

Forschung zur Ladeinfrastruktur für Elektrobusse

an Helmut-Schmidt-Universität Hamburg (HSU)



HELMUT SCHMIDT
UNIVERSITÄT

Universität der Bundeswehr Hamburg



mit Beiträgen von Amra Jahic, Mina Eskander und Detlef Schulz



Electrical Power Systems
Distributed Energy Laboratory

DLab
Electrical Power Systems

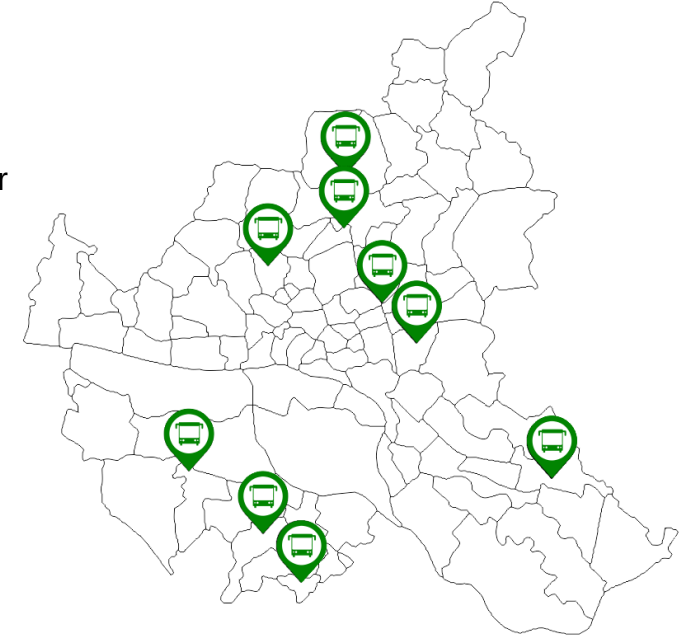
Foto: Pressestelle



Amra Jahic
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Helmut-Schmidt-Universität
amra.jahic@hsu-hh.de

Intelligentes Last- und Lademanagement für elektrische Busbetriebshöfe

- Bus Depot Simulator – Co-Simulationsplattform für die Simulation elektrischer Busbetriebshöfe
- Analyse der Lastprofile auf großen zentralen Busbetriebshöfen
- Auswirkungen des Lastmanagements
- Messungen zur Validierung der Simulationsplattform



Mina Eskander
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Helmut-Schmidt-Universität
mina.eskander@hsu-hh.de

Auslegung und Zuverlässigkeit der elektrischen Busbetriebshöfe

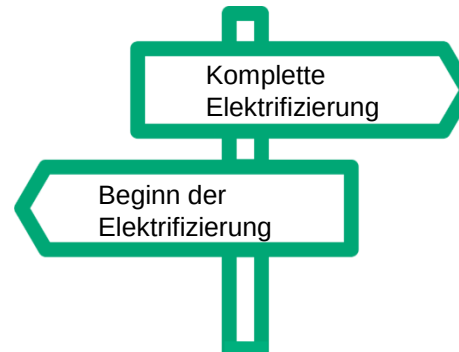
- Infrastrukturkonzepte der Busbetriebshöfe
- Analyse der Übertragbarkeit von beiden Konzepten
- Zuverlässigkeitsanalyse der Ladeinfrastruktur
- Notstromversorgung
- Parkplatz-Zuweisung innerhalb des Depots



Modellierung und Simulation der Ladeinfrastrukturkonzepte

Stand heute

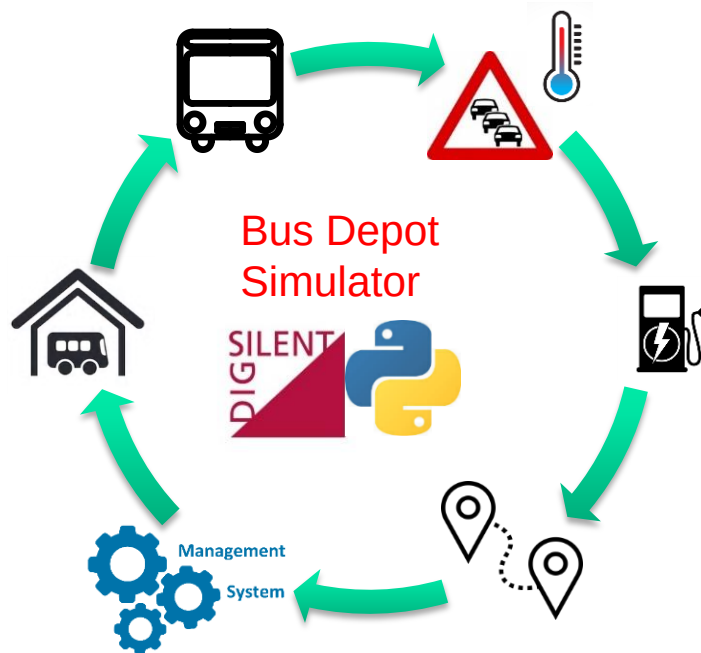
- Beginn der Elektrifizierung der Busbetriebshöfe
- Teilweise elektrifizierte Busflotte
- E-Busse mit limitierter Reichweite
- Beginn der Entwicklung eines intelligenten Managementsystems



Noch unbekannt

- Entwicklung der Reichweite der E-Busse
- Genaue Anzahl der E-Busse
- Genaue Umläufe für die E-Busse
- Zuweisungsprinzip für die Umläufe
- Funktionsweise des intelligenten Managementsystems

Für die Analyse der zukünftig komplett elektrifizierten Busbetriebshöfe ist eine Simulationsplattform notwendig!



Bus Depot Simulator bietet:

- Analyse der zukünftig komplett elektrifizierten Busbetriebshöfe
- Entwicklung und Testen der unterschiedlichen Managementalgorithmen
- Bewertung unterschiedlicher Szenarien in einer sicheren Laborumgebung (Busverspätungen, Umleitungen, Busausfälle, usw.)
- Untersuchungen für technische und energiewirtschaftliche Optimierungen

