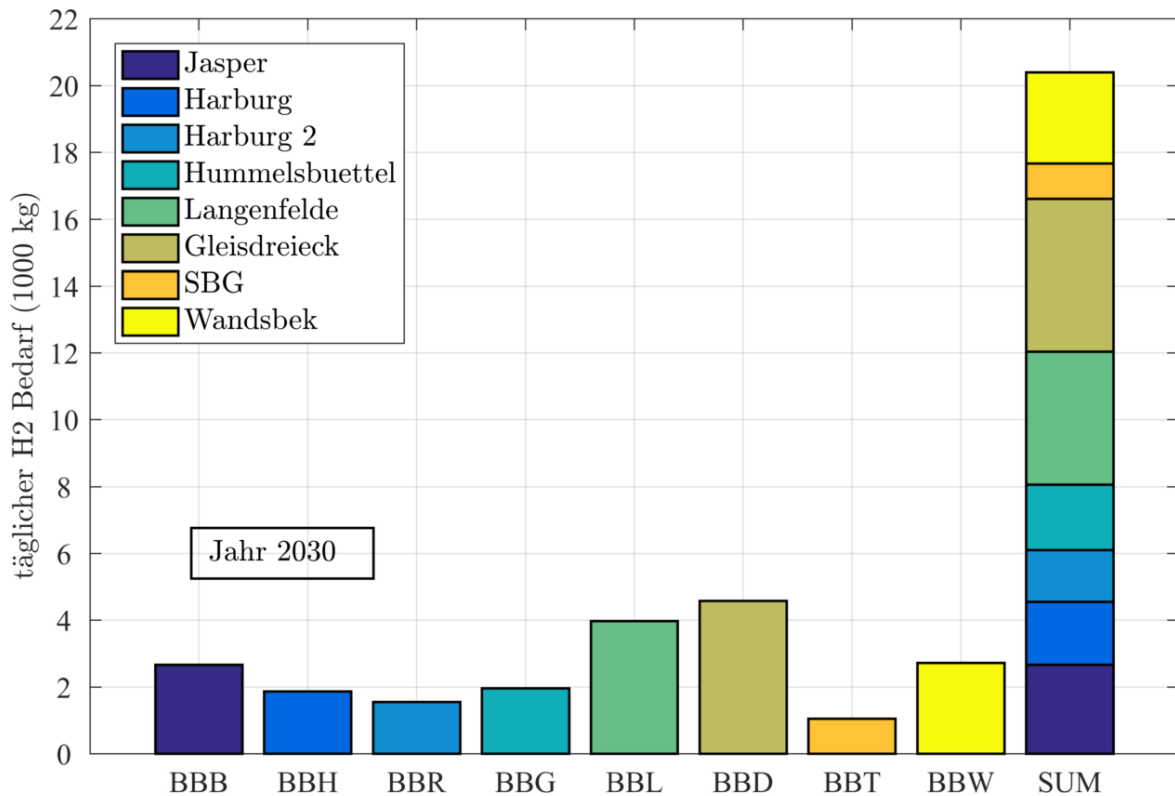


Abbildung 3.21: Wasserstoffmengen, die auf den Busbetriebshöfen täglich benötigt werden, wenn die Busflotte auf 100% Wasserstoffbusse umgestellt wird.

#### Auswirkungen auf die maximale Anschlussleistung

Nachfolgend soll geprüft werden, ob die Nutzung von Wasserstoffbussen statt Elektrobussen eine Reduktion der notwendigen Anschlussleistung eines Busbetriebshofes zur Folge hat. Dies soll durch eine Absenkung der maximalen Ladespitze erzielt werden.

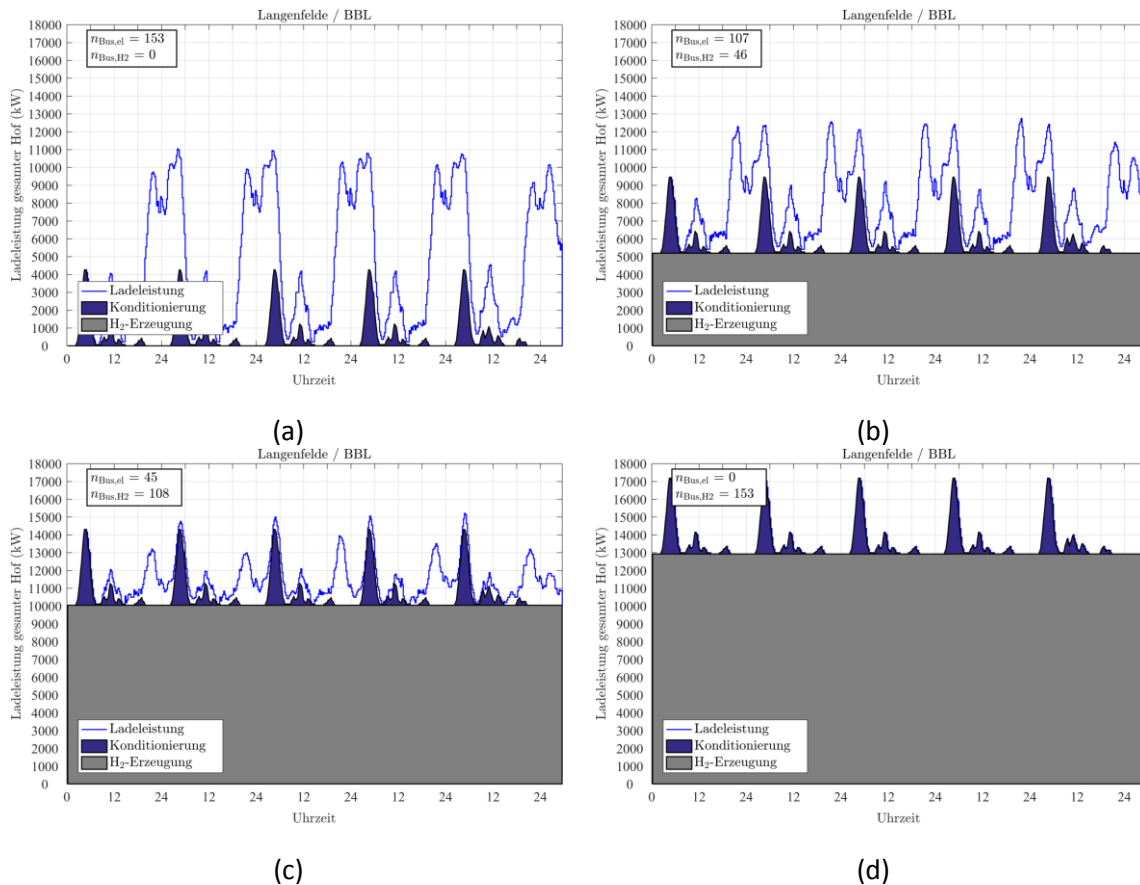


Abbildung 3.22: Entwicklung der Anschlussleistung bei verschiedenen Anteilen an Wasserstoffbussen sowie einer Produktion des Wasserstoffs durch einen Elektrolyseur vor Ort. a): 0%, b): 30%, c): 70%, d): 100%

Abbildung 3.22 zeigt, wie sich die Lade-Wirkleistungskurven entwickeln, wenn Elektrobusse sukzessive durch Wasserstoffbusse ersetzt werden und der dafür notwendige Wasserstoff auf dem Busbetriebshof durch einen Elektrolyseur produziert wird. Die Anschlussleistung ergibt sich erneut aus der maximalen Spitze über einen Wochenverlauf.

Ein Elektrolyseur erzeugt 2.143 kg Wasserstoff pro Tag und muss dafür 24 Stunden mit einer Leistung von 7,4 MVA versorgt werden. Damit ergäbe sich für einen täglichen Verbrauch von 2.143 kg Wasserstoff eine Grundlast durch den Elektrolyseur von 7,4 MVA, für 4.286 kg 14,8 MVA und so weiter. Dieser Bedarf ist in Abbildung 3.22 durch den grauen Bereich gekennzeichnet. Dieser steigt mit der Anzahl der Wasserstoffbusse und damit dem notwendigen Wasserstoff an. Gleichzeitig verringert sich der elektrische Ladebedarf der übrigen Busse. Dies ist daran zu erkennen, dass die blaue Lade-Wirkleistungskurve, die zusätzlich zum grau gefärbten Elektrolyseur-Bedarf hinzukommt, sinkt. Wasserstoffbusse müssen jedoch (wie auch Elektrobusse) vorkonditioniert werden (schwarzer Bereich). Die Vorkonditionierung verhindert, dass sich die Spitzen der Gesamtkurve weiter reduzieren und stellt damit eine untere Grenze für die Anschlussleistung dar.

Theoretisch könnte der Betrieb des Elektrolyseurs technisch optimierter realisiert werden, indem beispielsweise die Wasserstoffproduktion gedrosselt wird, wenn die Busse vorkonditioniert werden müssen. Damit ergäbe sich eine Vergleichmäßigung des Leistungsbedarfs. Elektrolyseure können jedoch nur eine begrenzte Bandbreite von Lastgradienten fahren. Des Weiteren war eine Untersuchung zur Optimierung der Wasserstofferzeugung nicht Gegenstand der Studie, die entsprechenden Auswirkungen und Potentiale können also nicht bewertet werden.



Es lässt sich folglich feststellen, dass der Spitzenwert der Anschlussleistung durch einen Einsatz von Wasserstoffbussen statt Elektrobussen nicht sinkt, wenn der Wasserstoff auf dem Hof produziert wird (siehe Abbildung 3.23, blaue Kurve). Gleichwohl kann die Anschlussleistung reduziert werden, wenn der Wasserstoff beispielsweise über Tanklastzüge auf den Hof geliefert wird (siehe Abbildung 3.23, gelbe Kurve).

Für die Nutzung von angeliefertem Wasserstoff muss die notwendige Infrastruktur auf dem Hof vorhanden sein. Diese verursacht einen Leistungsbedarf zwischen 22 und 4 Uhr von ca. 500 kW. Durch eine Erhöhung des Anteils an Wasserstoffbussen sinkt der Lade-Wirkleistungsbedarf aus Abbildung 3.22 (blaue Kurve), ohne dass Leistung für die Wasserstoffproduktion benötigt würde (grauer Bereich). Dies führt insgesamt zu einer Leistungsreduktion, die am Busbetriebshof Langenfelde zu einer Reduktion der maximalen Anschlussleistung von ca. 11 MW auf bis etwas über 4 MW führt. Dieses untere Limit entspricht der Spitze der Leistung für die Vorkonditionierung der Wasserstoffbusse.

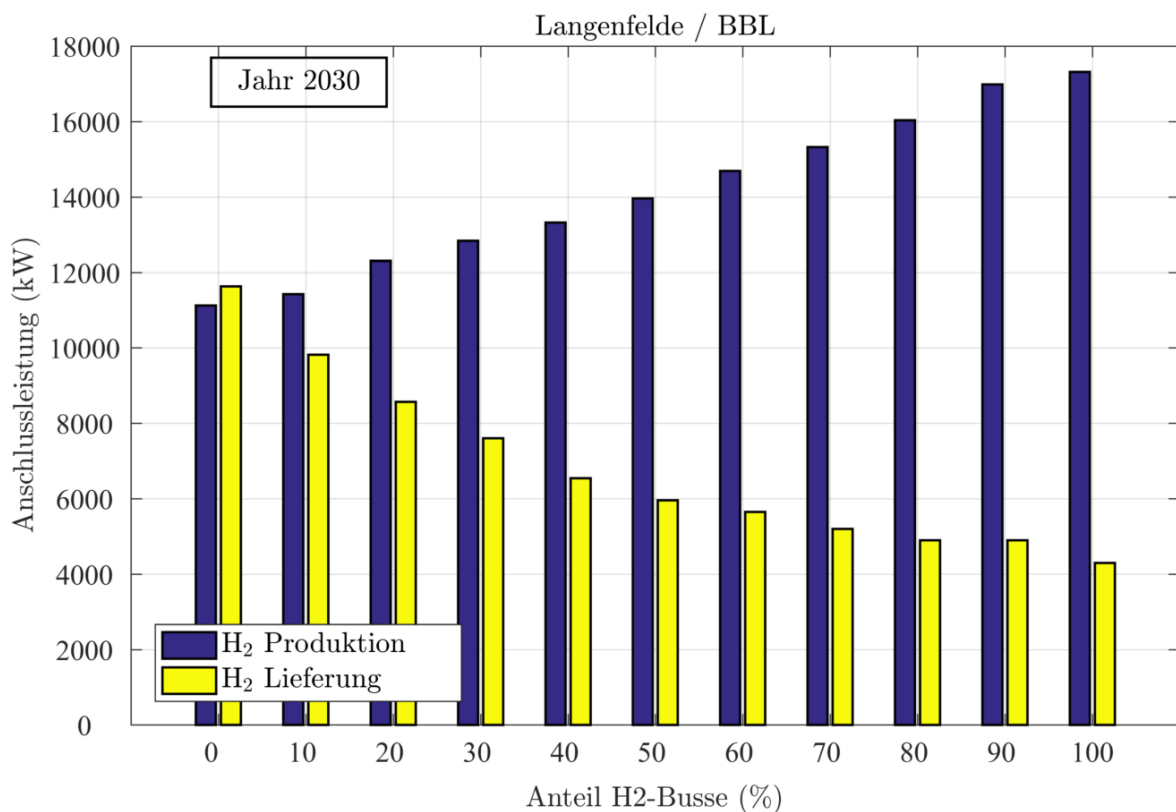


Abbildung 3.23: Entwicklung der Anschlussleistung bei Produktion (blau) und Lieferung (rot) von Wasserstoff bei verschiedenen Anteilen an Wasserstoffbussen.

### Einsatz von Range-Extender Fahrzeugen (RE)

Werden statt 100% Wasserstoffbusse 100% Range-Extender (RE) Busse verwendet, so verbleibt für den elektrischen Anteil der RE Busse ein gewisser Ladeleistungsbedarf. Drei RE Busse entsprechen in etwa dem Verbrauch von zwei Elektrobussen und einem Wasserstoffbus. Deshalb wird die benötigte Anschlussleistung für das 100% RE Szenario auf den Wert beziffert, der bei einem 30 bis 40 prozentigen Anteil an reinen Wasserstoffbussen auftreten würde. Für Langenfelde läge diese entsprechend Abbildung 3.23 zwischen 7,7 MW und 6,6 MW.

Abbildung 3.24 und Tabelle 3.5 zeigen die Ergebnisse für alle Busbetriebshöfe.

Tabelle 3.5: Anschlussleistungen reiner Wirkleistung in [MW] im Jahr 2015 bei unterschiedlichen Anteilen an Wasserstoffbussen. 30% Szenario entspricht in etwa einem 100% RE Szenario.

Anschlussleistung in 2015 [MW] bei x% H <sub>2</sub> -Bussen	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Billbrookdeich	9,8	8,2	7,3	<b>6,8</b>	6,1	5,8	4,9	4,6	4,1	3,8	3,6
Harburg 1	5,6	5,2	4,7	<b>4,1</b>	3,6	3,3	3	3	2,7	2,5	2,5
Harburg 2	3,7	3,4	2,8	<b>2,3</b>	2	1,9	1,8	1,5	1,4	1,4	1,3
Hummelsbüttel	7,3	6,7	6,1	<b>5,6</b>	5	4,4	3,6	3,2	3	2,8	2,5
Langenfelde	11,5	9,7	8,5	<b>7,5</b>	6,5	5,9	5,6	5,2	4,9	4,9	4,3
Mesterkamp (nicht Gleisdreieck)	8,7	7,8	7	<b>6,5</b>	6,2	5,6	5,4	5,2	4,9	4,8	4,5
SBG	4,9	4,7	4,2	<b>3,9</b>	3,8	3,6	3,4	3	2,6	2,3	2,2
Wandsbek	10,7	10,1	9,1	<b>7,7</b>	6,2	5,6	5,3	4,8	4,5	4,3	4,2

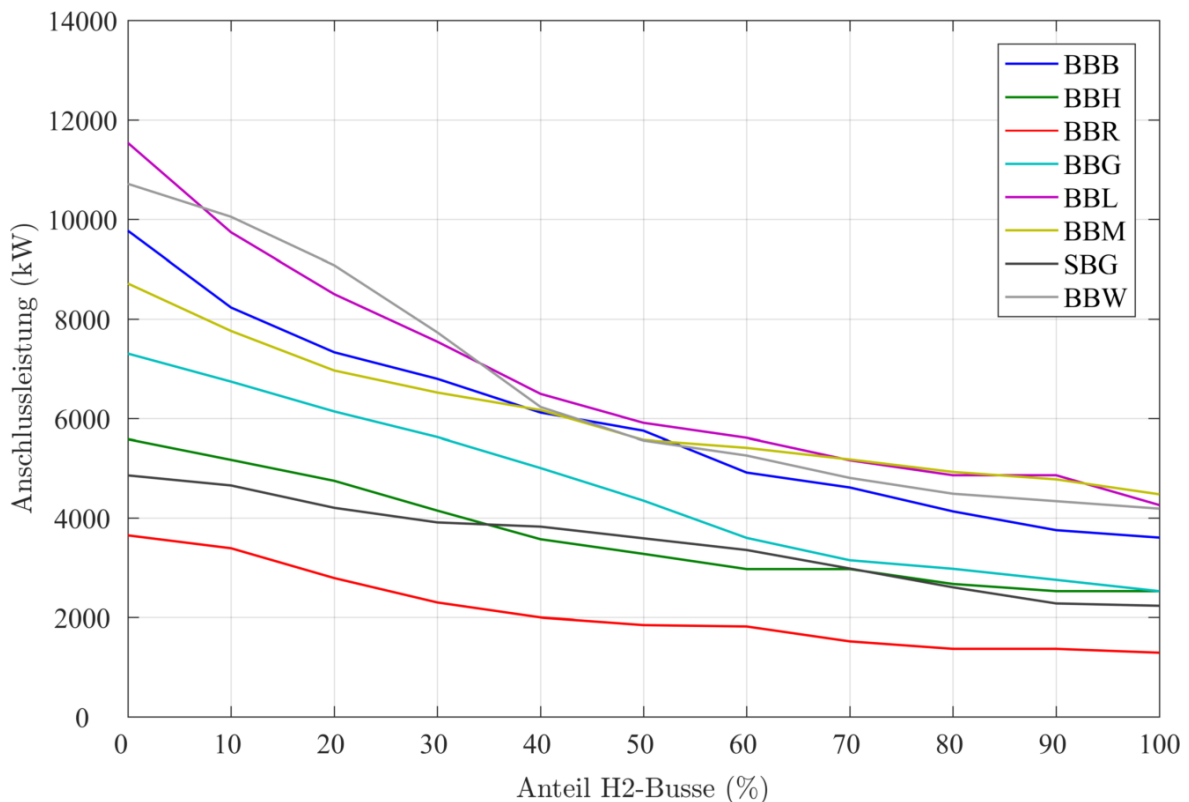


Abbildung 3.24: Verlauf der Anschlussleistung für alle Busbetriebshöfe bei verschiedenen Anteilen an Wasserstoffbussen und einer Anlieferung des Wasserstoffes.

## 4 Zusammenfassung & Handlungsempfehlungen

### 4.1 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen Teil 1

Im ersten Teil der vorliegenden Metastudie wurden die künftigen Anforderungen an die Netzentwicklung durch Elektromobilität in den Bereichen ÖPNV, Gewerbe und Privatfahrzeuge ermittelt. Zunächst wurde in Kapitel 2.1 der politisch abgestimmte Elektrofahrzeug-Hochlauf „META“ definiert. Mit Aussagen zu Marktanteilen von Automobilherstellern und weiteren Studien wurden weitere Hochläufe modelliert und mit dem Hochlauf „META“ verglichen. Anschließend wurde ein auf dem „META“-Szenario basierender Entwicklungskorridor aufgespannt, mit dessen Hilfe die Anforderungen an die Netzentwicklung abgeschätzt werden.

Um die Auswirkungen der Elektromobilität auf die einzelnen Umspannwerke (UW) abschätzen zu können, wurden in Kapitel 2.2 die Methodiken zur Verteilung der EFZ-Hochläufe für die Stadt Hamburg auf die Umspannwerksgebiete vorgestellt. Hierzu wurden die Entwicklungen verschiedener Sektoren (Privatfahrzeuge der in Hamburg Wohnenden, Pendler, gewerbliche und kommunale Flotten, Carsharing, Multi-Energie-Tankstellen, ÖPNV) betrachtet und über sektorspezifische Verteilungsschlüssel auf die Umspannwerksgebiete verteilt.

Des Weiteren wurden in Kapitel 2.3 sektorspezifische Tageslastgänge definiert, mit denen das „typische“ Ladeverhalten der Fahrzeuge in den Sektoren abgebildet wird. Hieraus und aus den jeweiligen Hochläufen ergibt sich die zusätzliche Last durch Elektromobilität an einem durchschnittlichen Tag.

Um die Auswirkungen einer höheren Marktdurchdringung schnellladefähiger Fahrzeuge abzuschätzen, wurde in Kapitel 2.4 ein Fallbeispiel konstruiert und ausgewertet. Hier wird vor allem gezeigt, dass die Gleichzeitigkeit des Ladens bei schnellladenden Fahrzeugen, durch die kürzeren Ladezeiten, deutlich sinkt.

Es zeigt sich in Kapitel 2.5, dass sich mit den definierten, sektorspezifischen Tageslastgängen die Spitzenlast in den Abendstunden ergibt. Diese resultiert insbesondere aus den prognostizierten hohen EFZ-Zahlen im gewerblichen Sektor. Zudem wird hierbei von einem ungesteuerten Laden ausgegangen, d. h. es wird keine Form von Lademanagement integriert, sondern die Fahrzeuge werden an die Ladesäule angeschlossen, sobald sie zurück auf dem Betriebshof sind. Eine Betrachtung der durchschnittlichen Fahrleistungen von Fahrzeugen zeigt, dass hier ein großes Verschiebepotenzial der Last in die Nacht vorhanden ist. Bei der Annahme, dass ein gewerbliches Elektrofahrzeug täglich 60 km, bei einem Energieverbrauch von 25 kWh/100 km, fährt, ist die verfahrenene Energiemenge bei einer Ladeleistung von 3,7 kW in vier Stunden wieder aufgeladen.

Mit der Verteilung der Fahrzeuge auf die Umspannwerksgebiete wurde in Kapitel 2.6 die zusätzliche Last durch Elektromobilität in den einzelnen UW-Gebieten ermittelt. Hier zeigt sich insbesondere eine hohe zusätzliche Last in den Umspannwerksgebieten, in denen Busbetriebshöfe oder Unterwerke der neuen U-Bahn-Linie U5 vorhanden sind. Außerdem wirkt sich der Bereich Gewerbe relativ stark auf die zusätzliche Last aus. Dementsprechend ist der Leistungszuwachs sehr abhängig vom jeweiligen Hochlauf-Szenario. Die anschließende Berechnung der neuen Umspannwerksreserven führt im Szenario „META“ zu vier kritischen UW-Gebieten:

- UW Bergedorf
- UW Fuhlsbüttel
- UW Hellbrook
- UW Langenhorn

Nach dem Szenario „MIN“ ergibt sich, dass die Reserven des UW Langenhorn noch nicht aufgebraucht werden. Im Szenario „MAX“ wurde zusätzlich das UW Siemersplatz als ein kritisches Gebiet identifiziert.

In der Tabelle 4.1 werden die Reserven und eine Ausbauempfehlung der UW-Gebiete aufgezeigt, die nach der verwendeten Methodik als kritisch identifiziert wurden.

Tabelle 4.1: Reserven und Ausbauempfehlung als "kritisch" identifizierter UW-Gebiete

<b>UW-Gebiet</b>	<b>Reserve 2015 [MVA]</b>	<b>Reserve 2020 [MVA]</b>	<b>Reserve 2025 [MVA]</b>	<b>Reserve 2030 [MVA]</b>	<b>Bis wann?</b>	<b>Szenario</b>
Bergedorf	7,8	1,5	0,6	-0,8	2025	MIN
Fuhlsbüttel	8,6	7,8	-0,4	-2,4	2025	MIN
Hellbrook	3,9	3,6	2,2	-3,9	2025	MIN
Langenhorn	13,7	11,4	9,1	-0,5	2030	META
Siemersplatz	10,7	9,0	8,2	-1,3	2030	MAX

Den Entscheidungsträgern für einen Netzausbau wird empfohlen die weitere Entwicklung der Elektromobilität, insbesondere in Hamburg, mit den in dieser Studie vorgestellten Prognosen zu vergleichen. Dadurch kann bei absehbaren Handlungsbedarf rechtzeitig ein Netzausbau der betroffenen Umspannungsgebiete erfolgen.

Weiterhin wird empfohlen, mit Stromhändlern ein Konzept zu erarbeiten, welches finanzielle Anreize für eine Lastverschiebung in die Nacht ermöglicht. Beispielhaft sei an dieser Stelle das in [29] ausgewertete Konzept „Time-of-Use“ erwähnt. Dieses Konzept zeigt, dass Nutzer von Elektrofahrzeugen freiwillig ihr Fahrzeug zu einem späteren Zeitpunkt, z. B. um Mitternacht, laden, wenn dafür der Strombezug günstiger ist. Dies ist insbesondere dann möglich, wenn die Fahrleistung am Tag in nur wenigen Stunden wieder aufladbar ist, was in den meisten Fällen möglich ist (eine Fahrleistung von 50 km benötigt eine Ladezeit von ca. drei Stunden bei einer Ladeleistung von 3,7 kW).

Vertragliche Vereinbarungen mit Besitzern großer Elektrofahrzeugflotten, z. B. über ein Lademanagement, ergeben große Potenziale zur Verschiebung von Lastspitzen. Außerdem können so dezentrale Anhäufungen von Ladesäulen auf Betriebshöfen identifiziert und kartiert werden.

Wichtig für den Ausbau der zukünftigen Ladeinfrastruktur sind rechtzeitige Gespräche und Vereinbarungen mit der Politik, insbesondere bezüglich privater Schnellladesäulen. Es sollte vermieden werden Fehlanreize zu generieren. Die willkürliche Installation von Schnellladesäulen durch private Nutzer ist mit einem massiven dezentralen Leitungsausbau verbunden, da die bisher installierten Leitungen solch hohe Leistungen nicht übertragen können. Technisch ist es nicht sinnvoll, auf breiter Fläche das Niederspannungsnetz auszubauen, um an vielen Punkten lokal 150 kW Ladeleistung bereitzustellen. Zudem gilt es zu vermeiden, dass der Leitungsausbau privater Ladesäulen auf die Allgemeinheit umverteilt wird.

## 4.2 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen Teil 2

Im zweiten Teil der Metastudie wurde untersucht, welche Auswirkungen der Busbetrieb mit Elektrobusen auf die elektrische Energieversorgung hat.

Der jährliche Gesamtenergiebedarf aller Busbetriebshöfe der HOCHBAHN beläuft sich auf ca. 132 GWh. Bei der VHH beläuft sich der Gesamtenergiebedarf auf ca. 49 GWh. Bei einer durchschnittlich 5 °C höheren Temperatur sinkt der Energiebedarf um 7,5%. Bei einer durchschnittlich 5 °C tieferen Temperatur steigt der Energiebedarf um 8,8%.

Tabelle 4.2 zeigt die notwendige Anschlussleistung im Jahr 2030 sowie den Vergleich mit den zu erwartenden Umspannwerksreserven. Die ermittelten Anschlussleistungen basieren auf den Lade-Wirkleistungskurven, die für jeden Busbetriebshof mithilfe der Umlaufdaten berechnet wurden, siehe Abbildung 4.1. Alle Busbetriebshöfe bis auf Gleisdreieck können voraussichtlich an der Mittelspannung angeschlossen werden. Ihre Lastspitze liegt unterhalb der 14 MVA Grenze. An den Umspannwerken Fuhlsbüttel und Bergedorf werden ab dem Jahr 2025 vermutlich Netzausbauten notwendig sein.

Tabelle 4.2: Vergleich zwischen notwendigen Anschlussleistungen der Busbetriebshöfe und freien Umspannwerksreserven

Busbetriebshof	Umspannwerk	Reserve 2015 [MVA]	Reserve 2020 [MVA]	Reserve 2025 [MVA]	Reserve 2030 [MVA]	Anschluss $S_{30}$ [MVA]
Billbrook	Horn	32,3	31,7	30,4	<b>28,0</b>	<b>9,8</b>
Harburg 1	Wilstorf	12,6	12,0	11,4	<b>9,2</b>	<b>5,6</b>
Harburg 2	Harburg	29,3	28,7	27,1	<b>24,6</b>	<b>5,9</b>
Hummelsbüttel	Fuhlsbüttel	8,6	7,5	<b>5,1</b>	<b>0,2</b>	<b>7,0</b>
Langenfelde	Eimsbüttel	80,1	78,4	67,7	<b>66,9</b>	<b>11,7</b>
Gleisdreieck	Alsterdorf	23,7	22,8	21,2	<b>12,0</b>	<b>16,3</b>
SBG	Hausbruch	10,2	10,2	10,2	<b>10,2</b>	<b>4,5</b>
Wandsbek	Wandsbek	24,9	23,3	22,8	<b>19,8</b>	<b>9,4</b>
Bergedorf	Bergedorf	7,8	7,3	6,4	<b>4,4</b>	<b>5,9</b>

Für zukünftig geplante Busbetriebshöfe lässt sich die Anschlussleistung mit der Anzahl der vorgesehenen Elektrobusse abschätzen. Der zu verwendende Gleichzeitigkeitsfaktor beträgt ca. 0,5.

Insbesondere bei Gelenk- und Doppelgelenkbussen kann es an manchen Busbetriebshöfen durch die im Modell gewählte Zuweisung von Umläufen dazu kommen, dass die vorhandenen Batteriespeichergößen nicht ausreichen, die Umläufe zu bedienen. Gegebenenfalls müssen hier zusätzliche Fahrzeuge beschafft oder eine Optimierung der Umlaufzuweisung durchgeführt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, Wasserstoff- oder Range-Extender Busse einzusetzen sowie die Busse auf der Strecke nachzuladen.

Die Verfügbarkeit der Busse für Wartungs-, Instandhaltungs- und Reinigungsarbeiten wird durch die Ladezeit reduziert. Der Großteil der Arbeiten kann jedoch auch während des Ladevorgangsdurchgeführt werden, sofern die Werkstätten über eine entsprechende Ladeinfrastruktur verfügen.

Der Einsatz von Wasserstoffbussen oder Range-Extendern ist eine Möglichkeit zur Bedienung größerer Umläufe. Wird der benötigte Wasserstoff auf dem Busbetriebshof produziert, so erhöht sich die notwendige Anschlussleistung. Bei einer Anlieferung des Wasserstoffes kann die Anschlussleistung

stark reduziert werden. Sie wird nach unten durch die notwendige Vorkonditionierung von Elektro- und Wasserstoffbussen limitiert.

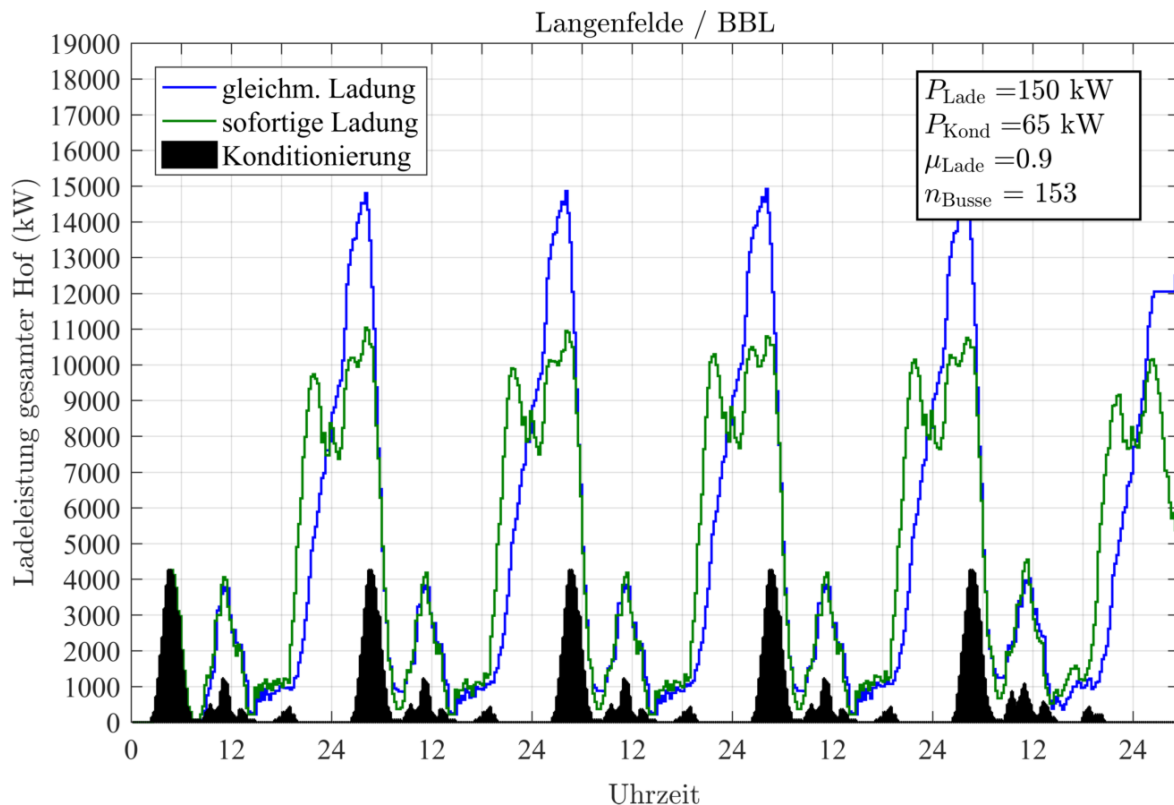


Abbildung 4.1: Verlauf einer typischen Ladeleistung einer Woche an einem Busbetriebshof der HOCHBAHN. Lade-Wirkungsgrad 90%, Ladeleistung 150 kW, Vorkonditionierung mit 65 kW, Verbrauchswerte für Busse im Winter.

#### 4.2.1 Handlungsempfehlungen VHH

Der Busbetriebshof Bergedorf benötigt laut den Berechnungen eine Anschlussleistung von ca. 6,4 MVA und ist damit in der Mittelspannung zu realisieren. Gleiches gilt für den Busbetriebshof Glinde (ca. 4,9 MVA) sowie Schenefeld (ca. 10,8 MVA). Gegebenenfalls sollten Zusatzverbraucher (Puffer) eingeplant werden.

#### 4.2.2 Handlungsempfehlungen HOCHBAHN

Es wird empfohlen, alle Busbetriebshöfe bis auf Gleisdreieck an die Mittelspannungsebene anzuschließen. Die Anschlussleistungen entsprechen den Ergebnissen aus Abschnitt 3.2.3. Zusätzlich ist es dringend erforderlich, potentielle Zusatzverbräuche (Puffer) zu definieren. Die hohen Anschlussleistungen sowie Energiebedarfe legen eine Prüfung nahe, ob ein Anschluss direkt an die Mittelspannungs-Sammelschiene (Netzebene 4, HS/MS) wirtschaftlich günstiger ist, als ein Anschluss an die Mittelspannungsebene (Netzebene 5, MS). Dadurch könnten Netzentgelte sowie Leistungspreis insgesamt günstiger sein.

Der Busbetriebshof Langenfelde befindet sich bezüglich des Leistungsbedarfes relativ nahe an der Obergrenze für die Mittelspannung (14 MVA). Die Prüfung auf eventuell notwendige Puffer und Optimierungsmöglichkeiten (Lademanagement etc.) sollten hier besonders sorgfältig durchgeführt werden um im Zweifel unterhalb der Anschlussgrenze zu verbleiben. Gegebenenfalls ist in Erwägung zu ziehen, einen zusätzlichen Anschluss zu nutzen, der die Grundlast des Busbetriebshofes abdeckt. Die Nutzung von Wasserstoffbussen mit einer Anlieferung des Wasserstoffs ist ebenfalls denkbar.

Der Busbetriebshof Gleisdreieck sollte an die Hochspannungsebene angeschlossen werden.

Die Anschlussreihenfolge der Busbetriebshöfe kann entsprechend der Einsatz- und Betriebsplanung der HOCHBAHN erfolgen. In den ersten Jahren sind die tatsächlich erforderlichen Leistungsbedarfe ausreichend gering, sodass keines der Umspannwerke dadurch eine Überlastung erfahren sollte.

Ab Beginn der Umstellung auf Elektromobilität wird der tatsächliche Anteil an Anschlussleistung in etwa linear mit dem Anteil der Elektrobusse auf dem Busbetriebshof ansteigen. Es ist daher zu empfehlen, die notwendige Anschlussleistung entsprechend dieses Hochlaufes abzuschätzen und vertraglich zwischen HOCHBAHN sowie Stromnetz Hamburg festzuhalten. Damit soll verhindert werden, dass alle Umspannwerke sofort mit Anschluss des Busbetriebshofes ihre Reserven überschreiten würden. Ein eventuell notwendiger Netzausbau kann somit zeitlich gestaffelt erfolgen und passt sich den tatsächlichen Leistungsanforderungen an.

