
Metastudie Elektromobilität:

**ANFORDERUNGEN AN DAS STROMNETZ DURCH
ELEKTROMOBILITÄT, INSBESONDERE
ELEKTROBUSSE, IN HAMBURG**

Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Im Auftrag und unter Mitwirkung von:



Veröffentlichung und Download



Autoren

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

Download

<http://edoc.sub.uni-hamburg.de/hsu/volltexte/2017/3156>

Randbedingungen

Politisch forcierte Umstellung des Verkehrs auf emissionsfreie Antriebe

- Senkung der Treibhausgasemissionen um mind. 55 % bis 2030¹
- Einsatz alternativer Versorgungstechnologien: Batterie oder Wasserstoff

Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur in Hamburg

- Installation von ca. 600 Ladepunkten² bis Herbst 2017 durch Stromnetz Hamburg

Systematische Umstellung der Busbeschaffung

- Ab 2020 werden durch die HOCHBAHN und VHH nur noch Busse mit emissionsfreien Antrieben angeschafft³

¹ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/4_tab_ziele-bundesreg_2016-10-07.pdf

² <https://www.stromnetz.hamburg/ueber-uns/innovationen/e-mobility/>

³ <http://hamburg.nahverkehraktuell.de/2017/05/01/rot-gruener-senat-ueber-1-500-elektrobusse-bis-2030/>

Aufgabenstellung und Ziel der Untersuchung

Ermittlung künftiger Anforderungen an die Netzentwicklung durch Elektromobilität in den Bereichen ÖPNV, Gewerbe und Privatfahrzeuge

- Entwicklungskorridor für die Jahre 2020, 2025 und 2030
- Auslegung auf die minimalen, mittleren und maximalen Anforderungen
- Vergleich mit Umspannwerksreserven (UW-Reserven) und Identifizierung von Engpässen
- Handlungsempfehlungen

Analyse der Auswirkungen auf die Energieversorgungsnetze und die Sicherstellung des Busbetriebs bei einer Umstellung des ÖPNV auf Elektrobusse

- Ableitung benötigter Anschlusskapazitäten bei einer Umstellung auf Elektrobusse
- Einsparpotenzial bei Anschlusskapazitäten durch Nutzung von Wasserstoffbussen
- Bewertung von Batteriekapazitäten und Ladeleistungen
- Auswirkungen auf die zeitliche Bindung von Elektrobussen
- Abschätzung des Gesamtenergiebedarfs
- Handlungsempfehlungen

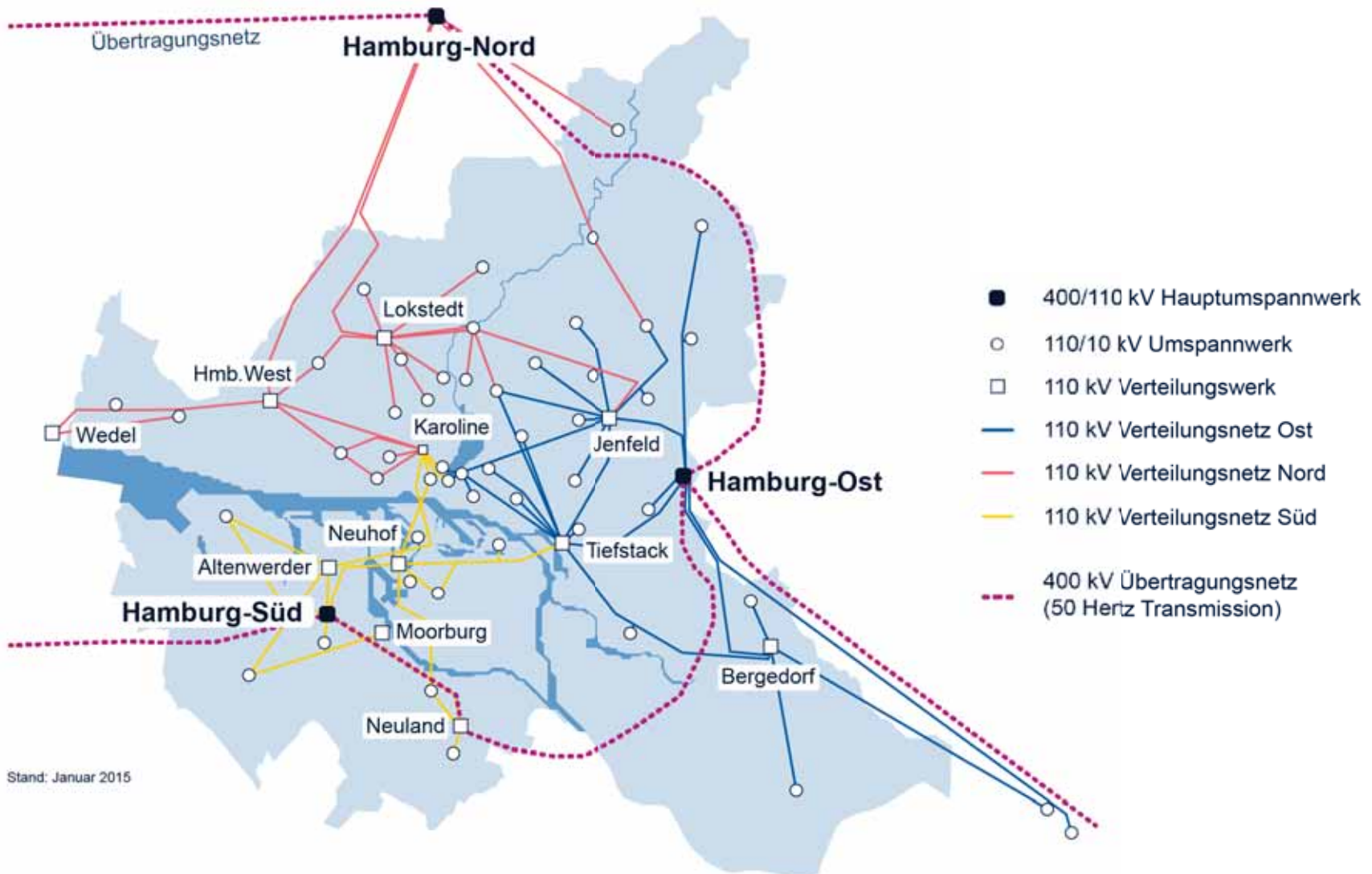
Teil 1

Ermittlung künftiger Anforderungen an die
Netzentwicklung durch Elektromobilität in den
Bereichen ÖPNV, Gewerbe und Privatfahrzeuge