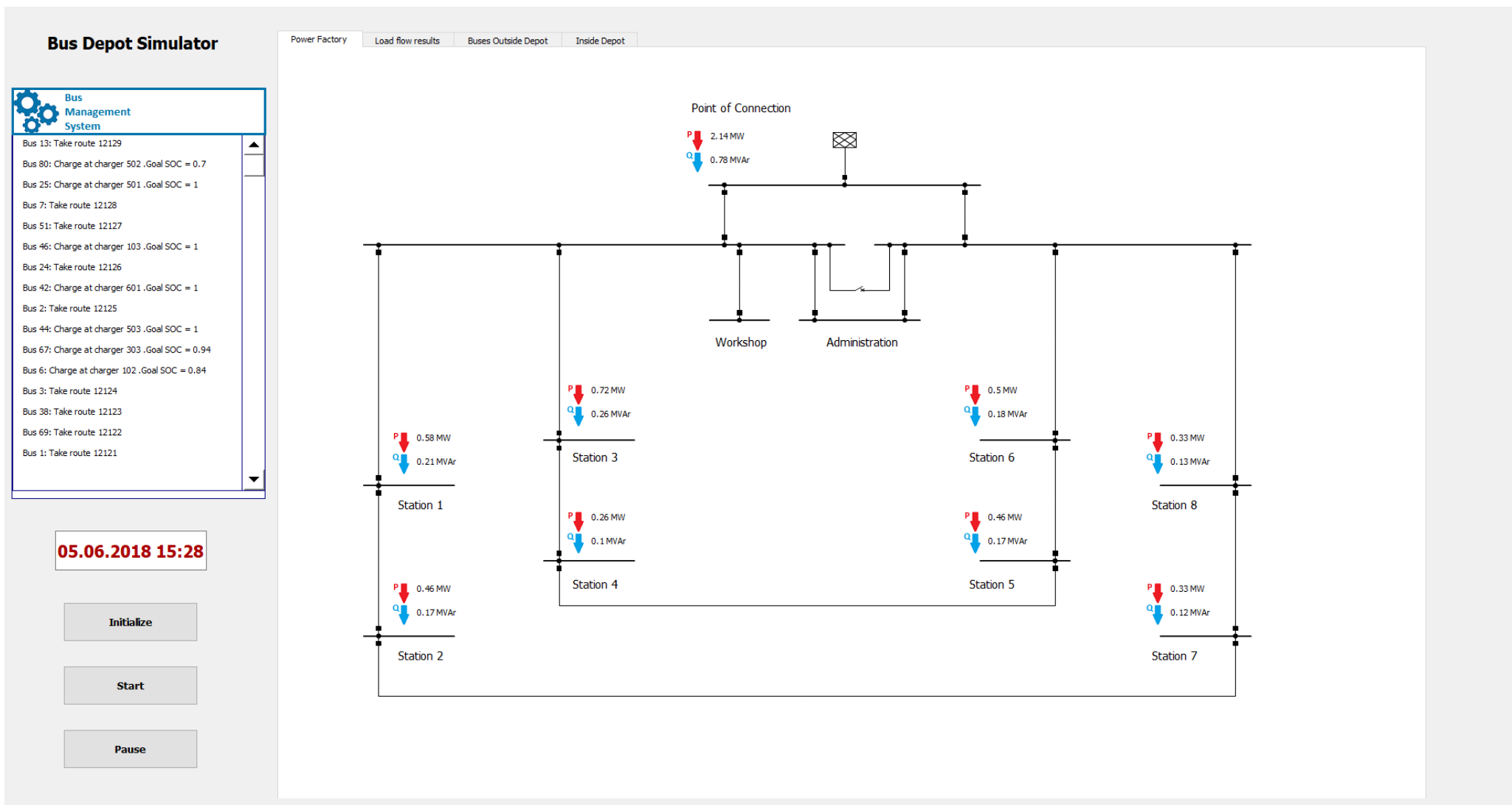


A. Jahic, M. Eskander, D. Schulz, J. Burkhardt, H. Klingenberg, „Konzepte für das Lastmanagement auf großen Busbetriebshöfen, in Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz“, D. Schulz, Ed., 1st ed. Hamburg, Germany, Helmut-Schmidt-Universität, 2019.



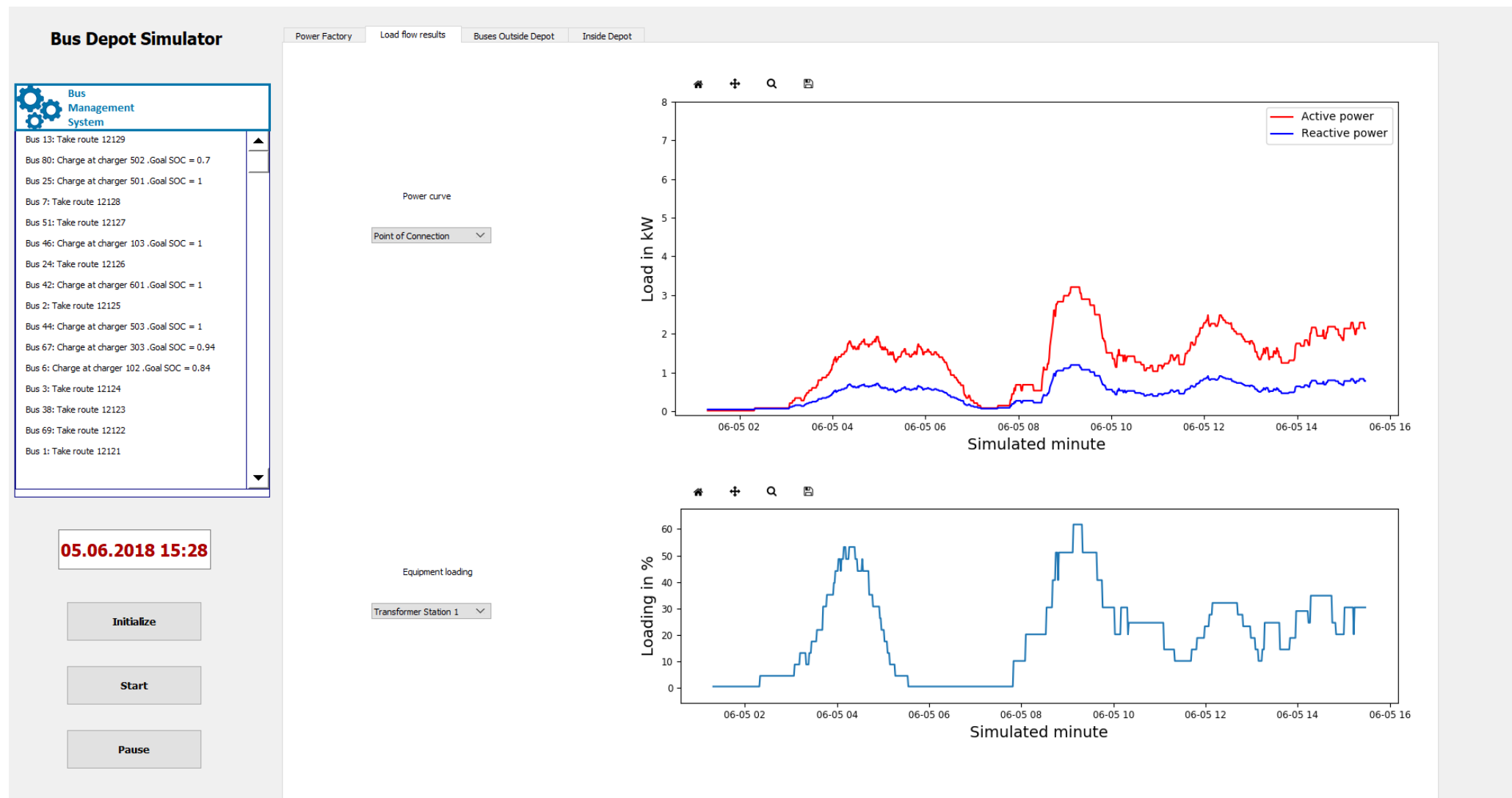
A. Jahic, M. Eskander, D. Schulz, „Bus Depot Simulator: Steady-State Python and DigSilent Co-simulation for Large-Scale Electric Bus Depots,“ in NEIS 2019 – Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Hamburg, Germany, 2019.