Für die Sicherstellung des Betriebs muss untersucht werden, ob mit Elektrobussen heutiger oder zukünftiger Reichweite die definierten Umläufe ganzjährig bedient werden können. Insbesondere werden Gelenk- und Doppelgelenkbusse bei kalten Umgebungstemperaturen an ihre maximalen Reichweitengrenzen stoßen. Es ist zu prüfen, ob eine Optimierung (Aufteilung) der Umläufe sinnvoll ist, oder ob generell auf einen gemischten Fuhrpark (Elektro- und Wasserstofffahrzeuge) gesetzt werden sollte. Denkbar ist der Einsatz von Mehrfahrzeugen für den reinen Elektrobus-Betrieb oder die Beimischung von Range-Extender Bussen. Auch die Entwicklung der Batterietechnologie sowie die damit verbundenen maximalen Reichweiten sollte sorgfältig beobachtet werden. Praktische Erfahrungswerte für Elektrobusse sollten in den ersten Jahren der Umstellung gesammelt werden. Durch eine Integration der Busse in das Betriebsmanagementsystem können Simulationsergebnisse (wie z.B. dieser Studie) mit realen Ergebnissen verglichen werden. Damit kann besser abgeschätzt werden, ab welchem Anteil an Elektrobussen (und damit sinkendem Anteil Dieselbusse) der Betrieb bei der aktuellen Definition von Umläufen an Grenzen stoßen würde.

### **4.2.3 Handlungsempfehlungen Stromnetz Hamburg**

Der Hochlauf der Anschlussleistung für die Busbetriebshöfe (tatsächliche vs. maximale Anschlussleistung) ist entsprechend 4.2.2 zu berücksichtigen.

Es wird empfohlen, das Umspannwerk Fuhlsbüttel (Busbetriebshof Hummelsbüttel) insbesondere für die Entwicklung der Elektromobilität ab 2025 vorzubereiten. Treten die Prognosen entsprechend der Ergebnisse von Teil 1 ein, so wird es ab 2025 notwendig sein, das Umspannwerk auszubauen. Die Prognosen für das Umspannwerk Bergedorf (Busbetriebshof Bergedorf) sind analog. Zu erwarten ist ein Ausbaubedarf ab 2030.





## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Stromnetz Hamburg GmbH, „Energieportal Hamburg,“ [Online]. Available: <http://www.energieportal-hamburg.de/distribution/energieportal/availableCapacity/AvailableCapacity.action?begin=&currentlySelectedMenuItemId=root%3A%3Aopen%3A%3AavailableCapacity>. [Zugriff am 7 Dezember 2016].
- [2] NOW GmbH, „Elektromobilität in Kommunen, Handlungsleitfaden,“ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2014.
- [3] PwC Autofacts, „Mit Elektrifizierung und Verbrennungsmotoren auf dem Weg in die Zukunft der Mobilität,“ PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, September 2016.
- [4] H. Proff, H. Proff, T. Fojcik und J. Sandau, Management des Übergangs in die Elektromobilität, Springer Verlag, 2014.
- [5] Bloomberg Finance LP., 25 Februar 2016. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/press-releases/electric-vehicles-to-be-35-of-global-new-car-sales-by-2040/>. [Zugriff am 29 November 2016].
- [6] Volkswagen AG, „TOGETHER - Strategie 2025,“ [Online]. Available: [http://www.volkswagenag.com/presence/konzern/pdf/Konzerninitiativen\\_Internet\\_GroupConnect.pdf](http://www.volkswagenag.com/presence/konzern/pdf/Konzerninitiativen_Internet_GroupConnect.pdf). [Zugriff am 29. November 2016].
- [7] Volkswagen AG, [Online]. Available: [http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info\\_center/de/news/2016/06/HV\\_2016.html](http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/news/2016/06/HV_2016.html). [Zugriff am 28 Oktober 2016].
- [8] Wirtschaftswoche, „E-Autos, Endlich kommen die deutschen Modelle,“ [Online]. Available: <http://www.wiwo.de/technologie/green/biz/e-autos-endlich-kommen-die-deutschen-modelle/14630792.html>. [Zugriff am 29 November 2016].
- [9] Die Bundesregierung, „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung,“ 2009.
- [10] Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (Statistisches Amt Nord), „Private PKW (Jan 2015),“ [Online]. Available: [http://www.statistik-nord.de/fileadmin/maps/Stadtteil\\_Profile\\_2015/atlas.html](http://www.statistik-nord.de/fileadmin/maps/Stadtteil_Profile_2015/atlas.html). [Zugriff am 1 Dezember 2016].
- [11] Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (Statistisches Amt Nord), „Durchschnittliches Einkommen je Steuerpflichtigen in EUR (2010),“ [Online]. Available: [http://www.statistik-nord.de/fileadmin/maps/Stadtteil\\_Profile\\_2015/atlas.html](http://www.statistik-nord.de/fileadmin/maps/Stadtteil_Profile_2015/atlas.html). [Zugriff am 1 Dezember 2016].
- [12] Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (Statistisches Amt Nord), „Wohnungen in Ein- und Zweifamilienhäusern (2014),“ [Online]. Available: [http://www.statistik-nord.de/fileadmin/maps/Stadtteil\\_Profile\\_2015/atlas.html](http://www.statistik-nord.de/fileadmin/maps/Stadtteil_Profile_2015/atlas.html). [Zugriff am 1 Dezember 2016].

- [13] T. Knahl und C. Sommer, „Einsatzpotenziale für Elektrofahrzeuge in der Hamburger Wirtschaft,“ Hamburg, 2013.
- [14] T. Gnann und P. Plötz, „Status Quo und Perspektiven der Elektromobilität in Deutschland,“ Karlsruhe, 2011.
- [15] L. Holtermann, A. Otto und S. Schulze, „Pendeln in Hamburg,“ Hamburg, 2013.
- [16] car2go Deutschland GmbH, „car2go in Hamburg - Geschäftsgebiet,“ [Online]. Available: <https://www.car2go.com/DE/de/hamburg/where/>. [Zugriff am 1 Dezember 2016].
- [17] DriveNow GmbH & Co. KG, „DriveNow Carsharing Hamburg,“ [Online]. Available: <https://de.drivenow.com/#!/carsharing/hamburg>. [Zugriff am 1 Dezember 2016].
- [18] Shell Deutschland Oil GmbH, „Shell Stationsfinder,“ [Online]. Available: <http://www.shell.de/autofahrer/shell-station-locator.html#iframe-Lz9jb3VudHJ5PURFJmxbmd1YWdlPWRIX0RFJnNpdGU9cnRsJm1vZGVzZWxIY3RIZD10cnVl>. [Zugriff am 1 Dezember 2016].
- [19] Esso Deutschland GmbH, „Tankstellenliste Hamburg,“ [Online]. Available: <http://www.essofuelfinder.de/station-locations/germany/hamburg/hamburg>. [Zugriff am 1 Dezember 2016].
- [20] TOTAL Deutschland GmbH, „Der Total Tankstellenfinder,“ [Online]. Available: <http://www.total.de/highlights/tankstellenfinder.html>. [Zugriff am 1 Dezember 2016].
- [21] Das Örtliche, „Aral Tankstellen in Hamburg,“ [Online]. Available: [http://www.dasoertliche.de/?kw=Aral+Tankstellen&form\\_name=search\\_nat&ci=Hamburg&context=11&page=78&action=56&cilInput=Hamburg&zvo\\_ok=1&radius=5&buab=40000058&zbuab=40000064%2C40000057%2C40000068%2C40000053%2C40000065%2C40000075%2C40000074%2C40000067%2C4000](http://www.dasoertliche.de/?kw=Aral+Tankstellen&form_name=search_nat&ci=Hamburg&context=11&page=78&action=56&cilInput=Hamburg&zvo_ok=1&radius=5&buab=40000058&zbuab=40000064%2C40000057%2C40000068%2C40000053%2C40000065%2C40000075%2C40000074%2C40000067%2C4000). [Zugriff am 1 Dezember 2016].
- [22] JET Tankstellen Deutschland GmbH, „Filialfinder,“ [Online]. Available: [https://www.jet-tankstellen.de/kraftstoff/filialfinder/?location=Hamburg%2C+Deutschland&replace\\_code=&radius=20](https://www.jet-tankstellen.de/kraftstoff/filialfinder/?location=Hamburg%2C+Deutschland&replace_code=&radius=20). [Zugriff am 1 Dezember 2016].
- [23] Erhardt & Kellner GmbH, „Hamburg: Taxistände,“ [Online]. Available: [http://www.deutschland123.de/hamburg\\_Taxist%C3%A4nde](http://www.deutschland123.de/hamburg_Taxist%C3%A4nde). [Zugriff am 1 Dezember 2016].
- [24] Siemens AG, „Technische Schriftenreihe Ausgabe 9 - Elektrische Infrastruktur für E-Car Ladestationen,“ [Online]. Available: [http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/DE/consultant-support/download-center/tabcardseiten/Documents/Technische-Schriften/Ausgabe\\_9\\_Elektrische\\_Infrastruktur\\_fuer\\_E-Car-Ladestationen.pdf](http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/DE/consultant-support/download-center/tabcardseiten/Documents/Technische-Schriften/Ausgabe_9_Elektrische_Infrastruktur_fuer_E-Car-Ladestationen.pdf). [Zugriff am 1 Dezember 2016].
- [25] ABB AG, „Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge - Terra 51 Ladestation,“ [Online]. Available: [http://www.austrian-mobile-power.at/amp/Mitglieder\\_Produktblaetter/Produktdatenblatt\\_Terra51LadeStation.pdf](http://www.austrian-mobile-power.at/amp/Mitglieder_Produktblaetter/Produktdatenblatt_Terra51LadeStation.pdf). [Zugriff am 1 Dezember 2016].

- [26] J. Mühlenhoff, „Erneuerbare Elektromobilität,“ Berlin, 2010.
- [27] K. Bozem, A. Nagl, V. Rath und A. Haubrock, Elektromobilität: Kundensicht, Strategien, Geschäftsmodelle, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [28] M. Held, R. Graf, D. Wehner, S. Eckert, M. Faltenbacher, S. Weidner und O. Braune, „Abschlussbericht: Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen,“ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin, 2016.
- [29] ECOtality, „The EV Project - Q4 2012 Report,“ 2013.
- [30] hamburg.de GmbH & Co. KG, „Parkhäuser in Hamburg,“ [Online]. Available: <http://www.hamburg.de/parken/>. [Zugriff am 1 Dezember 2016].



## 6 Anhang

### 6.1 Stadtteilkarten zur Bestimmung der Verteilung der privaten Fahrzeuge

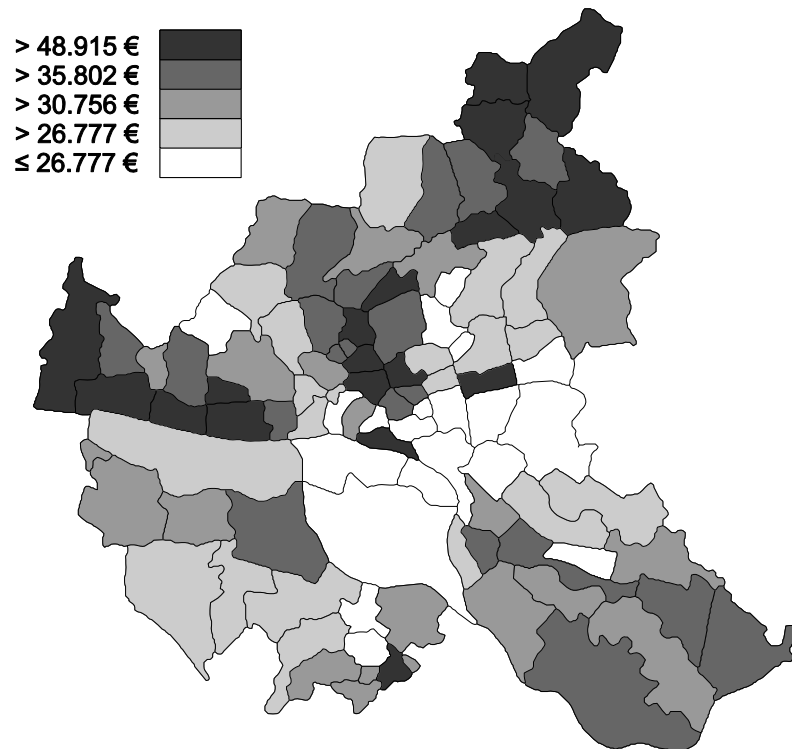


Abbildung 6.1: Einteilung der Stadtgebiete nach dem durchschnittlichen Einkommen

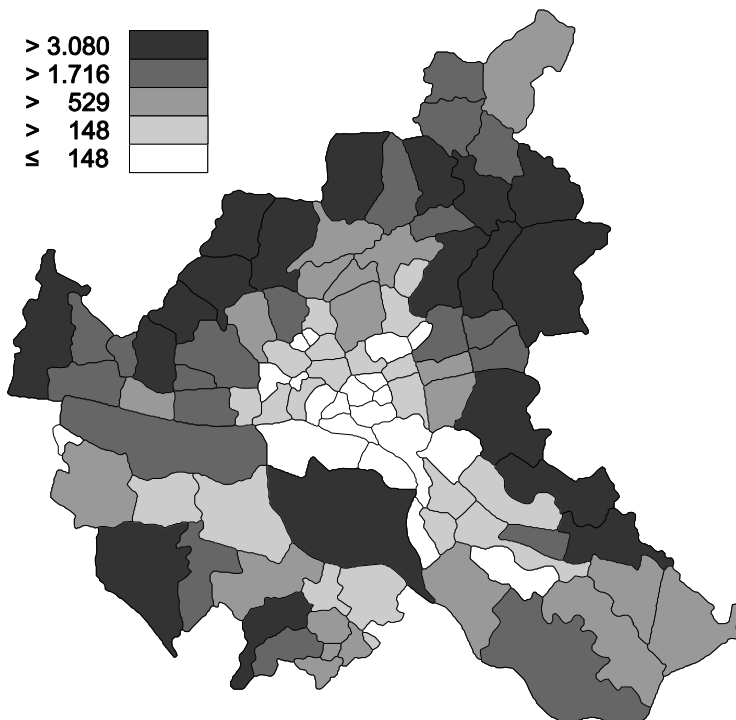


Abbildung 6.2: Einteilung der Stadtgebiete nach der Anzahl an Wohnungen in Ein- und Zweifamilienhäusern

## 6.2 UW-Gebietseinteilung im Sektor Carsharing

Tabelle 6.1: Flächenfaktor Einteilung der UW-Gebiete im Carsharing

<b>UW-Gebiet</b>	<b>Flächenfaktor</b>
Bergedorf	0,25
Billstedt	0,25
Großneumarkt	0,25
Hafen City	0,25
Mitte	0,25
Neustadt	0,25
Niendorf	0,25
Poppenbüttel	0,25
Rathaus	0,25
Sülldorf	0,25
Eppendorf	0,5
Fuhlsbüttel	0,5
Harburg	0,5
Wilhelmsburg	0,5
Altona	1
Bille	1
Eidelstedt	1
Eilbek	1
Eimsbüttel	1
Hamburg West	1
Hellbrook	1
Hinschenfelde	1
Holsten	1
Hohe Luft	1
Horn	1
Karoline	1
Siemersplatz	1
St. Georg	1
Tonndorf	1
Winterhude	1
Alsterdorf	1,5
Bahrenfeld	1,5
Barmbek	1,5
Bramfeld	1,5
Wandsbek	1,5

### 6.3 Gesamttageslastgänge für Hamburg

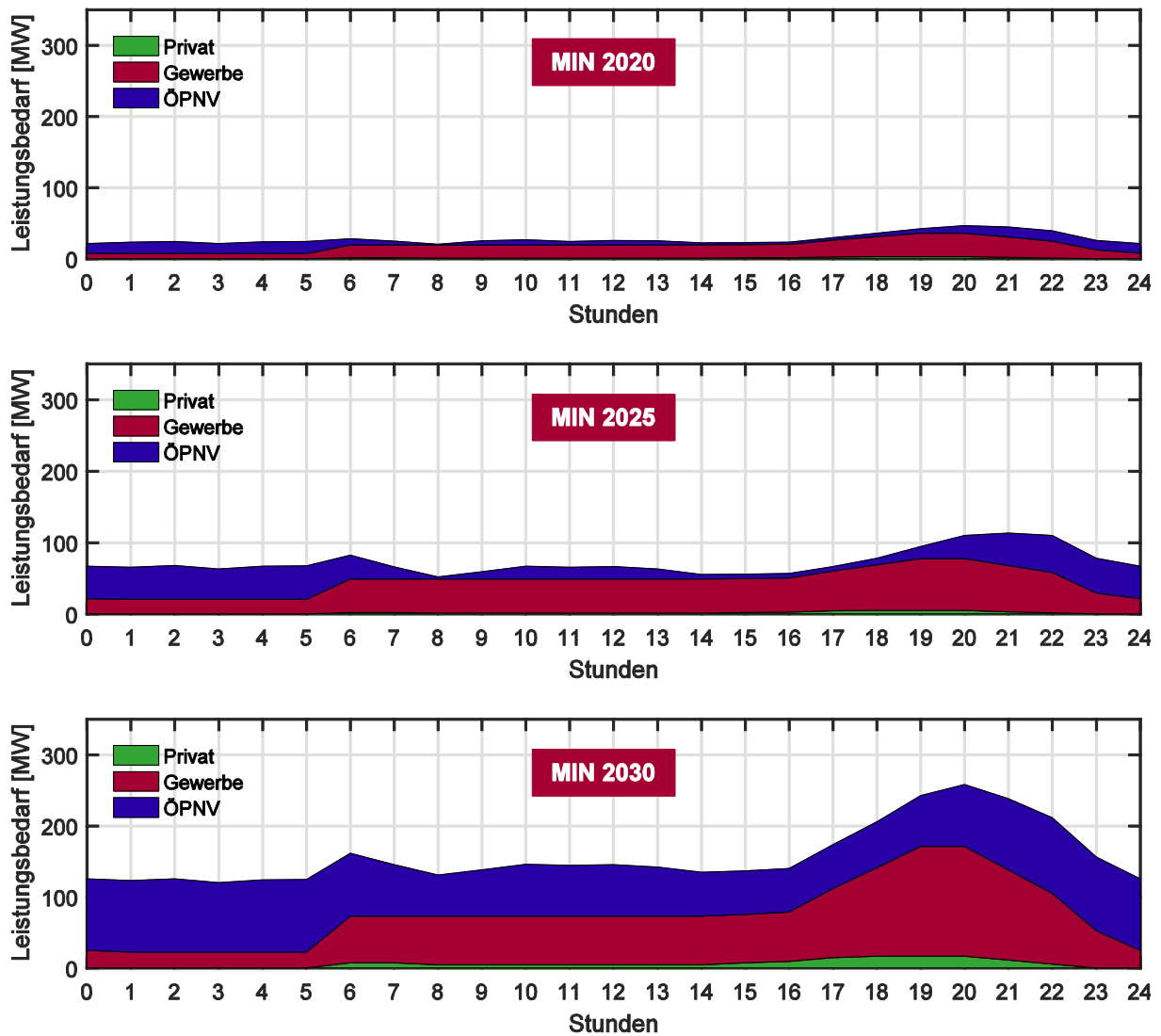


Abbildung 6.3: Gesamttageslastgang für Hamburg im Szenario "MIN"

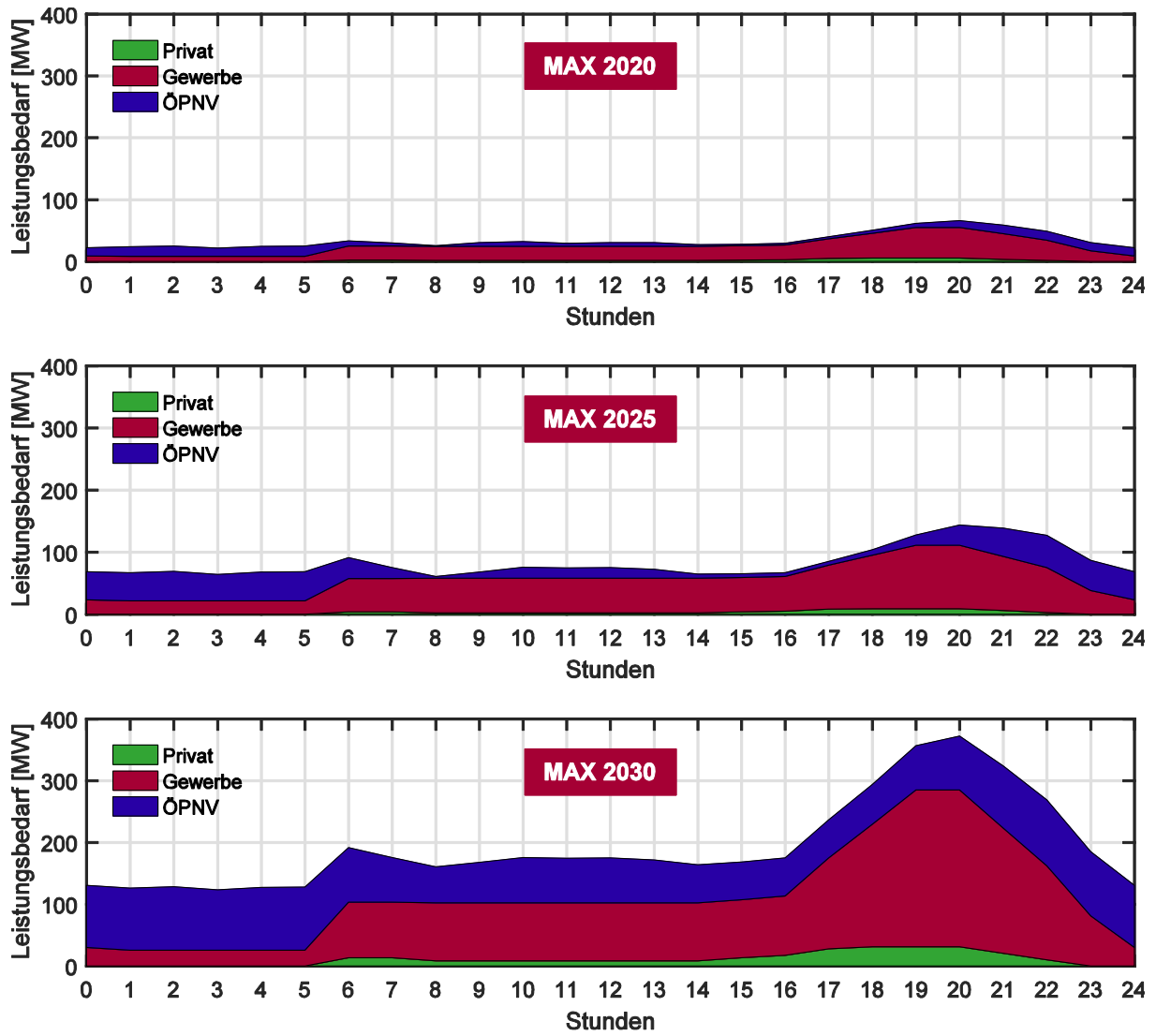


Abbildung 6.4: Gesamttageslastgang für Hamburg im Szenario "MAX"



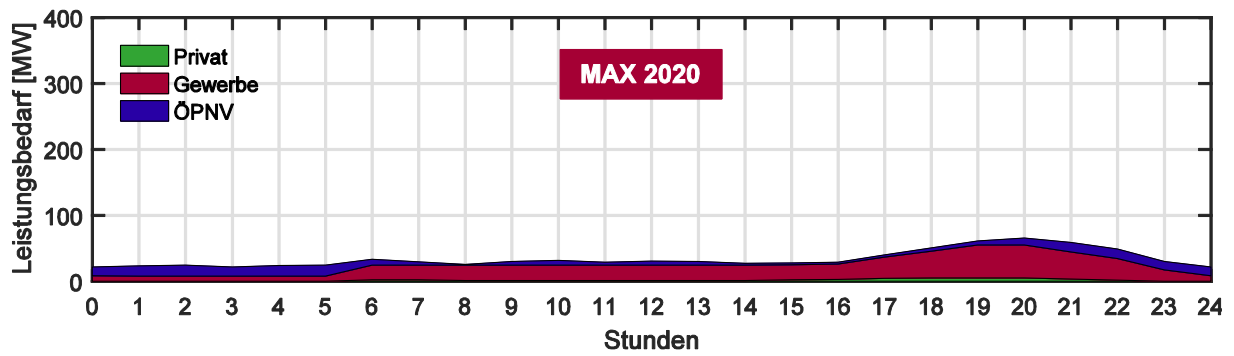
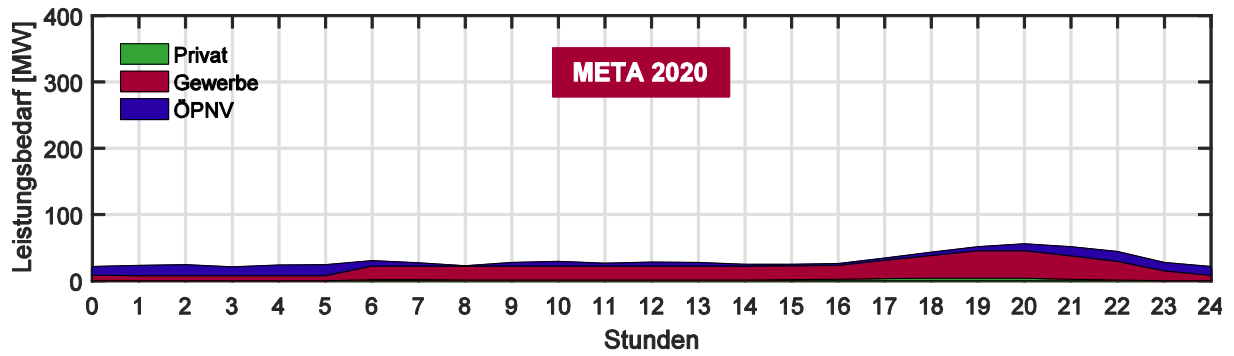
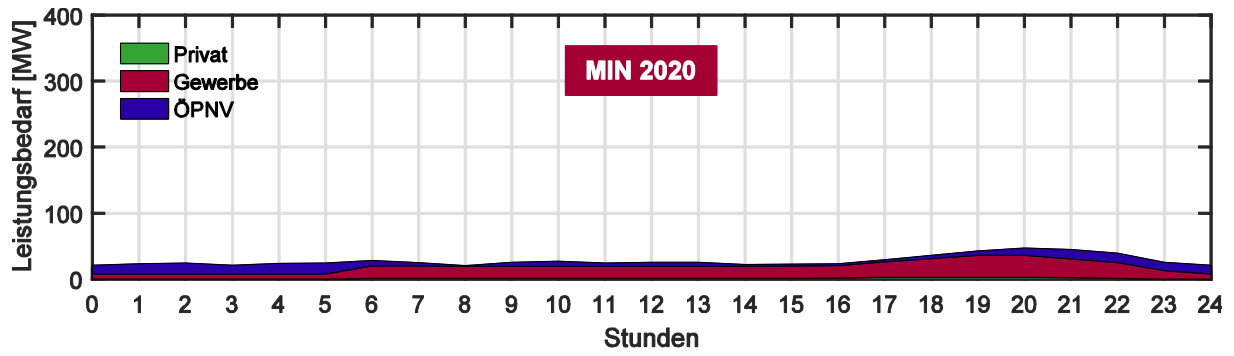


Abbildung 6.5: Gesamttageslastgang für Hamburg im Jahr 2020

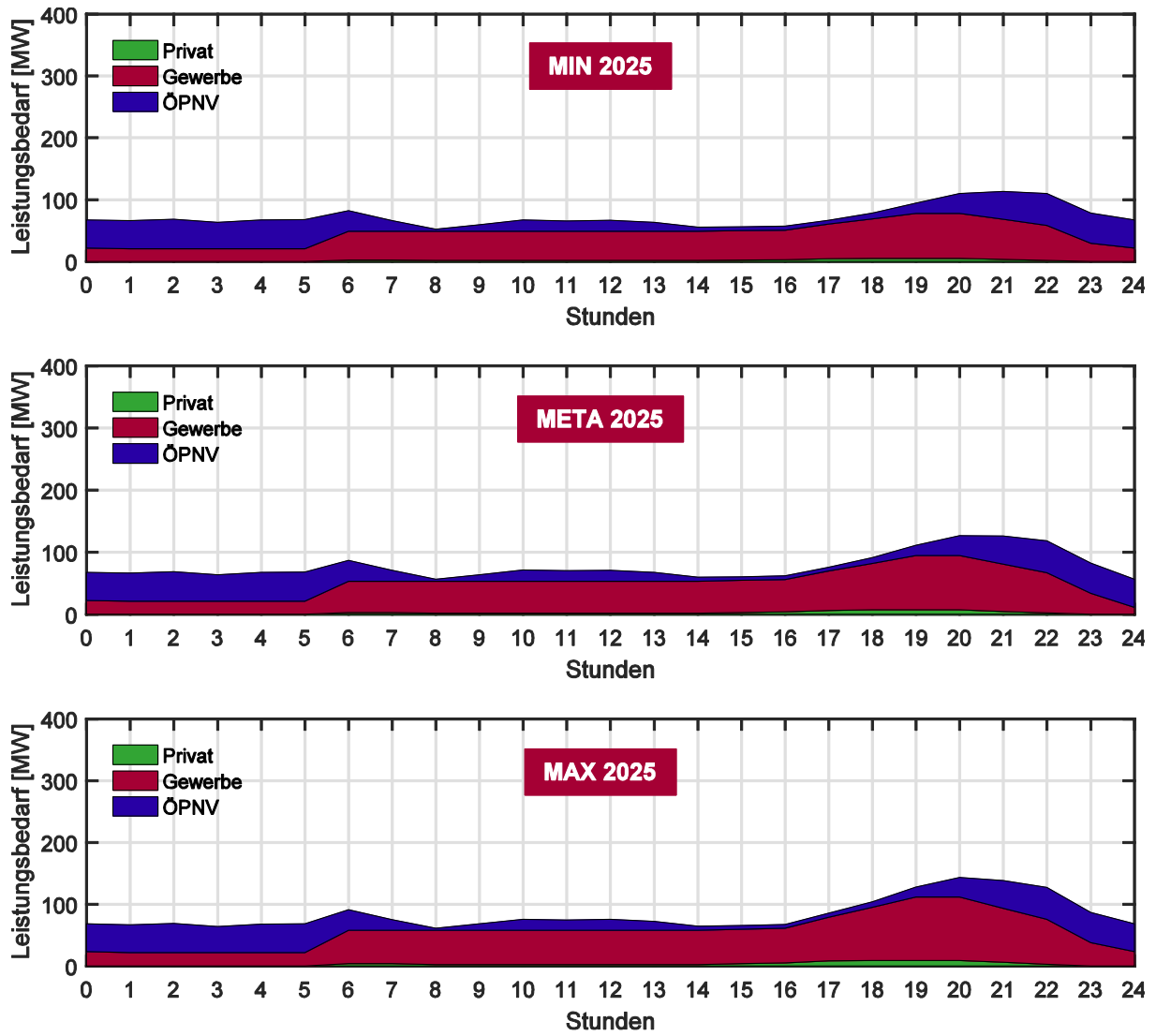


Abbildung 6.6: Gesamttageslastgang für Hamburg im Jahr 2025

## 6.4 Entwicklung der zusätzlichen Lasten durch Elektromobilität

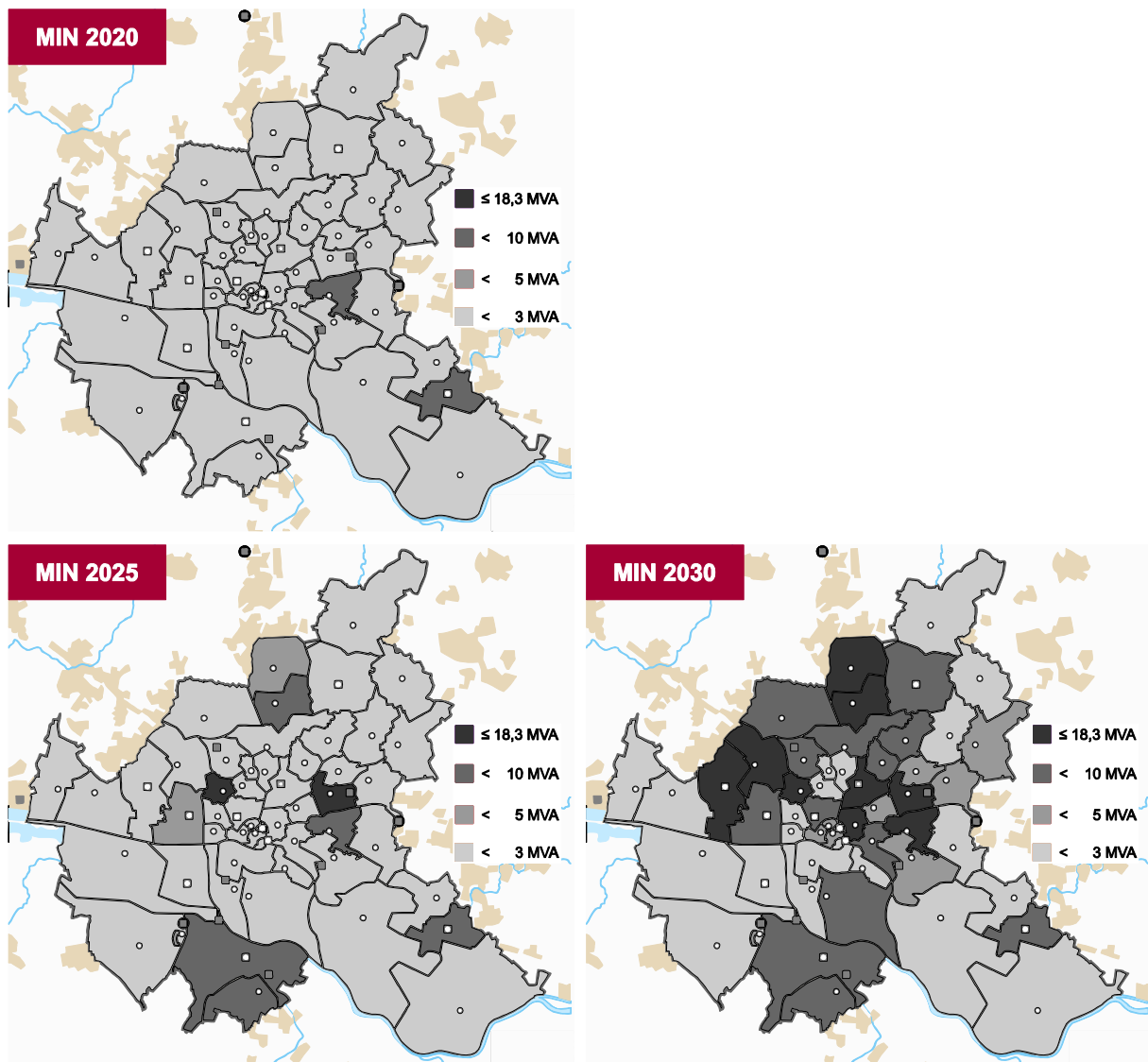


Abbildung 6.7: Zeitliche Entwicklung der zusätzlichen Lasten im Szenario "MIN"

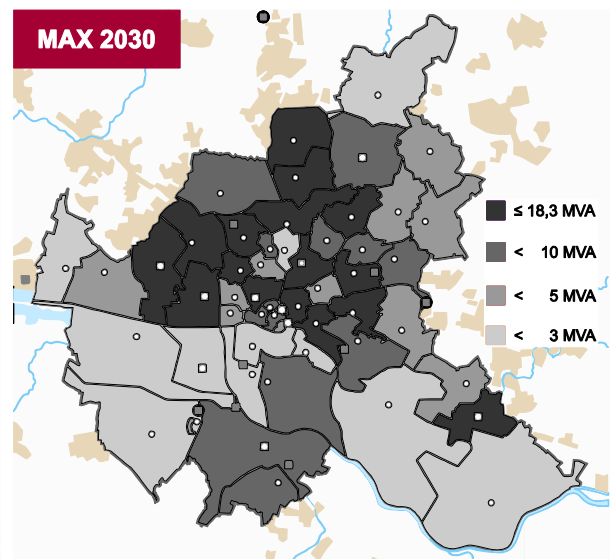
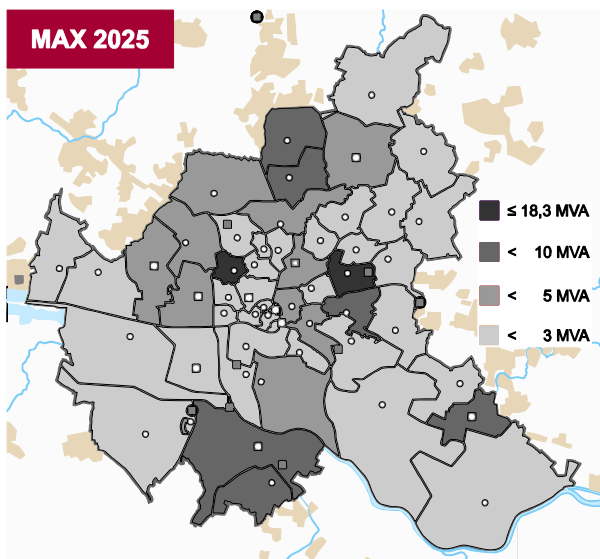
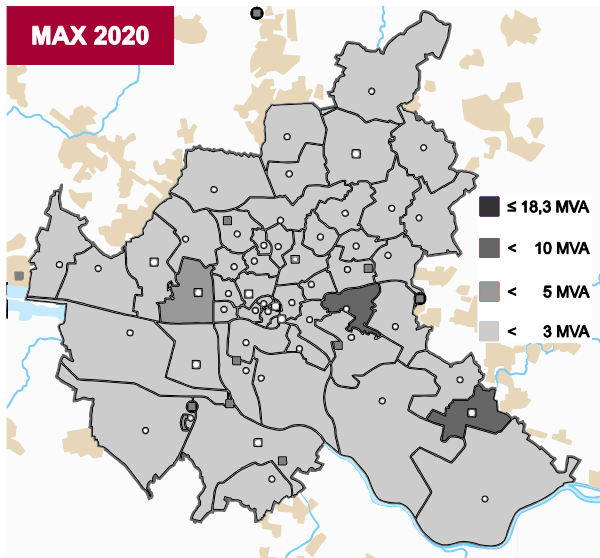