Aufbau des Verteilnetzes in Hamburg

D. Schulz



Umspannwerksreserven in Hamburg

D. Schulz

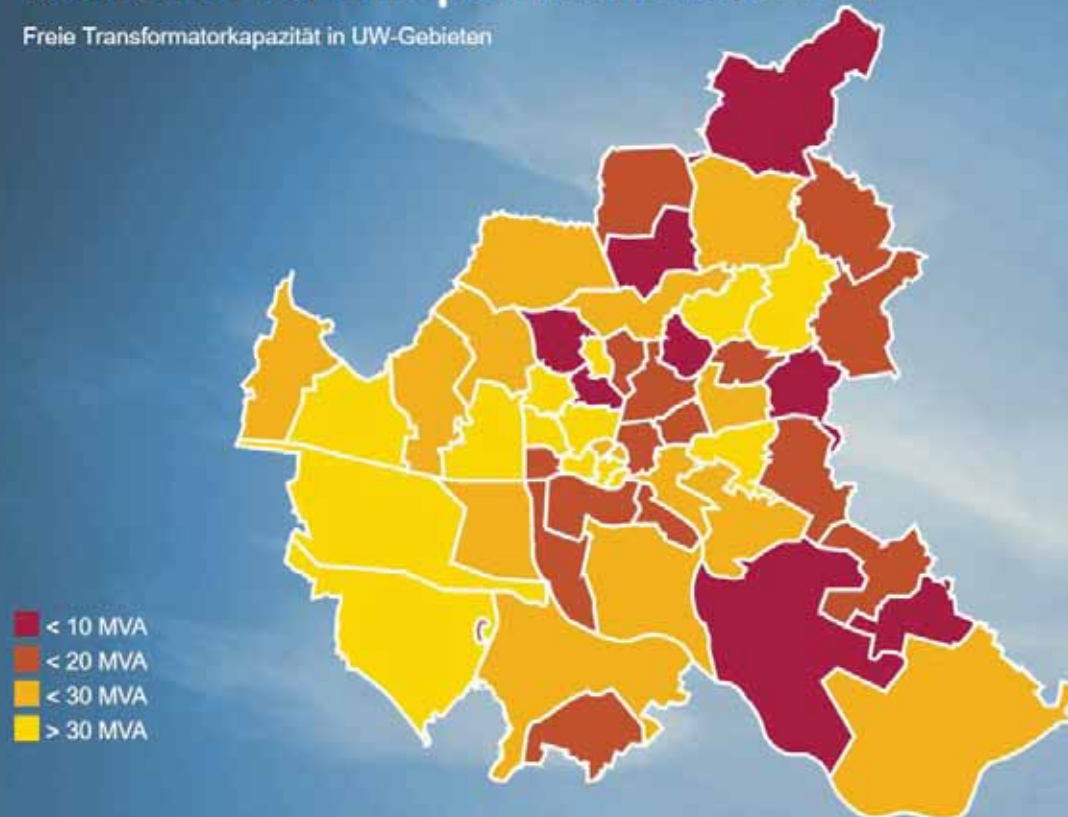
Energieportal Hamburg



Zubau regenerativer Energie Stromwetter Schulen **UW-Reserven** Information

Übersicht der Umspannwerksreserven

Freie Transformatorkapazität in UW-Gebieten



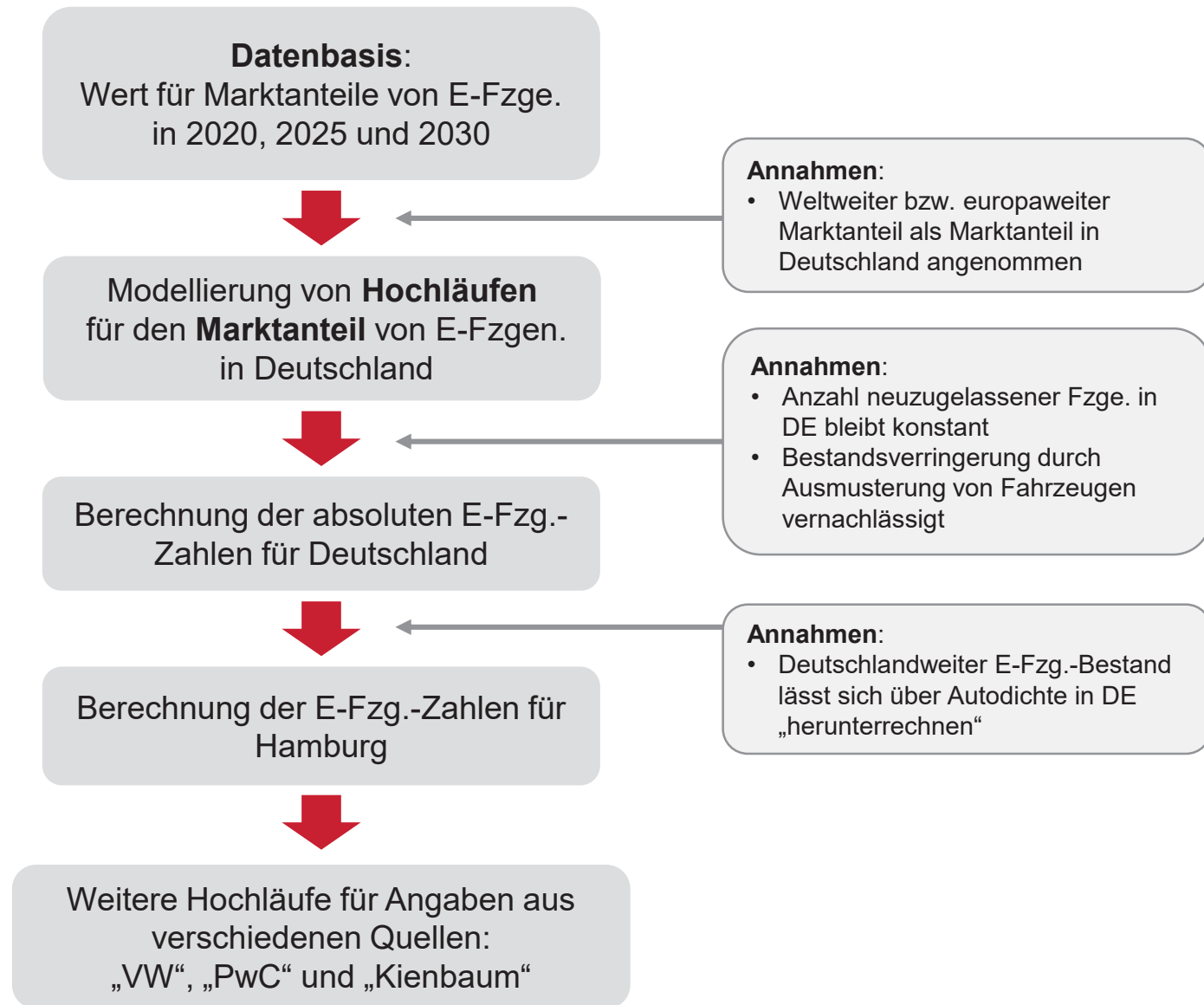
Große Stadtentwicklungsprojekte oder Industrieansiedlungen erfordern eine intelligente Netzplanung. Gibt es Leistungsreserven in dem jeweiligen Gebiet oder muss die Infrastruktur ausgebaut werden? Könnte die Ansiedlung des Kunden in einem anderen Stadtteil schneller und kostengünstiger erfolgen? Fragen, die sich Stadtplaner, große Industriekunden und wir - die Stromnetz Hamburg - gemeinsam stellen.

Für eine erste Einschätzung, ob das gewünschte Stadtgebiet über die nötigen Leistungsreserven verfügt, hilft ein Blick auf die Übersicht der Umspannwerksreserven. Diese Übersichtskarte wird jährlich aktualisiert und zeigt die Leistungsreserven des Hochspannungsnetzes.

Nutzen Sie die Leistungsreserven, können zeit- und aufwendige Netzausbaumaßnahmen im Hochspannungsnetz vermieden werden – eine schnelle Anbindung an unser Netz ist gewährleistet. Ist ein Anschluss an das Netz in einer Region gewünscht, die nicht über die Leistungsreserve verfügt – kein Problem! Selbstverständlich kommen wir unserer Aufgabe zur Netzanbindung nach.

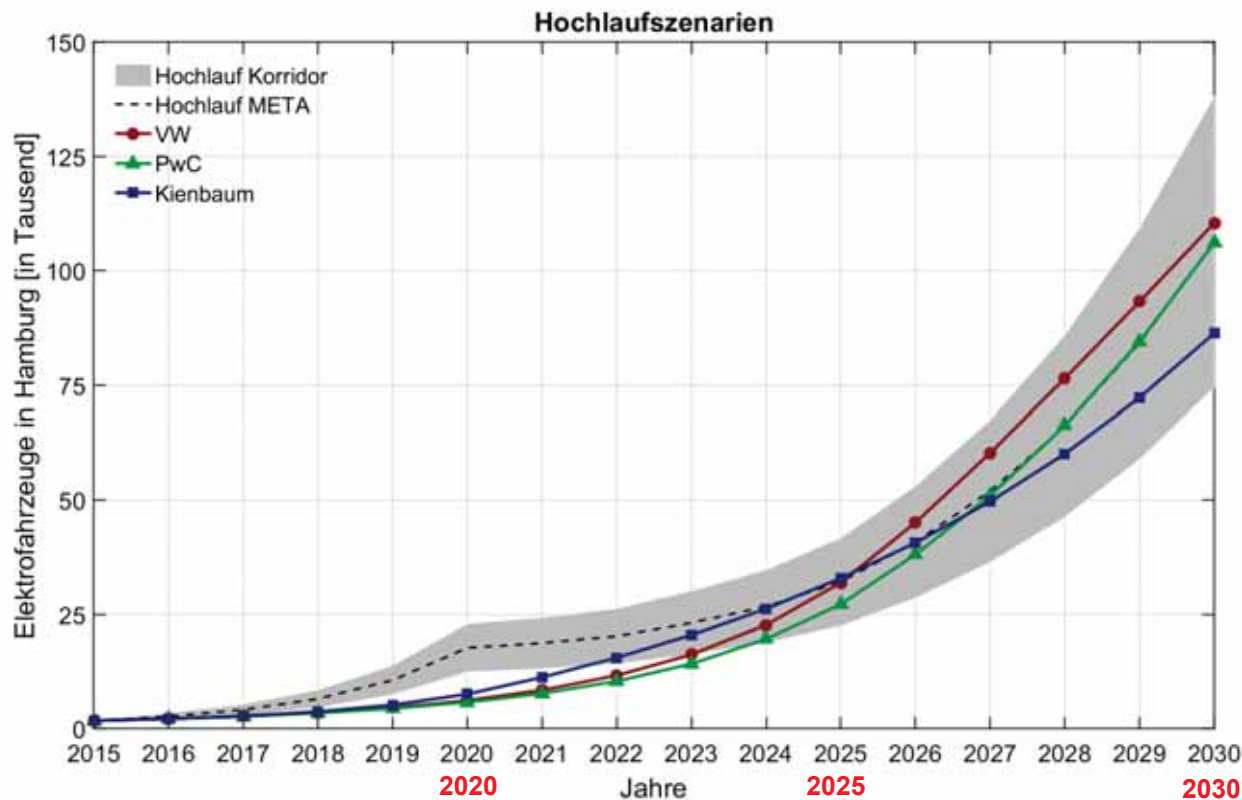
Elektrofahrzeug-Hochlauf in Hamburg

Methodik zur Bestimmung der Hochläufe für Hamburg



Elektrofahrzeug-Hochlauf in Hamburg

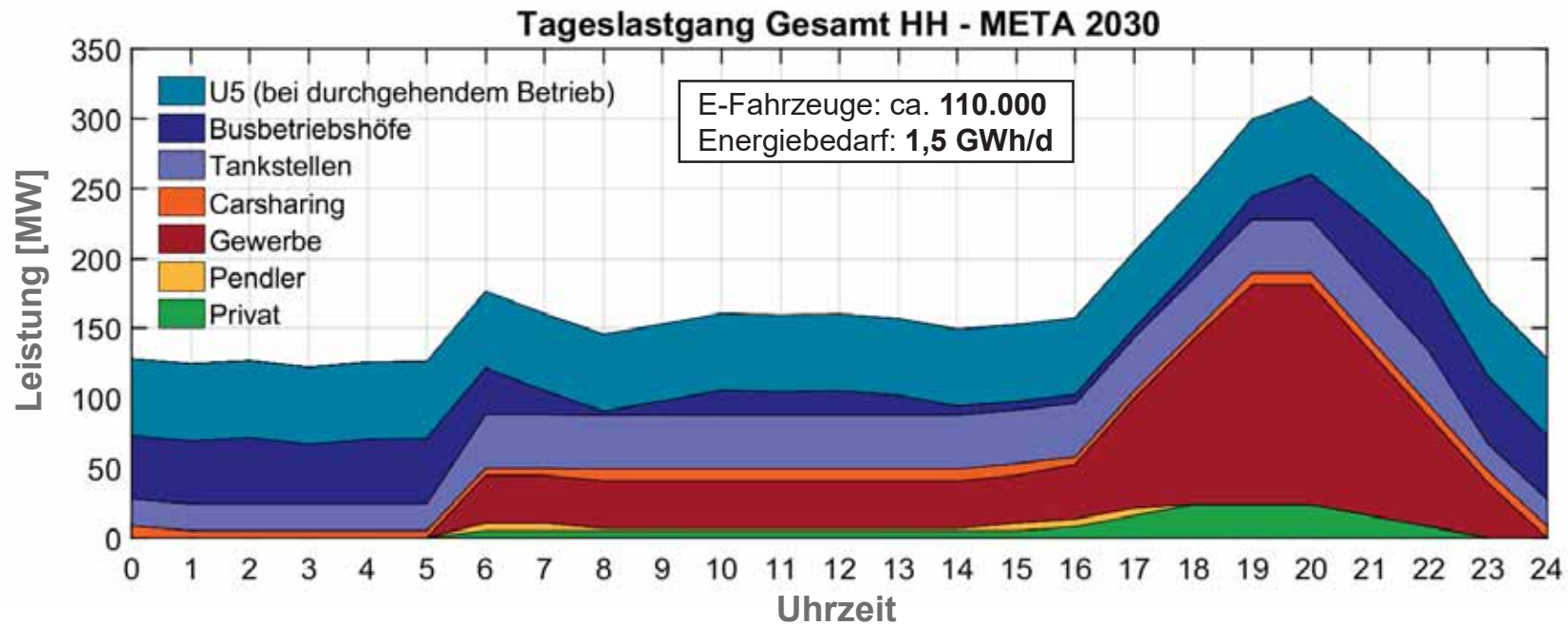
Hochläufe verschiedener Studien und Angaben