Bus Depot Simulator – Power Factory



Beispiel: Busbetriebshof Bergedorf

Bus Depot Simulator – Lastprofile



Beispiel: Busbetriebshof Bergedorf

Bus Depot Simulator – Umläufe

Bus Depot Simulator

**Bus Management System**

- Bus 13: Take route 12129
- Bus 80: Charge at charger 502 .Goal SOC = 0.7
- Bus 25: Charge at charger 501 .Goal SOC = 1
- Bus 7: Take route 12128
- Bus 51: Take route 12127
- Bus 46: Charge at charger 103 .Goal SOC = 1
- Bus 24: Take route 12126
- Bus 42: Charge at charger 601 .Goal SOC = 1
- Bus 2: Take route 12125
- Bus 44: Charge at charger 503 .Goal SOC = 1
- Bus 67: Charge at charger 303 .Goal SOC = 0.94
- Bus 6: Charge at charger 102 .Goal SOC = 0.84
- Bus 3: Take route 12124
- Bus 38: Take route 12123
- Bus 69: Take route 12122
- Bus 1: Take route 12121

05.06.2018 15:28

Initialize

Start

Pause

Power FactoryLoad flow resultsBuses Outside DepotInside Depot

Bus Driving	Route Id	Departure time	Time until arrival
Bus 51.	Route: 12127	2018-06-05 15:13:00	0 days 04:31:00
Bus 2.	Route: 12125	2018-06-05 15:07:00	0 days 04:07:00
Bus 31.	Route: 12110	2018-06-05 13:31:00	0 days 03:44:00
Bus 49.	Route: 12088	2018-06-05 12:22:00	0 days 01:28:00
Bus 47.	Route: 12083	2018-06-05 11:50:00	0 days 01:30:00
Bus 4.	Route: 12007	2018-06-05 04:23:00	0 days 07:09:00
Bus 26.	Route: 12116	2018-06-05 14:24:00	0 days 03:12:00
Bus 24.	Route: 12126	2018-06-05 15:12:00	0 days 03:56:00
Bus 48.	Route: 12085	2018-06-05 12:06:00	0 days 02:44:00
Bus 7.	Route: 12128	2018-06-05 15:14:00	0 days 09:10:00
Bus 29.	Route: 12118	2018-06-05 14:34:00	0 days 03:59:00
Bus 13.	Route: 12129	2018-06-05 15:26:00	0 days 07:27:00
Bus 8.	Route: 12014	2018-06-05 04:41:00	0 days 03:52:00
Bus 19.	Route: 12113	2018-06-05 14:04:00	0 days 04:00:00
Bus 14.	Route: 12114	2018-06-05 14:13:00	0 days 08:01:00

Beispiel: Busbetriebshof Bergedorf

Bus Depot Simulator – Busbetriebshof

Bus Depot Simulator



Bus Management System

Bus 13: Take route 12129

Bus 80: Charge at charger 502 .Goal SOC = 0.7

Bus 25: Charge at charger 501 .Goal SOC = 1

Bus 7: Take route 12128

Bus 51: Take route 12127

Bus 46: Charge at charger 103 .Goal SOC = 1

Bus 24: Take route 12126

Bus 42: Charge at charger 601 .Goal SOC = 1

Bus 2: Take route 12125

Bus 44: Charge at charger 503 .Goal SOC = 1

Bus 67: Charge at charger 303 .Goal SOC = 0.94

Bus 6: Charge at charger 102 .Goal SOC = 0.84

Bus 3: Take route 12124

Bus 38: Take route 12123

Bus 69: Take route 12122

Bus 1: Take route 12121

05.06.2018 15:28

Initialize

Start

Pause

Power FactoryLoad flow resultsBuses Outside DepotInside Depot

Station 1

 SoC=79%	 SoC=36%	 SoC=82%					

Station 2

	 SoC=79%	 SoC=76%	 SoC=61%				

Station 3

 SoC=71%	 SoC=67%	 SoC=59%					

Station 4

Station 5

 SoC=45%	 SoC=63%	 SoC=78%					

Station 6

 SoC=71%	 SoC=66%						

Station 7

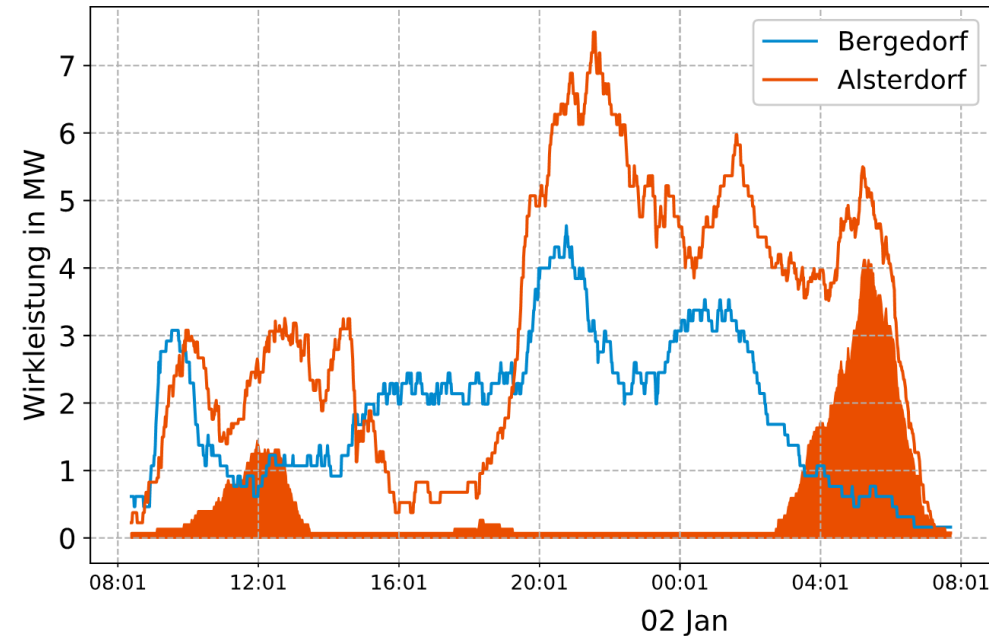
Station 8

Beispiel: Busbetriebshof Bergedorf

Typischer Lastprofil für die analysierten Busbetriebshöfe

Simulation der teilweise elektrifizierten Busbetriebshöfe:

- Streckenzuweisung nach FIFO
- Sofortiges Laden
- Winterzeit (-15°C)
- Reichweite der Busse angepasst, basiert auf der Länge der Umläufe
- Vereinfachtes Laden (konstante Leistung von 150 kW)
- Vorkonditionierung
 - Alsterdorf, elektrisch mit 65 kW
 - Bergedorf nicht elektrisch



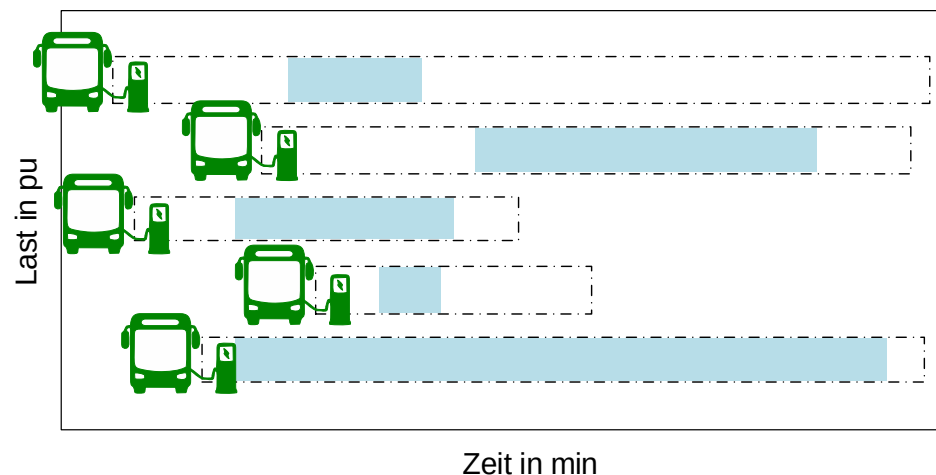
Ergebnisse der Analyse für teilweise elektrifizierte Busbetriebshöfe

Bergedorf:

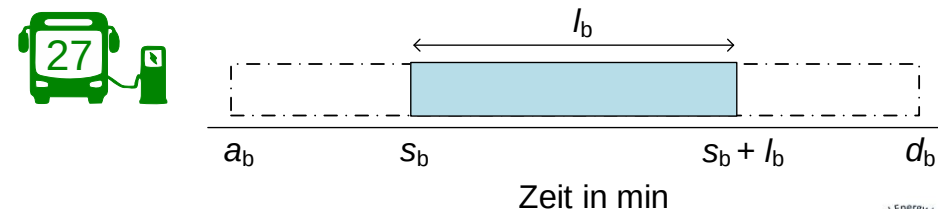
- E-Busse: 82
- Lastspitze: 4,62 MW
- Gleichzeitigkeitsfaktor: 39,39 %

Alsterdorf:

- E-Busse: 127
- Lastspitze: 7,49 MW
- Gleichzeitigkeitsfaktor: 38,58 %



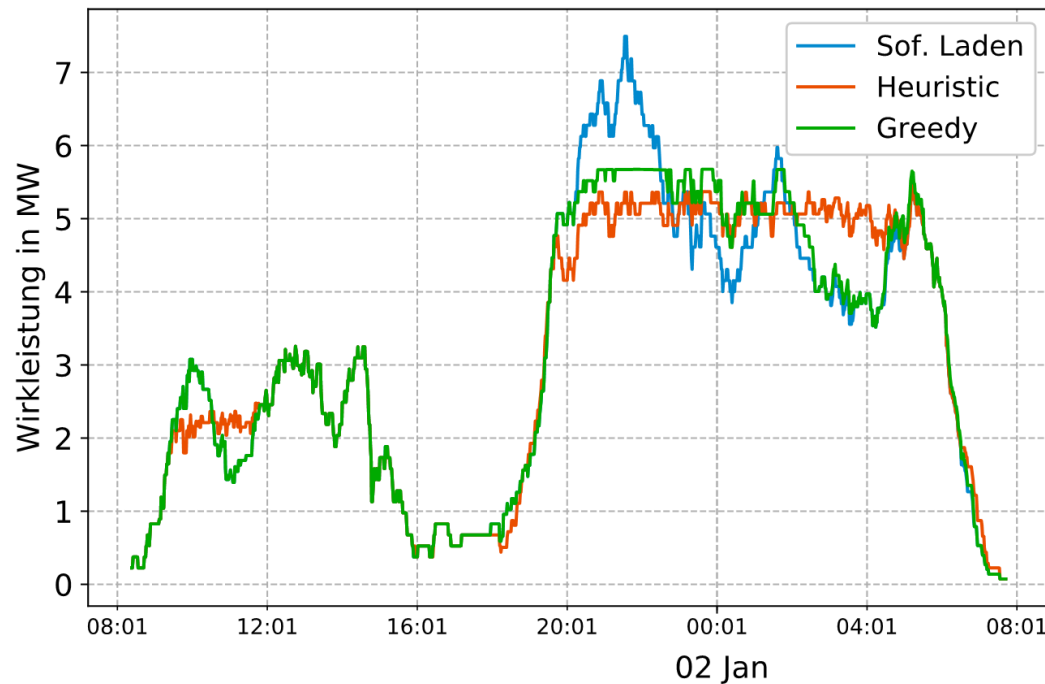
Ziel:
Ladevorgänge organisieren und die Lastspitze reduzieren



Optimierung der Ladevorgänge zur Reduzierung der Lastspitze

ALSTERDORF

	Sof. Laden	Heuristic	Greedy
Lastspitze (MW)	7,49	5,47	5,67
Gleichzeitigkeit (%)	38,58	28,18	29,13



Szenario:

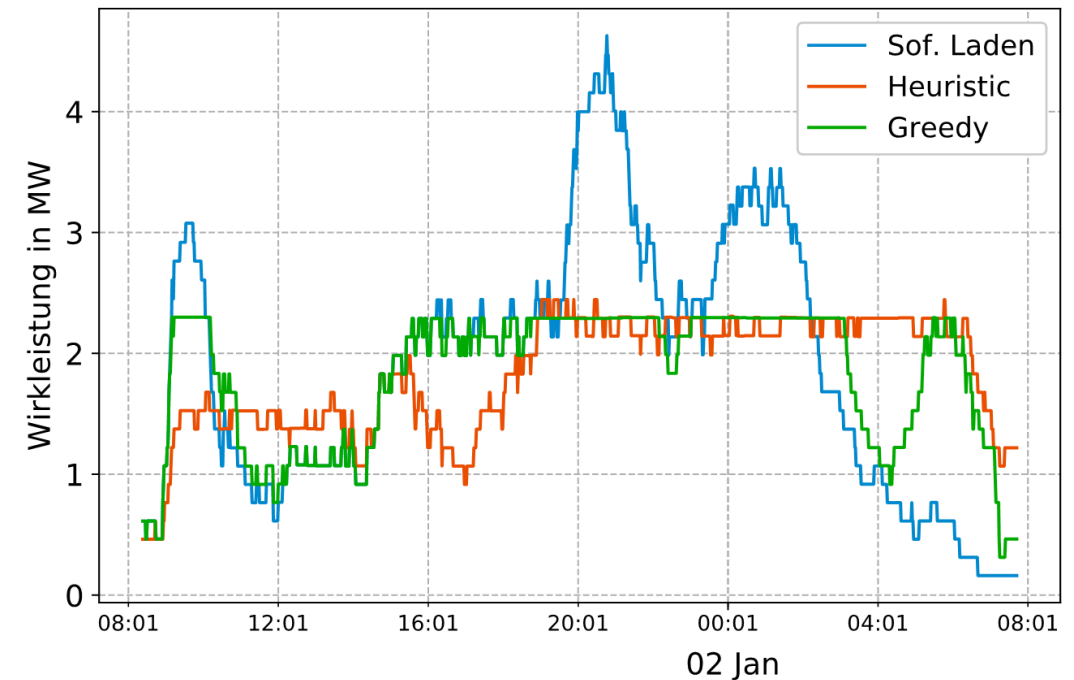
- Streckenzuweisung nach FIFO
- Winterzeit (-15°C)
- Vorkonditionierung Alsterdorf elektrisch Mit 65 kW
- Vorkonditionierung Alsterdorf nicht elektrisch



A. Jahic, M. Eskander, D.Schulz, "Charging schedule for load peak minimization on large-scale electric bus depots," Applied Sciences, vol. 9, no. 9, 1748, 2019.

BERGEDORF

	Sof. Laden	Heuristic	Greedy
Lastspitze (MW)	4,62	2,44	2,29
Gleichzeitigkeit (%)	39,39	19,51	18,29



Messungen auf den Busbetriebshöfen - Aufbau



Busbetriebshof Bergedorf

- Zeitraum: 19.06.2020 – 07.07.2020
- Gemessen: Zwei Ladesäulen (DC) und AC-Seite des Umrichters

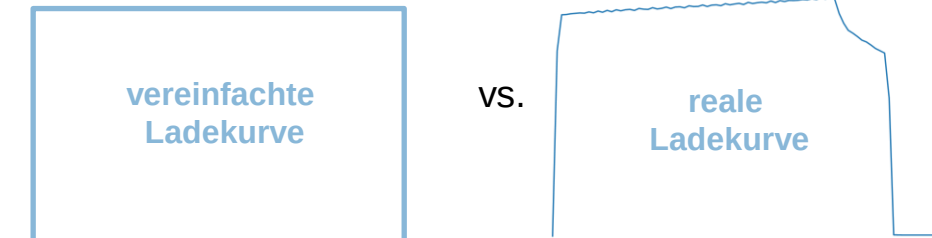


Busbetriebshof Alsterdorf

- Zeitraum: 20.01.2020 – 10.02.2020
- Gemessen: Eine Ladesäule und Niederspannungsseite des zugehörigen Trafos

Motivation:

Realistische Modellierung der Ladevorgänge



Vorgehensweise:

Validierung bzw. Anpassung der Modelle basiert auf Messdaten

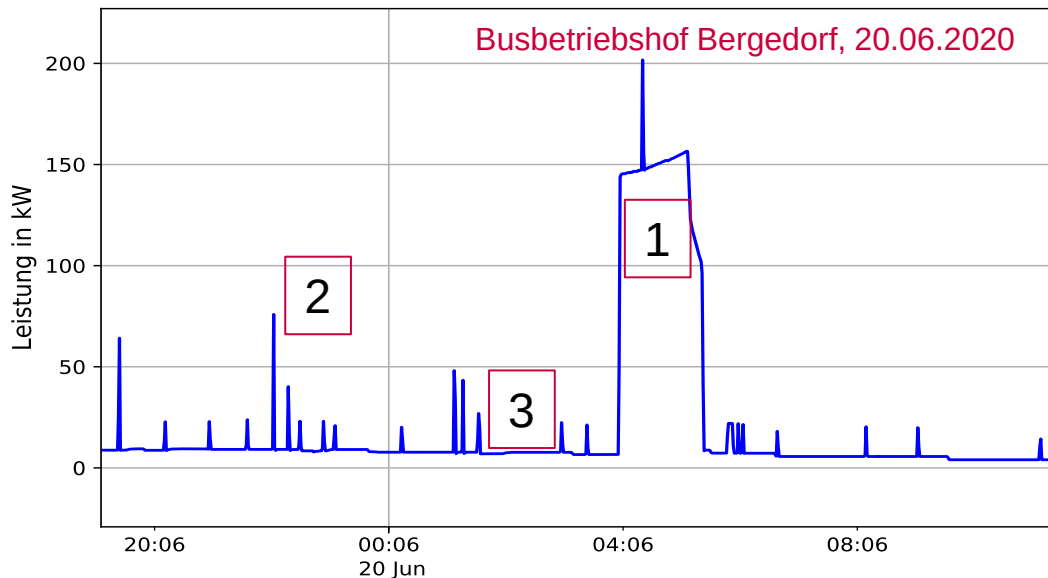
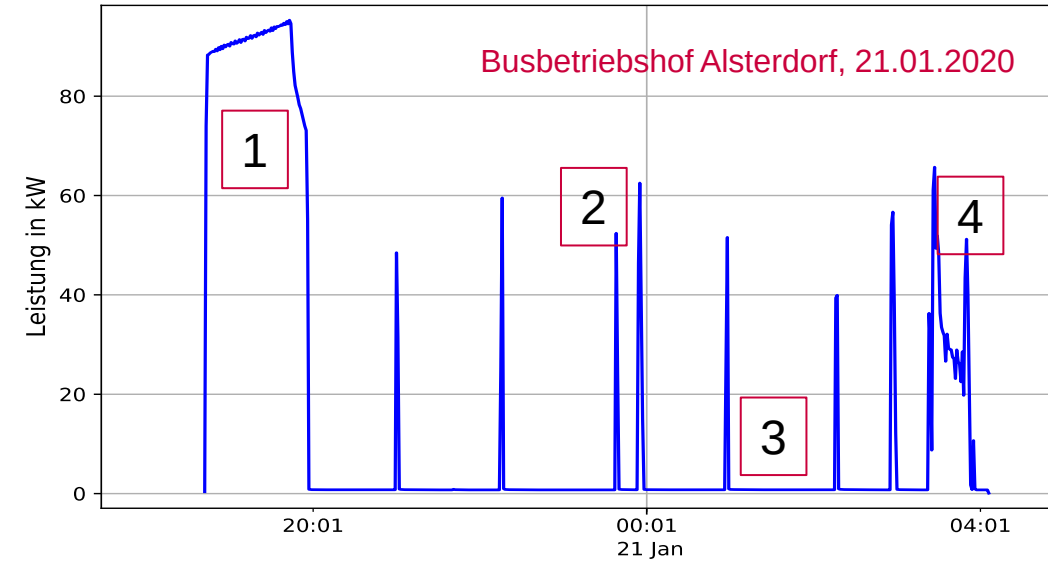