Abbildung 6.8: Zeitliche Entwicklung der zusätzlichen Lasten im Szenario "MAX"

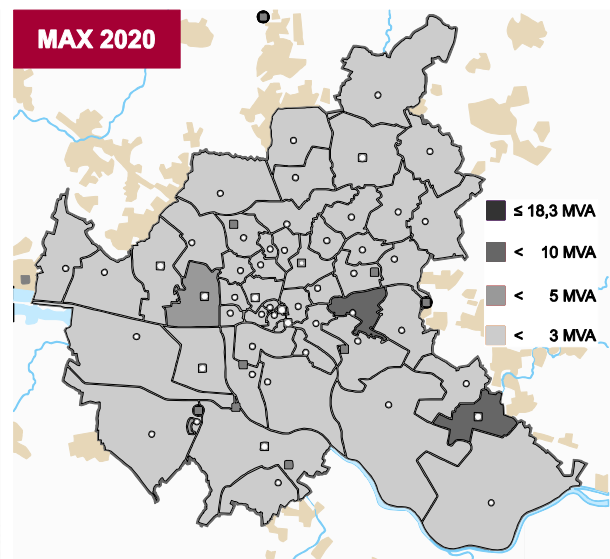
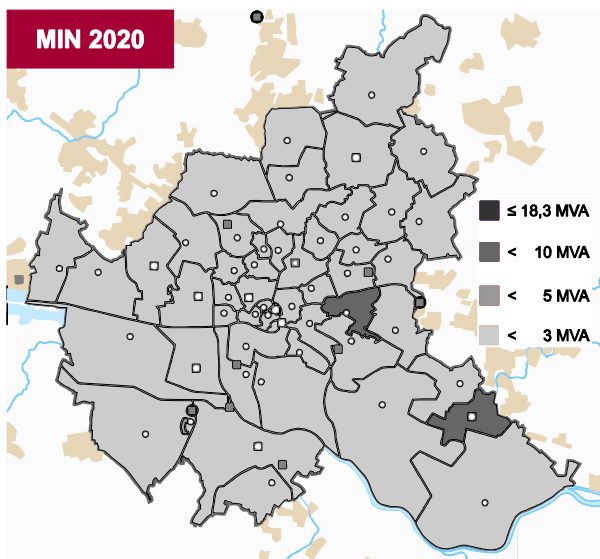
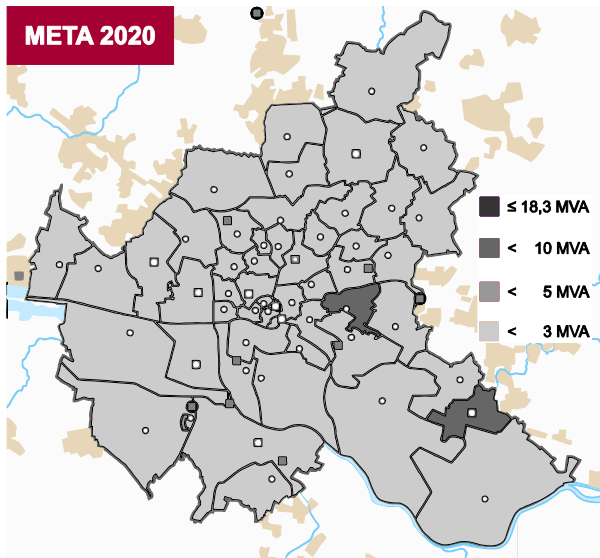


Abbildung 6.9: Szenarienvergleich der zusätzlichen Lasten im Jahr 2020

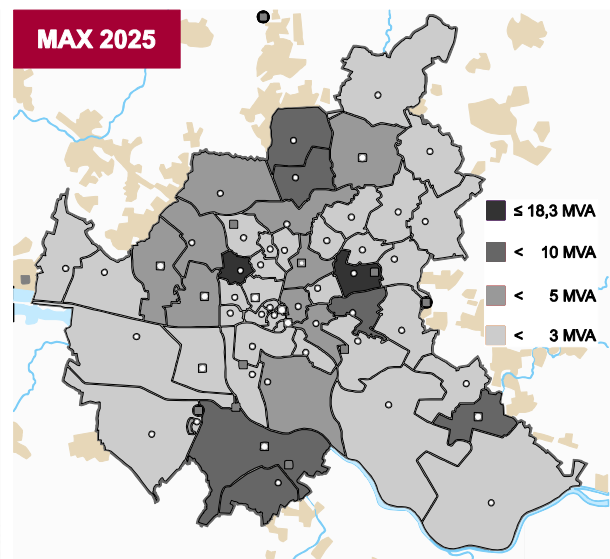
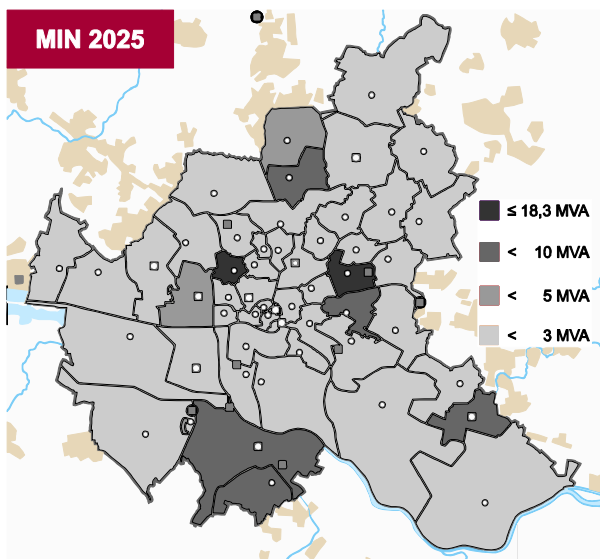
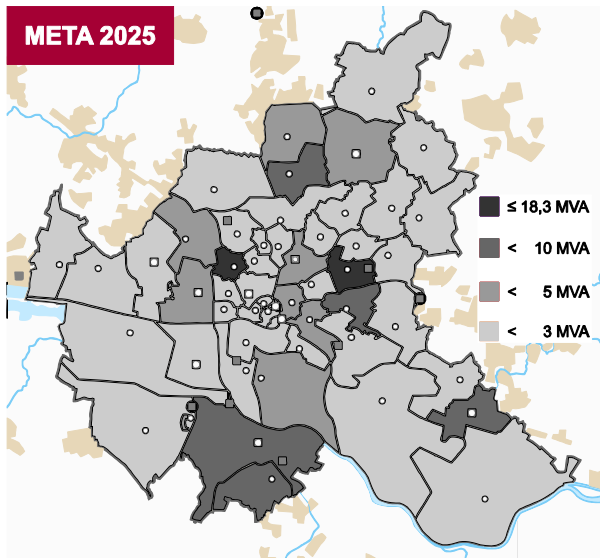


Abbildung 6.10: Szenarienvergleich der zusätzlichen Lasten im Jahr 2025

### 6.5 Entwicklung der Umspannwerksreserven

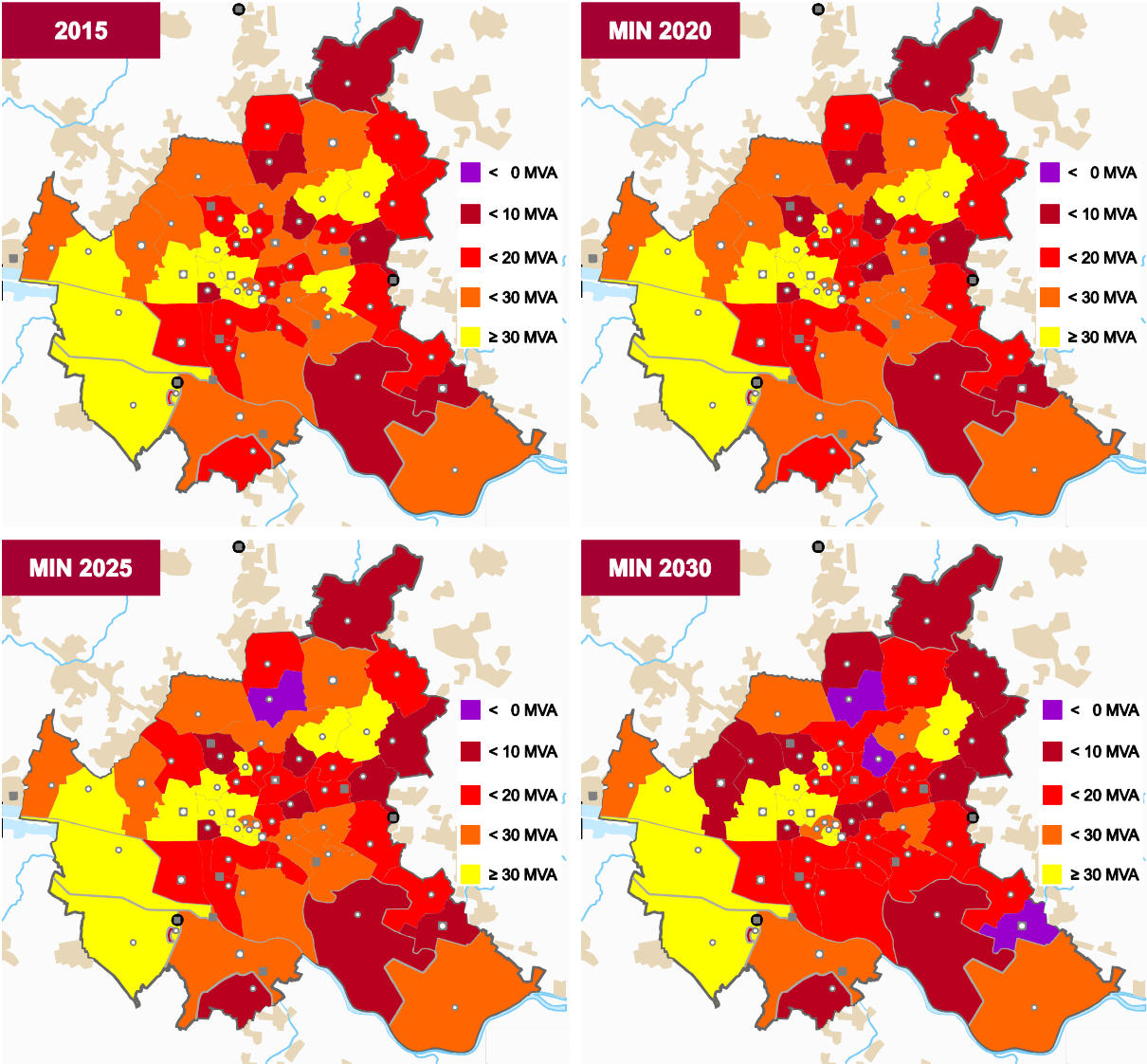


Abbildung 6.11: Zeitliche Entwicklung der UW-Reserven im Szenario "MIN"

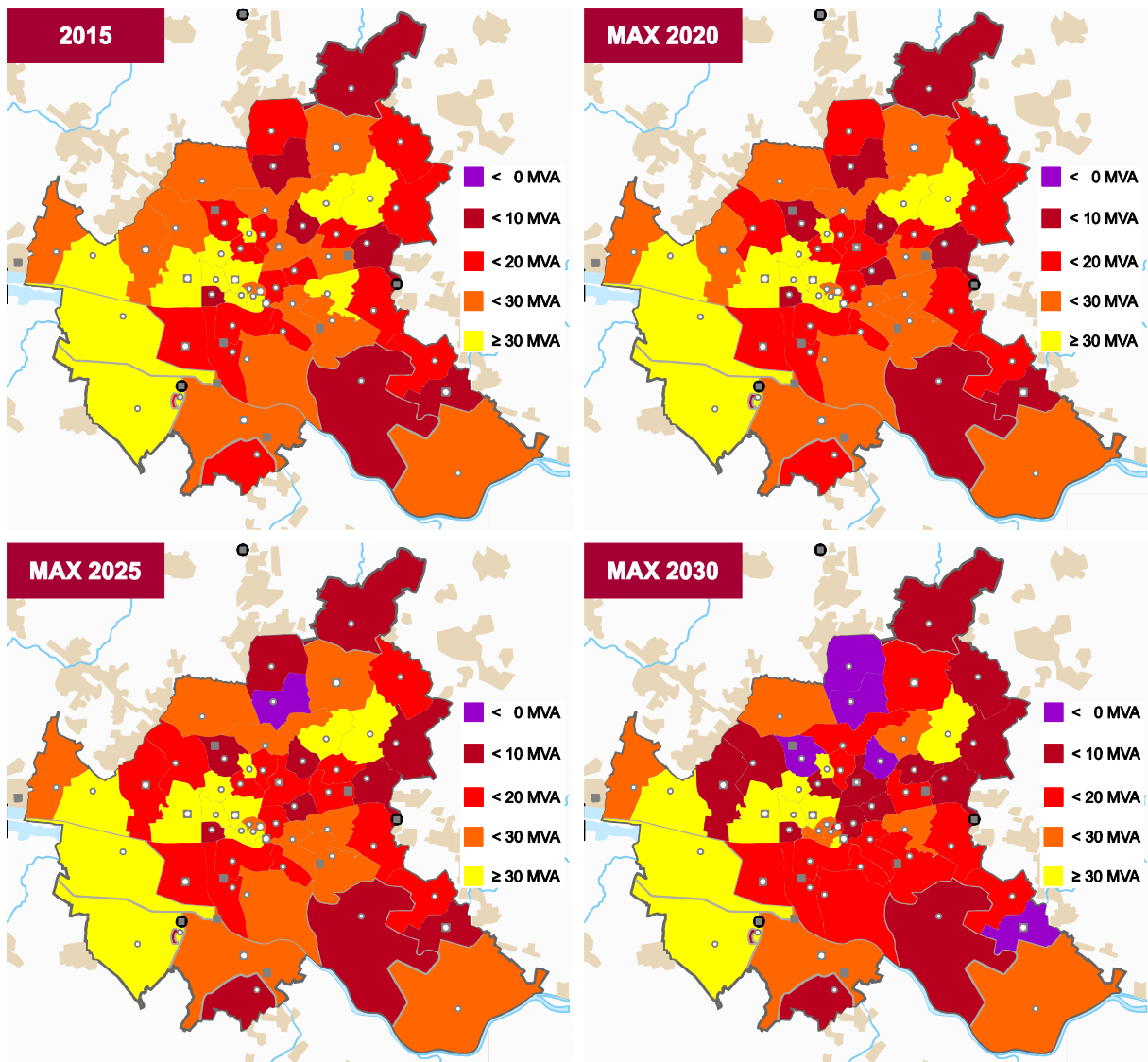


Abbildung 6.12: Zeitliche Entwicklung der UW-Reserven im Szenario "MAX"



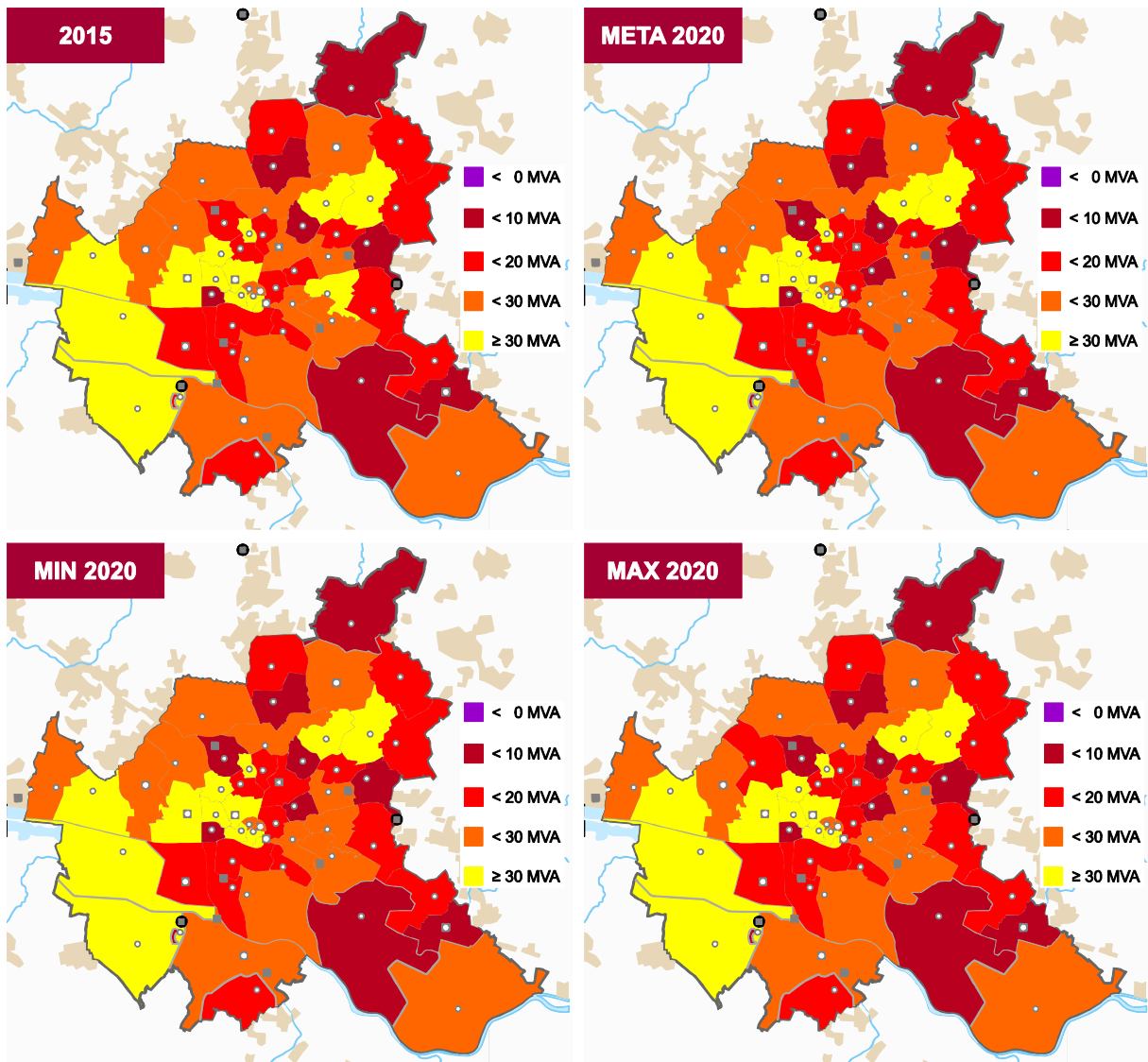


Abbildung 6.13: Szenarienvergleich der UW-Reserven im Jahr 2020

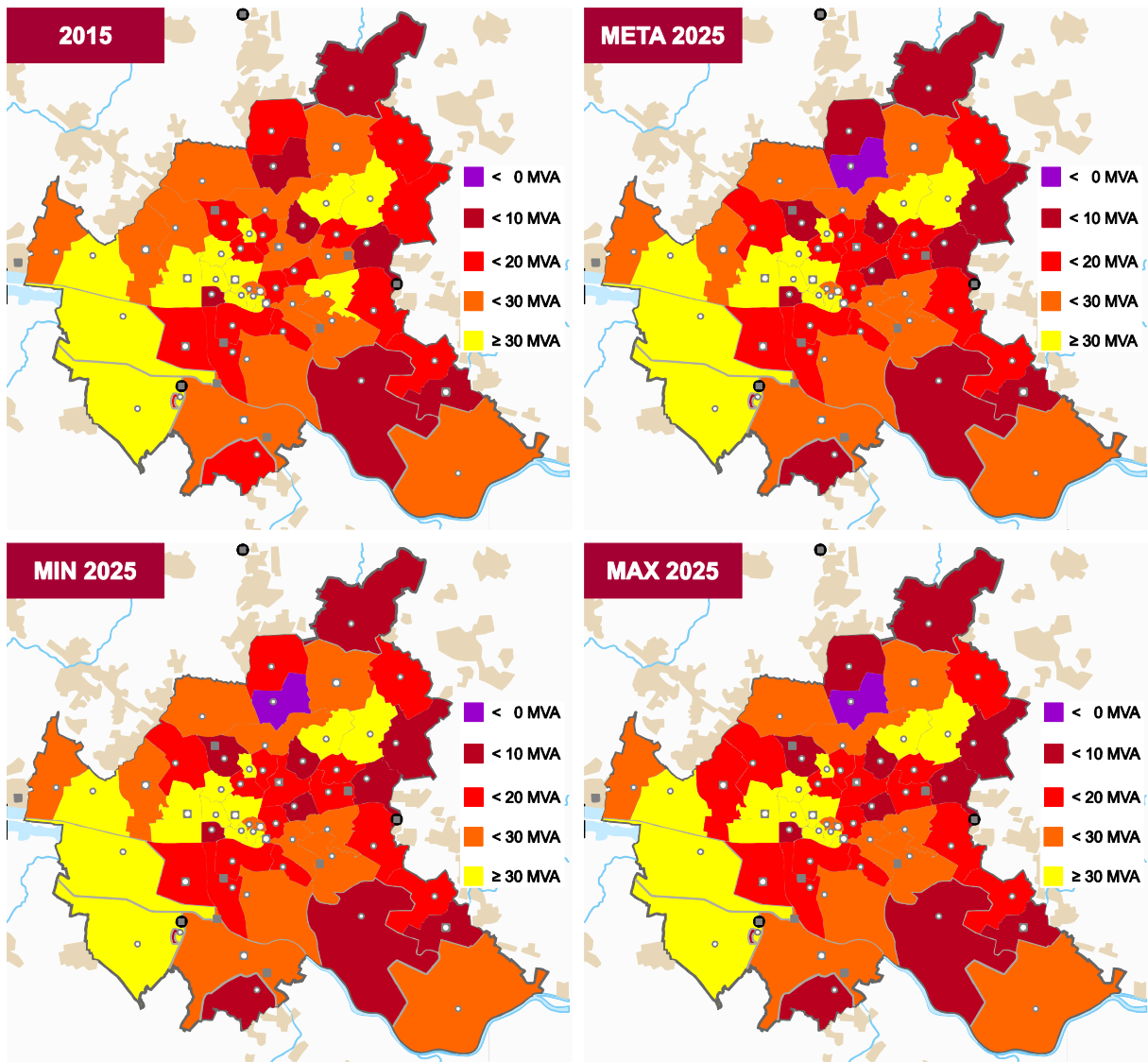


Abbildung 6.14: Szenarienvergleich der UW-Reserven im Jahr 2025

## 6.6 Umspannwerksreserven

Tabelle 6.2: Reserven-Entwicklung im Szenario "META"

<b>UW</b>	<b>Reserve [MVA]</b>				<b>UW</b>	<b>Reserve [MVA]</b>			
Bez.	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>	Bez.	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
ADOF	23,67	22,8	21,2	11,9	HOLU	12,87	12,5	11,8	10,1
ALMO	4,66	4,4	3,6	2,4	HORN	32,27	23,2	22,7	21,7
ALTO	9,70	9,3	8,4	6,7	KUWE	15,45	15,3	15,1	14,3
ALWE	18,20	18,2	17,5	17,3	LAHO	13,69	11,4	9,1	-0,5
BABK	21,72	19,4	18,6	8,9	LEMS	8,22	7,9	7,4	6,1
BANF	67,52	64,7	63,4	56,6	LOHB	13,81	13,4	12,5	10,8
BERG	7,83	1,3	0,4	-1,6	MITE	23,94	23,3	22,8	20,2
BILE	24,50	23,4	21,0	16,4	NGAM	23,88	23,7	23,5	22,8
BIST	15,18	14,9	13,5	12,5	NGRA	40,93	40,7	40,5	39,4
BIWE	23,27	22,5	21,4	18,3	NIEN	29,36	27,2	26,5	22,7
BRAM	36,36	35,9	34,0	27,0	NSTA	27,34	26,7	25,6	22,7
CARO	47,72	46,8	46,3	38,7	POPP	24,47	22,0	21,2	17,0
DREH	13,41	13,3	12,9	12,4	RAHL	11,99	11,6	9,7	8,0
EIBE	10,63	8,5	8,2	6,8	RATH	36,02	35,2	34,5	30,9
EIDL	22,56	20,2	19,5	5,9	RISN	23,56	23,4	22,9	22,0
EIMS	80,08	78,4	67,7	66,9	SGEO	15,63	13,2	12,3	2,2
EPDO	43,80	42,9	42,4	39,8	SIEM	10,72	9,3	8,6	0,2
FAMS	34,18	33,7	33,1	31,2	SUEL	39,82	39,4	38,1	36,2
FIWE	33,94	33,7	33,2	32,1	TOND	8,75	8,2	6,6	4,3
FUHL	8,63	7,5	-0,7	-4,3	VDEL	19,45	19,3	18,8	18,0
GNEU	32,29	31,6	31,0	28,1	VOLK	12,30	12,0	10,5	9,0
HACI	52,37	52,0	51,6	49,9	WAND	24,92	23,3	13,9	12,3
HARB	29,31	28,7	22,5	21,1	WEST	22,76	20,9	20,2	6,4
HAUS	10,24	5,7	5,7	5,7	WIBU	24,19	23,4	21,0	17,8
HELB	3,90	3,5	2,0	-4,5	WILS	12,55	12,0	6,5	5,1
HINS	14,39	13,4	12,4	8,3	WINT	18,59	18,5	18,2	17,9
HOLS	40,78	40,4	39,5	37,9					

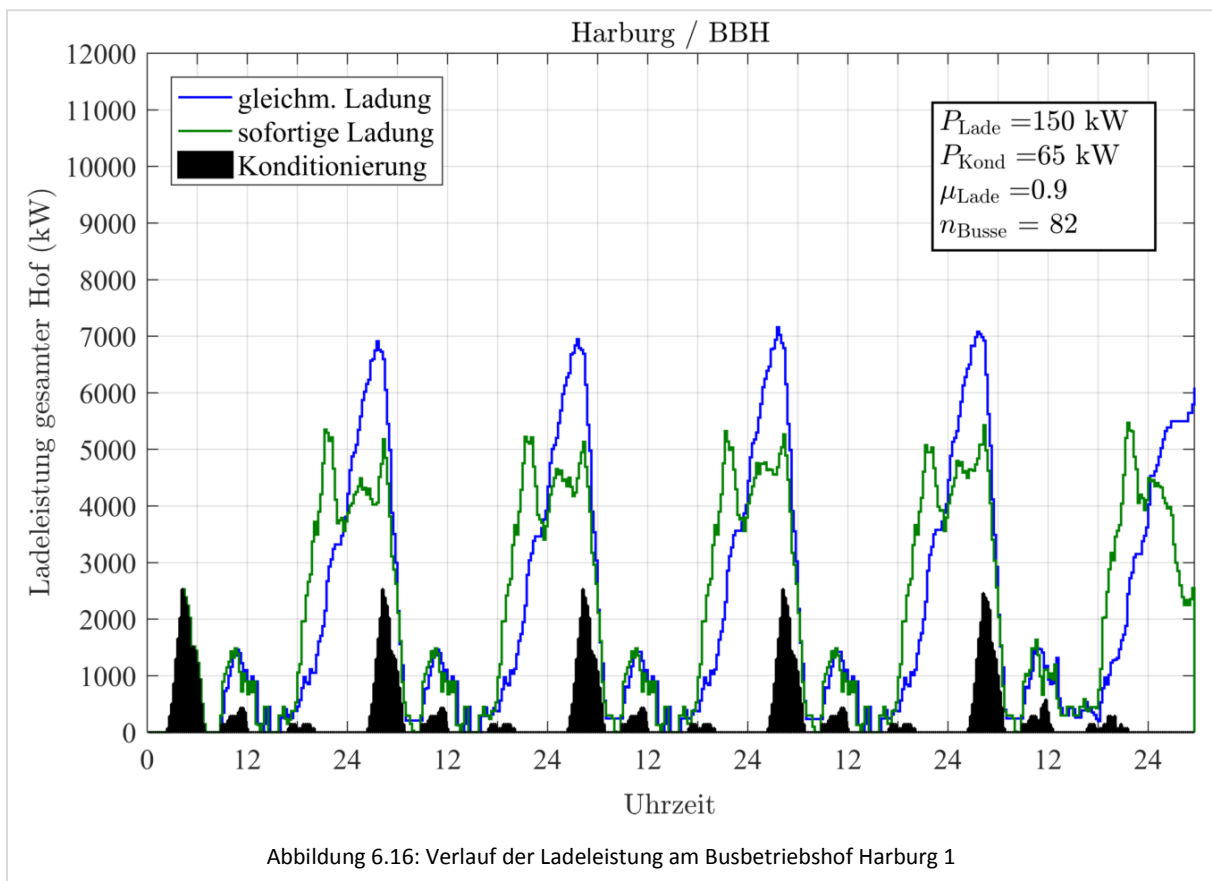
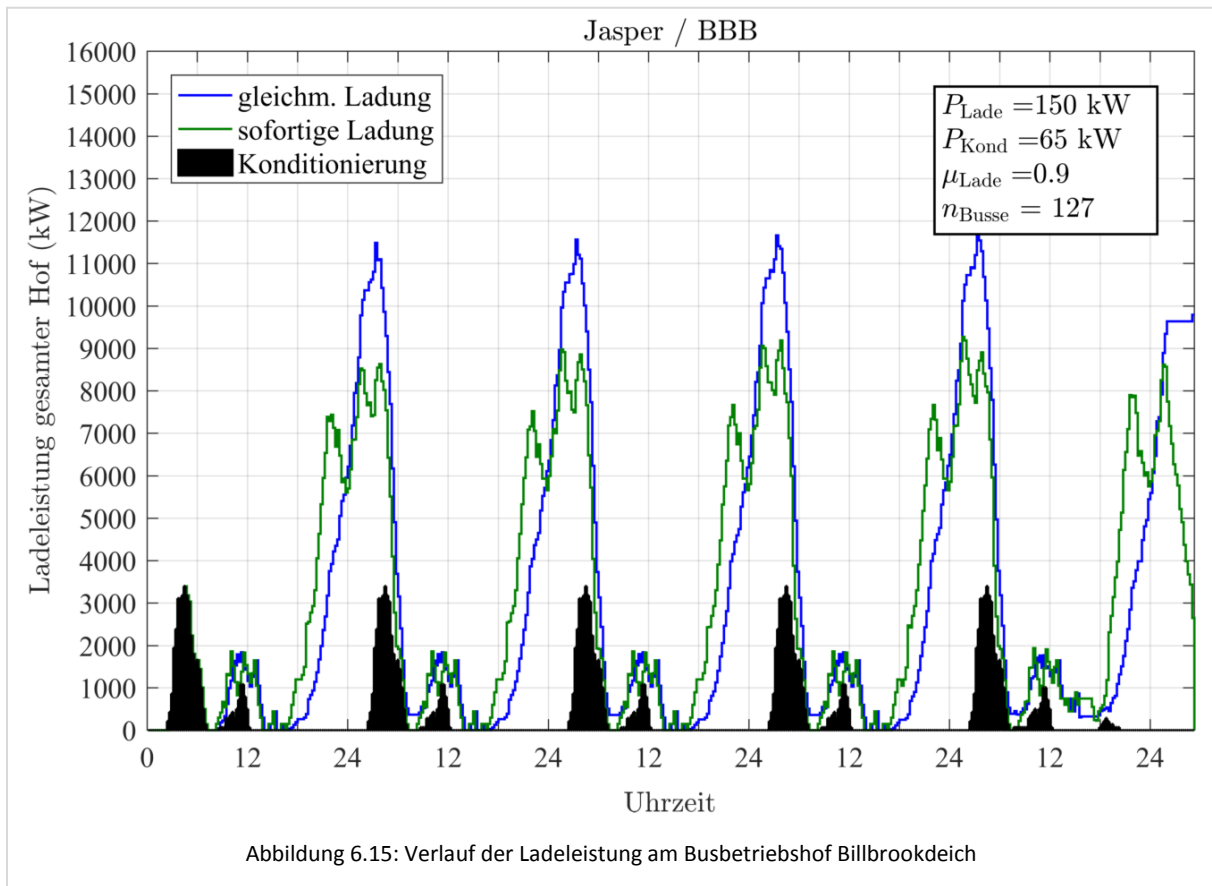
Tabelle 6.3: Reserven-Entwicklung im Szenario "MIN"