- Modellierung des Hochlaufes von Elektrofahrzeugen in Hamburg mithilfe von Angaben aus Wirtschaft und Automobilindustrie
- Die modellierten Hochläufe weichen nur gering vom Hochlauf „Metastudie“ ab
- Hochlauf „Metastudie“ und minimaler bzw. maximaler Korridor ($\pm 30\%$ von „Metastudie“) als Sensitivität zur Abschätzung der Auswirkungen auf das Netz definiert

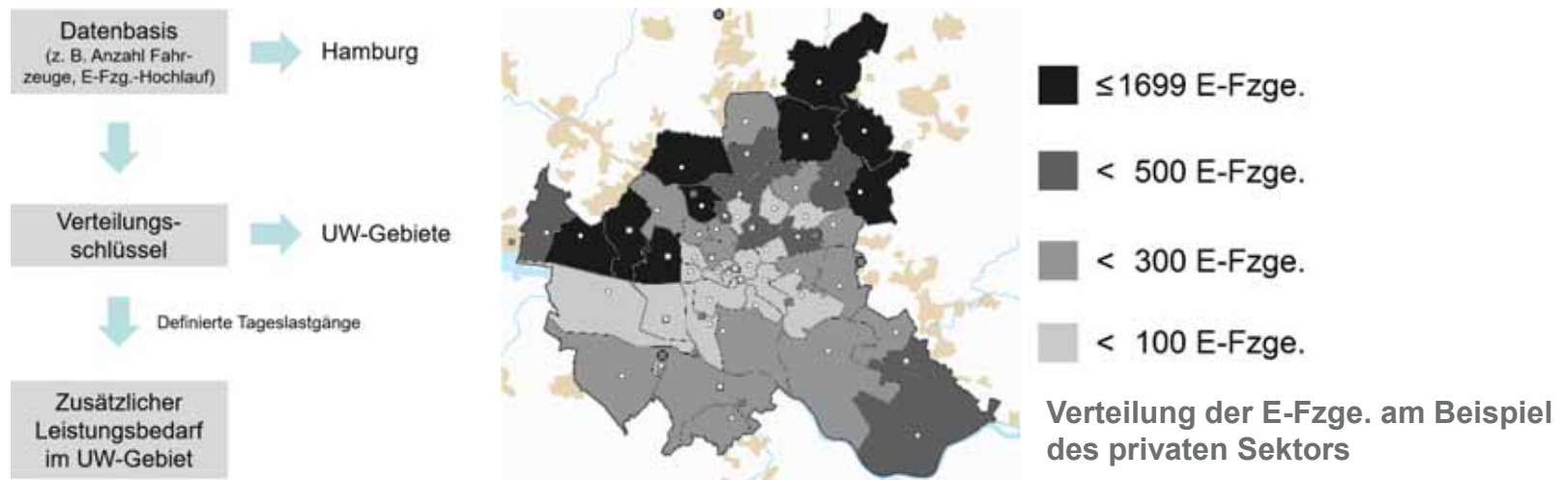
Tageslastgang durch Elektromobilität

Szenario „META“ 2030



- Definition von Sektor-spezifischen Tageslastgängen in Abhängigkeit vom Fahr- und Parkverhalten
- Leistungsbezug mit maximaler Ladesäulenleistung
- Berücksichtigung von anteiliger Schnellladung (150 kW)
- Berücksichtigung von Tag- und Nachtladung
- Annahme: Ohne ein Lademanagement ergibt sich eine Lastspitze in den frühen Abendstunden

Methodik zur Bestimmung zusätzlicher Leistungsbedarfe in den UW-Gebieten



Basis der Verteilungsschlüssel der einzelnen Sektoren:

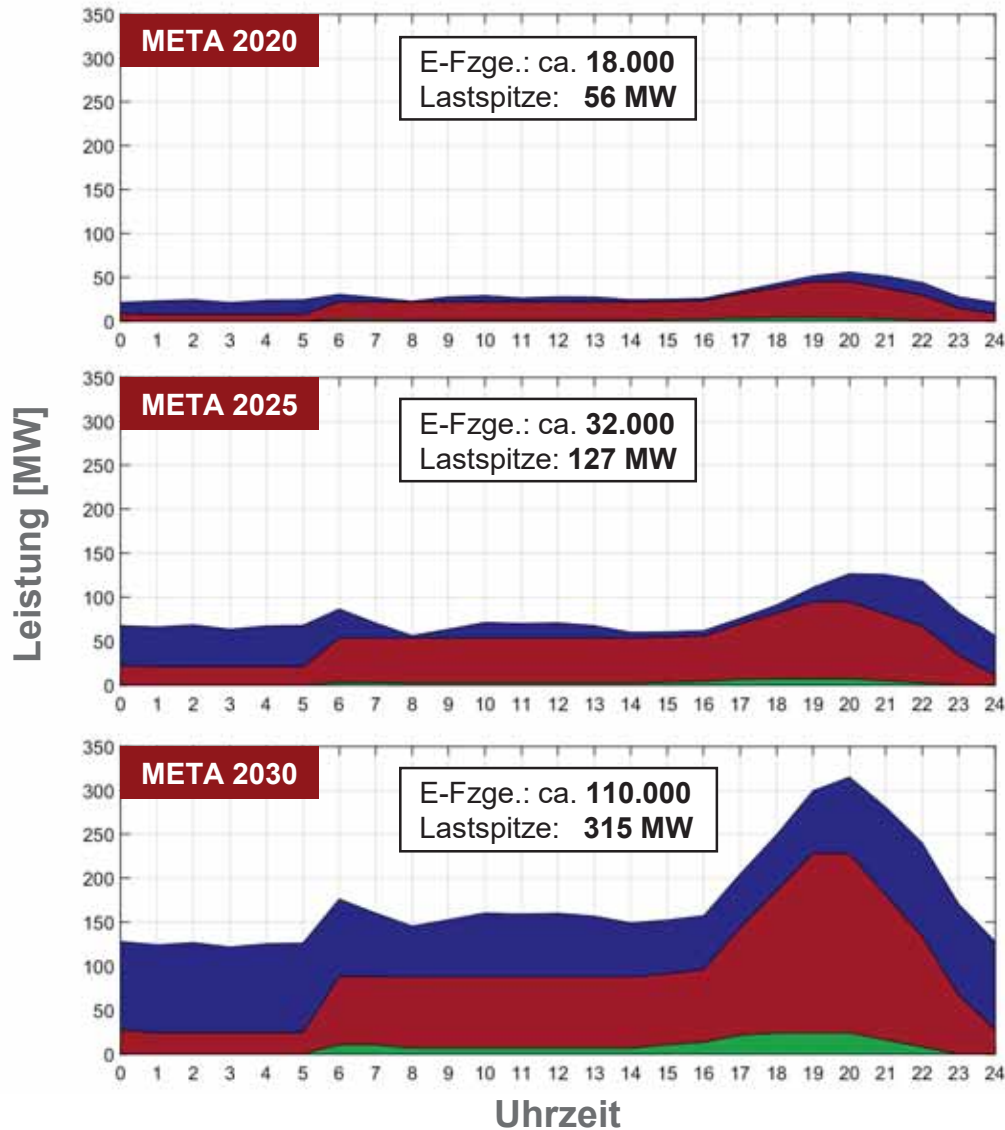
- **Private Fzge.:** Einkommen, Anzahl der Ein- und Zweifamilienhäuser und gemeldete private Fzge. in den Stadtgebieten
- **Gewerbliche & kommunale Flotten, Pendler:** Gemeldete nichtprivate Fzge. in den PLZ-Gebieten
- **Carsharing:** Heutiges Geschäftsgebiet von Car2Go
- **Tankstellen:** Standorte der 5 größten Tankstellenketten
- **ÖPNV:** Standorte der Busbetriebshöfe und der geplanten U5-Unterwerke

Nur Elektromobilität betrachtet ➔ die Entwicklung weiterer Sektoren kann:

- einen zeitlich früheren Handlungsbedarf und
- den Ausbau weiterer Umspannwerke nach sich ziehen.

Ergebnisse

Tageslastgang in Hamburg – Szenario „META“

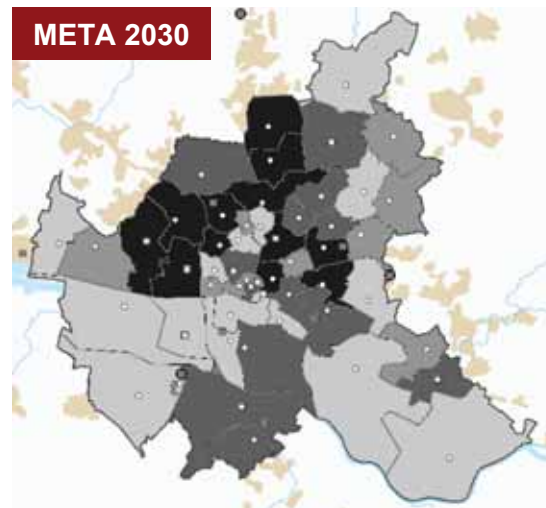
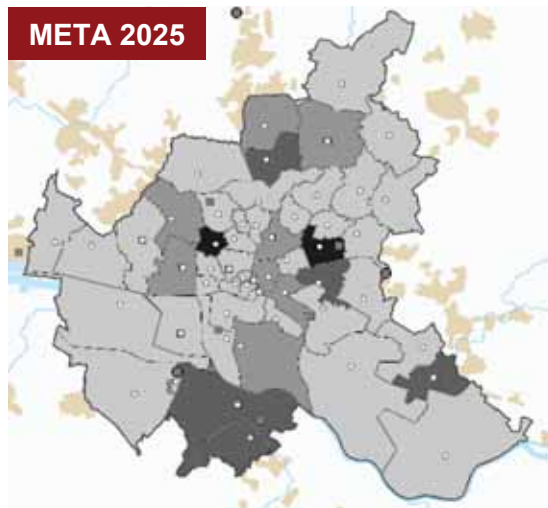


Ergebnis:
Größter Anteil der zusätzlichen Last durch den Bereich „**Gewerbe**“

Bereich	Sektoren
Privat	In HH Wohnende, Pendler
Gewerbe	Gewerbl. & kommunale Flotten, Carsharing, Tankstellen
ÖPNV	HOCHBAHN-Busbetriebshöfe, VHH-Busbetriebshof, U5 (ab 2030)