Dewetron 3300



PQ box 300

Messungen auf den Busbetriebshöfen - Ergebnisse



Gemessene Ereignisse während der Messkampagnen:

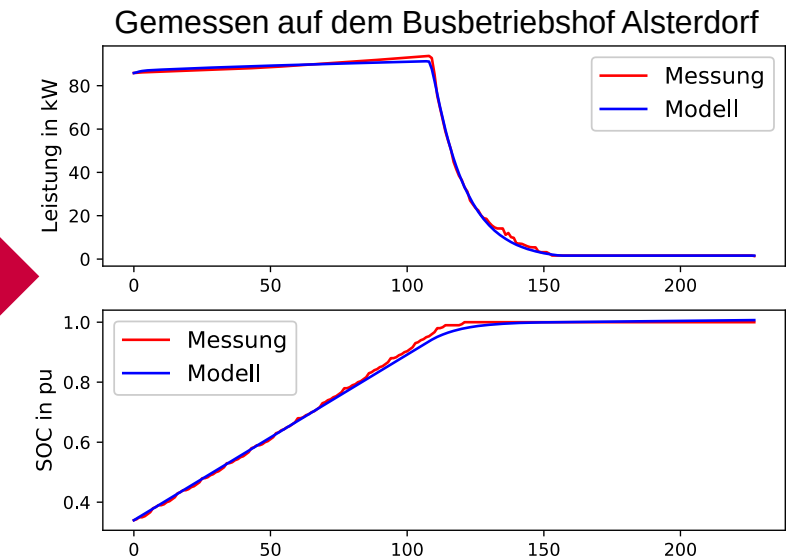
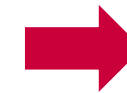
1. Ladevorgang
2. Kurze Lastspitzen
3. Grundlast
4. Vorkonditionierung



Modellierung der realen
Lastprofile ist komplex aber
möglich.

Schritte bei der
Entwicklung bzw.
Validierung:

- Entwicklung eines entsprechenden Modells
- Parameter-Fitting mithilfe der Messdaten
- Validierung der Modelle

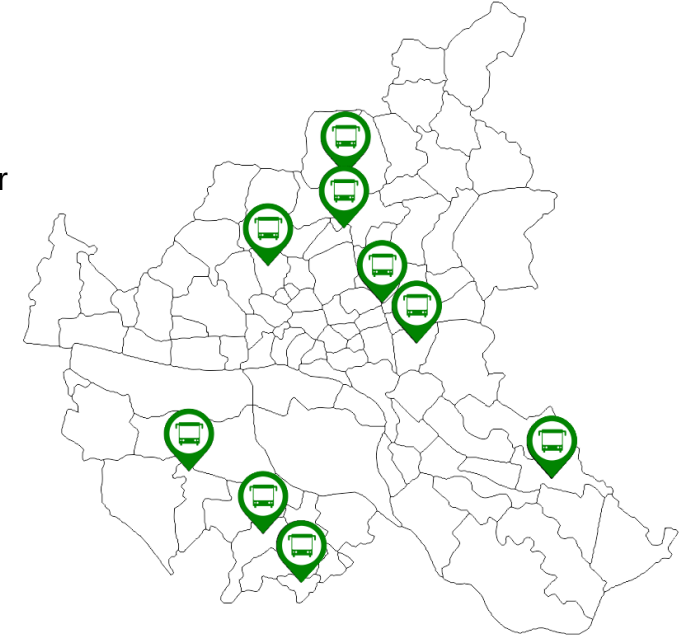




Amra Jahic
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Helmut-Schmidt-Universität
amra.jahic@hsu-hh.de

Intelligentes Last- und Lademanagement für elektrische Busbetriebshöfe

- Bus Depot Simulator – Co-Simulationsplattform für die Simulation elektrischer Busbetriebshöfe
- Analyse der Lastprofile auf großen zentralen Busbetriebshöfen
- Auswirkungen des Lastmanagements
- Messungen zur Validierung der Simulationsplattform



Mina Eskander
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Helmut-Schmidt-Universität
mina.eskander@hsu-hh.de