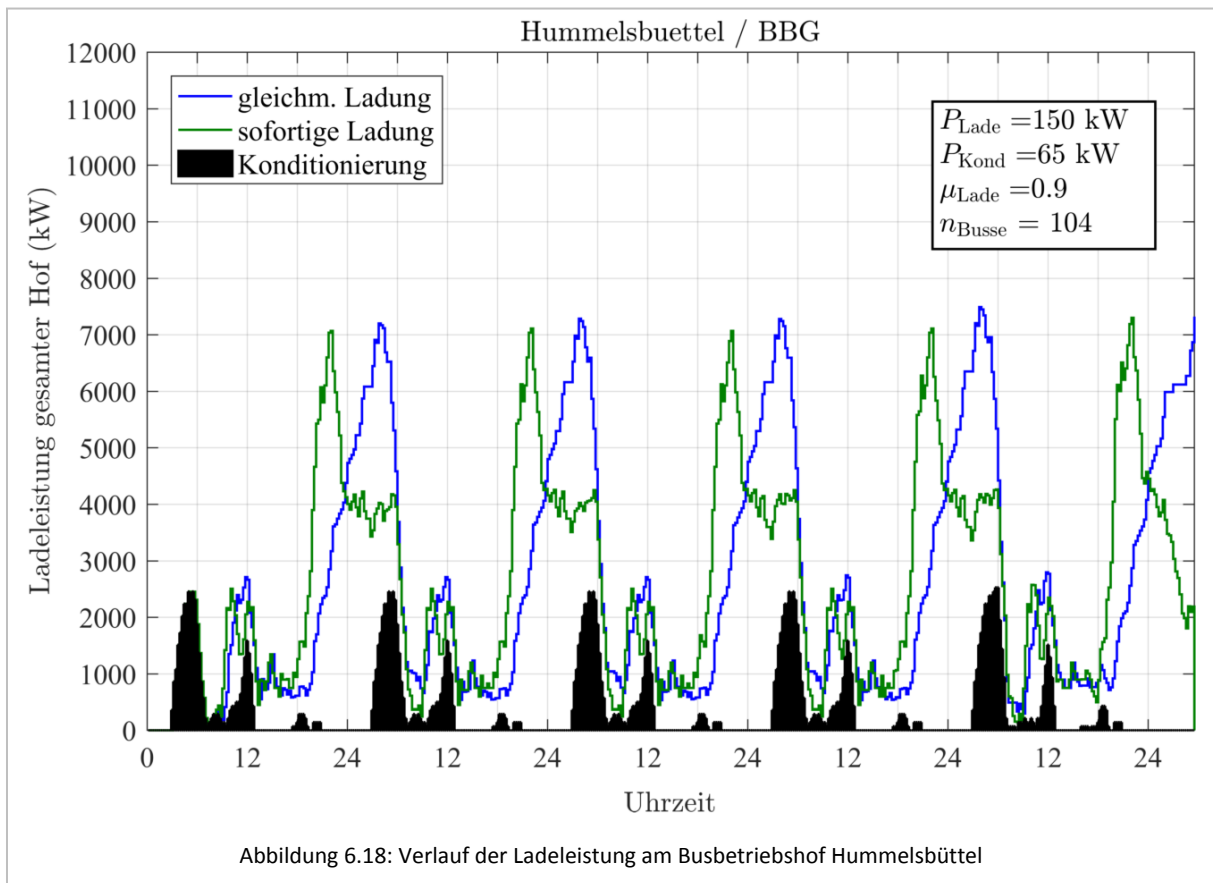
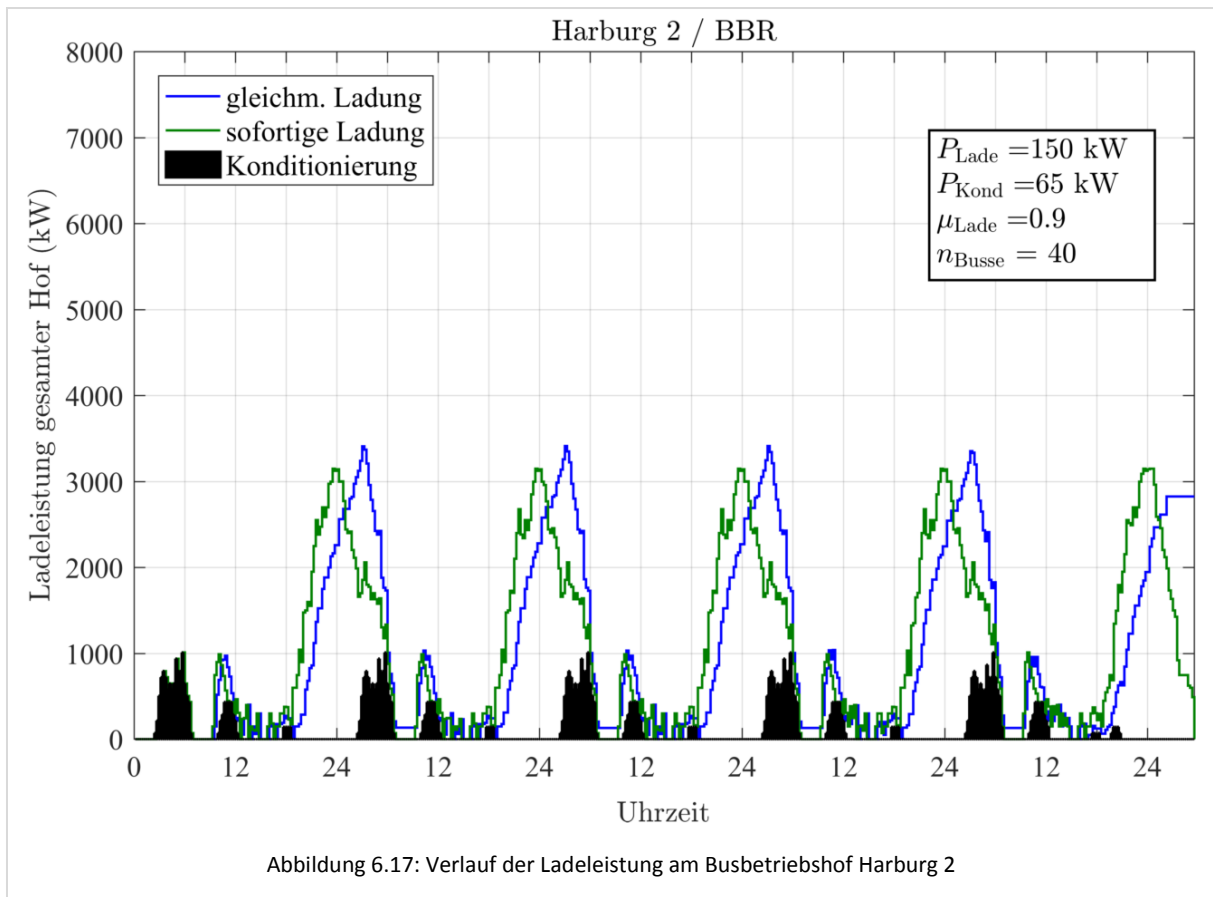
<b>UW</b>	<b>Reserve [MVA]</b>				<b>UW</b>	<b>Reserve [MVA]</b>			
Bez.	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>	Bez.	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
ADOF	23,67	23,0	21,8	13,8	HOLU	12,87	10,9	10,9	10,9
ALMO	4,66	4,5	3,7	2,9	HORN	32,27	22,2	22,2	22,2
ALTO	9,70	9,4	8,6	7,4	KUWE	15,45	14,7	14,7	14,7
ALWE	18,20	18,2	17,5	17,4	LAHO	13,69	3,6	3,6	3,6
BABK	21,72	19,8	19,1	10,9	LEMS	8,22	6,6	6,6	6,6
BANF	67,52	65,2	64,3	59,5	LOHB	13,81	11,5	11,5	11,5
BERG	7,83	1,5	0,6	-0,8	MITE	23,94	21,3	21,3	21,3
BILE	24,50	23,7	21,6	18,4	NGAM	23,88	23,1	23,1	23,1
BIST	15,18	15,0	13,7	13,0	NGRA	40,93	39,9	39,9	39,9
BIWE	23,27	22,8	21,8	19,6	NIEN	29,36	24,3	24,3	24,3
BRAM	36,36	36,0	34,2	27,8	NSTA	27,34	23,9	23,9	23,9
CARO	47,72	47,0	46,6	39,8	POPP	24,47	18,8	18,8	18,8
DREH	13,41	13,3	13,0	12,6	RAHL	11,99	8,7	8,7	8,7
EIBE	10,63	8,6	8,4	7,4	RATH	36,02	32,5	32,5	32,5
EIDL	22,56	20,5	20,0	7,4	RISN	23,56	22,4	22,4	22,4
EIMS	80,08	78,6	67,7	67,3	SGEO	15,63	4,4	4,4	4,4
EPDO	43,80	43,1	42,7	40,9	SIEM	10,72	1,7	1,7	1,7
FAMS	34,18	33,9	33,3	32,0	SUEL	39,82	37,0	37,0	37,0
FIWE	33,94	33,8	33,3	32,6	TOND	8,75	5,3	5,3	5,3
FUHL	8,63	7,8	-0,4	-2,4	VDEL	19,45	18,3	18,3	18,3
GNEU	32,29	31,8	31,4	29,3	VOLK	12,30	9,6	9,6	9,6
HACI	52,37	52,1	51,9	50,6	WAND	24,92	13,0	13,0	13,0
HARB	29,31	28,9	22,7	21,7	WEST	22,76	8,0	8,0	8,0
HAUS	10,24	5,7	5,7	5,7	WIBU	24,19	19,2	19,2	19,2
HELB	3,90	3,6	2,2	-3,9	WILS	12,55	5,8	5,8	5,8
HINS	14,39	13,7	12,9	10,0	WINT	18,59	18,0	18,0	18,0
HOLS	40,78	40,5	39,7	38,6					

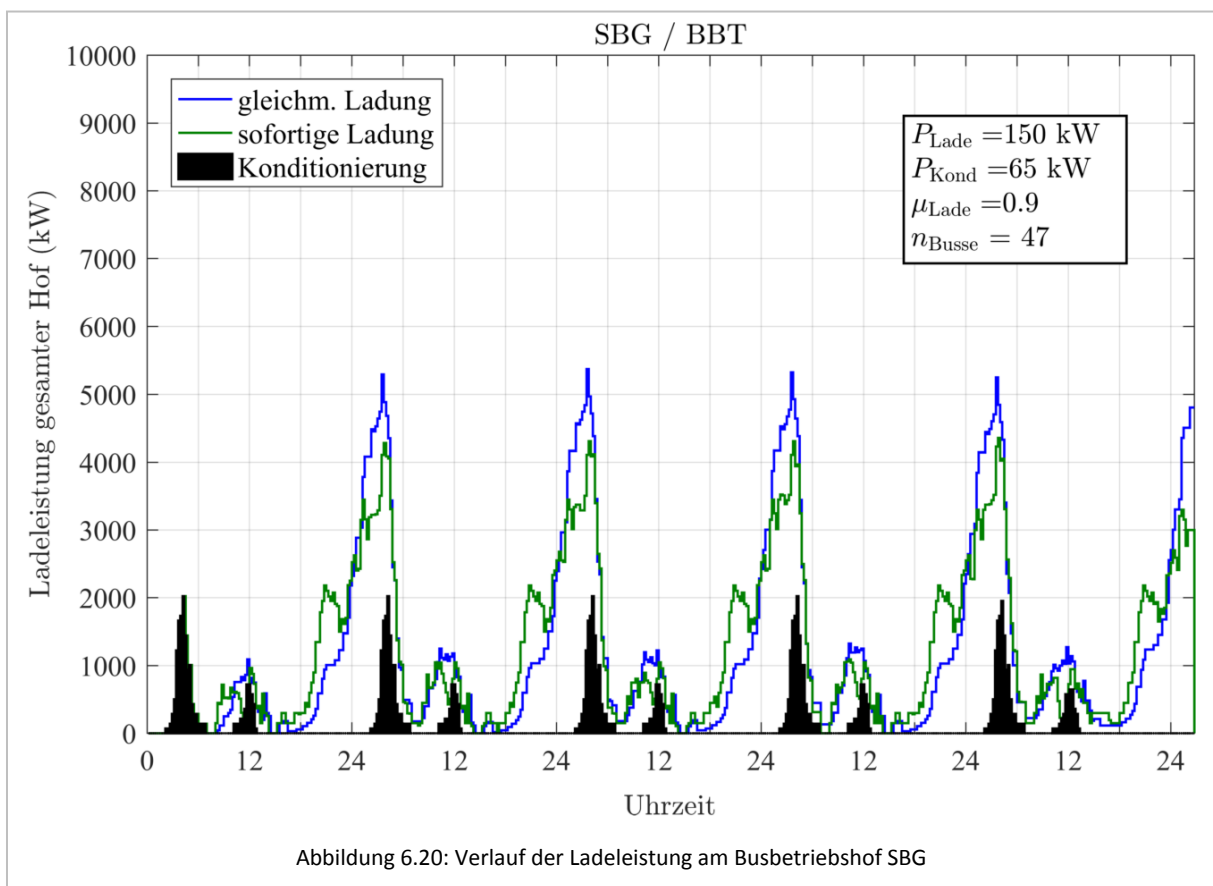
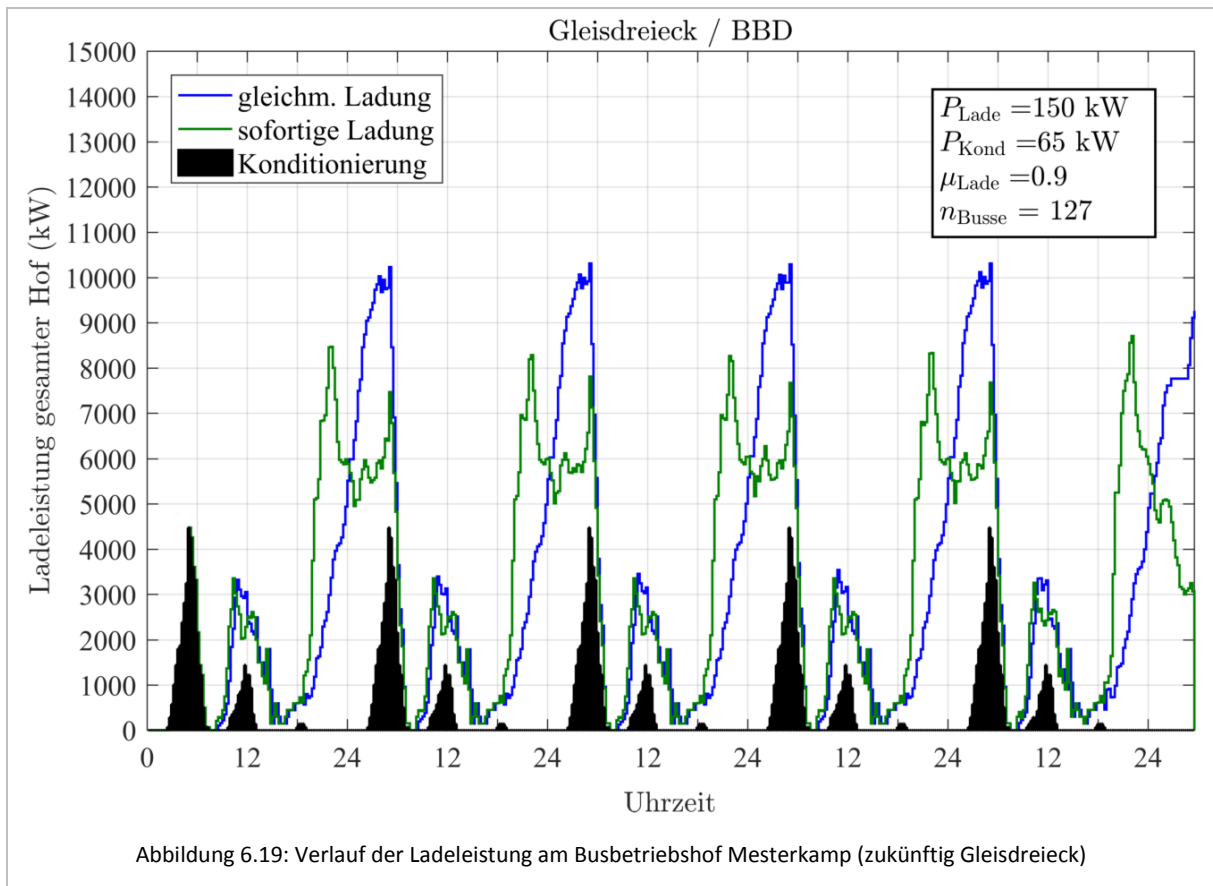
Tabelle 6.4: Reserven-Entwicklung im Szenario "MAX"

<b>UW</b>	<b>Reserve [MVA]</b>				<b>UW</b>	<b>Reserve [MVA]</b>			
Bez.	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>	Bez.	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
ADOF	23,67	22,3	20,7	10,1	HOLU	12,87	12,3	11,6	9,4
ALMO	4,66	4,3	3,4	1,9	HORN	32,27	23,1	22,6	21,1
ALTO	9,70	9,2	8,2	6,0	KUWE	15,45	15,2	15,0	14,0
ALWE	18,20	18,1	17,5	17,2	LAHO	13,69	10,7	7,9	-4,6
BABK	21,72	19,1	18,0	7,0	LEMS	8,22	7,8	7,2	5,5
BANF	67,52	64,2	62,6	53,7	LOHB	13,81	13,3	12,3	10,0
BERG	7,83	1,2	0,1	-2,5	MITE	23,94	23,1	22,5	19,1
BILE	24,50	23,1	20,5	14,4	NGAM	23,88	23,6	23,4	22,4
BIST	15,18	14,9	13,4	12,1	NGRA	40,93	40,6	40,3	39,0
BIWE	23,27	22,3	21,0	17,0	NIEN	29,36	27,0	26,0	21,0
BRAM	36,36	35,7	33,7	26,1	NSTA	27,34	26,5	25,2	21,5
CARO	47,72	46,6	46,0	37,6	POPP	24,47	21,7	20,7	15,3
DREH	13,41	13,3	12,9	12,2	RAHL	11,99	11,4	9,5	7,2
EIBE	10,63	8,4	8,0	6,2	RATH	36,02	34,9	34,1	29,4
EIDL	22,56	19,9	19,1	4,3	RISN	23,56	23,3	22,8	21,6
EIMS	80,08	78,3	67,7	66,4	SGEO	15,63	12,9	11,7	0,1
EPDO	43,80	42,7	42,1	38,7	SIEM	10,72	9,0	8,2	-1,3
FAMS	34,18	33,6	32,9	30,4	SUEL	39,82	39,2	37,9	35,4
FIWE	33,94	33,6	33,0	31,6	TOND	8,75	8,0	6,3	3,3
FUHL	8,63	7,1	-1,0	-6,4	VDEL	19,45	19,2	18,7	17,6
GNEU	32,29	31,4	30,7	26,8	VOLK	12,30	11,8	10,3	8,4
HACI	52,37	51,8	51,4	49,1	WAND	24,92	23,1	13,7	11,6
HARB	29,31	28,5	22,3	20,3	WEST	22,76	20,7	19,7	4,7
HAUS	10,24	5,7	5,7	5,7	WIBU	24,19	23,2	20,6	16,5
HELB	3,90	3,4	1,8	-5,2	WILS	12,55	11,9	6,3	4,5
HINS	14,39	13,1	11,9	6,5	WINT	18,59	18,5	18,1	17,8
HOLS	40,78	40,3	39,3	37,2					

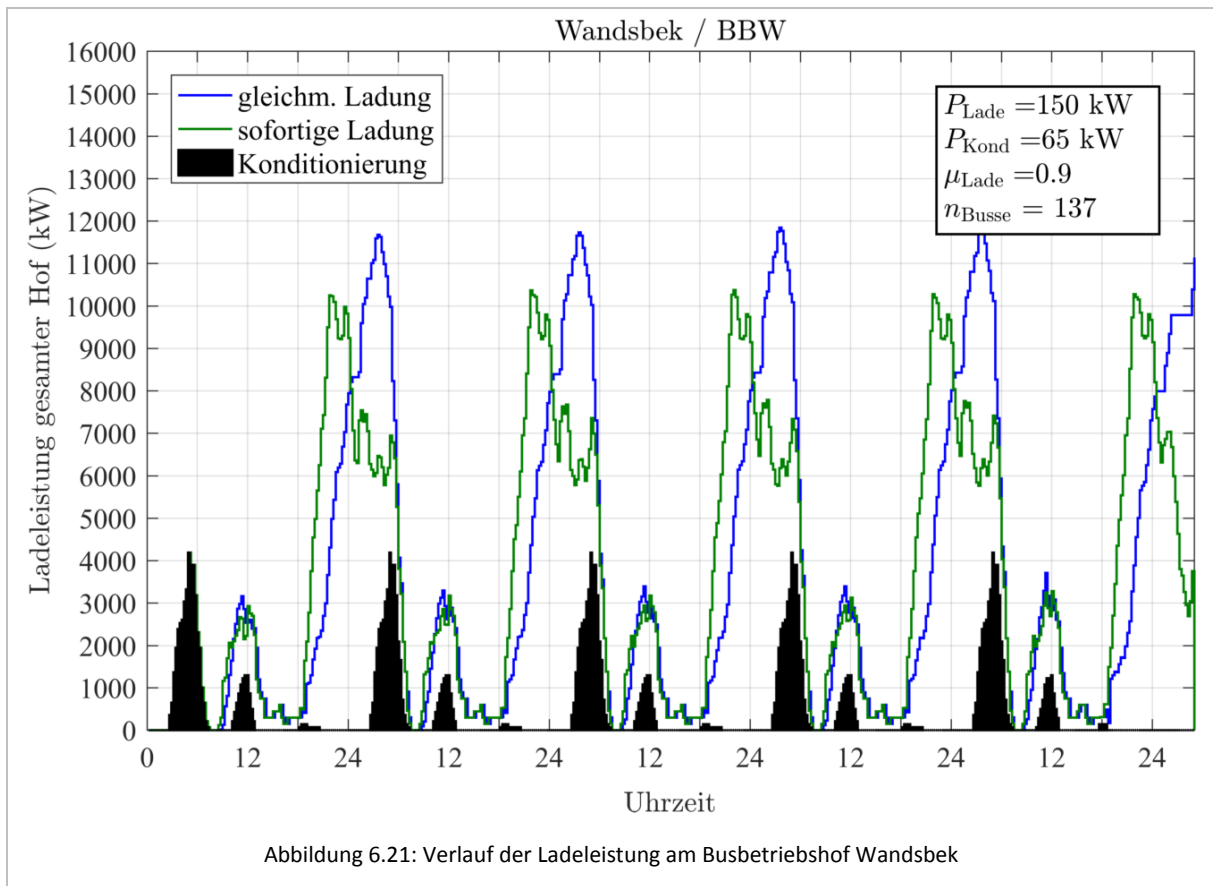
## 6.7 Lade-Wirkleistungskurven der Busbetriebshöfe



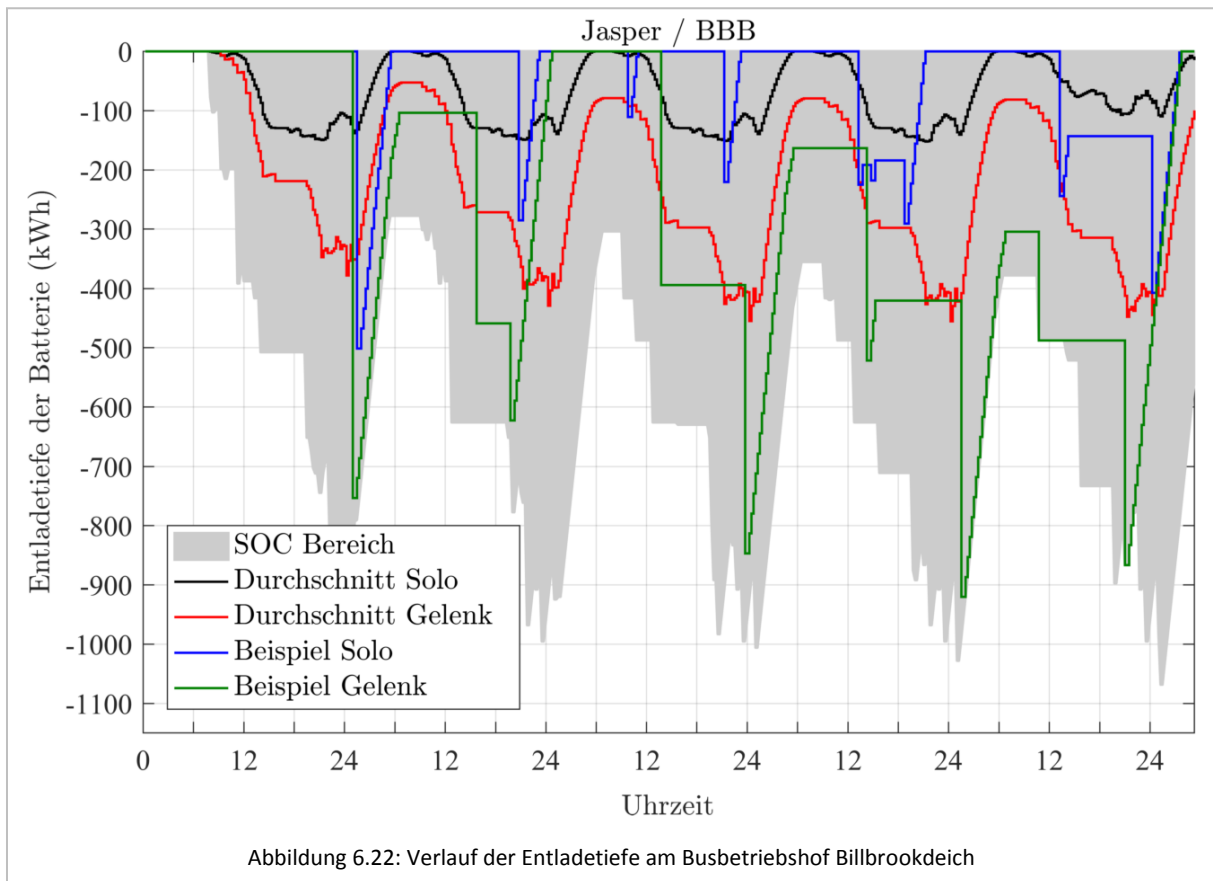


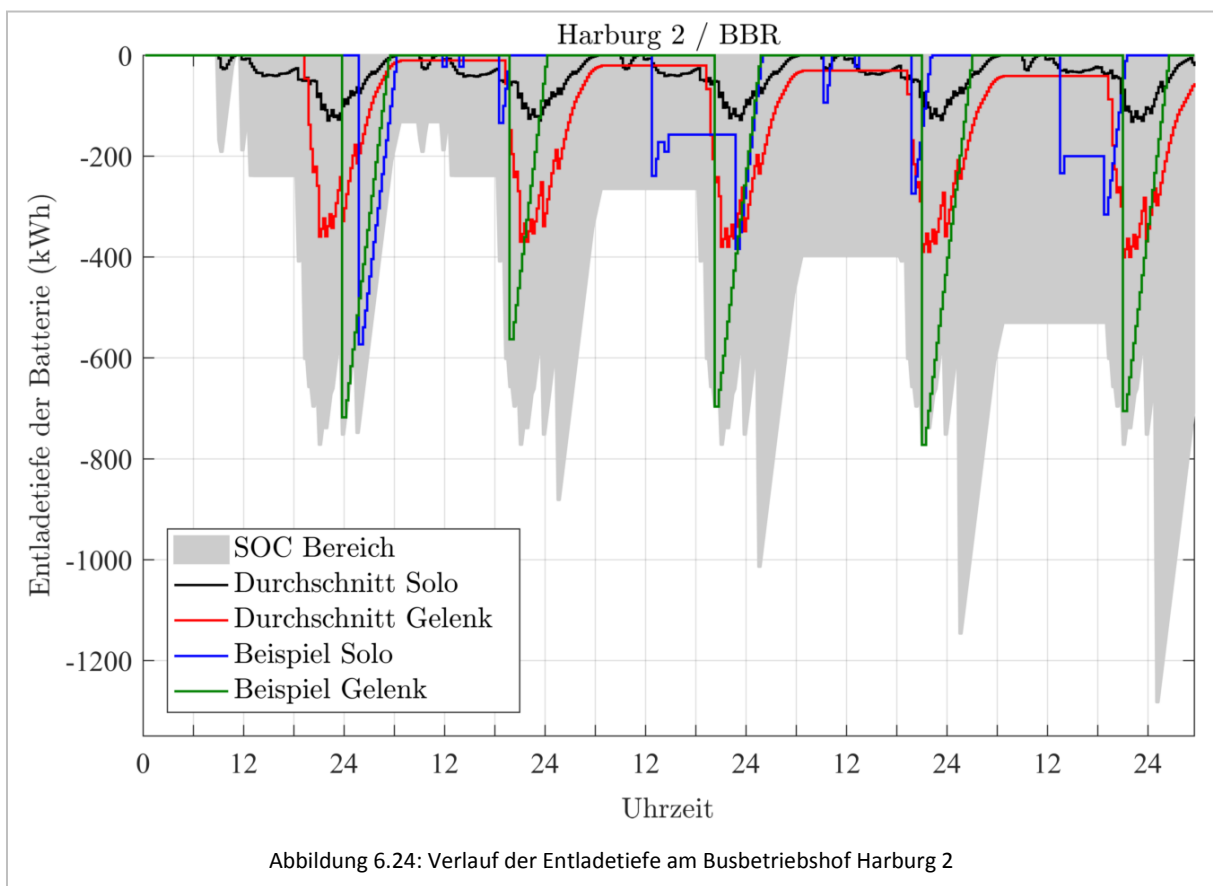
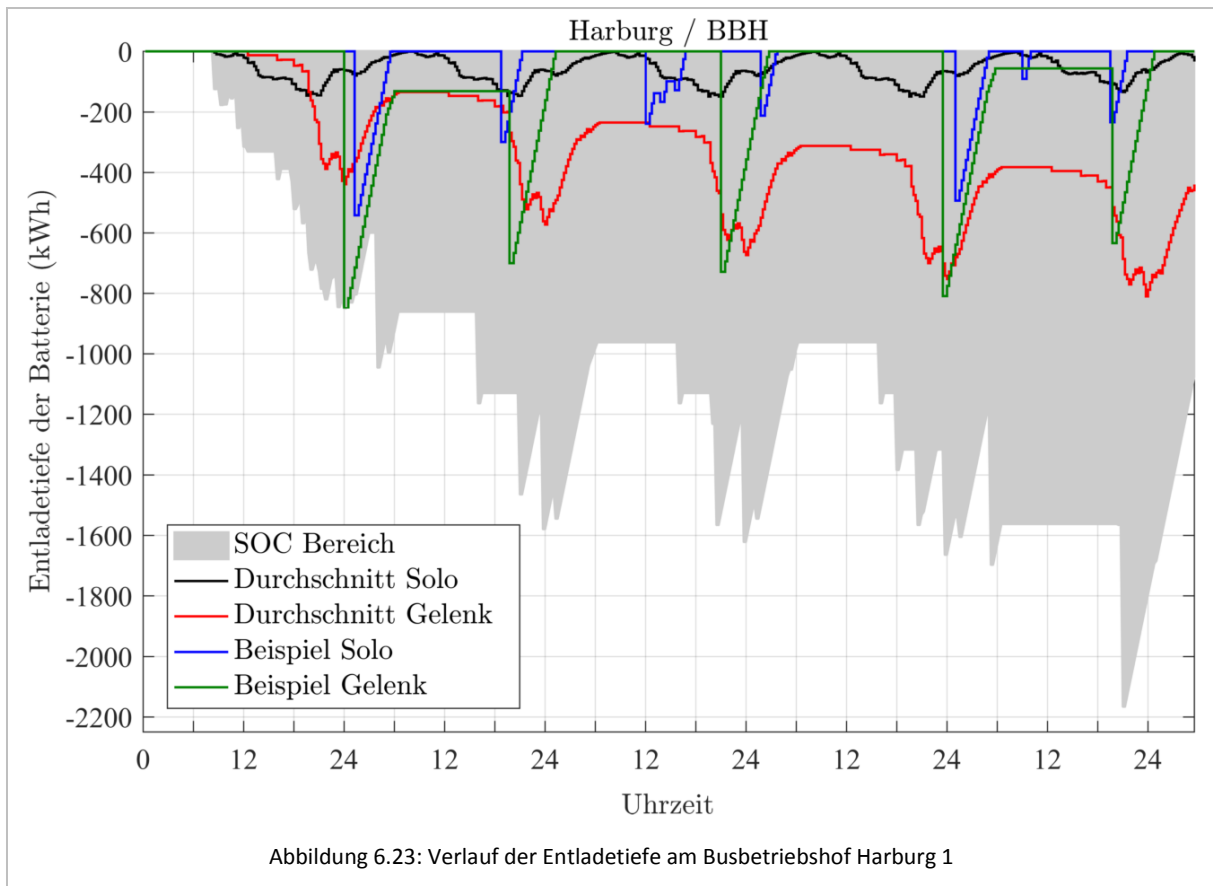


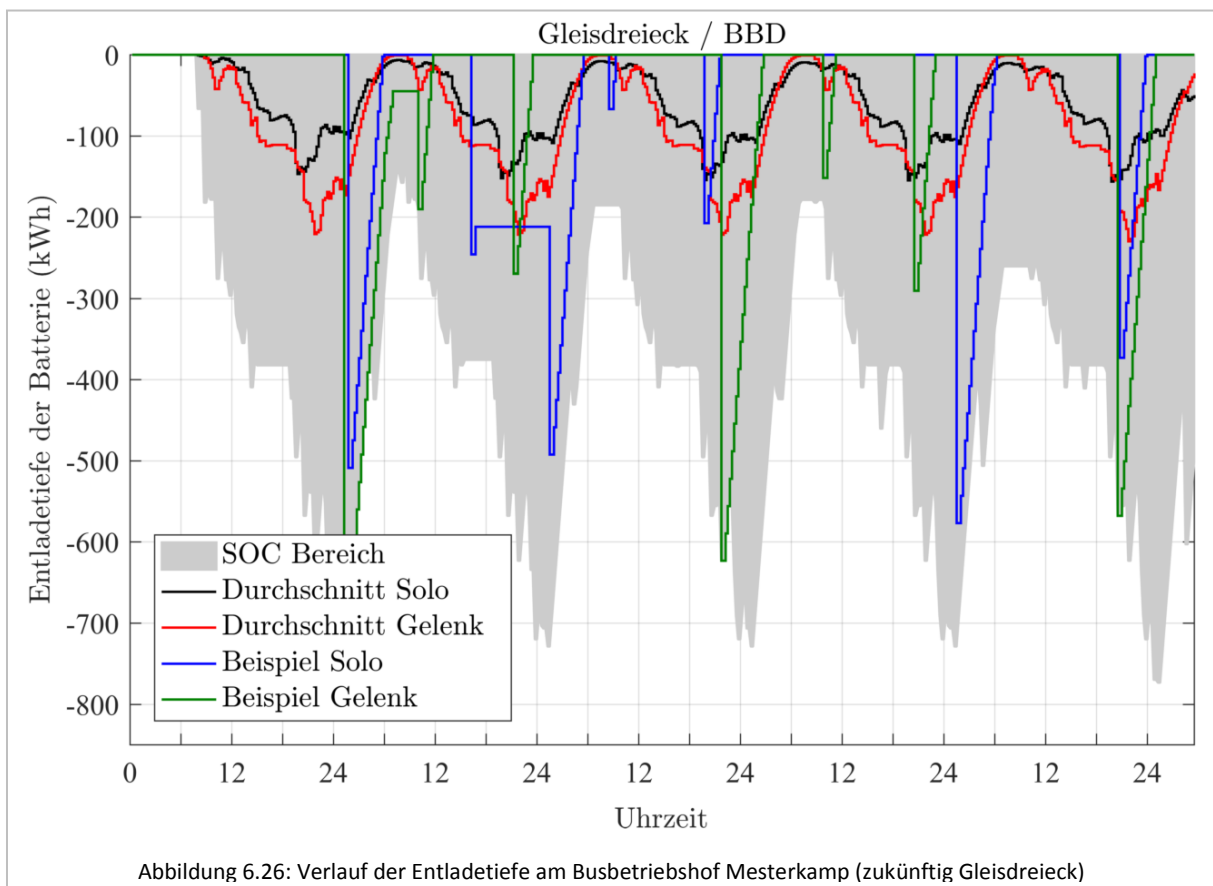
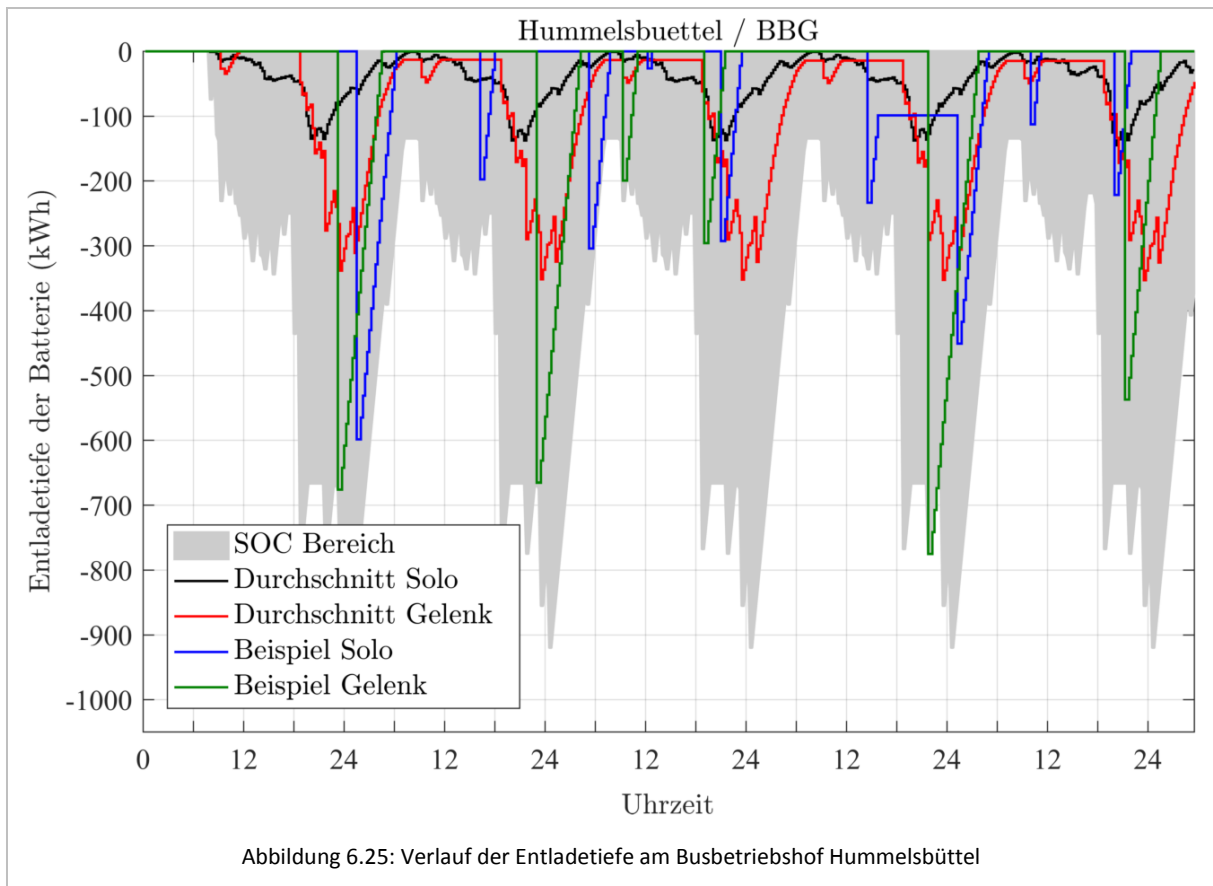