Ergebnisse

Zusätzliche Lasten – Szenario „META“



Legende

● 380/110-kV-Umspannwerk

■ 110-kV-Schaltanlage

○ 110 bzw. 25/10-kV-Umspannwerk

■ < 18,3 MVA

■ < 10 MVA

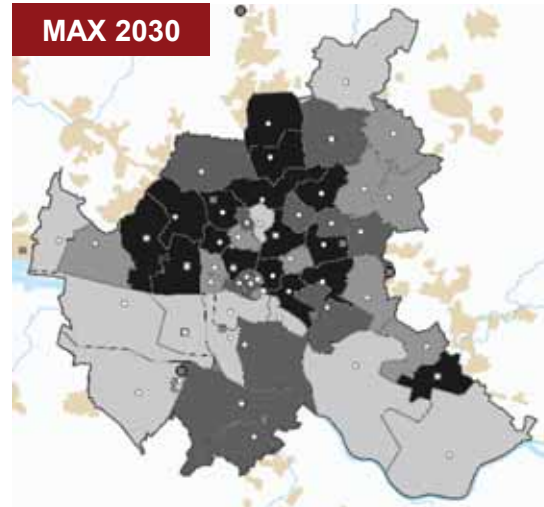
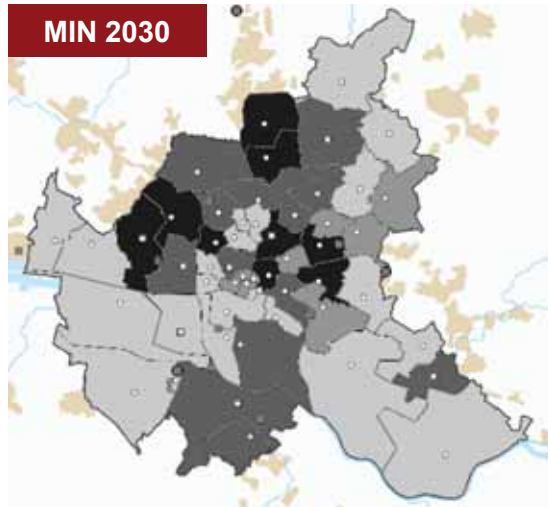
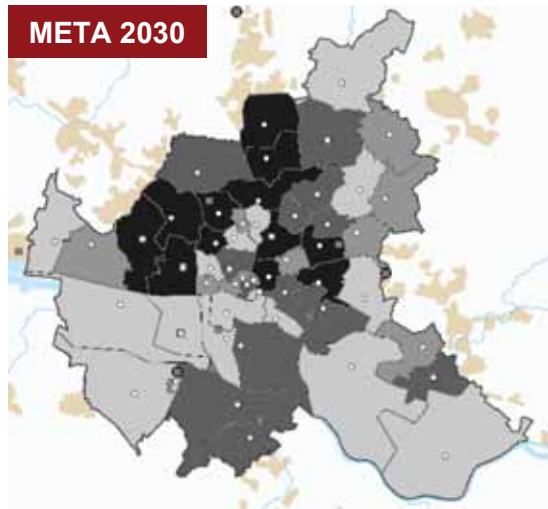
■ < 5 MVA

■ < 3 MVA

- Umspannungsgebiete (UW-Gebiete) mit Busbetriebshöfen oder U5-Unterwerke besonders belastet

Ergebnisse

Zusätzliche Lasten – Szenarienvergleich 2030



Legende

● 380/110-kV-Umspannwerk

■ 110-kV-Schaltanlage

○ 110 bzw. 25/10-kV-Umspannwerk

■ < 18,3 MVA

■ < 10 MVA

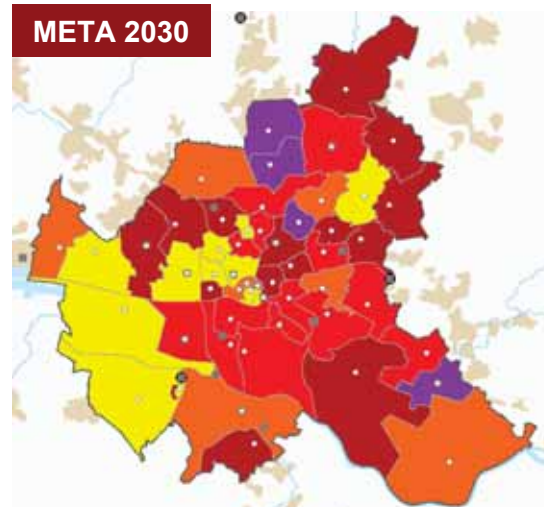
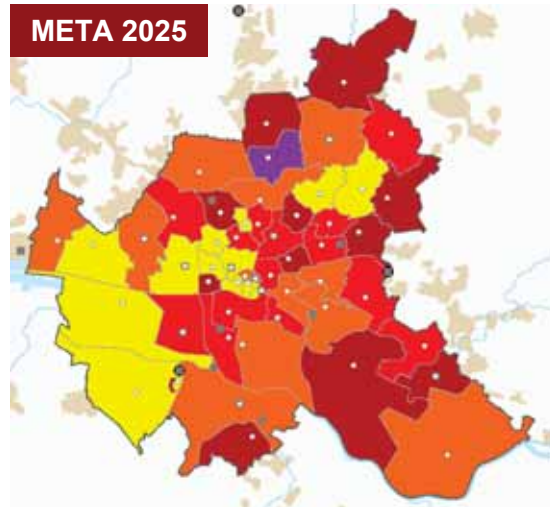
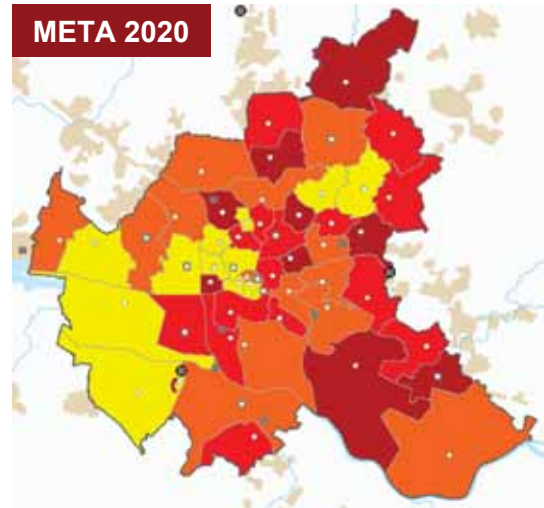
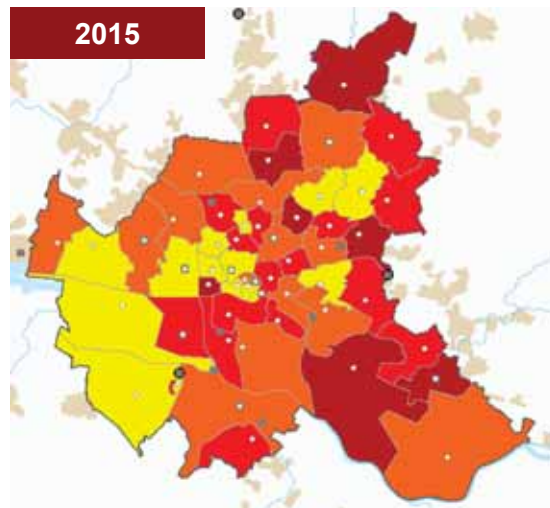
■ < 5 MVA

■ < 3 MVA

- Zusätzlicher Leistungsbedarf stark abhängig vom Hochlauf-Szenario

Ergebnisse

Resultierende UW-Reserven – Szenario „META“



Legende

- 380/110-kV-Umspannwerk
- 110-kV-Schaltanlage
- 110 bzw. 25/10-kV-Umspannwerk

Freie Transformorkapazität

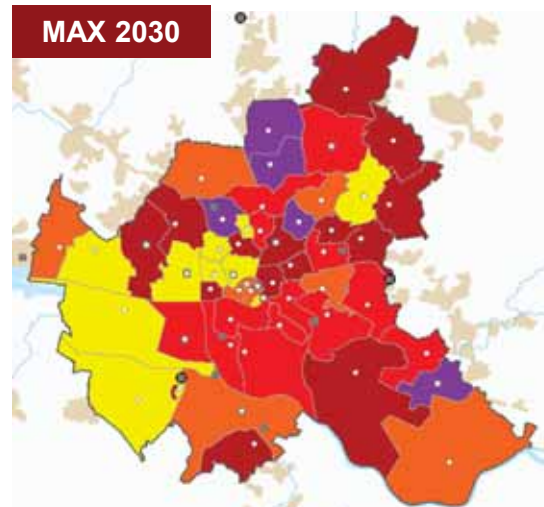
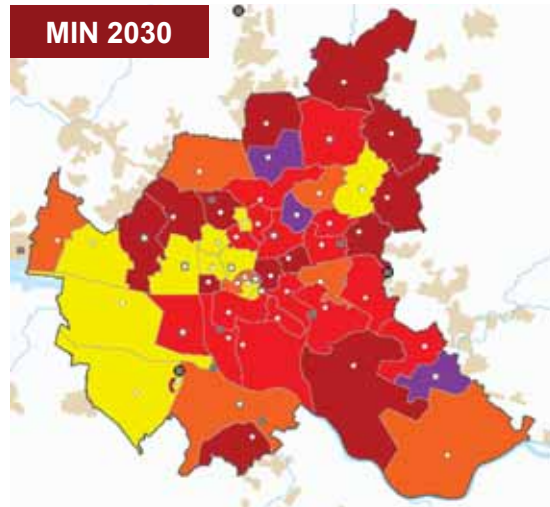
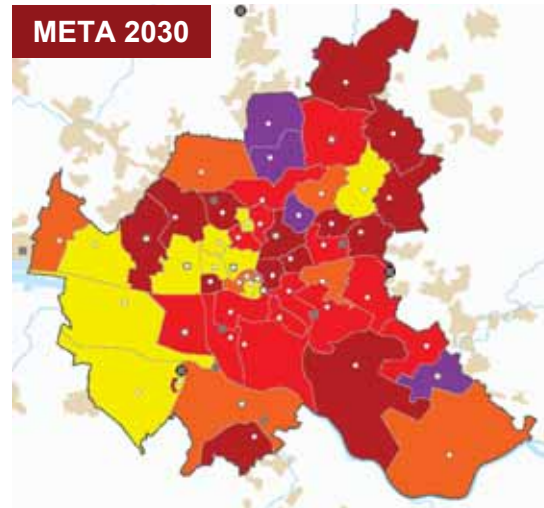
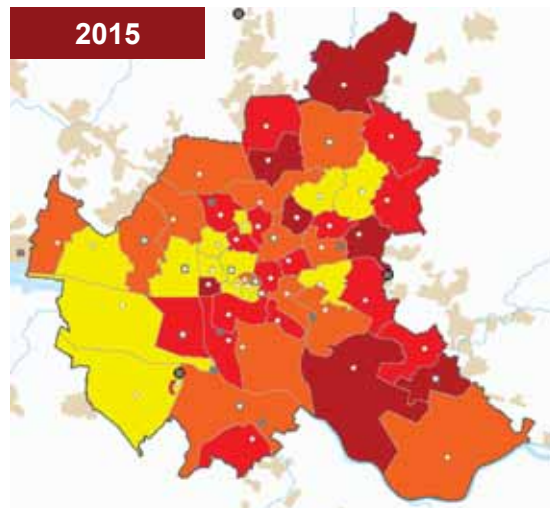
- < 0 MVA
- < 10 MVA
- < 20 MVA
- < 30 MVA
- ≥ 30 MVA