Auslegung und Zuverlässigkeit der elektrischen Busbetriebshöfe

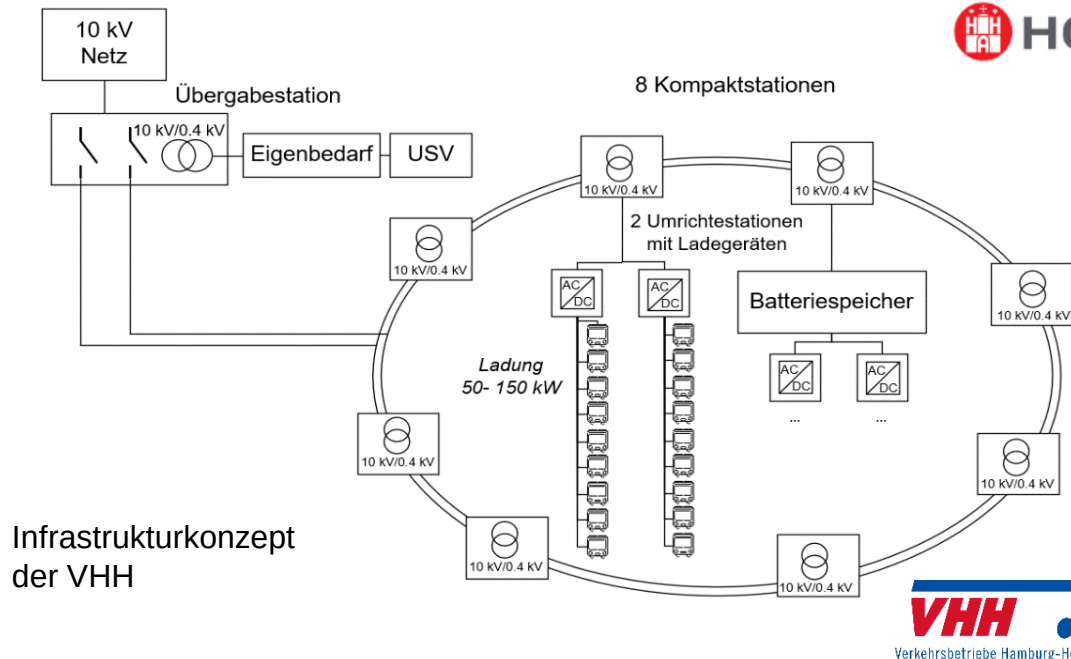
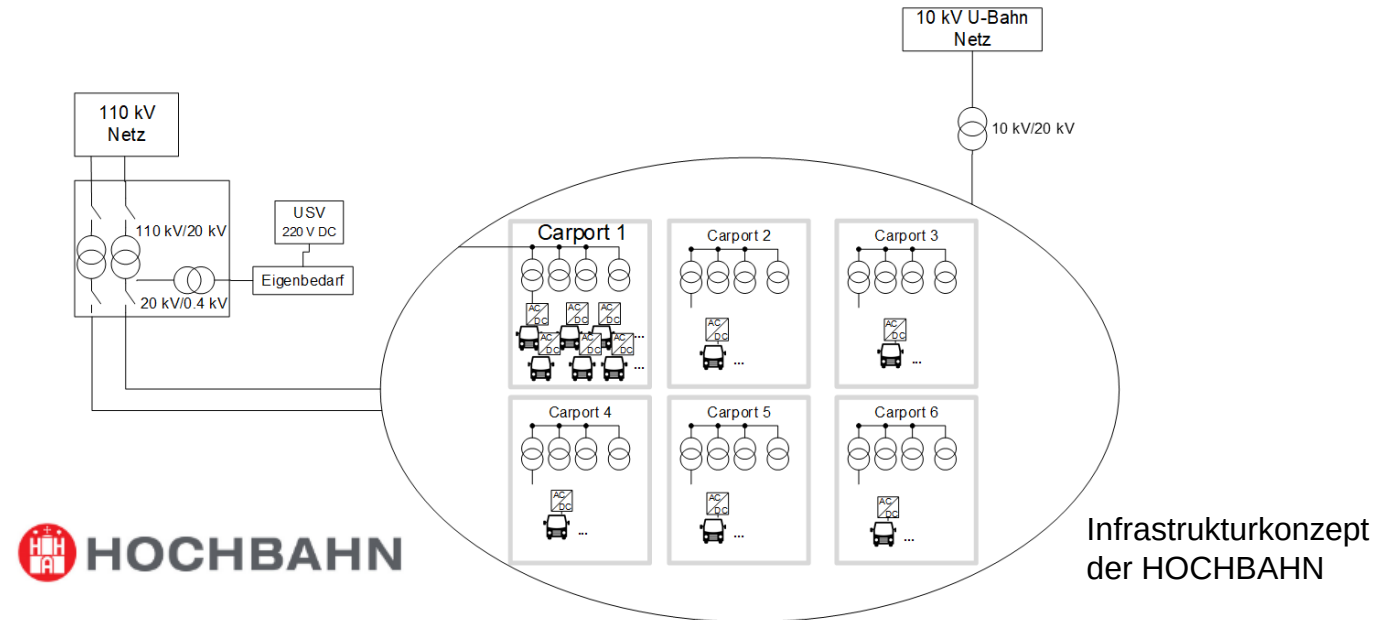
- Infrastrukturkonzepte der Busbetriebshöfe
- Analyse der Übertragbarkeit von beiden Konzepten
- Zuverlässigkeitsanalyse der Ladeinfrastruktur
- Notstromversorgung



Infrastrukturkonzepte der Busbetriebshöfe

Komponenten des HOCHBAHN-Systems

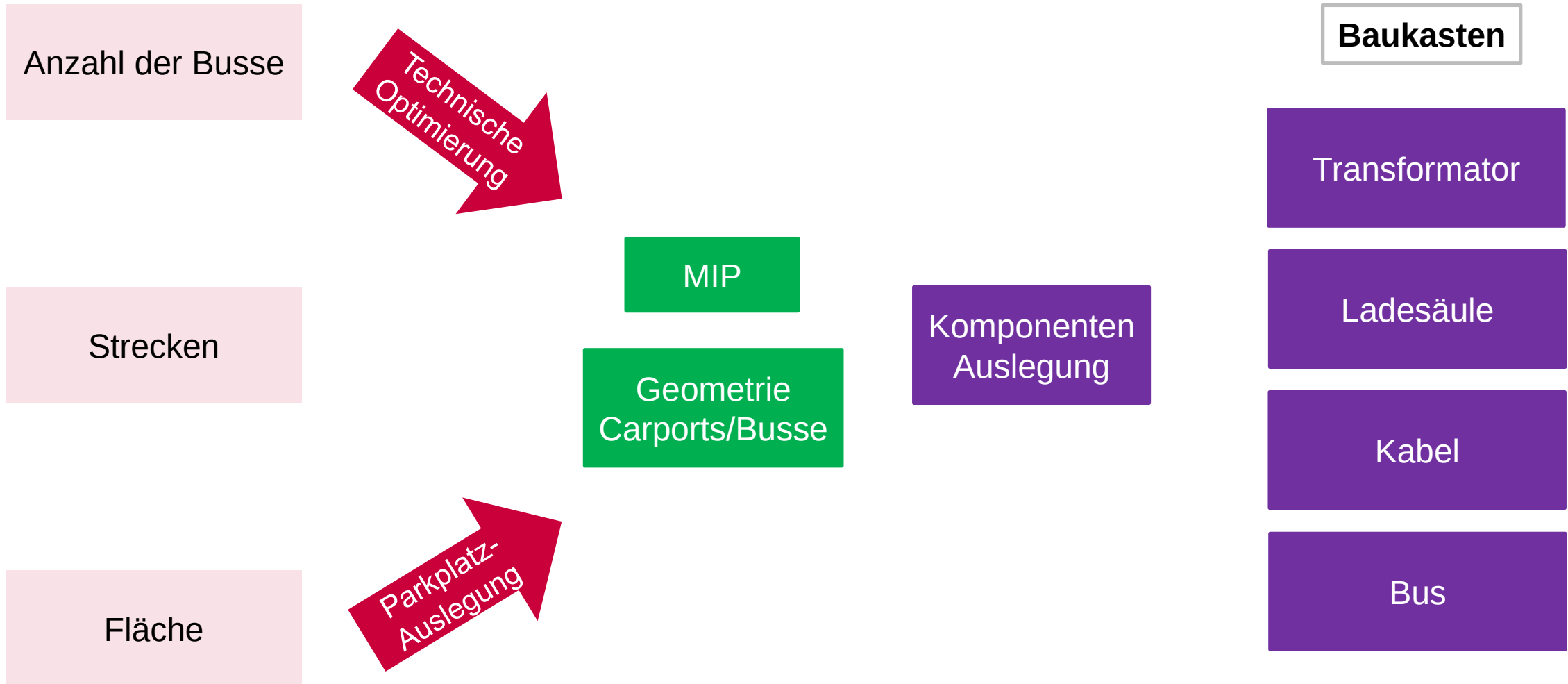
- 110 kV Anschluss
- 110 kV/20 kV Trafo
- 20 kV/0,4 kV Trafo
- 110 kV, 20 kV Schalter
- Umrichter (pro Ladesäule)
- USV