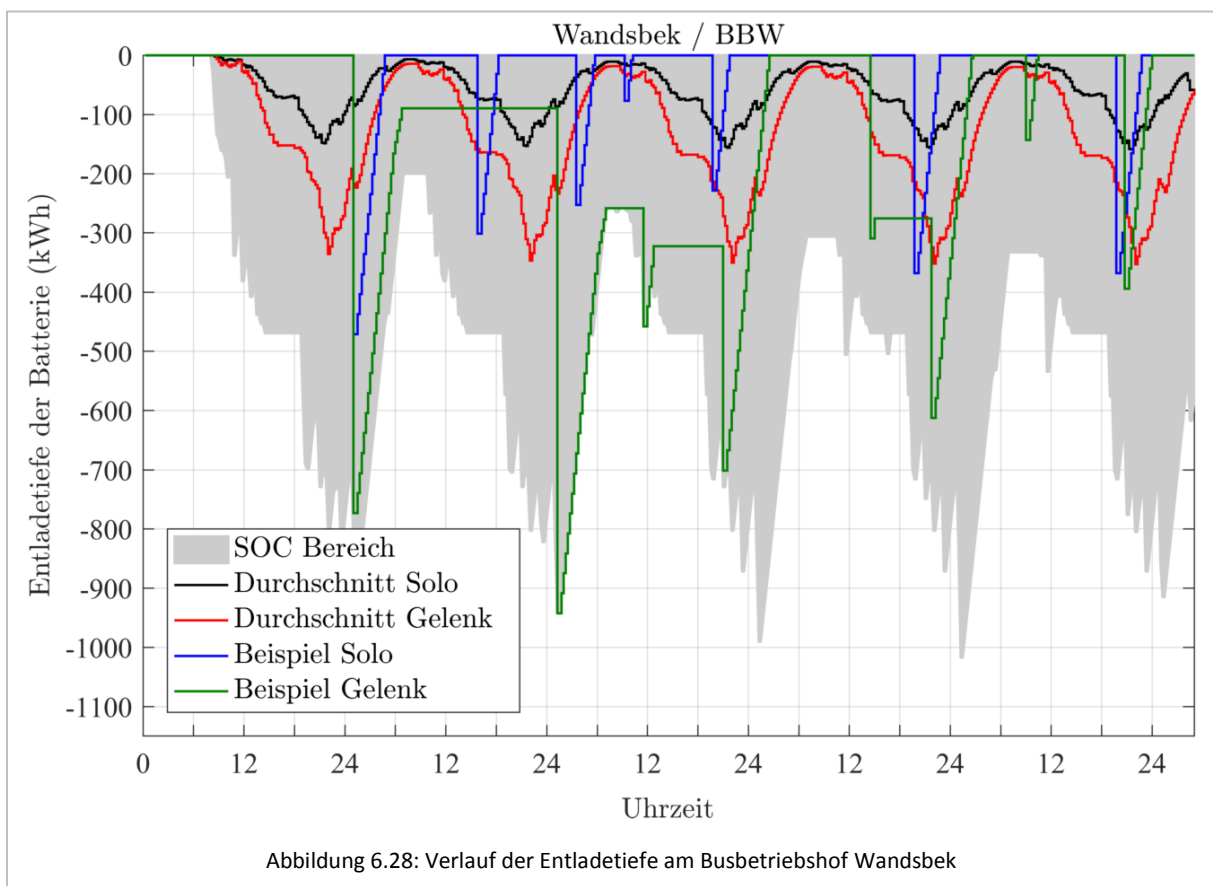
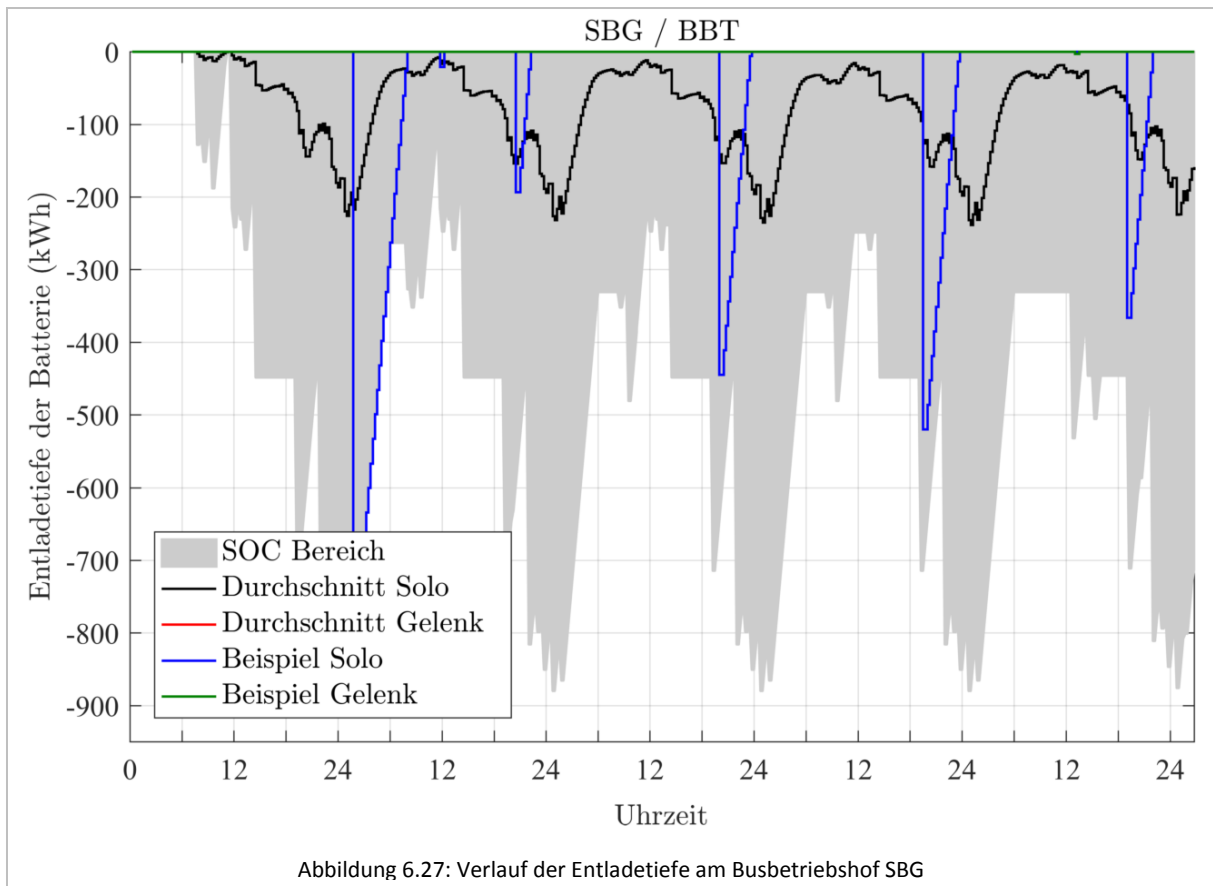


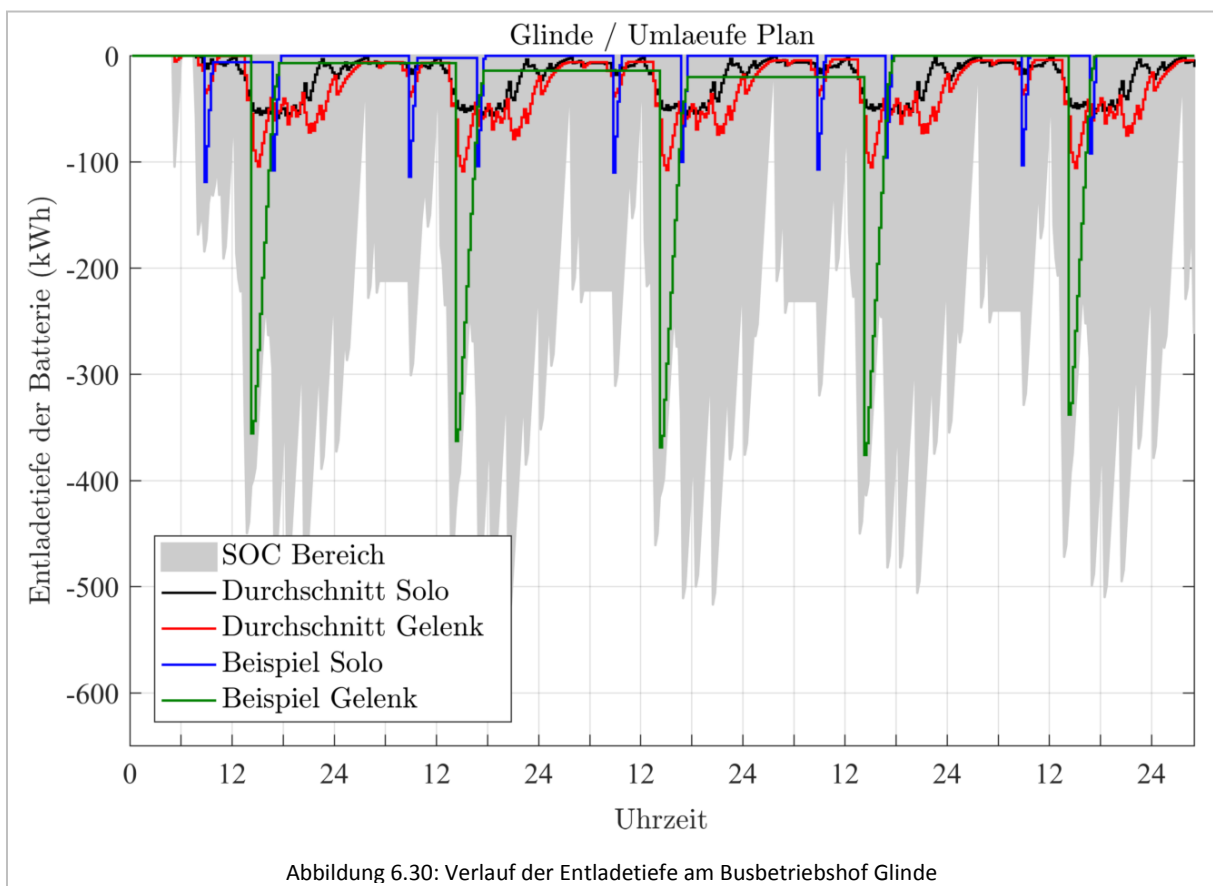
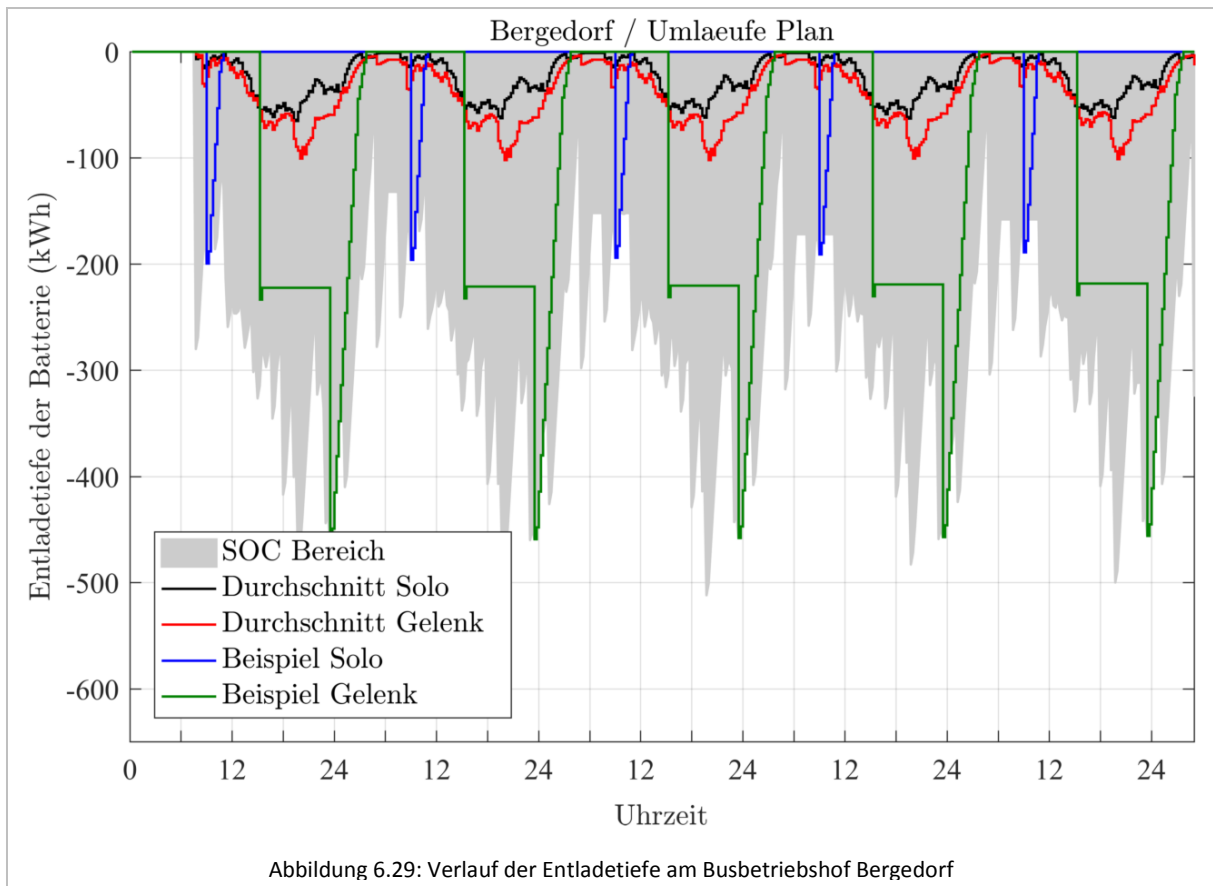
## 6.8 Verlauf der Entladezustände

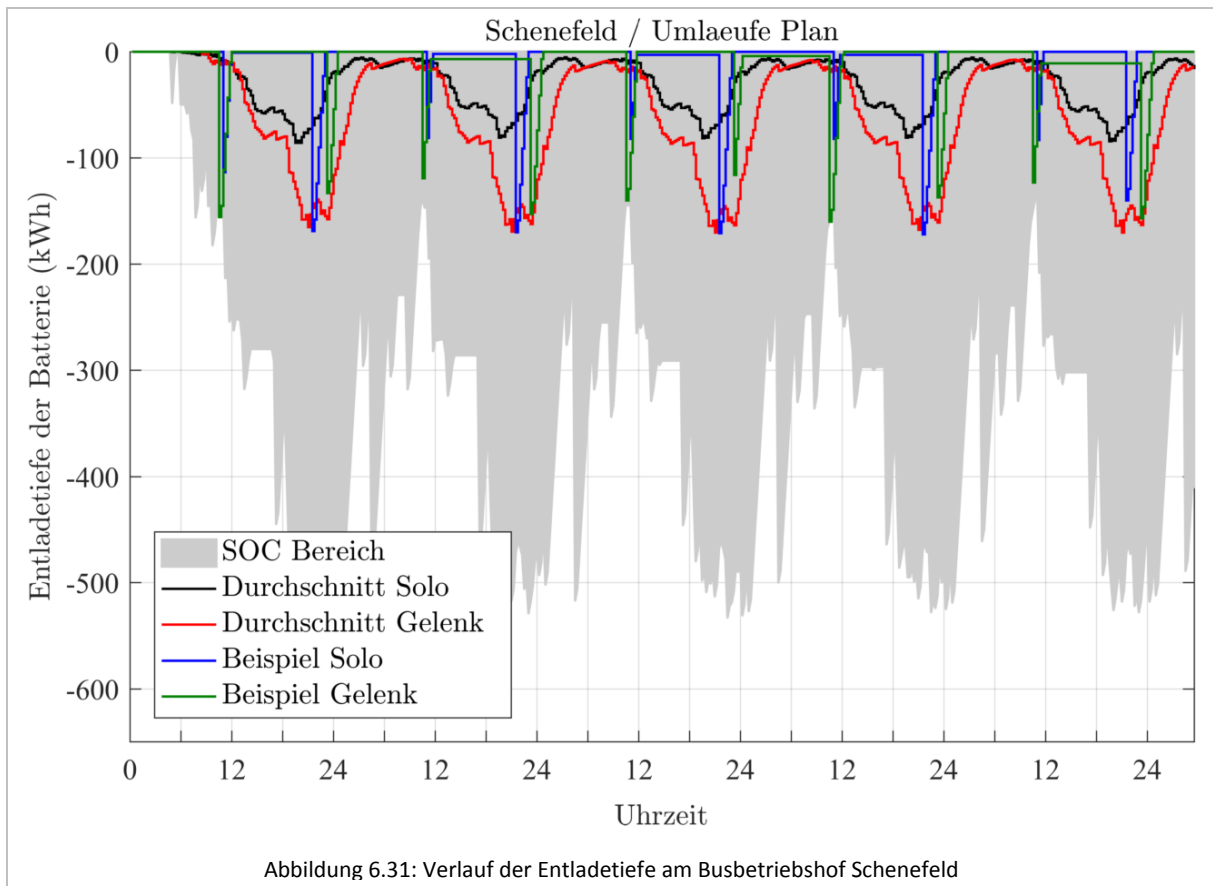




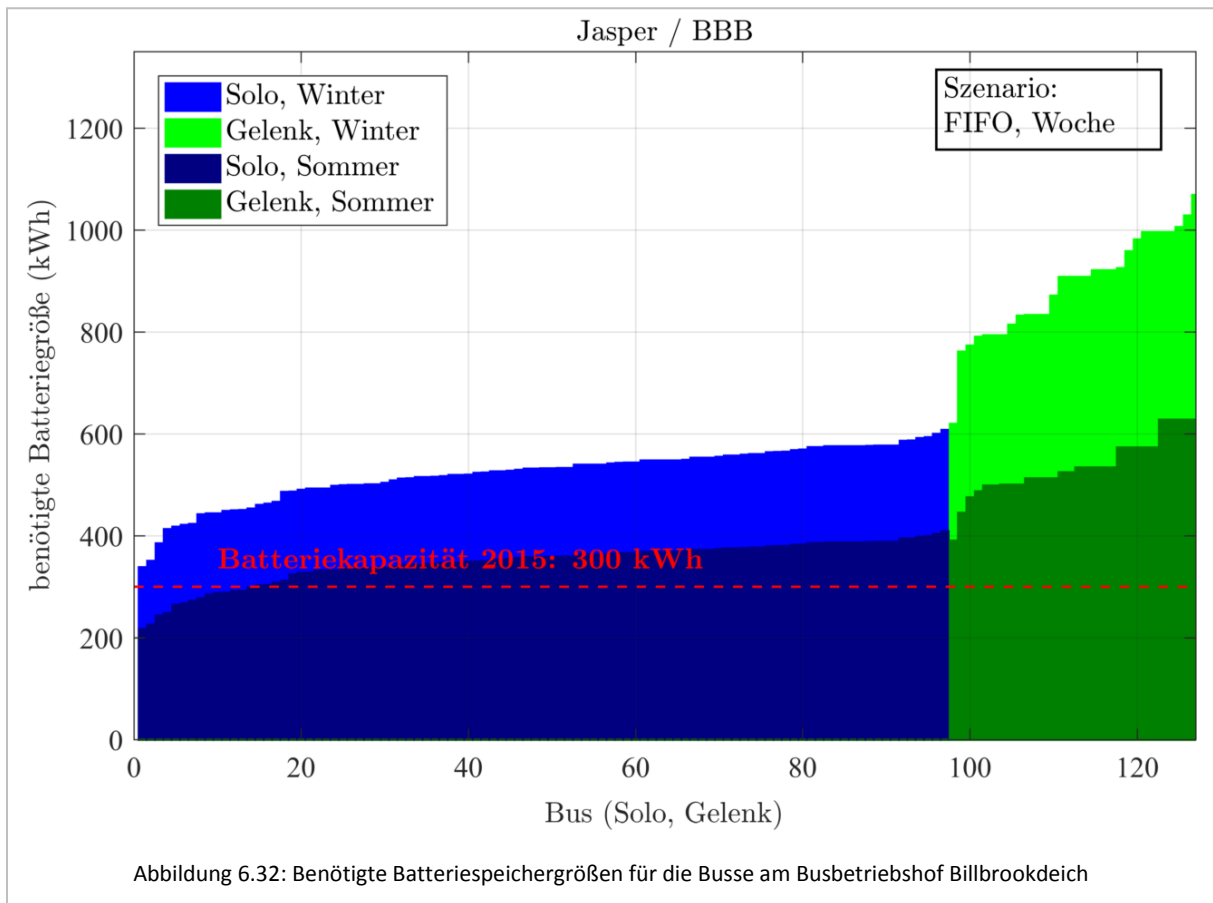


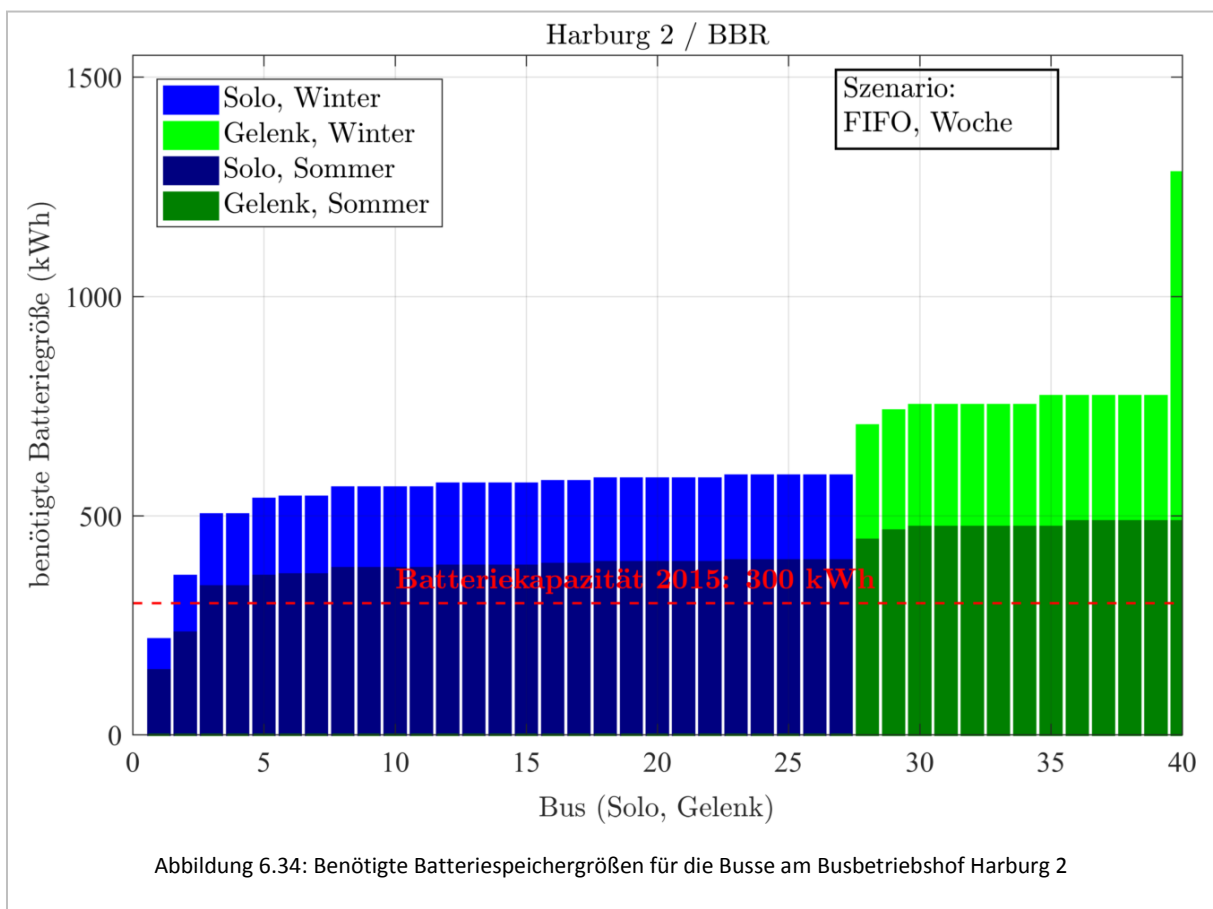
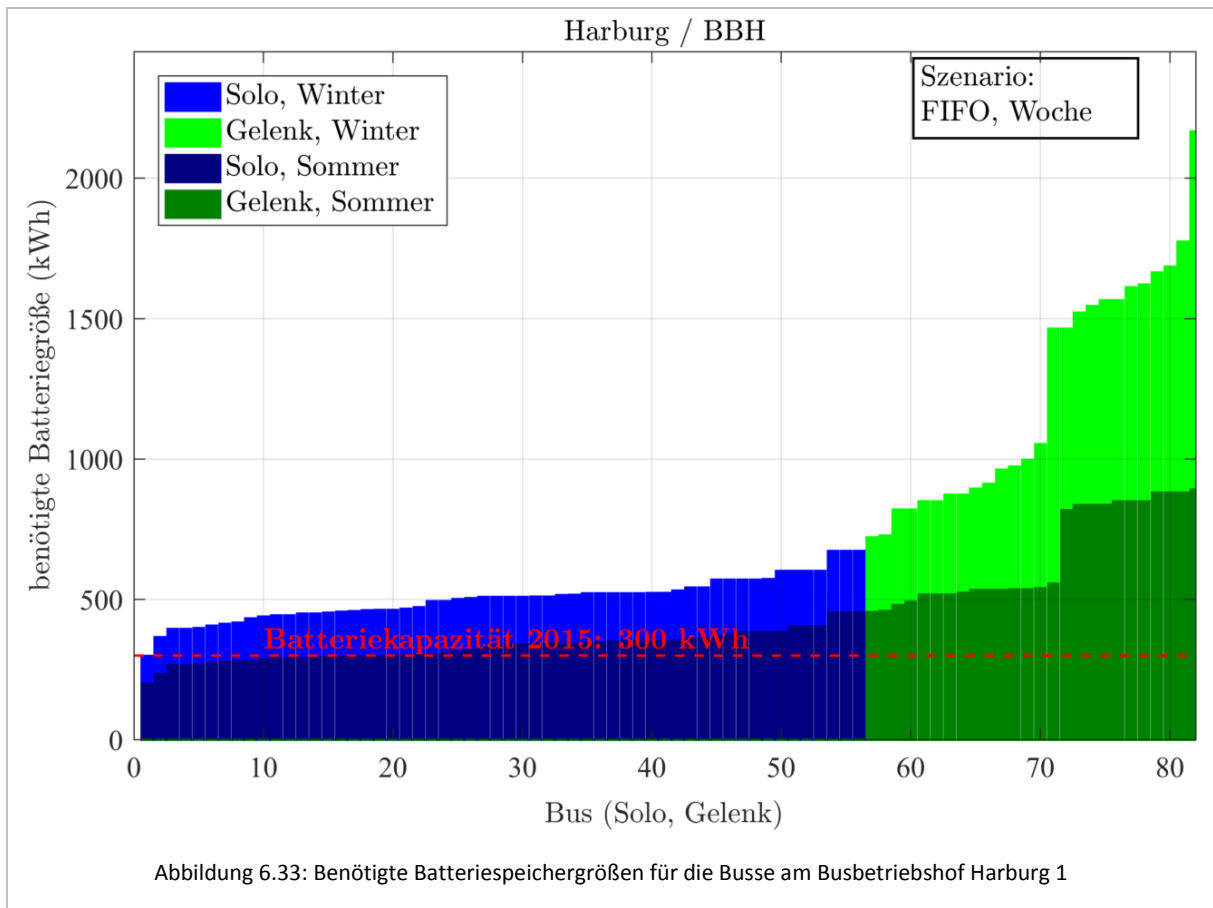


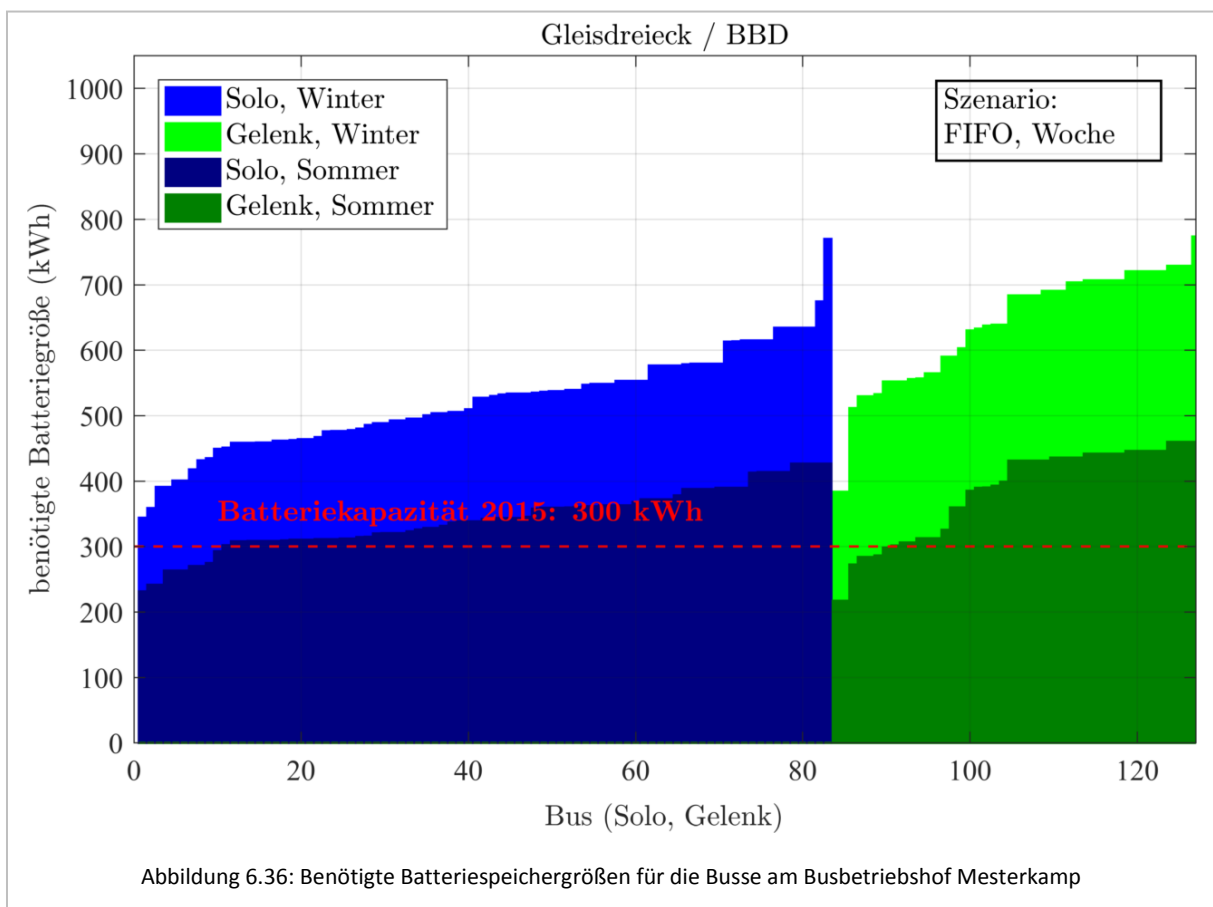
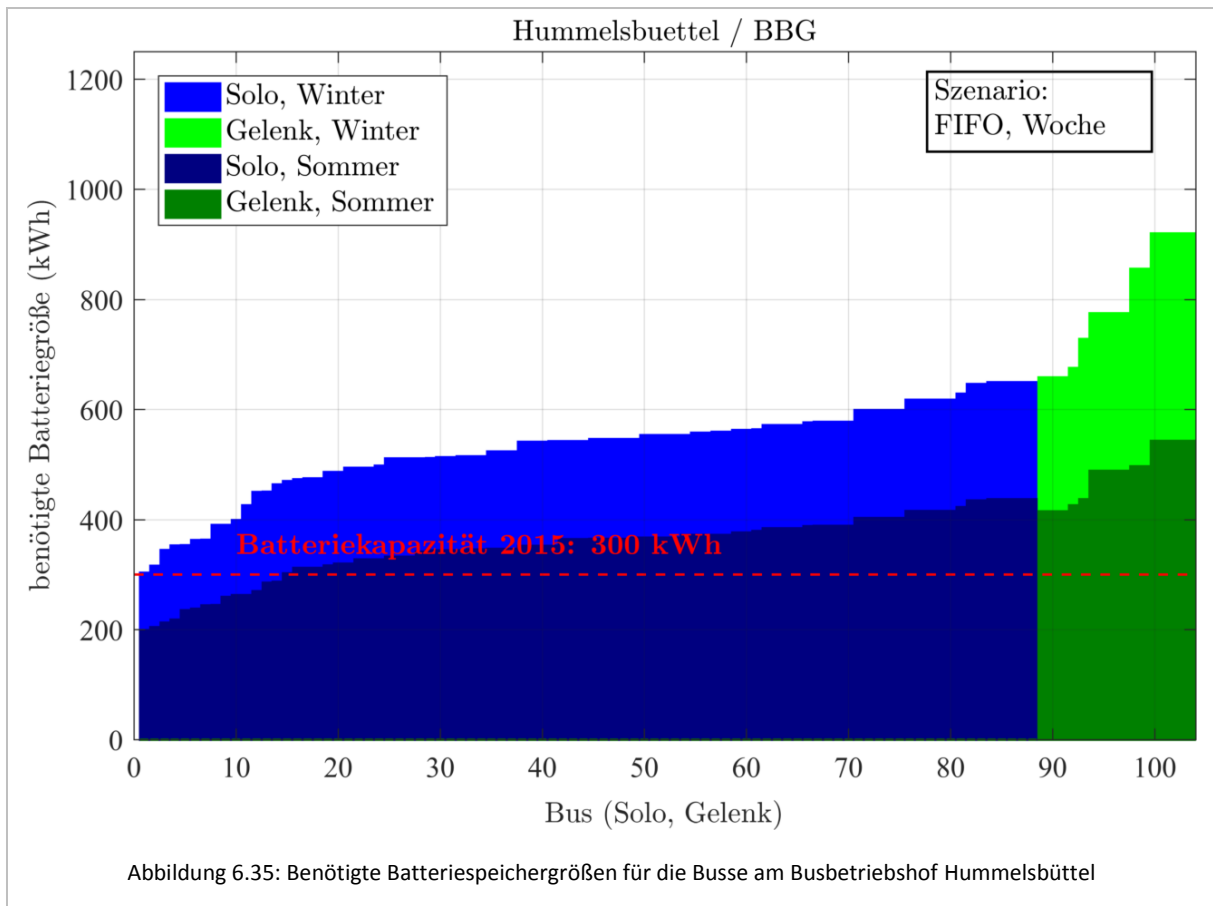




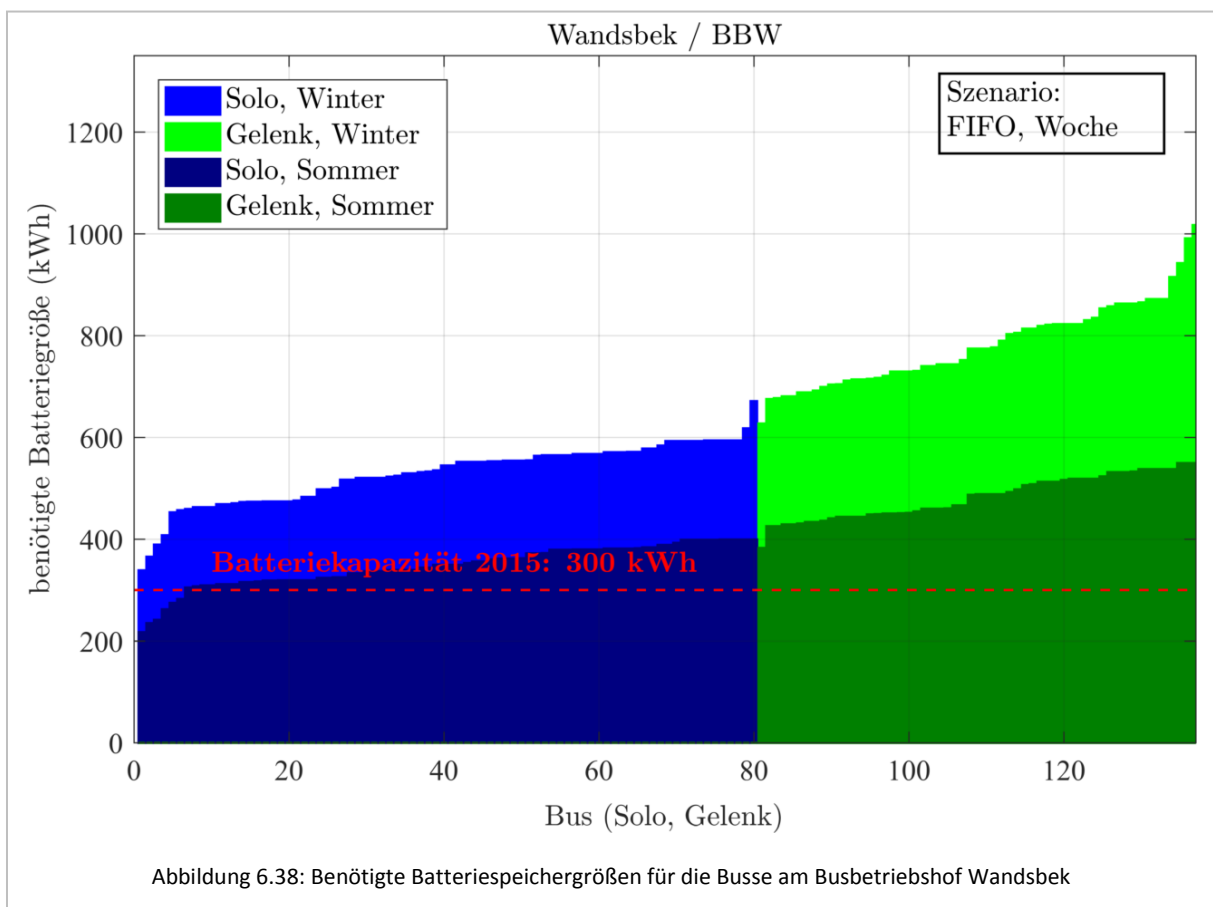
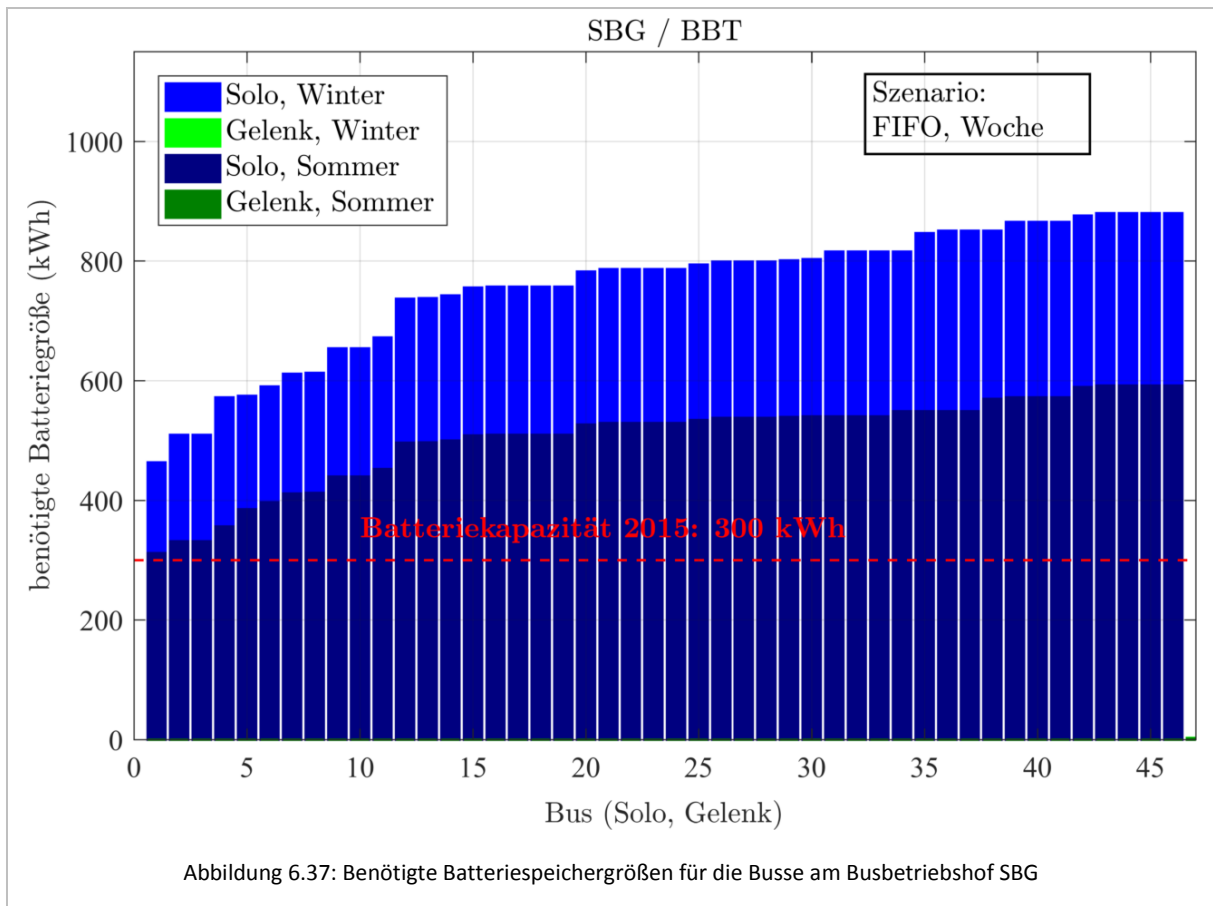
## 6.9 Notwendige Batteriespeichergößen