UW Gesamtanzahl: 53

- Heutige Reserven in den meisten Fällen noch ausreichend (nur E-Mobilität betrachtet); ein kritisches UW-Gebiet 2025, vier kritische UW-Gebiete 2030

Ergebnisse

Resultierende UW-Reserven – Szenarienvergleich 2030



Legende

● 380/110-kV-Umspannwerk

■ 110-kV-Schaltanlage

○ 110 bzw. 25/10-kV-Umspannwerk

Freie Transformatorkapazität

■ < 0 MVA

■ < 10 MVA

■ < 20 MVA

■ < 30 MVA

■ ≥ 30 MVA

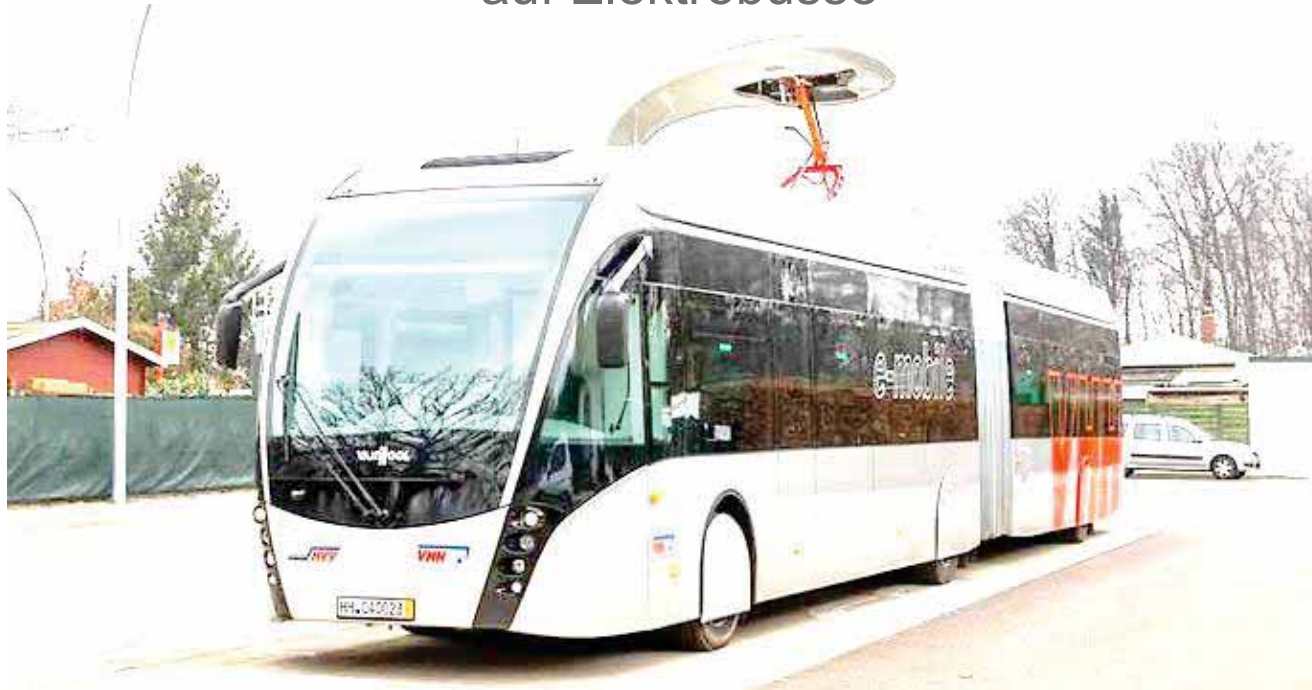
- Ein kritisches UW-Gebiet weniger im MIN-Szenario
- Ein kritisches UW-Gebiet mehr im MAX-Szenario

Zusammenfassung & Handlungsempfehlungen (Teil 1)

1. Im Szenario „META“ werden die **Reserven** von
 - UW Bergedorf,
 - UW Hellbrook,
 - UW Fuhlsbüttel und
 - UW Langenhorn **überschritten**
2. **Beobachtung** der Entwicklung der Elektromobilität in Hamburg
 - Ausbau der Umspannwerke bei absehbarem Handlungsbedarf
3. **Kooperationen** mit Stromhändlern und Besitzern von größeren E-Fzg.-Flotten für Anreize zur Lastverschiebung durch **Lademanagement**
4. **Vereinbarungen** mit Städten und Kommunen zu Ladesäulenanschlüssen, insb. privaten Schnellladesäulen
 - Im Vordergrund steht die Nutzung vorhandener leistungsstarker Ladeknoten an z. B. Tankstellen; ein dezentraler Netzausbau zur flächendeckenden Bereitstellung von (privaten) Schnellladesäulen ist ökonomisch nicht sinnvoll

Teil 2

Analyse der Auswirkungen auf die
Energieversorgungsnetze und die Sicherstellung
des Busbetriebs bei einer Umstellung des ÖPNVs
auf Elektrobusse