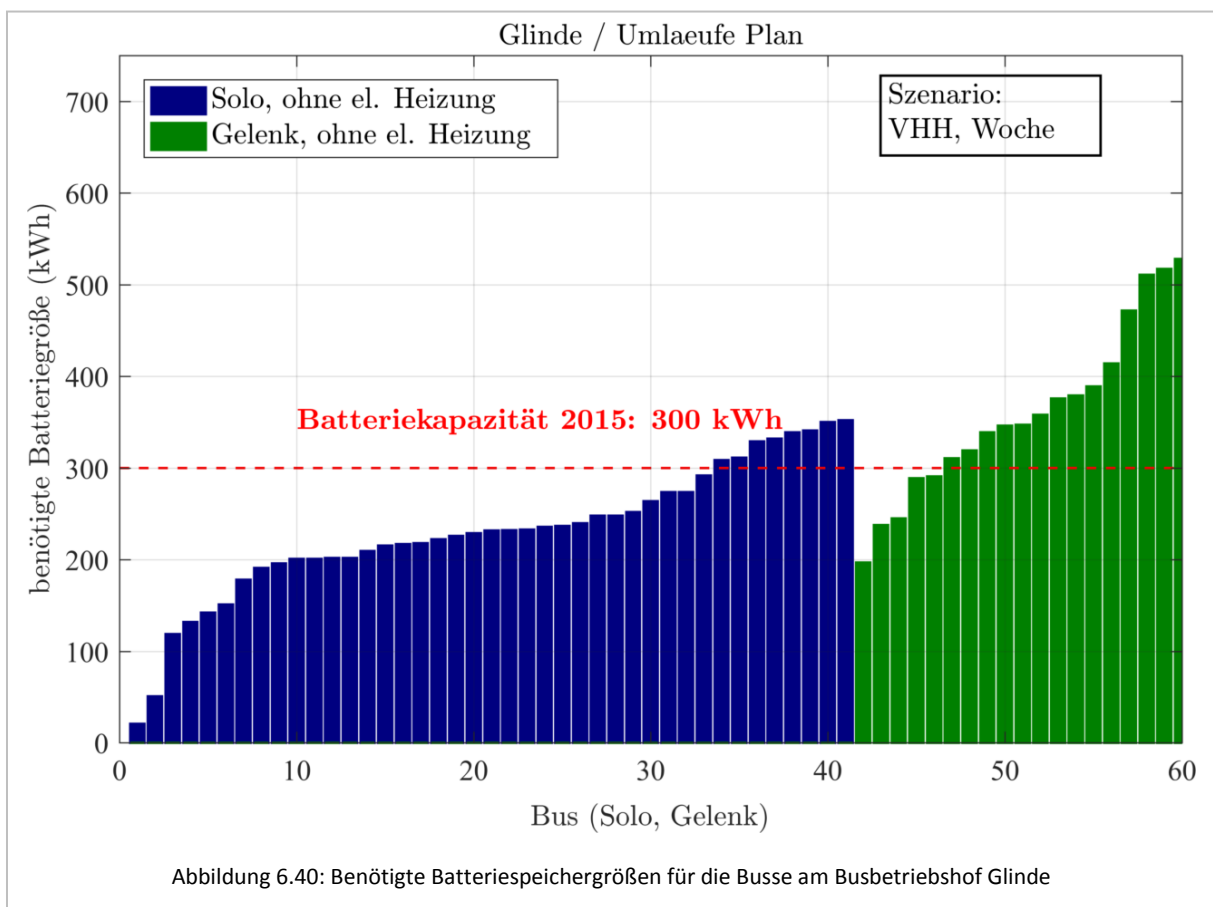
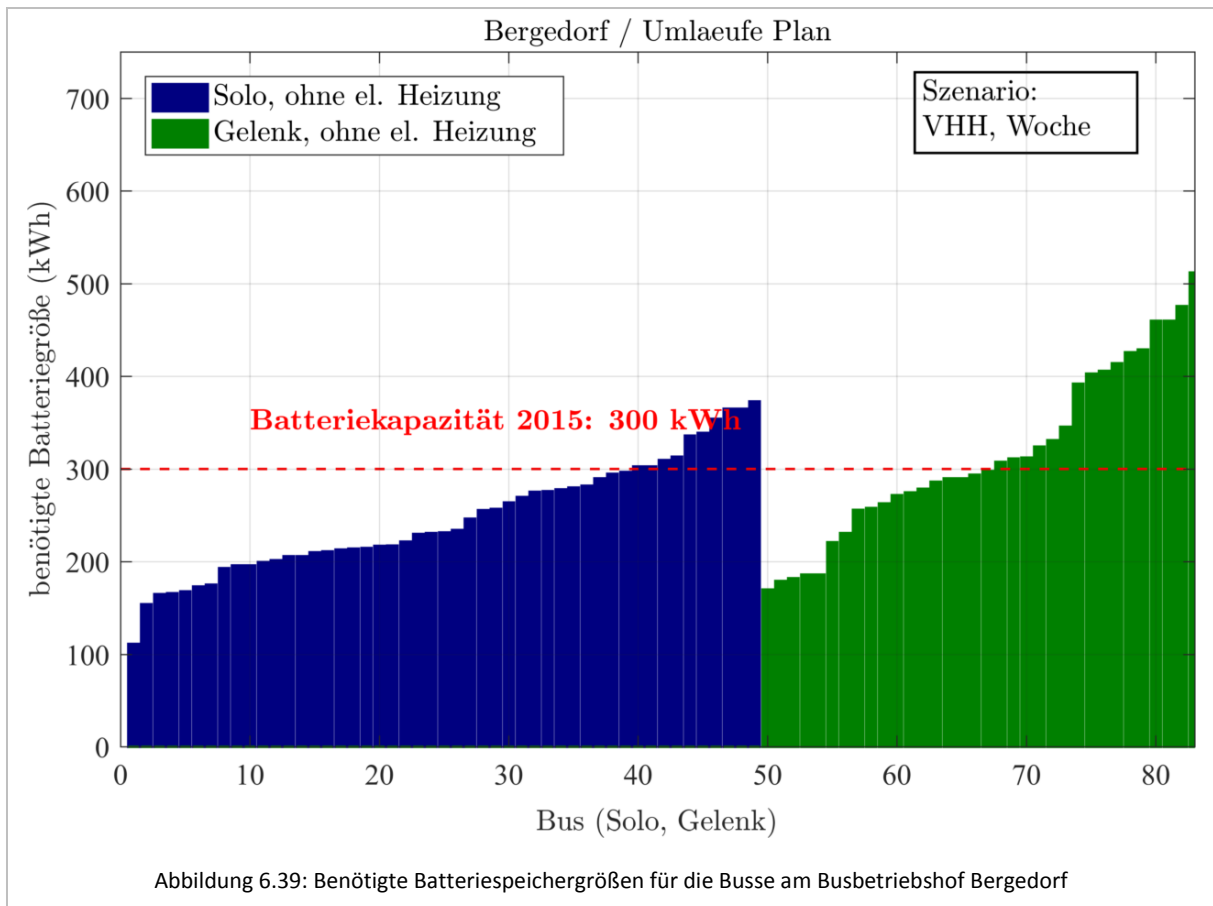


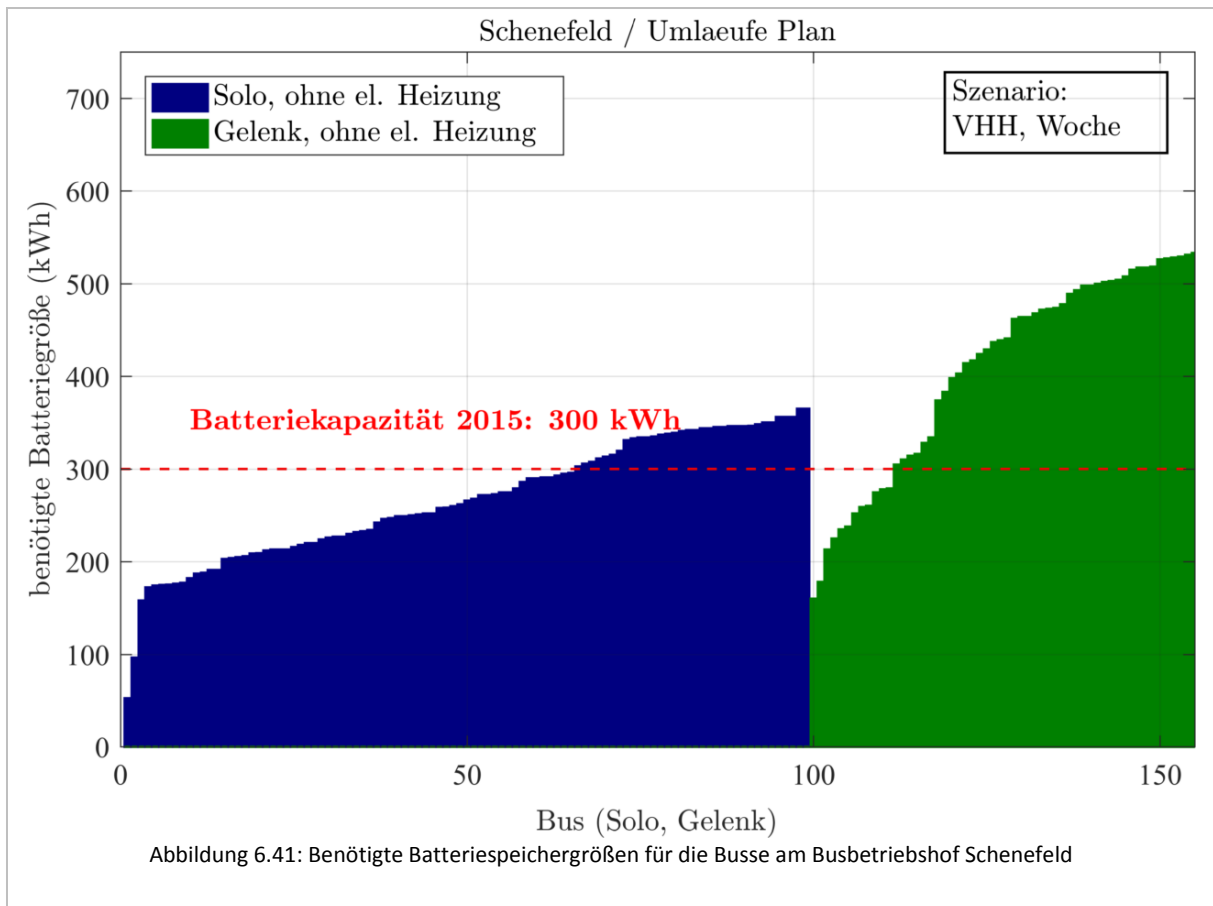




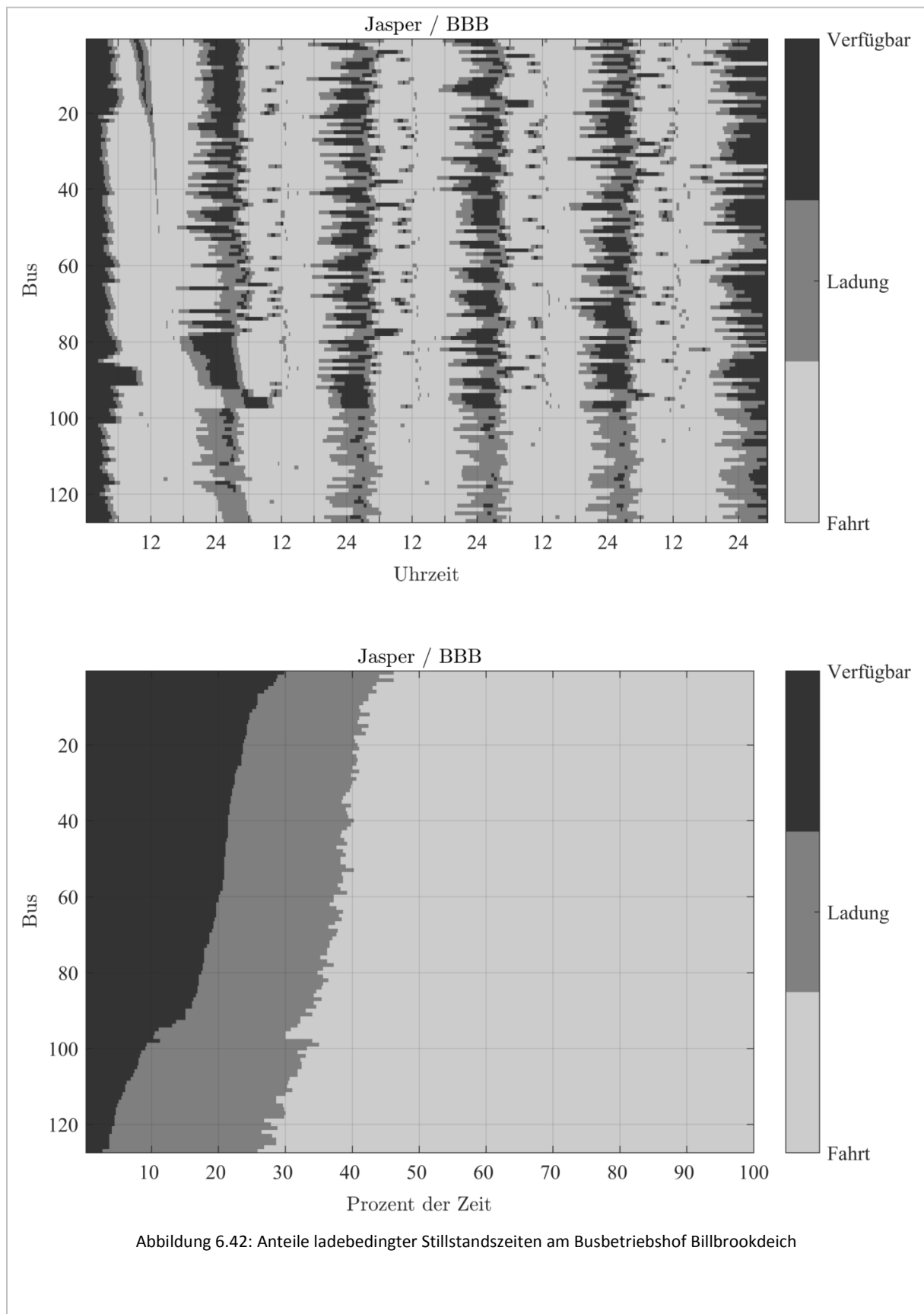








## 6.10 Busverfügbarkeit



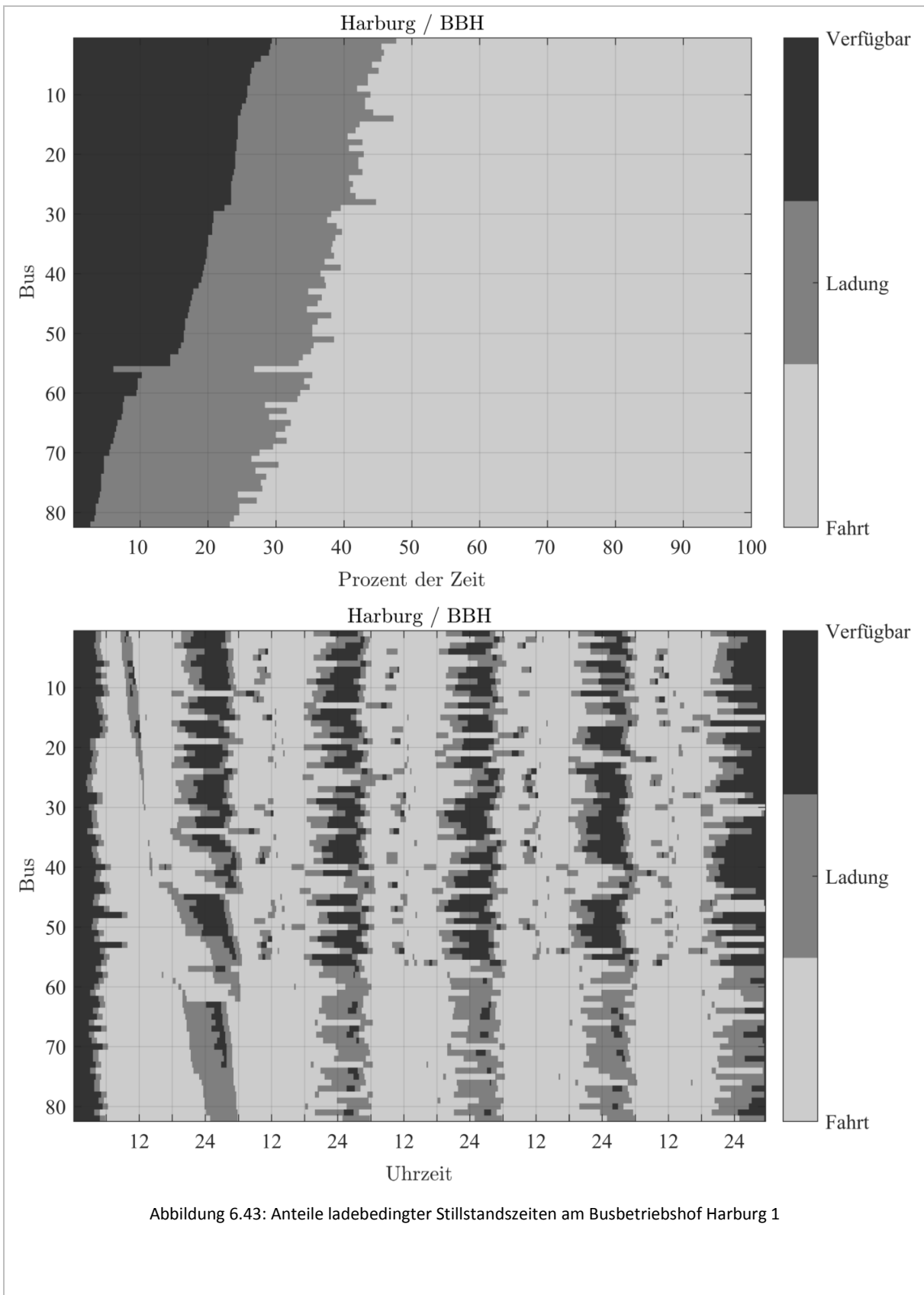
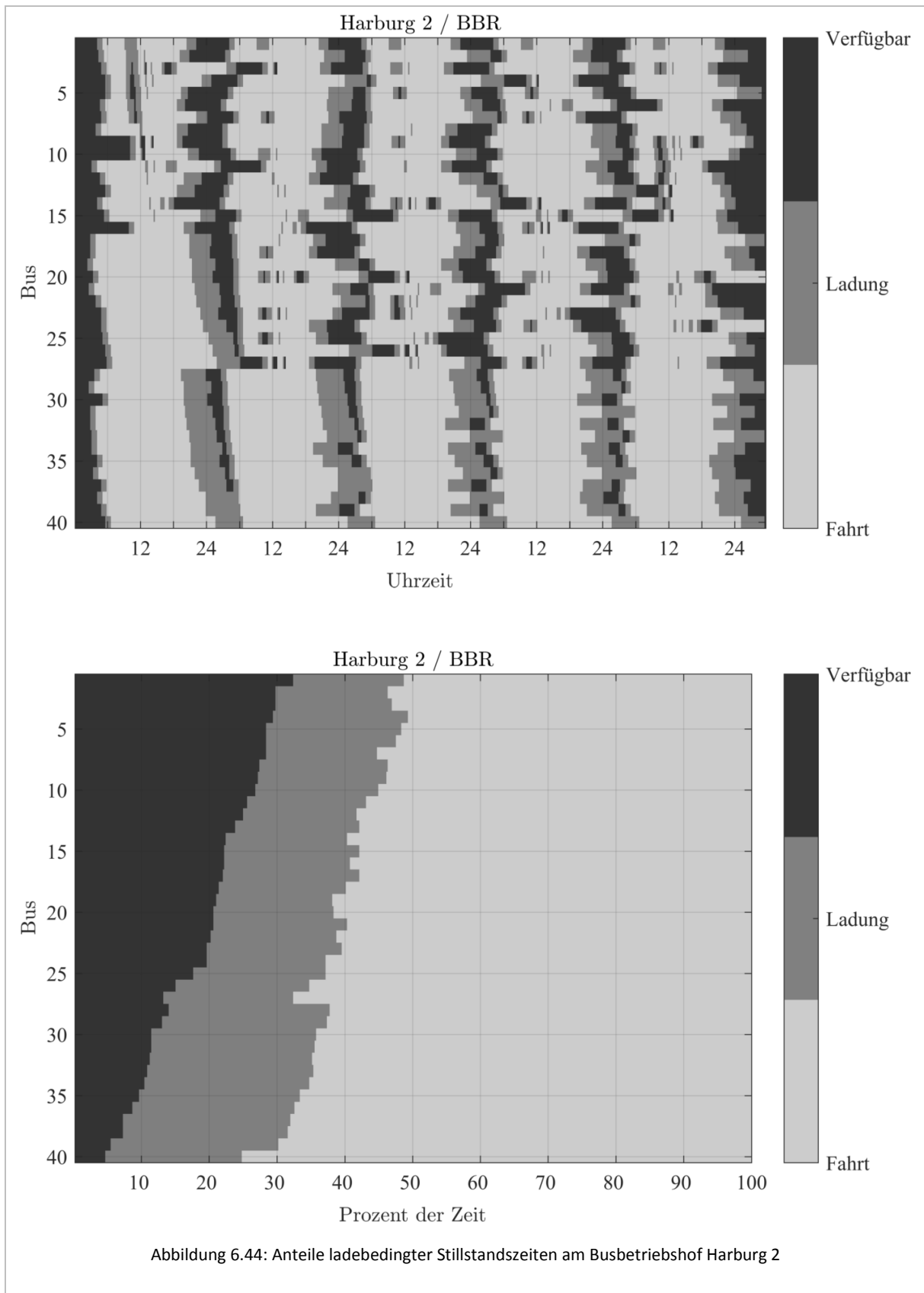
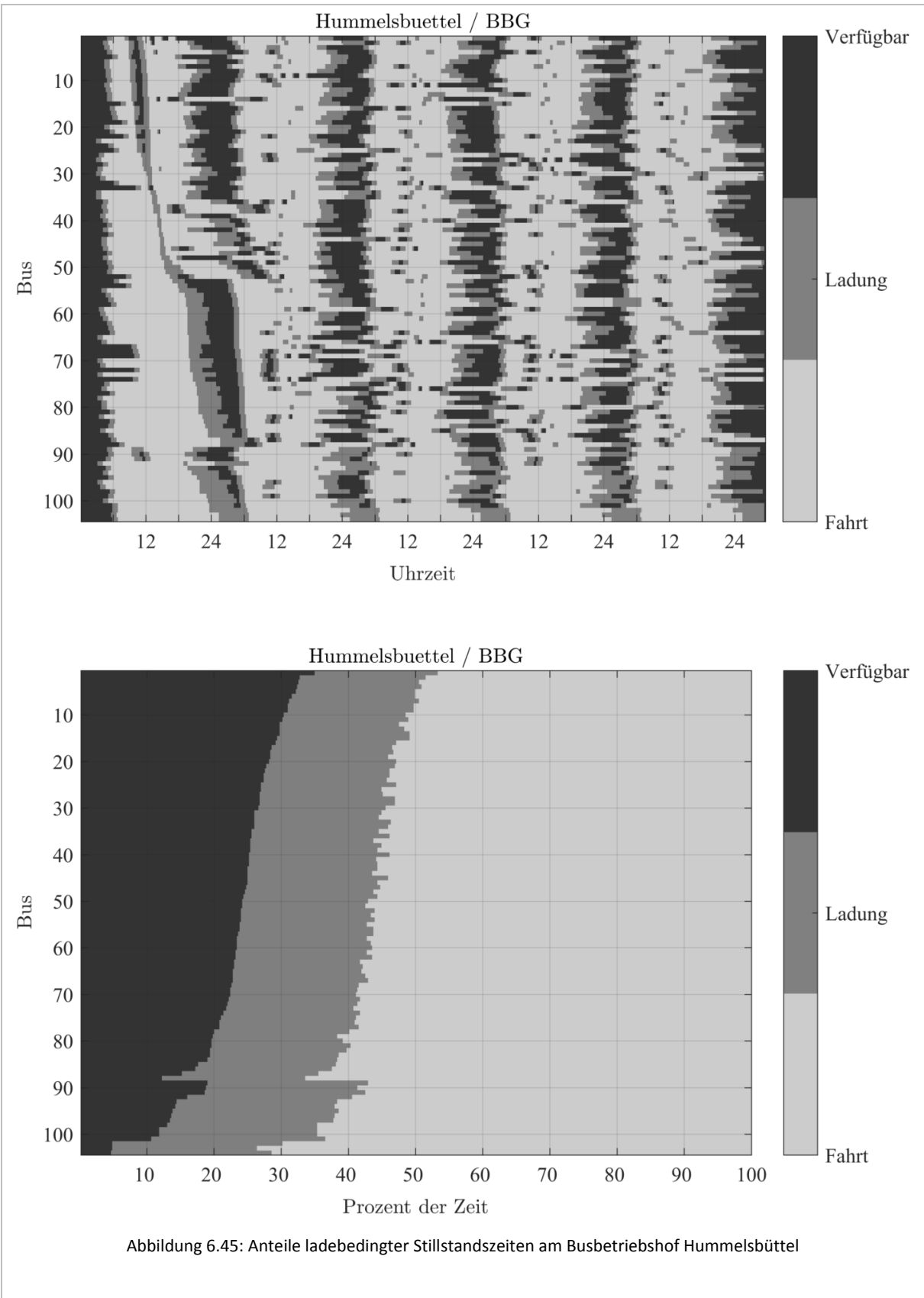
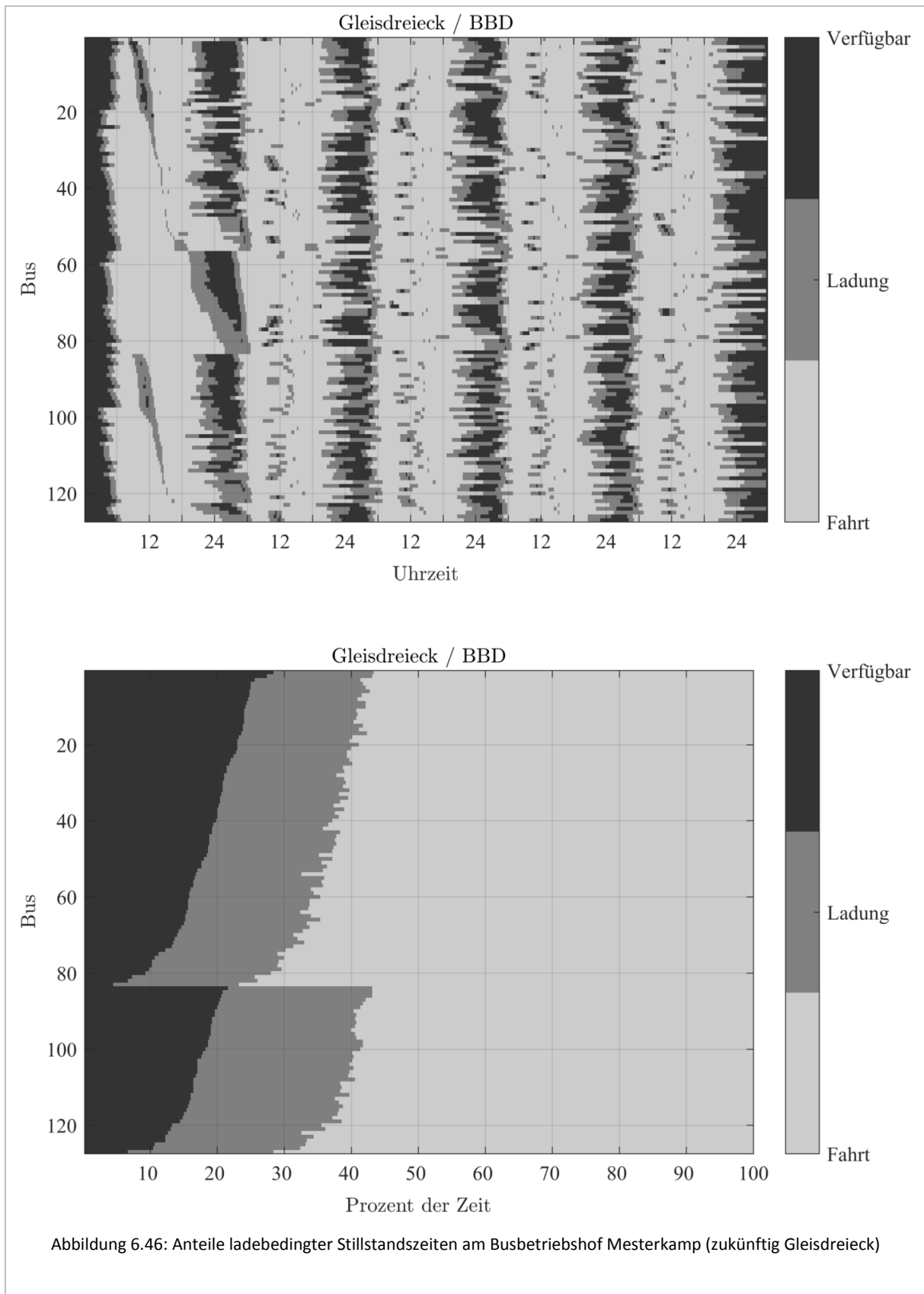


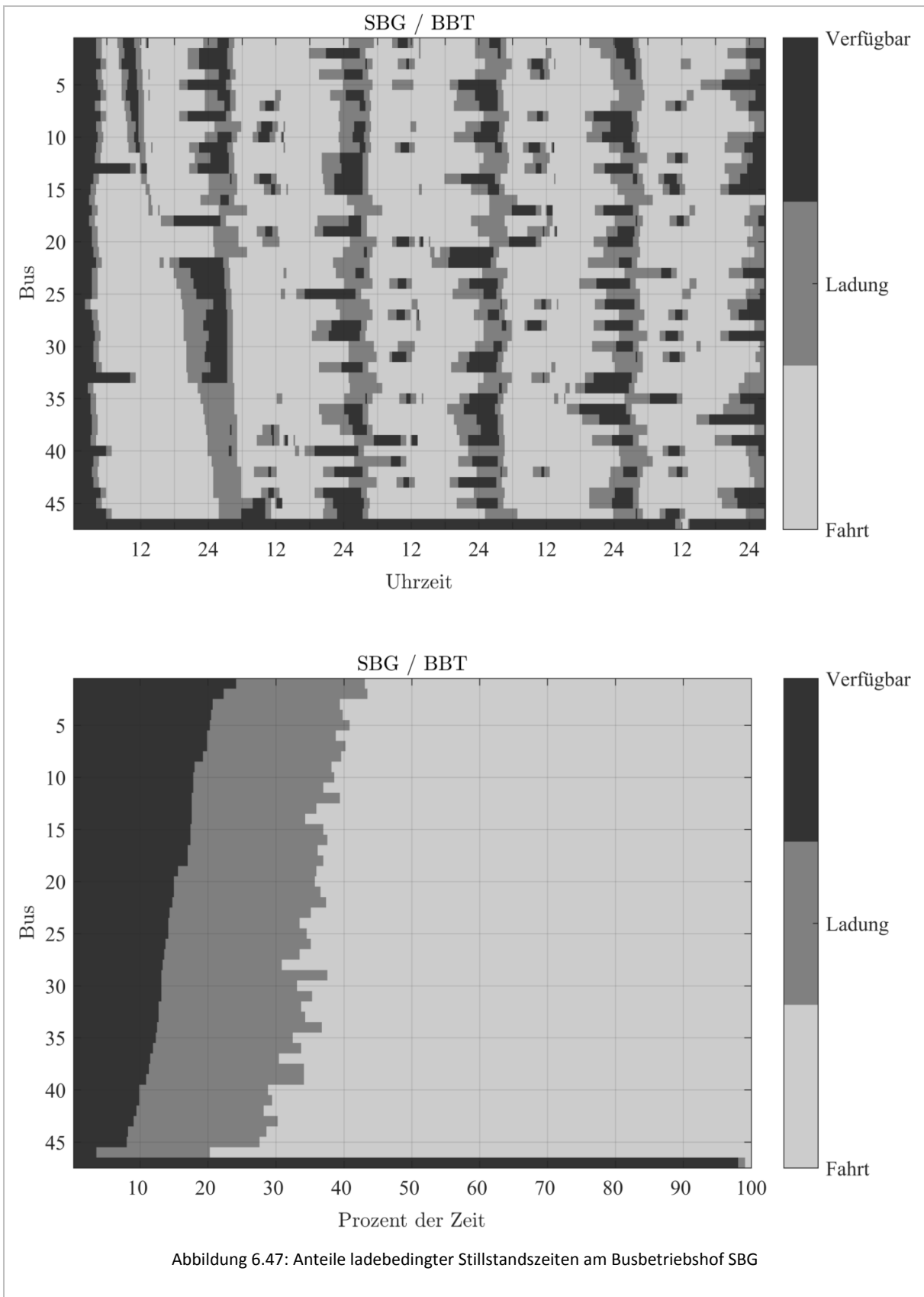
Abbildung 6.43: Anteile ladebedingter Stillstandszeiten am Busbetriebshof Harburg 1











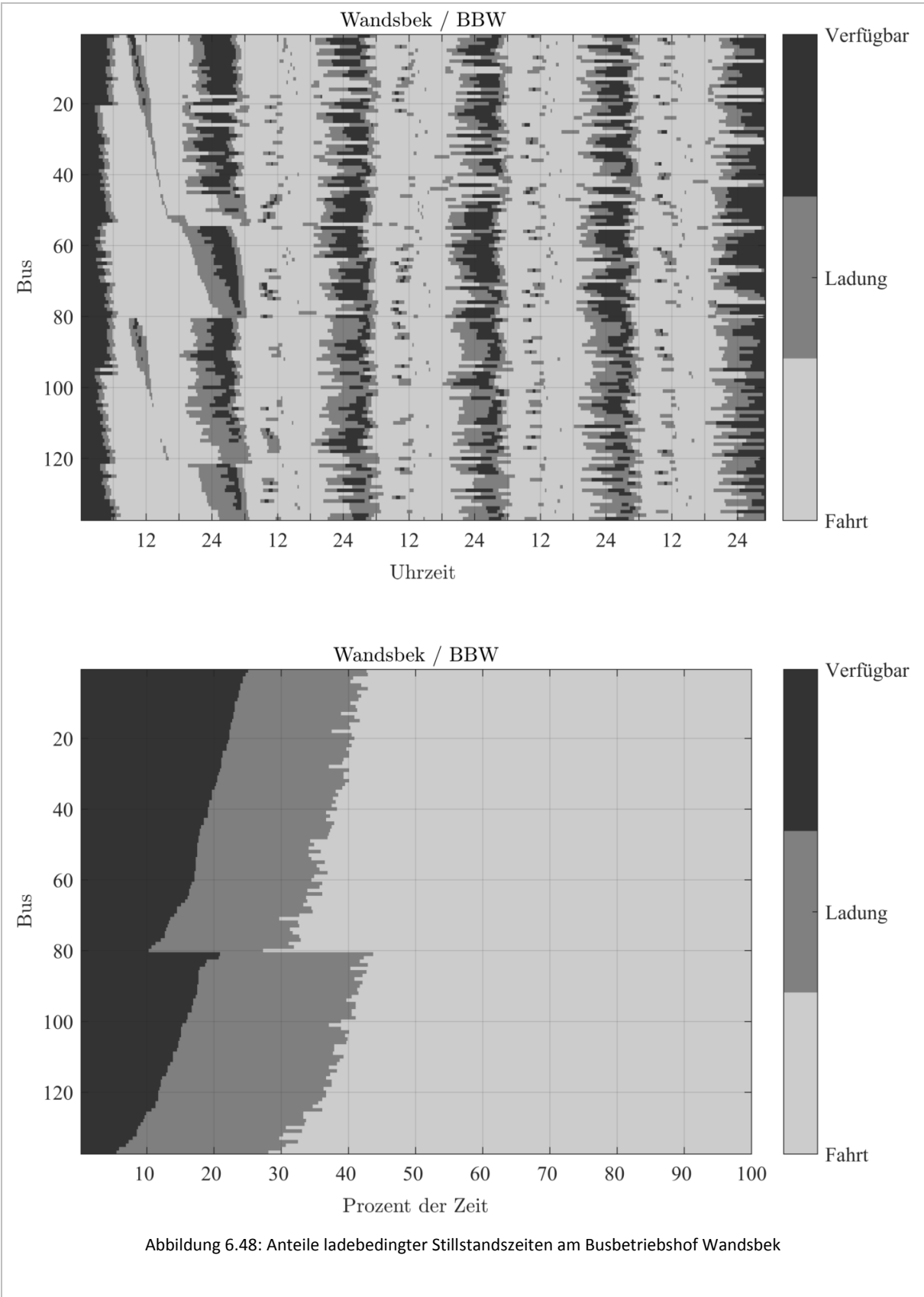
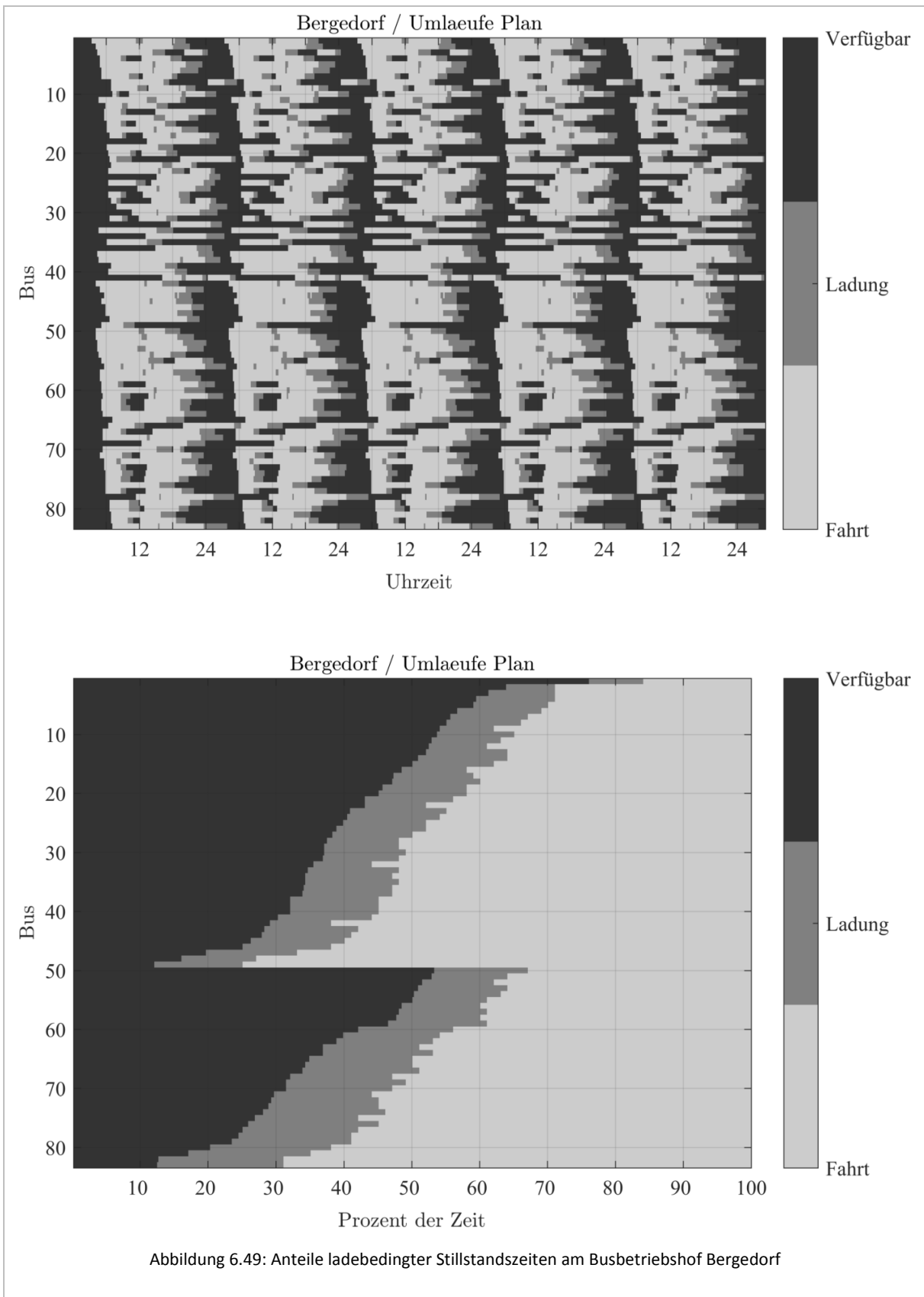
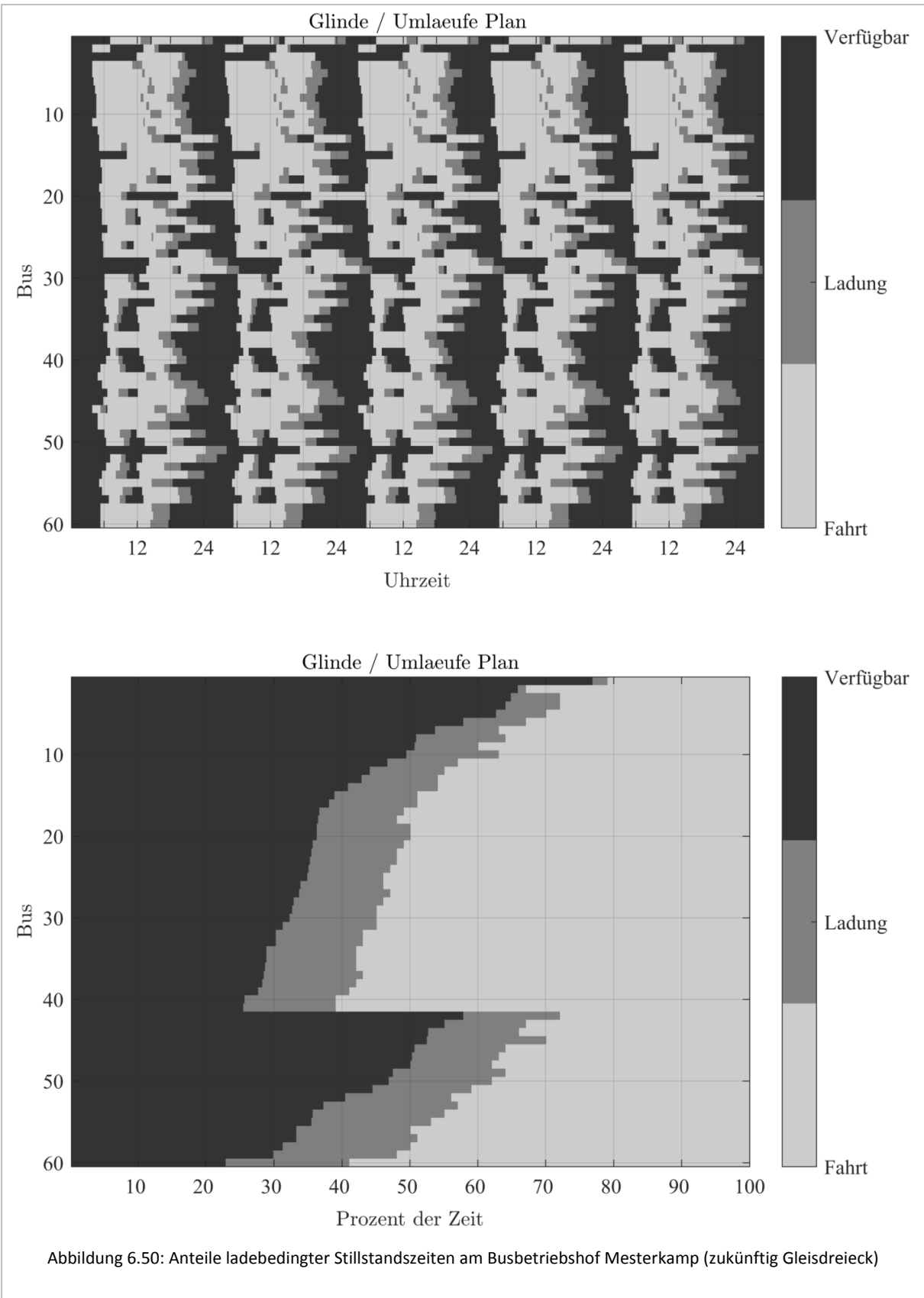


Abbildung 6.48: Anteile ladebedingter Stillstandszeiten am Busbetriebshof Wandsbek





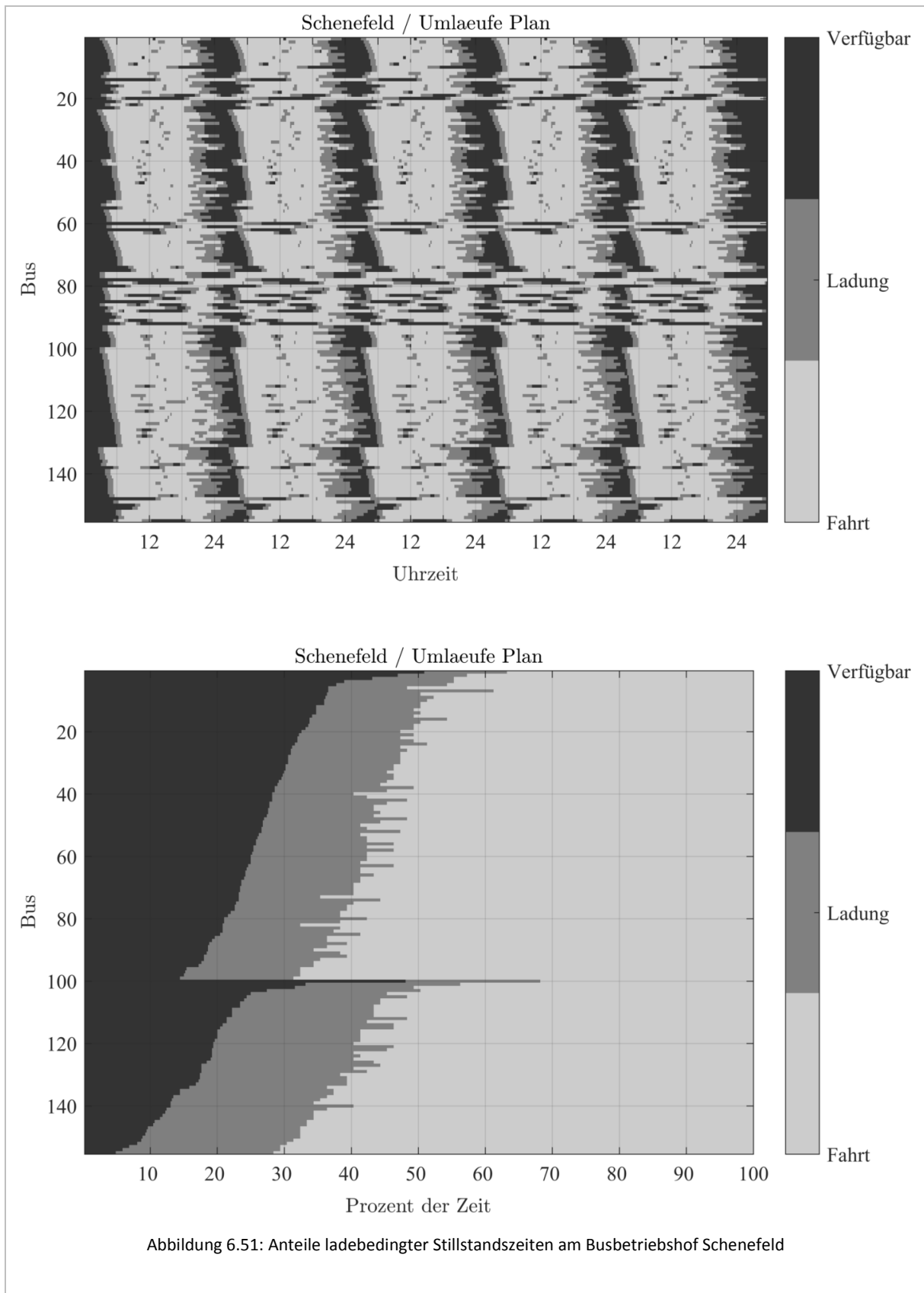
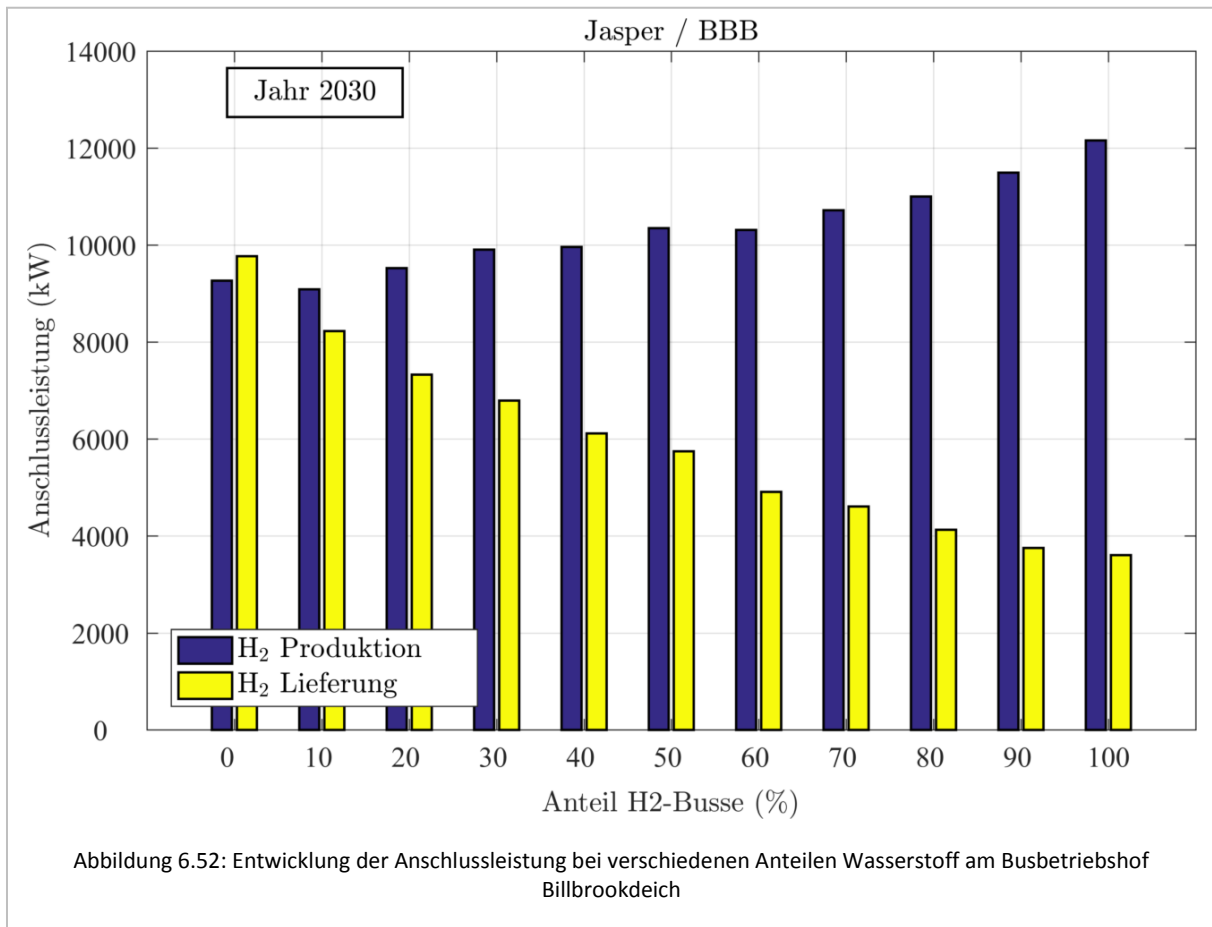
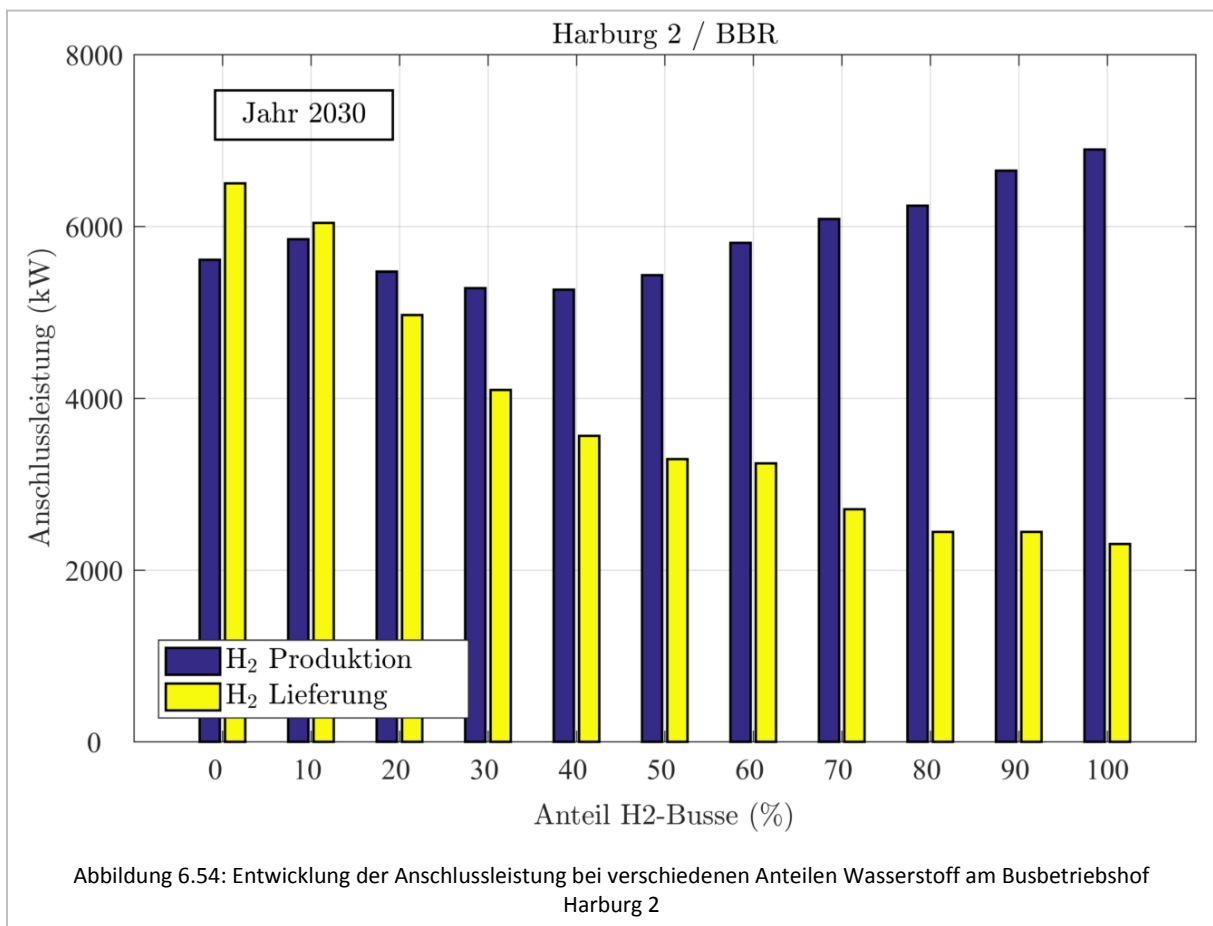
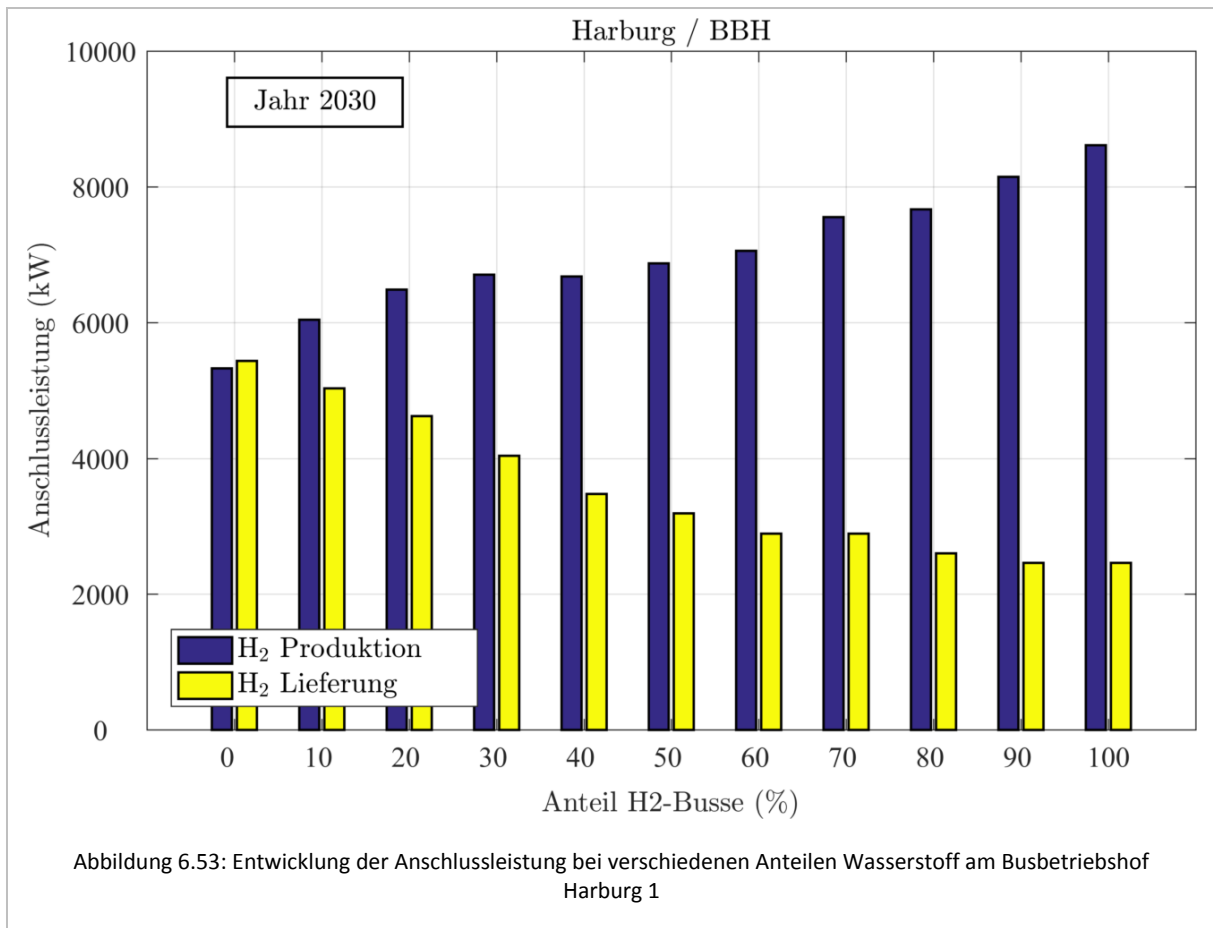
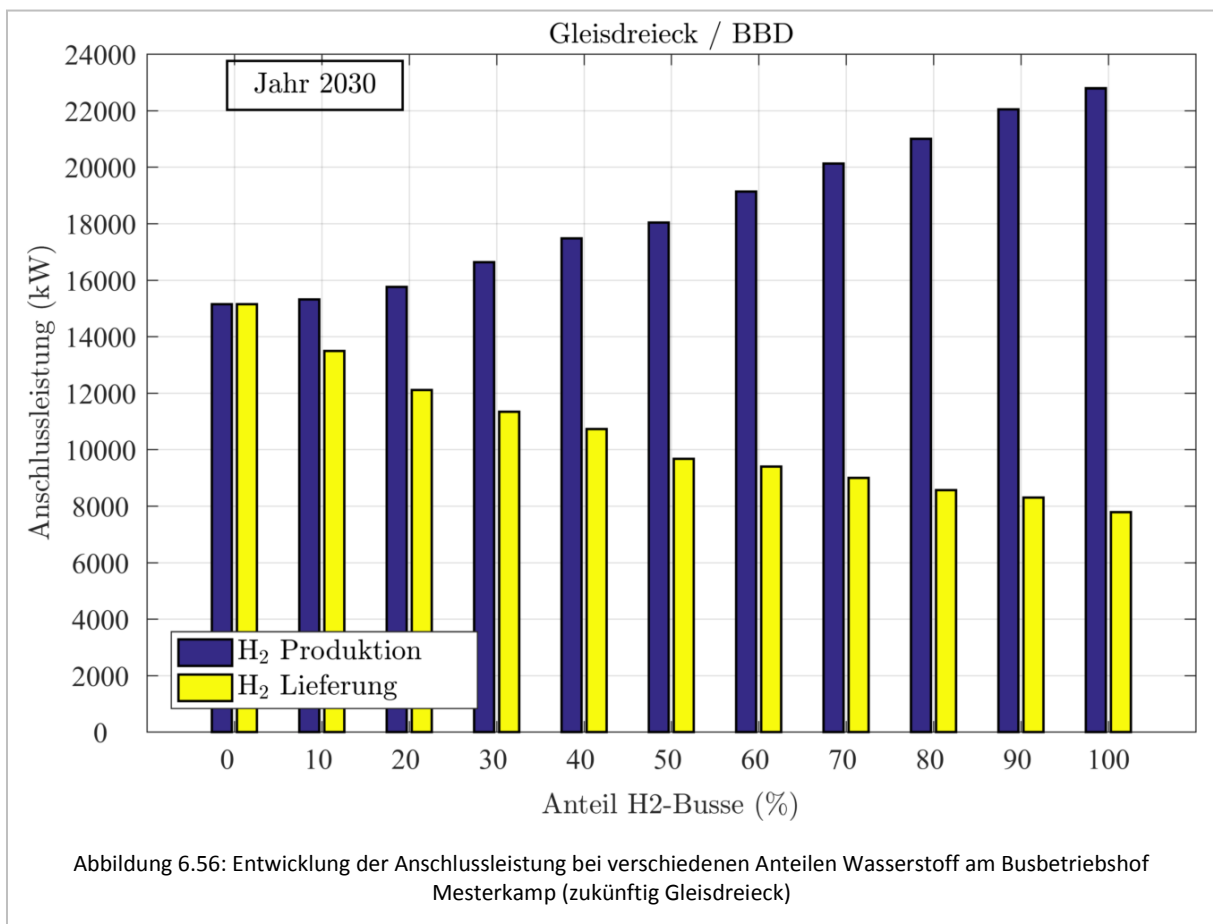
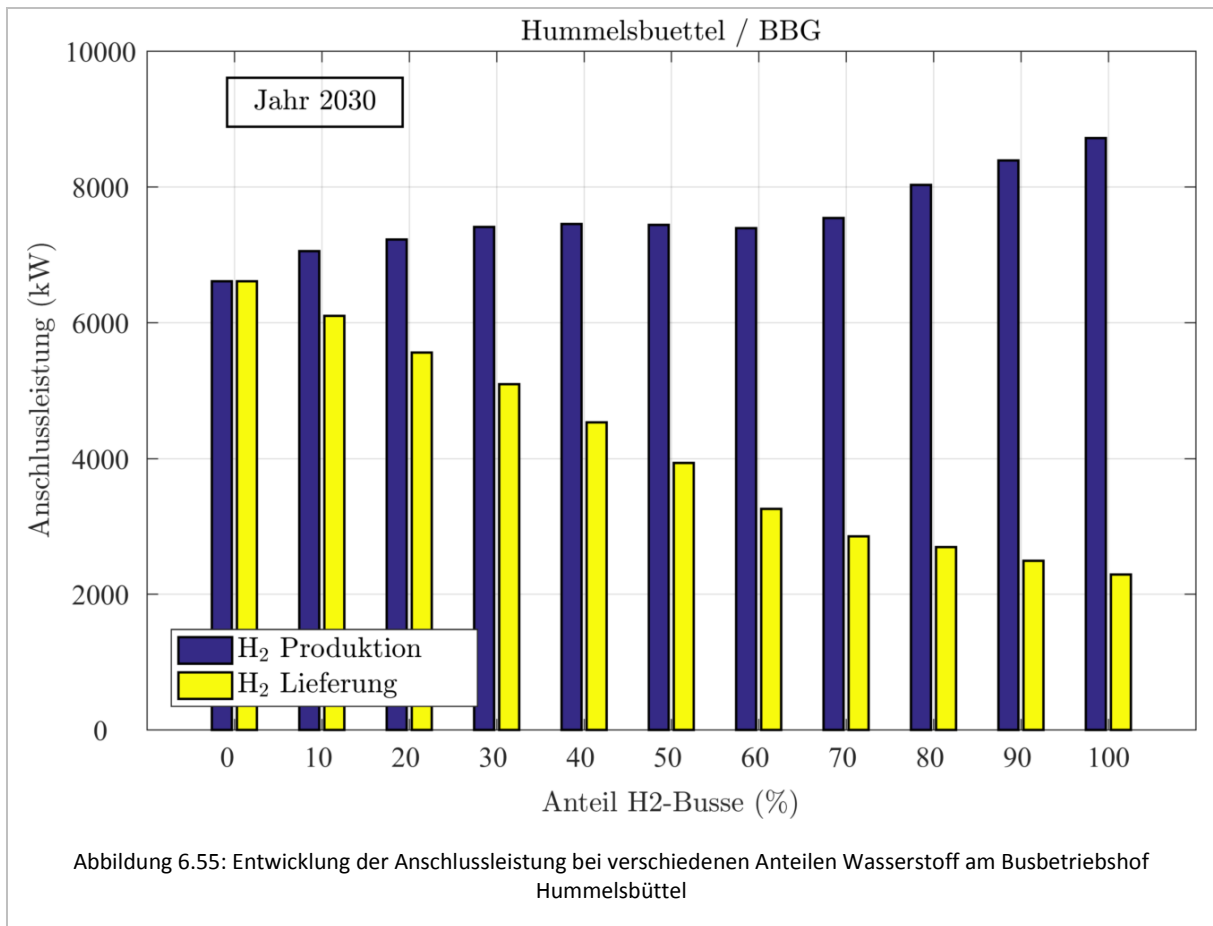


Abbildung 6.51: Anteile ladebedingter Stillstandszeiten am Busbetriebshof Schenefeld

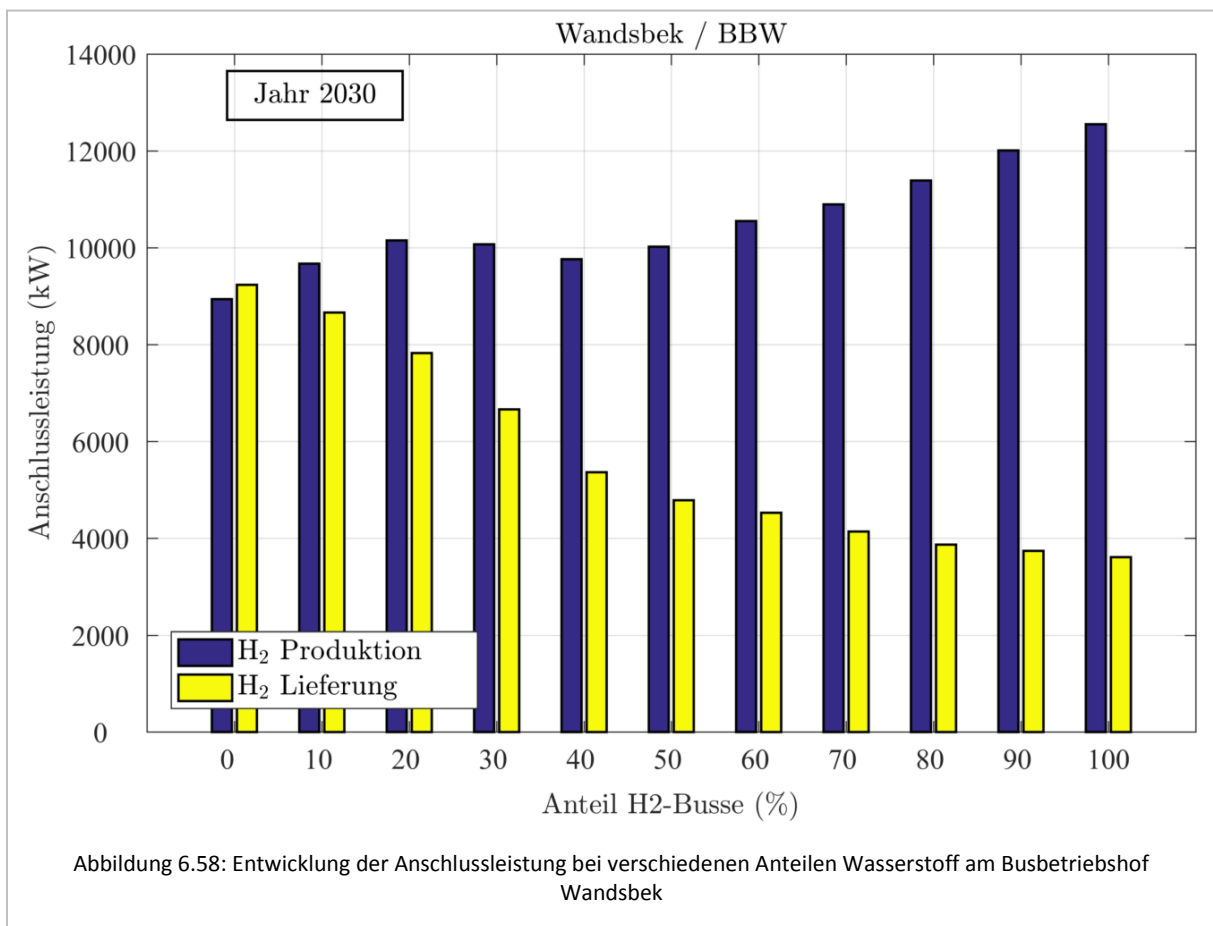
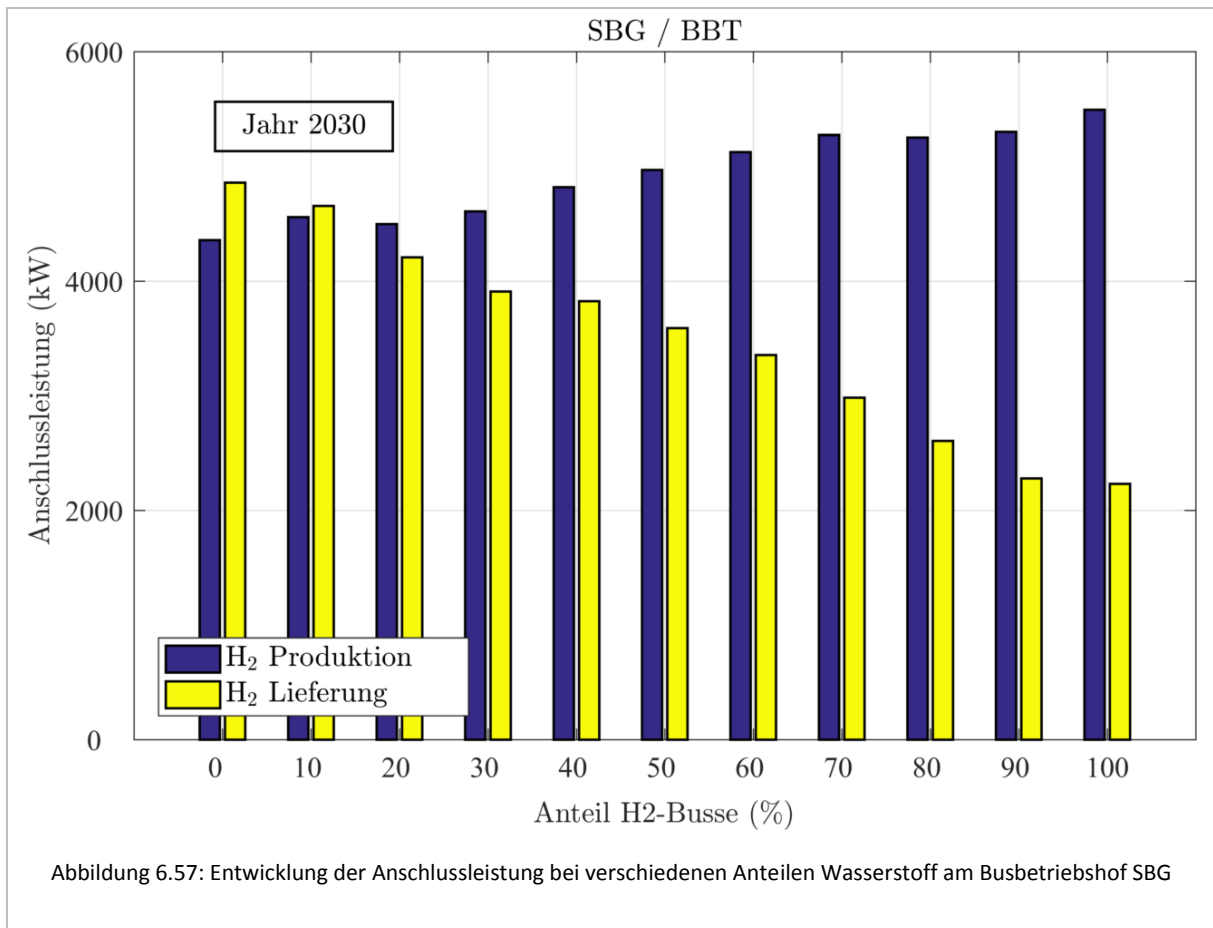
## 6.11 Entwicklung der Anschlussleistung nach Anteil Wasserstoffbusse