Umspannwerksreserven in Hamburg

D. Schulz

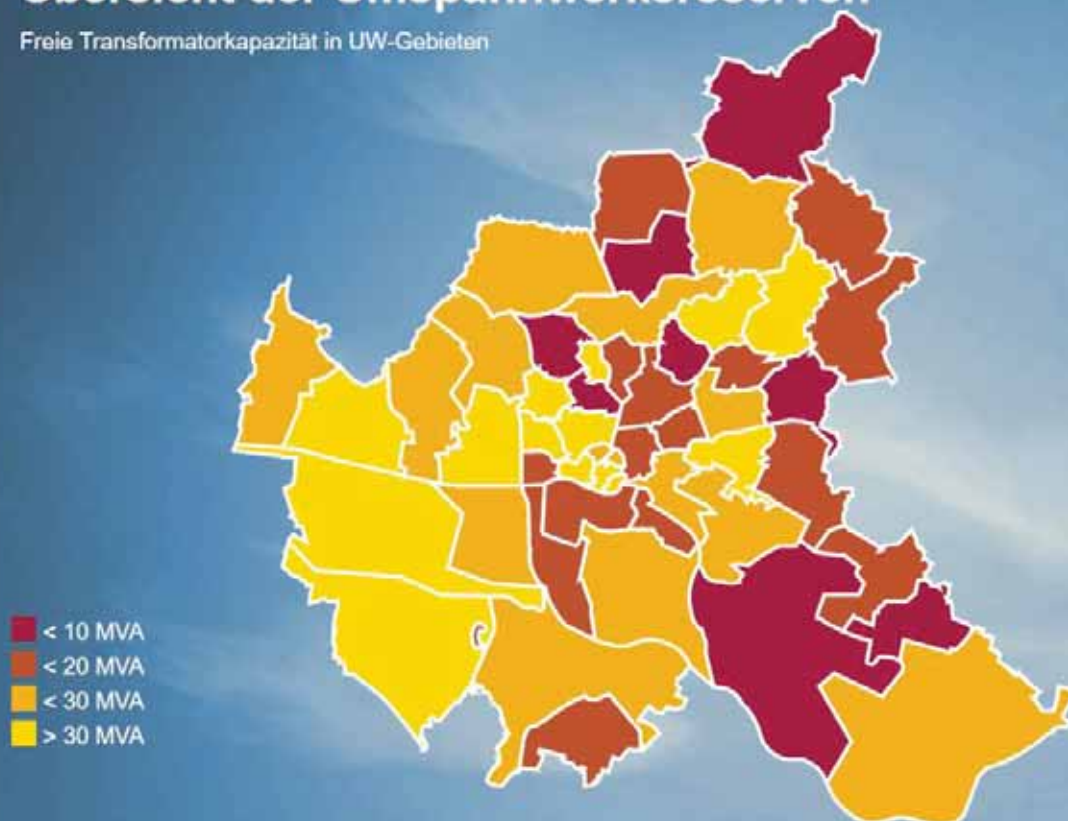
Energieportal Hamburg



Zubau regenerativer Energie Stromwetter Schulen **UW-Reserven** Information

Übersicht der Umspannwerksreserven

Freie TransformatorKapazität in UW-Gebieten

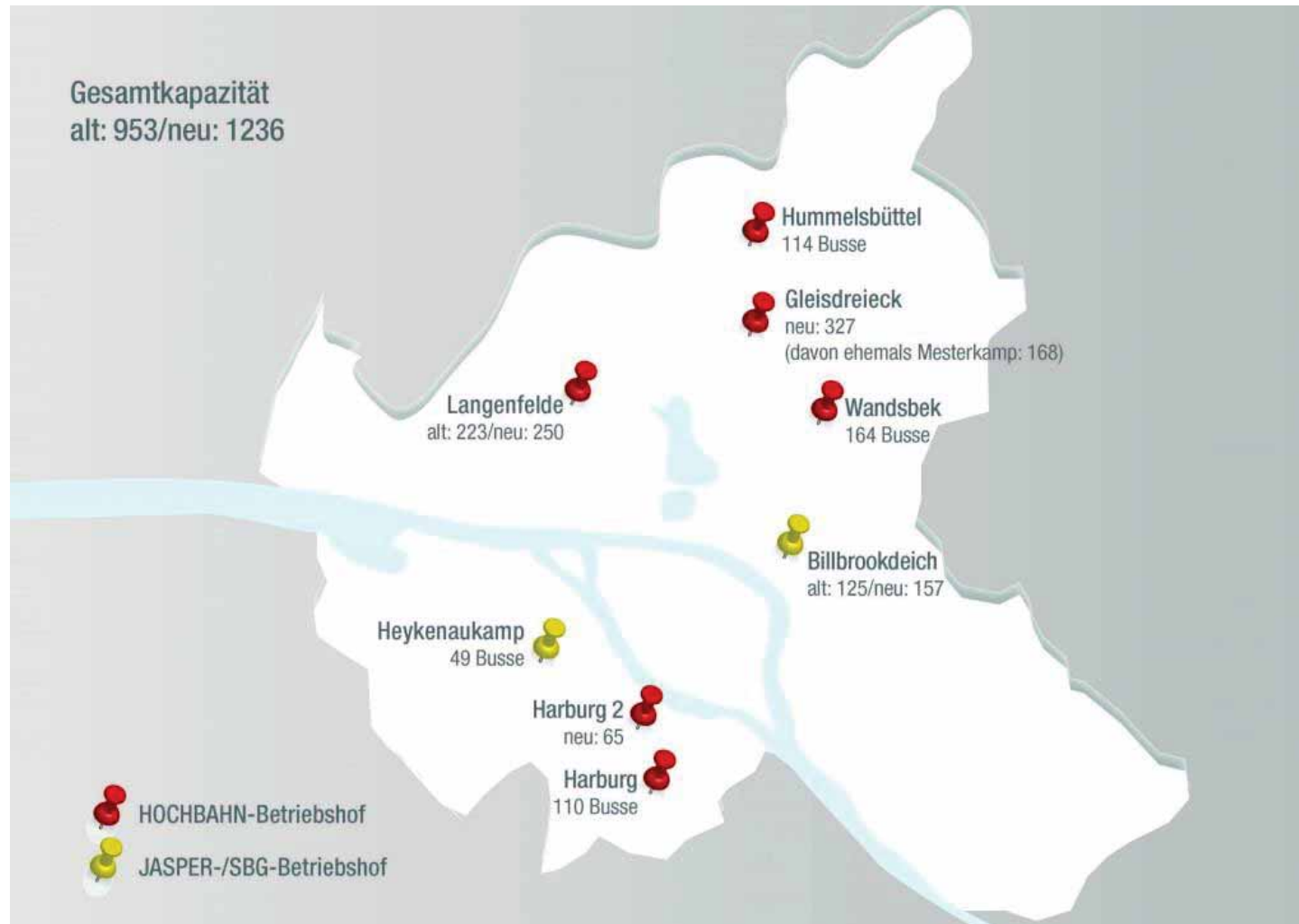


Große Stadtentwicklungsprojekte oder Industrieansiedlungen erfordern eine intelligente Netzplanung. Gibt es Leistungsreserven in dem jeweiligen Gebiet oder muss die Infrastruktur ausgebaut werden? Könnte die Ansiedlung des Kunden in einem anderen Stadtteil schneller und kostengünstiger erfolgen? Fragen, die sich Stadtplaner, große Industriekunden und wir - die Stromnetz Hamburg - gemeinsam stellen.

Für eine erste Einschätzung, ob das gewünschte Stadtgebiet über die nötigen Leistungsreserven verfügt, hilft ein Blick auf die Übersicht der Umspannwerksreserven. Diese Übersichtskarte wird jährlich aktualisiert und zeigt die Leistungsreserven des Hochspannungsnetzes.

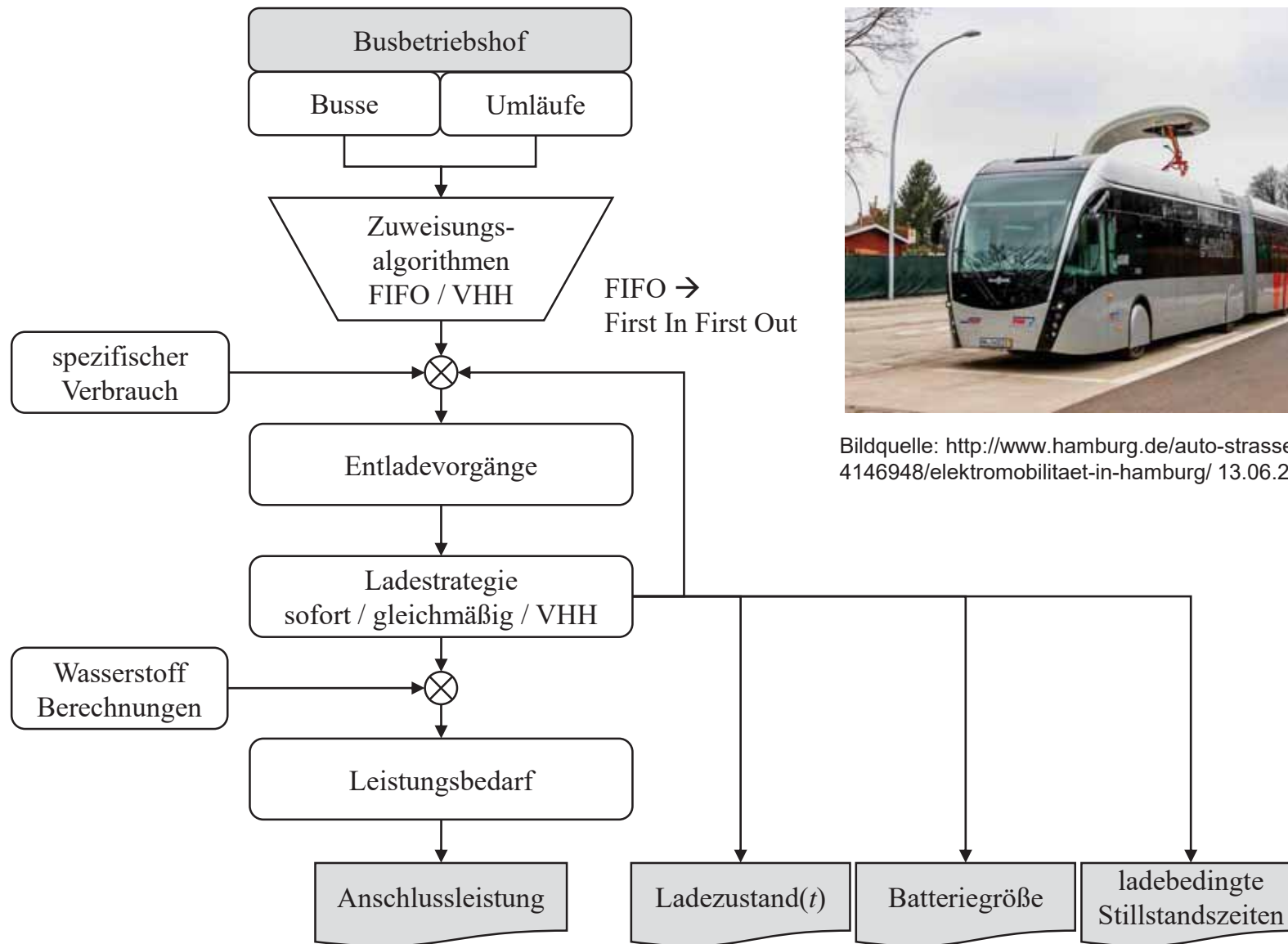
Nutzen Sie die Leistungsreserven, können zeit- aufwendige Netzausbaumaßnahmen im Hochspannungsnetz vermieden werden – eine schnelle Anbindung an unser Netz ist gewährleistet. Ist ein Anschluss an das Netz in einer Region gewünscht, die nicht über die Leistungsreserve verfügt – kein Problem! Selbstverständlich kommen wir unserer Aufgabe zur Netzanbindung nach.

Heutige und zukünftige Busbetriebshöfe der HOCHBAHN



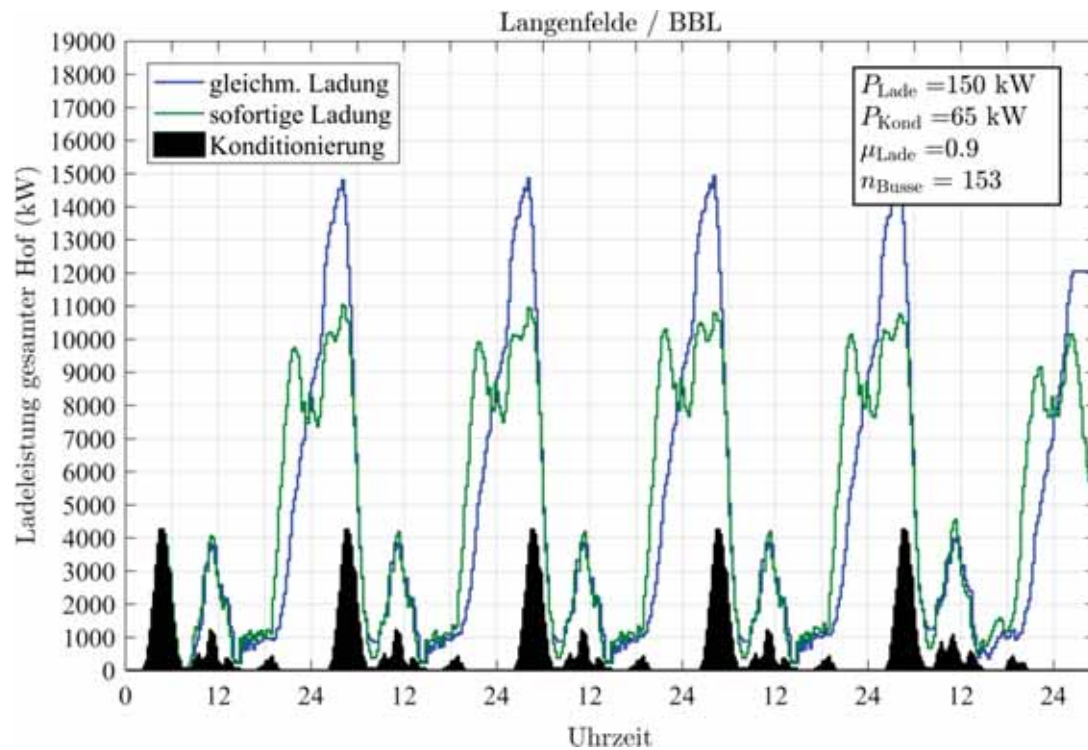
Quelle: <http://dialog.hochbahn.de/bus-in-zukunft/gleisdreieck-busbetriebshof-der-naechsten-generation/>, Zugriff 19.09.2017

Methodik zu Berechnungsszenarien Teil 2



Bildquelle: <http://www.hamburg.de/auto-strasse-hamburg/4146948/elektromobilitaet-in-hamburg/> 13.06.2017