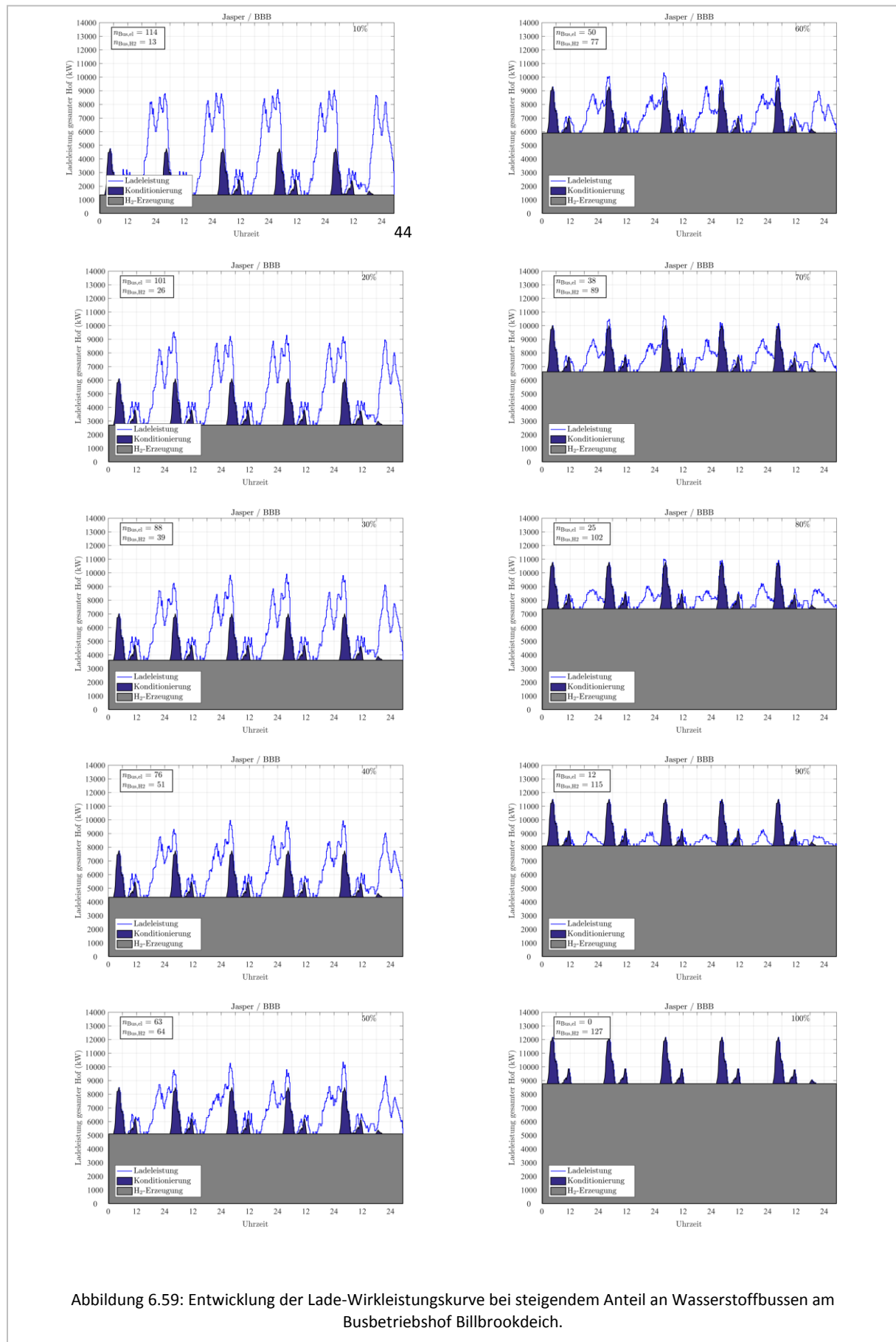








## 6.12 Entwicklung der Lade-Wirkleistungskurven je nach Anteil Wasserstoffbusse



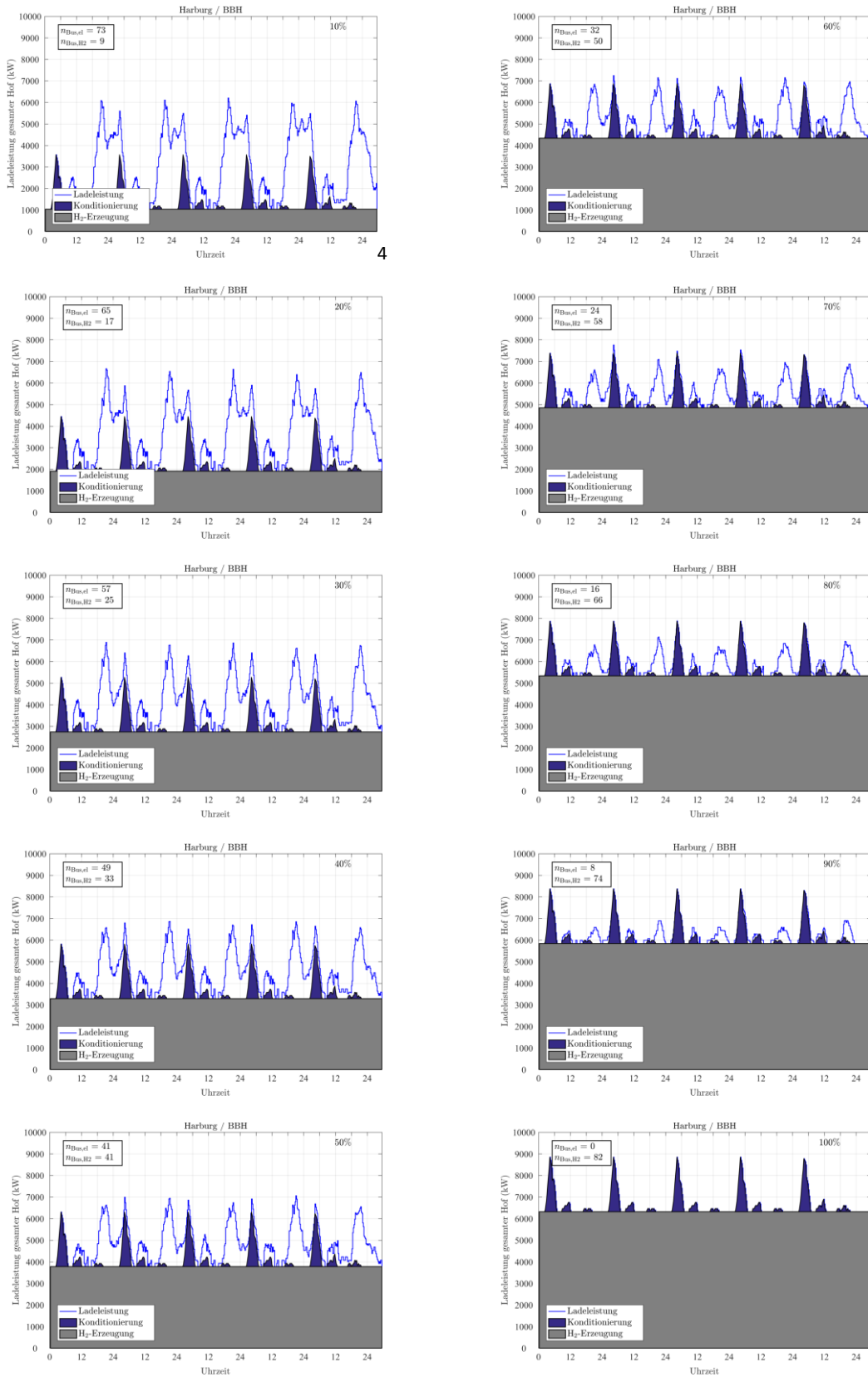


Abbildung 6.60: Entwicklung der Lade-Wirkleistungskurve bei steigendem Anteil an Wasserstoffbussen am Busbetriebshof Harburg 1.

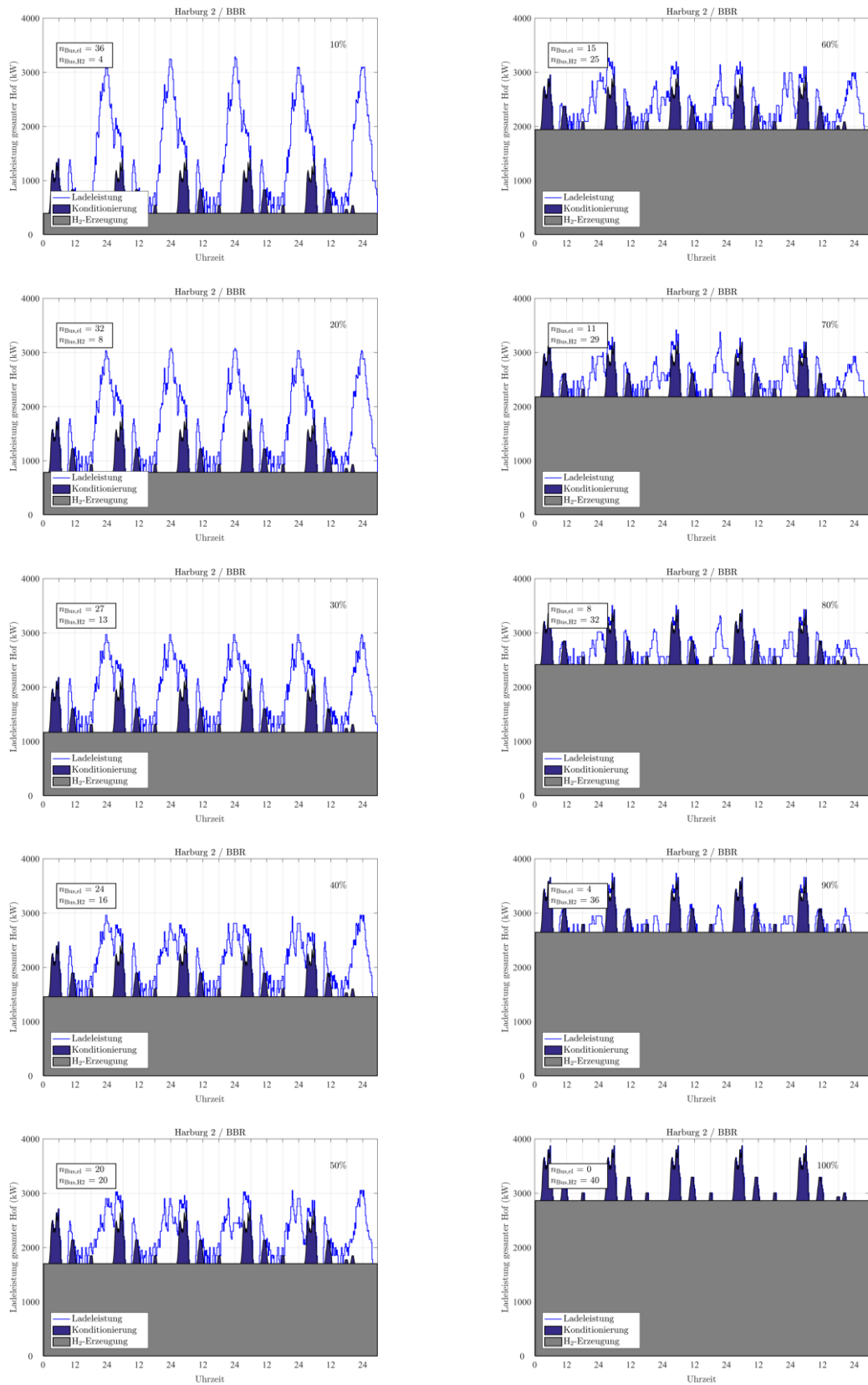


Abbildung 6.61: Entwicklung der Lade-Wirkleistungskurve bei steigendem Anteil an Wasserstoffbussen am Busbetriebshof Harburg 2.

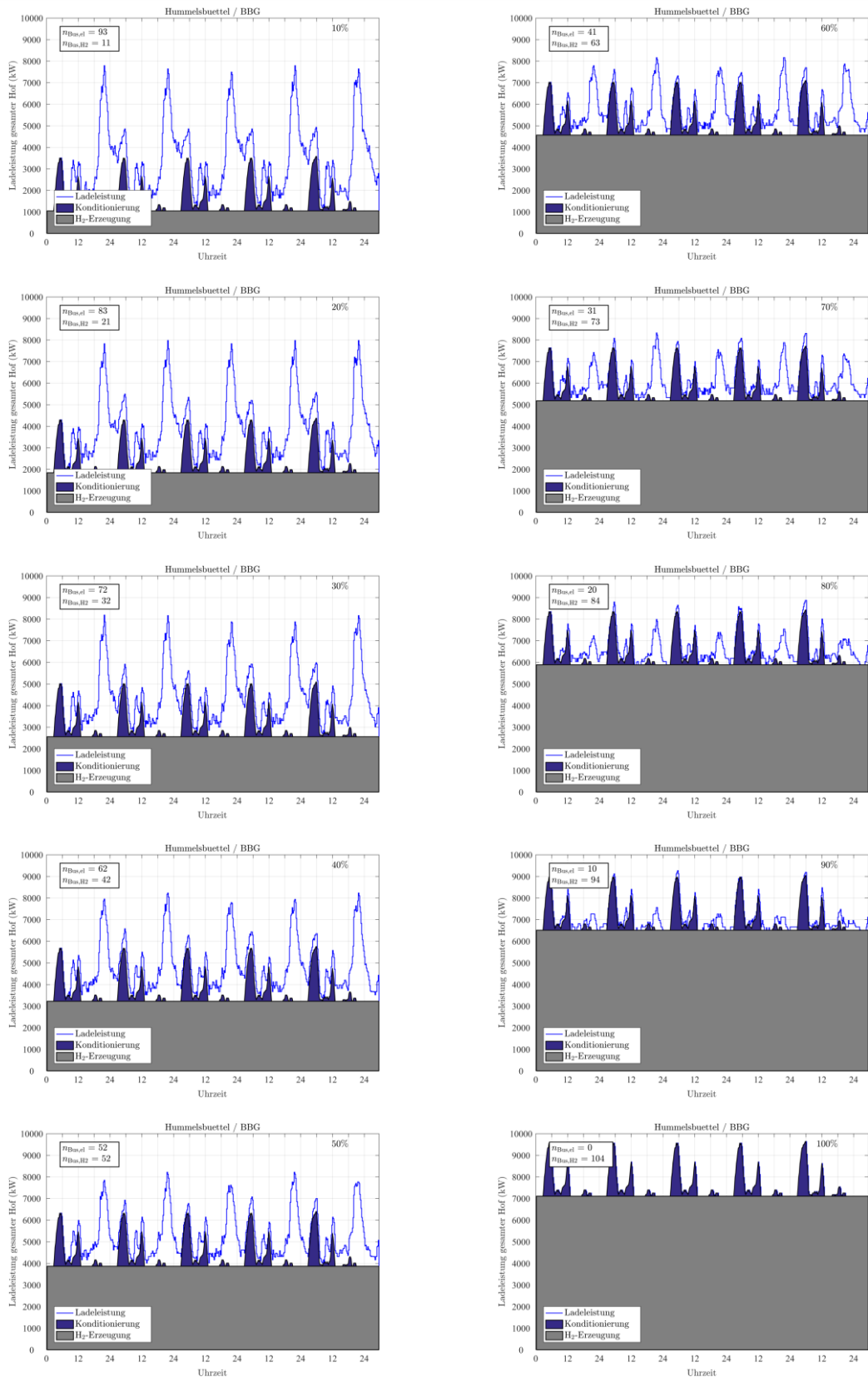


Abbildung 6.62: Entwicklung der Lade-Wirkleistungskurve bei steigendem Anteil an Wasserstoffbussen am Busbetriebshof Hummelsbüttel.

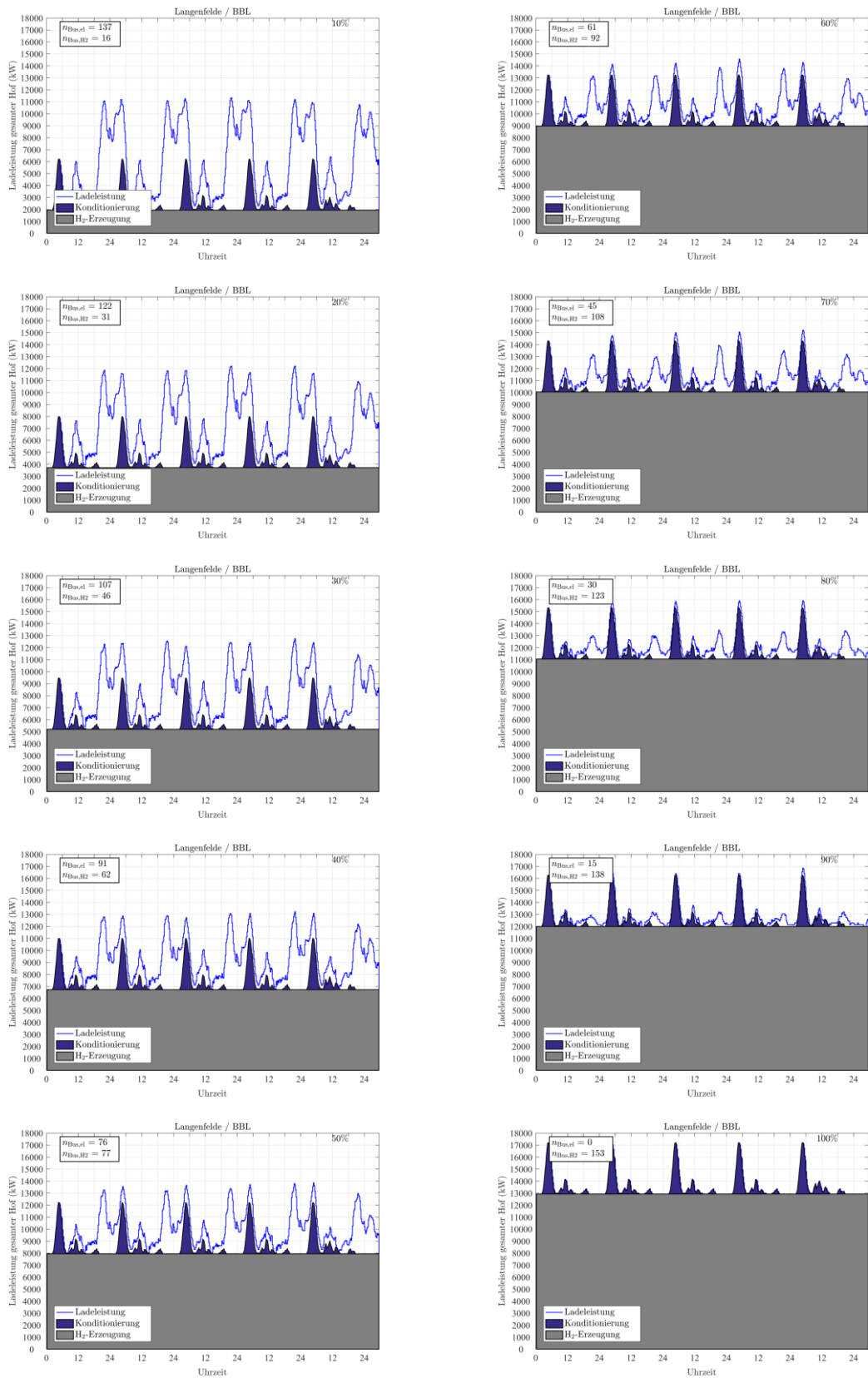


Abbildung 6.63: Entwicklung der Lade-Wirkleistungskurve bei steigendem Anteil an Wasserstoffbussen am Busbetriebshof Langenfelde

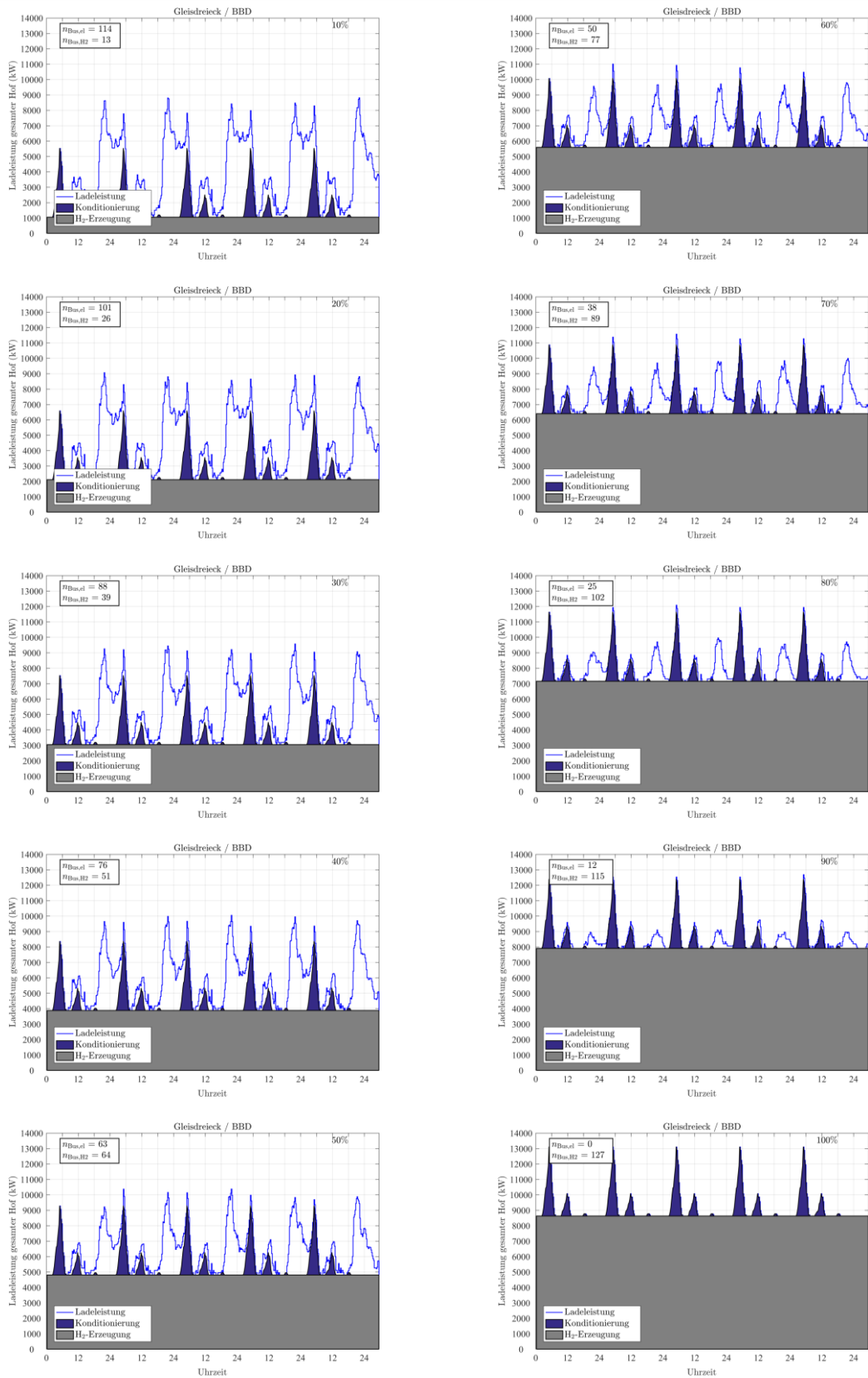


Abbildung 6.64: Entwicklung der Lade-Wirkleistungskurve bei steigendem Anteil an Wasserstoffbussen am Busbetriebshof Mesterkamp (zukünftig Gleisdreieck).

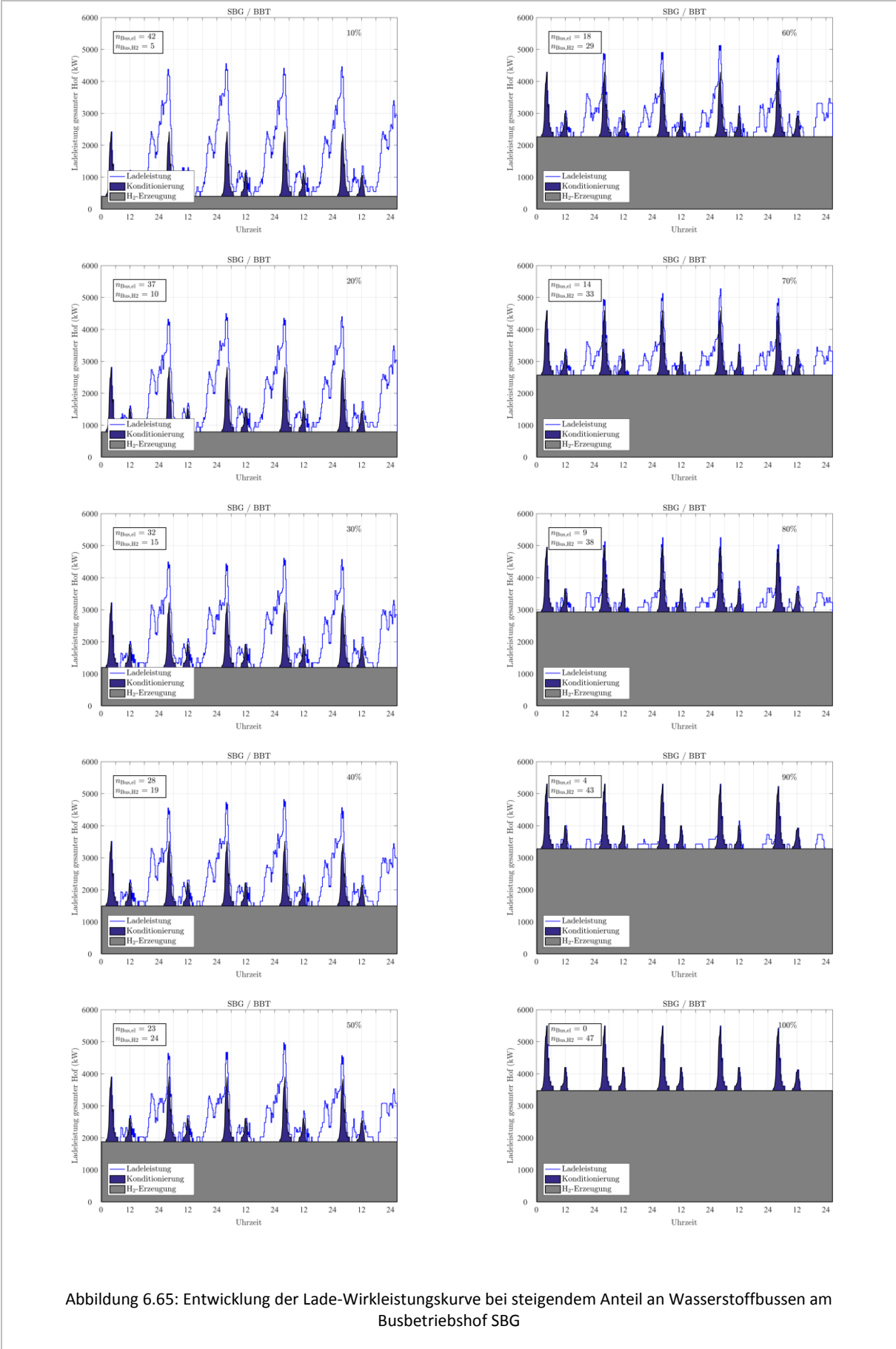


Abbildung 6.65: Entwicklung der Lade-Wirkleistungskurve bei steigendem Anteil an Wasserstoffbussen am Busbetriebshof SBG



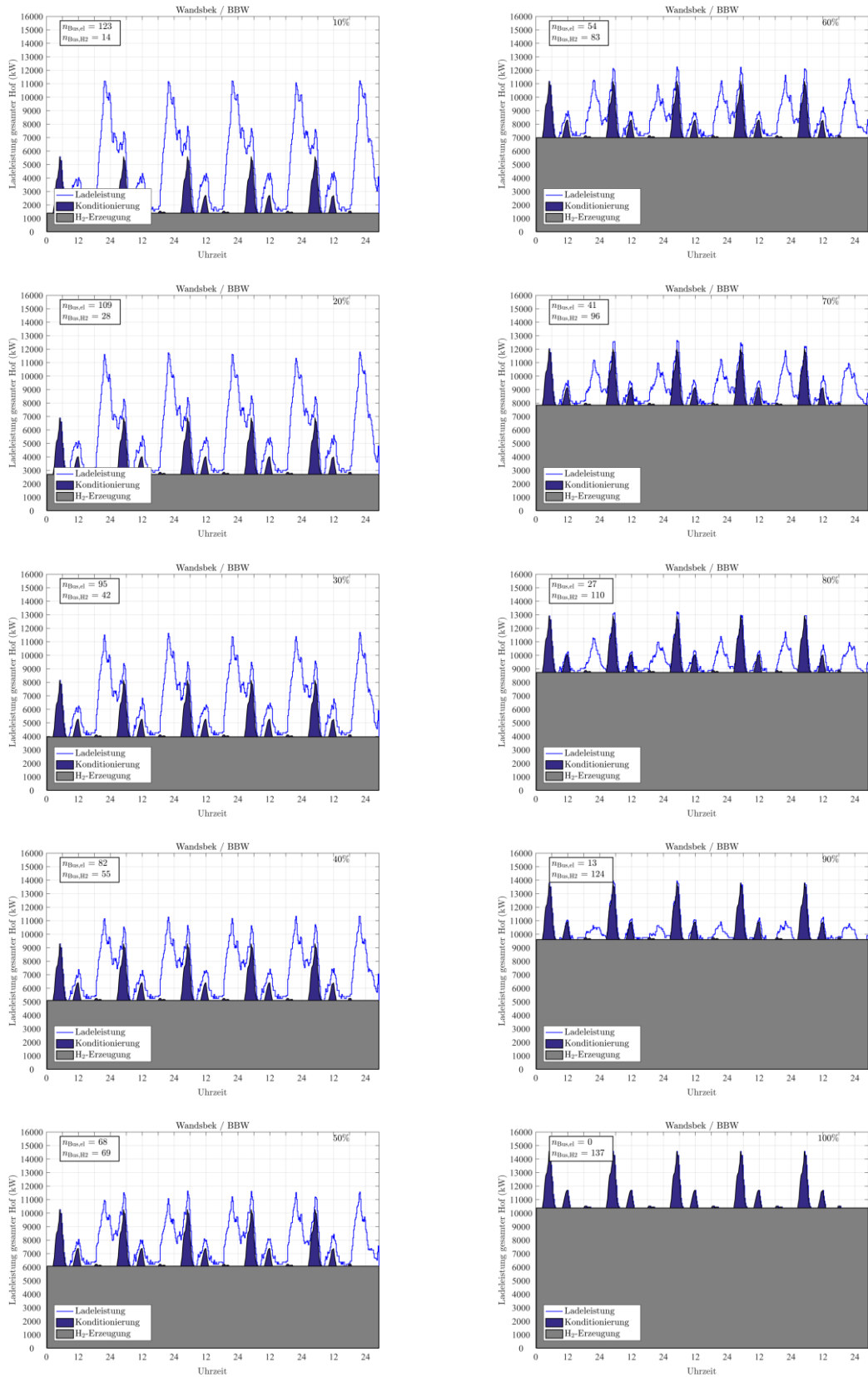
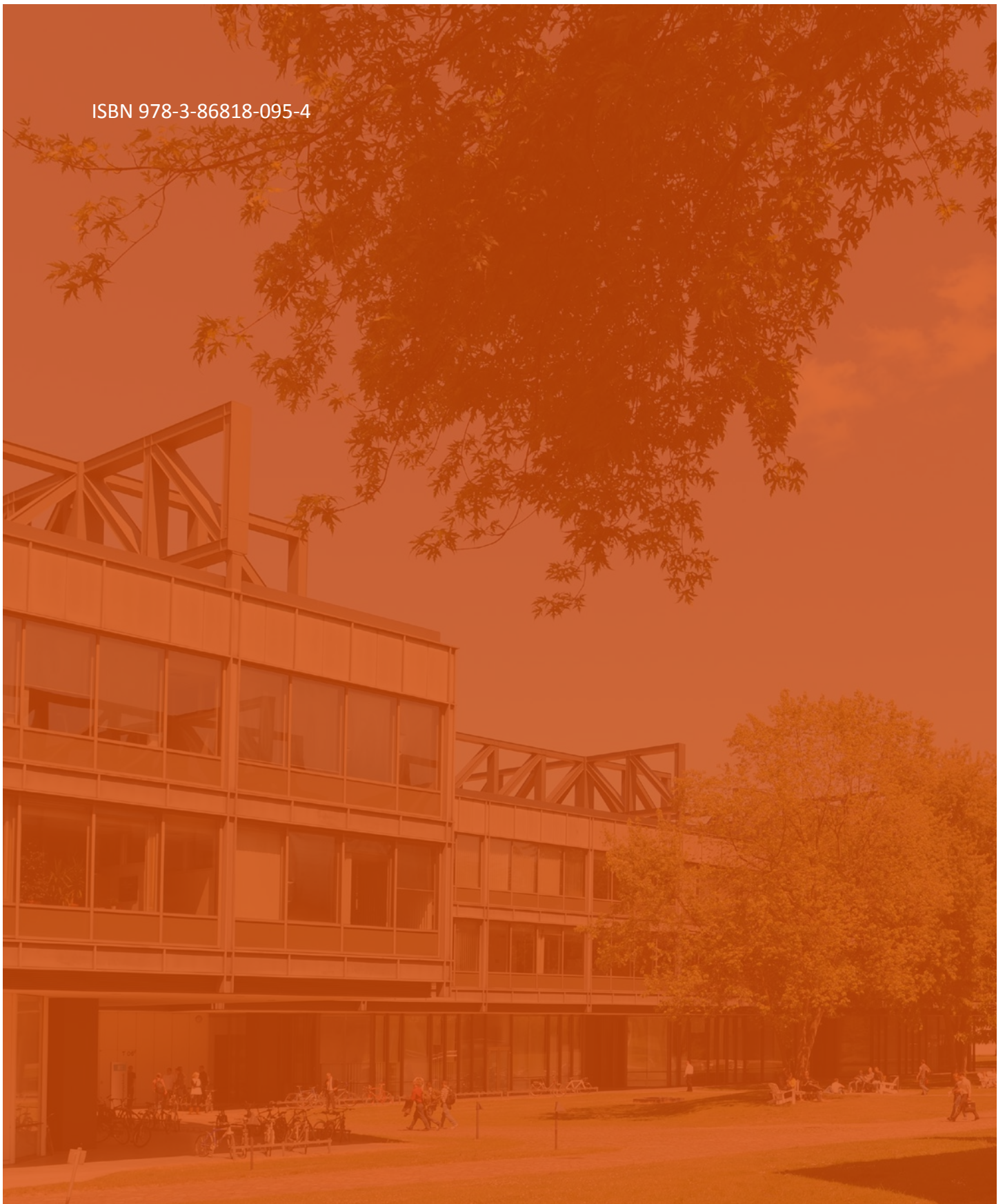


Abbildung 6.66: Entwicklung der Lade-Wirkleistungskurve bei steigendem Anteil an Wasserstoffbussen am Busbetriebshof Wandsbek





ISBN 978-3-86818-095-4



Metastudie: Anforderungen an das Stromnetz durch Elektromobilität, insbesondere Elektrobusse, in Hamburg  
9. Dezember 2016 · Hamburg · Helmut-Schmidt-Universität · [www.hsu-hh.de/ees](http://www.hsu-hh.de/ees)

---