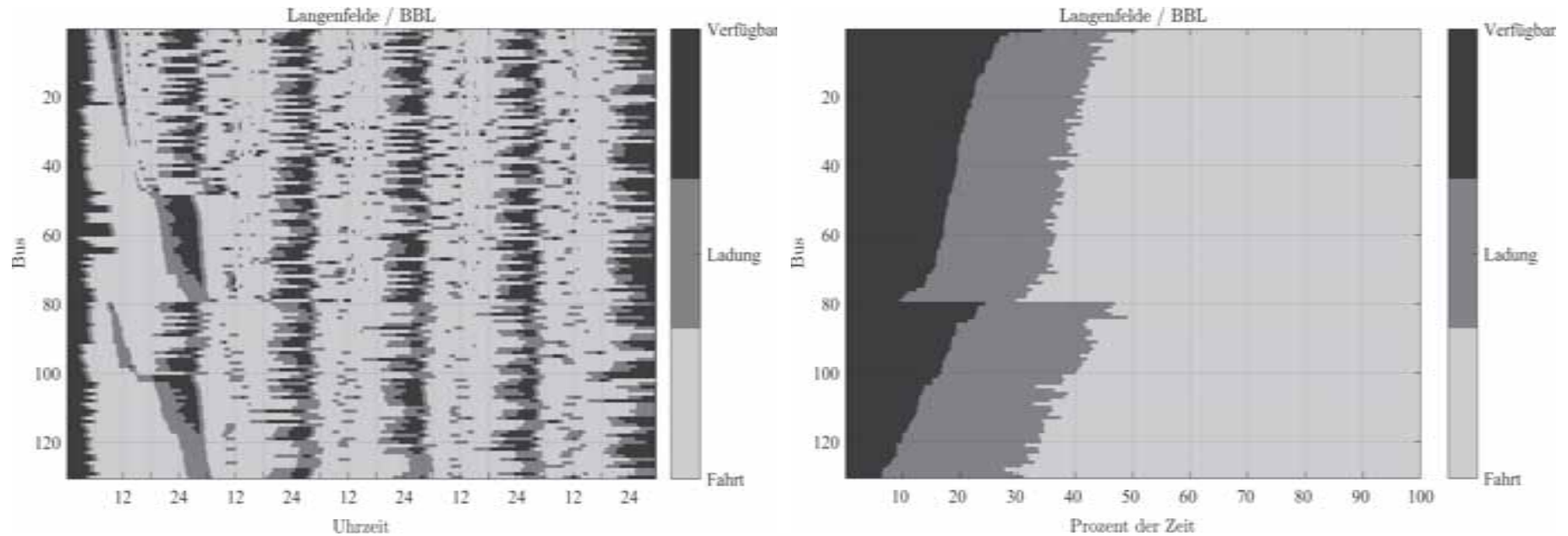
Verlauf der Ladeleistungskurve eines Busbetriebshofes über eine Woche



Bildquelle: <http://www.hamburg.de/auto-strasse-hamburg/4146948/elektromobilitaet-in-hamburg/> 13.06.2017

- Konzept: hauptsächliche Ladung der Busse in den **Nachtstunden**
- In den **Mittagsstunden** können Busse teilweise nachgeladen werden
- Zukünftige Ladekonzepte müssen technische & organisatorische Randbedingungen berücksichtigen
 - Die **Konditionierung** der Busse **überschneidet sich am frühen Morgen** teilweise mit restlichen Ladevorgängen
 - **Gleichmäßige Ladung** der Busse nicht immer besser
 - **Vergleichmäßigungs-Potential** der Ladung zwischen der „Doppelspitze“

Veränderungen in der zeitlichen Bindung der Busse



- Verfügbar bedeutet: auf dem Hof **anwesend**, wird **nicht geladen oder konditioniert**
- Die Zeit, die ein Bus auf dem Hof verfügbar ist, **reduziert sich um 30-70 %**, ca. 5 %-Punkte entfallen auf Konditionierung
- Reduktion der Verfügbarkeit von Bussen durch z.B. Werkstatt, Reinigung, etc. kann **Indikator für Mehrbedarf** an Bussen sein
- Welche Tätigkeiten können **während des Ladens** realisiert werden? Reduktion des Mehrbedarfs?
- Grafik ist ein guter Indikator dafür, ob Busse wieder **voll aufgeladen** werden können, ansonsten geht die Verfügbarkeit gegen Null

Anschlussleistungsbedarf der Busbetriebshöfe in 2030

Hof	Hochrechnung 2015 → 2030	P_{2015} [MW]	S_{2030} [MVA]	Grundlast Hof [MVA]	S_{Σ} [MVA] *	Netz
Billbrook	1	9,3	9,8	0,8	10,7	MS
Harburg 1	0,97	5,5	5,6	0,4	6,0	MS
Harburg 2	1,78	3,2	5,9	0,8	6,7	MS
Hummelsbüttel	0,91	7,3	7,0	1,2	8,2	MS
Langenfelde	1,01	11,0	11,7	1,6	13,3	MS
Gleisdreieck	1,74	8,7	15,9	1,6	17,5	HS
SBG	1	4,4	4,5	0,15	4,6	MS
Wandsbek	0,86	10,4	9,4	0,4	9,8	MS
Bergedorf	1,57	3,6	5,9	0,4	6,4	MS
Glinde	1,54	2,8	4,5	0,4	4,9	MS
Schenefeld	1,06	9,1	10,2	0,63	10,8	MS

- Scheinleistungsbedarf ($\cos\phi=0,95$) S_{Σ} von Billbrook, Harburg 1/2, Hummelsbüttel, SBG, Wandsbek und Bergedorf liegen **unterhalb der Obergrenze** für Mittelspannung (14 MVA)
- Scheinleistungsbedarf S_{Σ} für **Langenfelde bietet kaum Puffer**
 - Optionen: Blindleistungskompensation? Hof und Ladeleistung auf getrennte Anschlüsse?
- Scheinleistungsbedarf S_{Σ} für Gleisdreieck liegt bereits **über der Obergrenze** für die Mittelspannung

* Ohne Berücksichtigung von Werkstattbedarf & Reserven

Anschlussbedingungen und Netzausbau

Betriebshof	UW	Reserve 2020 [MVA]	Reserve 2025 [MVA]	Reserve 2030 [MVA]	S ₂₀₃₀ [MVA]	Netz
Billbrook	Horn	31,7	30,4	28,0	9,8	MS
Harburg 1	Wilstorf	12,0	11,4	9,2	5,6	MS
Harburg 2	Harburg	28,7	27,1	24,6	5,9	MS
Hummelsbüttel	Fuhlsbüttel	7,5	5,1	0,2	7,0	MS
Langenfelde	Eimsbüttel	78,4	67,7	66,9	11,7	MS
Gleisdreieck	Alsterdorf	22,8	21,2	12,0	17,5	HS
SBG	Hausbruch	10,2	10,2	10,2	4,5	MS
Wandsbek	Wandsbek	23,3	22,8	19,8	9,4	MS
Bergedorf	Bergedorf	7,3	6,4	4,4	5,9	MS

- Keine Berücksichtigung der Grundlast des Hofes, des Werkstattbedarfs und der Reserven (nur bei Gleisdreieck), da die Höfe heute schon am Netz sind
- Bei 6 von 9 Busbetriebshöfen reichen die UW-Reserven aus
- Am Busbetriebshof **Hummelsbüttel und Bergedorf** reichen die UW-Reserven ab 2025 nicht mehr aus
- Gleisdreieck wird an Hochspannung angeschlossen

Prüfung des Einsatzes von Wasserstoff-Fahrzeugen

Hintergrund / Ziel:

Kann eine Ergänzung durch Wasserstofffahrzeuge einen eventuellen Netzausbau (zu hohe Anschlussleistung) verhindern oder verzögern?

Verbrauchsdaten der Busse:

Reine Wasserstoffbusse

- Solo: 9 kg/100km
Gelenk: 14 kg/100km
Doppelgelenk: 19 kg/100km

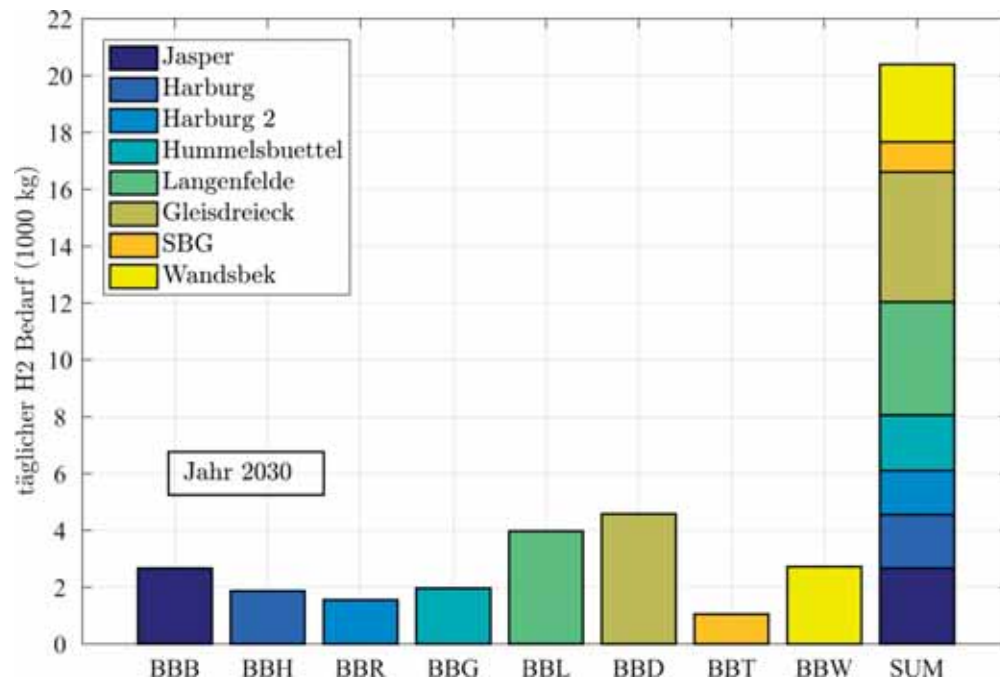
Range Extender Busse (REX-Busse)

- Solo: 3,1 kg/100km
Gelenk: 5,6 kg/100km
Doppelgelenk: nicht betrachtet
- REX fährt zu ~2/3 elektrisch und zu ~1/3 mit Wasserstoff
- 3 REX-Busse \approx 1 Wasserstoffbus + 2 Elektrobusse

Wasserstoff-Varianten:

- Wasserstoff-Erzeugung auf dem Hof
 - pro Elektrolyseur: 2143 kg/Tag, 7,4 MVA
- Wasserstoff-Anlieferung:
 - 0,5 MW (0,65 MVA) von 22-4 Uhr für Infrastruktur
 - Keine elektrische Energie für die Erzeugung benötigt

Prüfung des Einsatzes von Wasserstoff-Fahrzeugen zur Verringerung der Anschlussleistungen

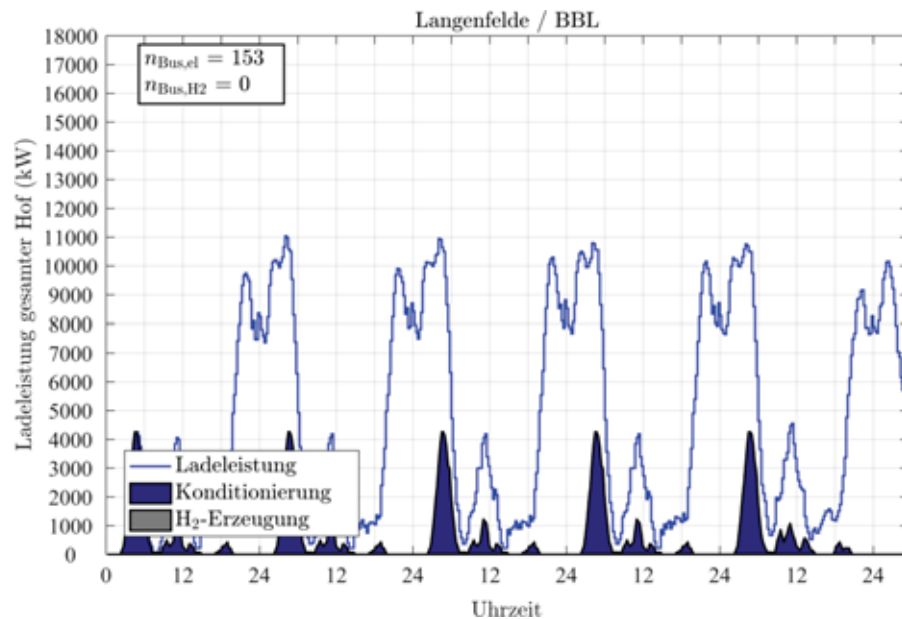


<http://www.hamburg.de/pressearchiv-fhh/1298318/2009-03-24-bsu-emissionsfreie-mobilitaet/>
(Bild: Hochbahn), 13.06.2017

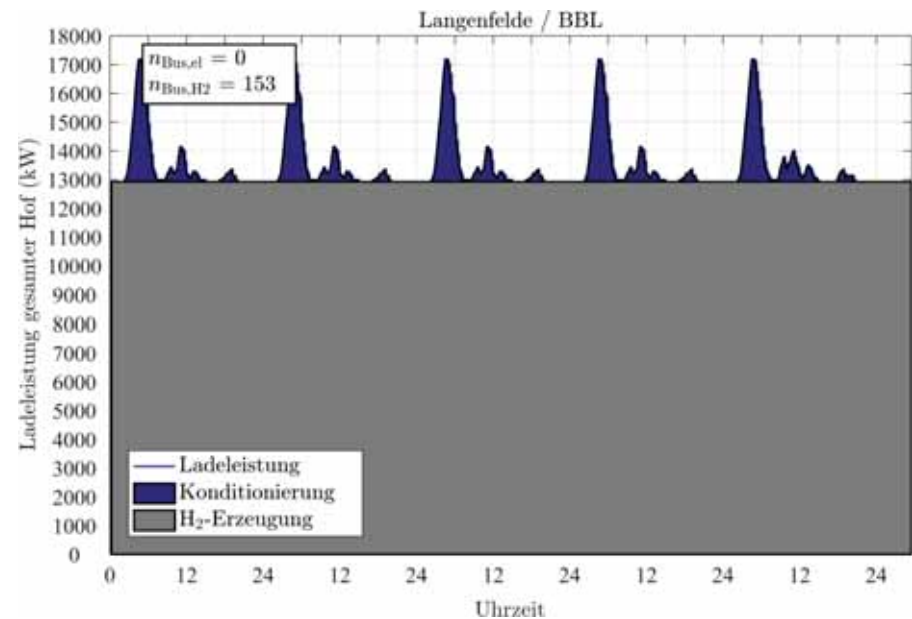
- Gesamtbedarf für 100% Wasserstoffbusse liegt voraussichtlich bei bis zu 21 t/Tag über alle Betriebshöfe
- Annahme: Range Extender Busse fahren zu ~2/3 elektrisch und ~1/3 mit Wasserstoff
- Beim Einsatz von Range Extender Bussen:
 - liegt der Wasserstoff Bedarf bei ca. 7 t/Tag
 - Reduziert sich der elektrische Energiebedarf auf ca. 2/3 des Bedarfs gegenüber dem reinem Batteriebetrieb
 - Sinken die benötigten Anschlussleistungen der Betriebshöfe

Auswirkungen des Einsatzes von Wasserstoffbussen auf die notwendige Anschlussleistung 1/2

0% Wasserstoff-Produktion

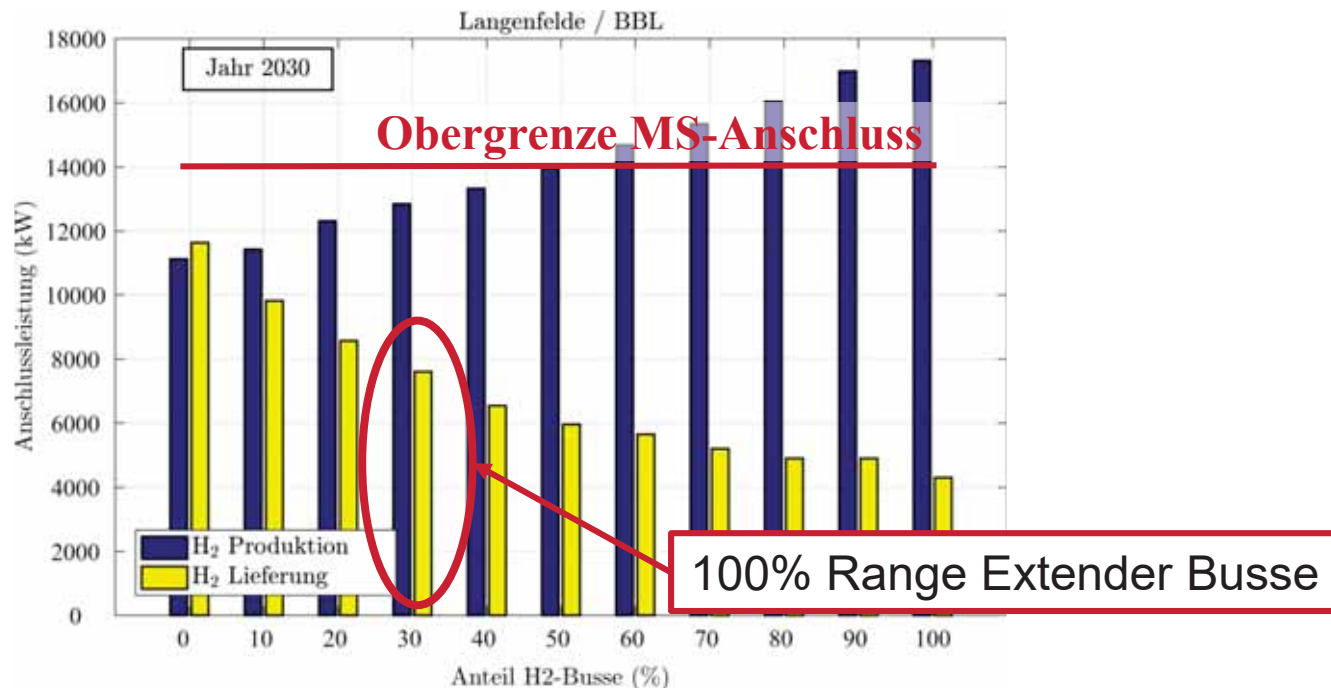


100% Wasserstoff-Produktion



- Wasserstoff-Produktion erhöht den Leistungsbedarf am Busbetriebshof gegenüber alleinigem Einsatz von Elektrobussen
- Vorkonditionierung begrenzt das Potential zur Reduktion der Anschlussleistung
- Nicht-konstante Betriebsweise des Elektrolyseurs könnte die Anschlussleistung reduzieren, ist jedoch betriebsbedingt nur geringfügig möglich

Auswirkungen des Einsatzes von Wasserstoffbussen auf die notwendige Anschlussleistung 2/2



- Wasserstoff-Produktion auf Betriebshof (Elektrolyseur) erhöht Anschlussleistung
- Durch eine Wasserstoff-Anlieferung wird die Anschlussleistung gesenkt
- 100% Range Extender Busse entspricht ca. 30-40% reinen Wasserstoffbussen
 - Anschlussleistung Langenfelde: 11,7 MVA → 8,1 MVA

Veränderung der notwendigen Anschlussleistungen durch den Einsatz von Range Extender Bussen bei Wasserstoff-Lieferung

Busbetriebshof	S ₂₀₃₀ [MVA] 100% Elektro*	S ₂₀₃₀ [MVA] 100% REX (30% H ₂)*	UW-Reserve 2030 [MVA]
Billbrook	9,8	7,2	28,0
Harburg 1	5,6	4,3	9,2
Harburg 2	5,9	4,4	24,6
Hummelsbüttel	7,0	5,4	0,2
Langenfelde	11,7	8,1	66,9
Gleisdreieck	15,9	11,9	12,0
SBG	4,5	4,1	10,2
Wandsbek	9,4	7,0	19,8

- Die Anschlussleistungen der Betriebshöfe könnten durch Range Extender Busse stark reduziert werden
- Die Reduktion reicht nicht aus, um den Ausbau des UW Fuhlsbüttel (Hummelsbüttel) zu verhindern
- Gleisdreieck Sonderfall, weil voraussichtlich Anschluss an Hochspannung direkt möglich

* Ohne Berücksichtigung von Grundlast des Hofes, Werkstattbedarf & Reserven

Handlungsempfehlungen Anschluss der Höfe (Teil 2)

1. Schrittweiser Anschluss fast aller Betriebshöfe an Mittelspannung mit Leistung nach Prognosen für 2030, zzgl. Puffer und Blindleistung
2. Nur Betriebshof Gleisdreieck wird an die Hochspannung angeschlossen
→ keine Reduktion der UW-Reserve auf MS-Ebene
3. Ab ca. 2020 linearer Anstieg von Elektrobussen auf allen BH
4. Zukünftige Absprache HOCHBAHN und Stromnetz Hamburg:
genutzte Leistung < **maximale** Anschlussleistung, falls die UW-Reserven noch nicht ausreichen
5. Bis 2025 ist ein Ausbau nur für das UW Fuhlsbüttel (Hummelsbüttel) und das UW Bergedorf (VHH) nötig
6. Reichweitenproblematik bleibt, folgende Lösungsoptionen sind möglich:
 - a) Überarbeitung der Busumläufe und optimierte Zuweisung
 - b) Einsatz von Wasserstoff-/Range Extender Bussen
 - c) Nachladen auf der Strecke

**Vielen Dank an alle Beteiligten für die
Mitwirkung, vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**