Komponenten des VHH-Systems

- 10 kV Anschluss
- 10 kV/0,4 kV Trafo
- 10 kV Schalter
- Umrichter (2 Stationen)
- Batteriespeicher
- USV

Vorgehensweise der Auslegung von Busbetriebshöfen



M. Eskander, A. Jahic, D. Schulz, "Beeinflussung der Übertragbarkeit der Ladeinfrastruktur von Busbetriebshöfen in Hamburg auf andere Städte", Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz, Hamburg, Deutschland, 2019.



Electrical Power Systems
Distributed Energy Laboratory

M. Eskander, A. Jahic 14

Vorgehensweise der Auslegung von Busbetriebshöfen

Baukasten 1 Transformator

- Belastung / Verluste
- Kühlsystem
- Innen- / Außenraum
- Käfig / Tresorraum

Baukasten 2 Ladesäule

- Zentralisiert / Dezentralisiert
- Induktion / Stecker / Pantograph
- Wirkungsgrad

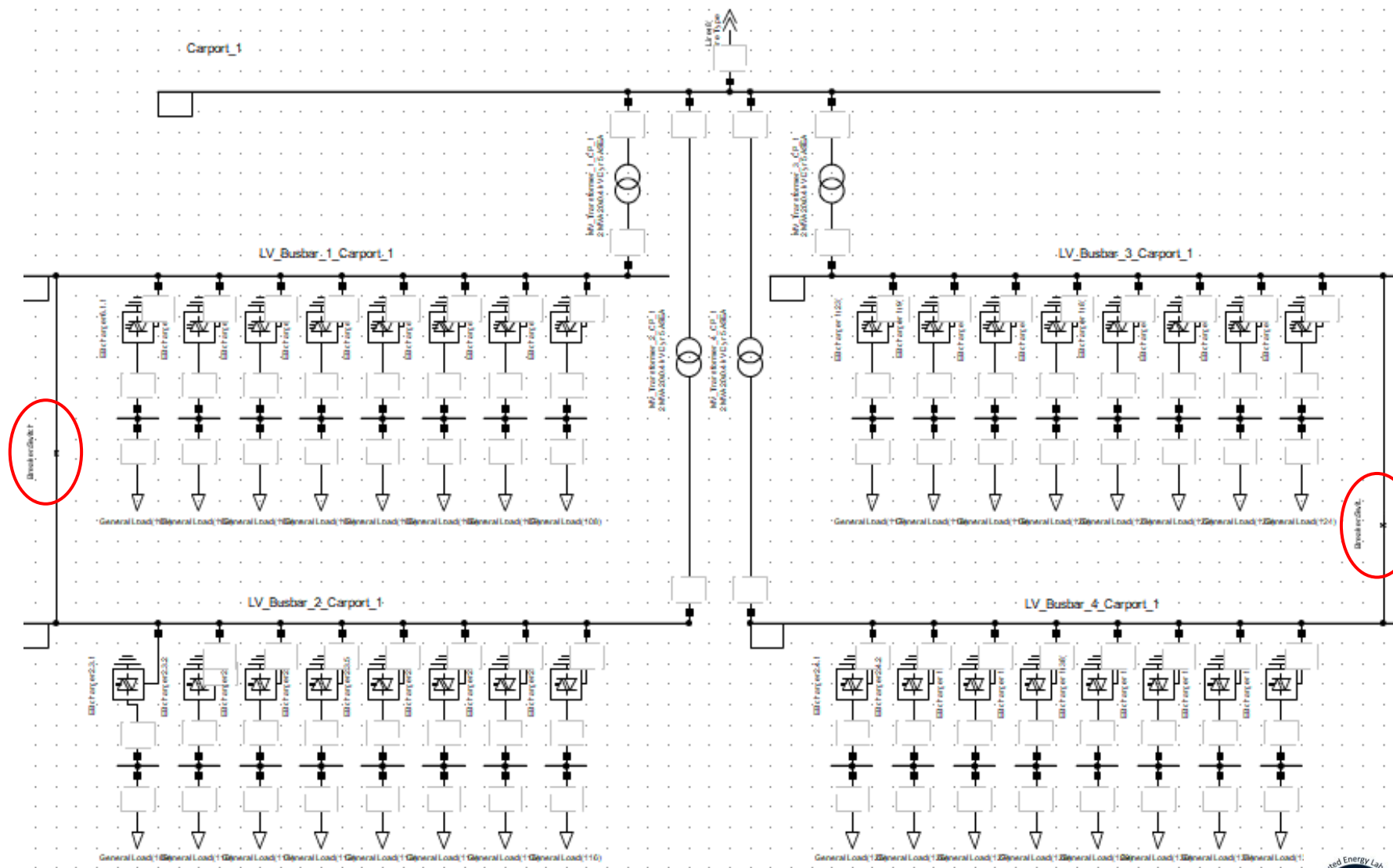
Baukasten 3 Kabel

- Länge
- Verluste
- Spannungsebene
- Geometriebezogen

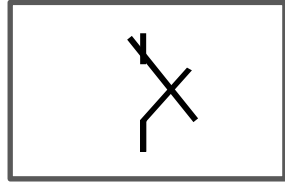
Baukasten 4 Bus

- Batteriekapazität
- Vorkonditionierung
- Bus Typ (Gelenk / Solo)

Belastung von Transformatoren Carport 1



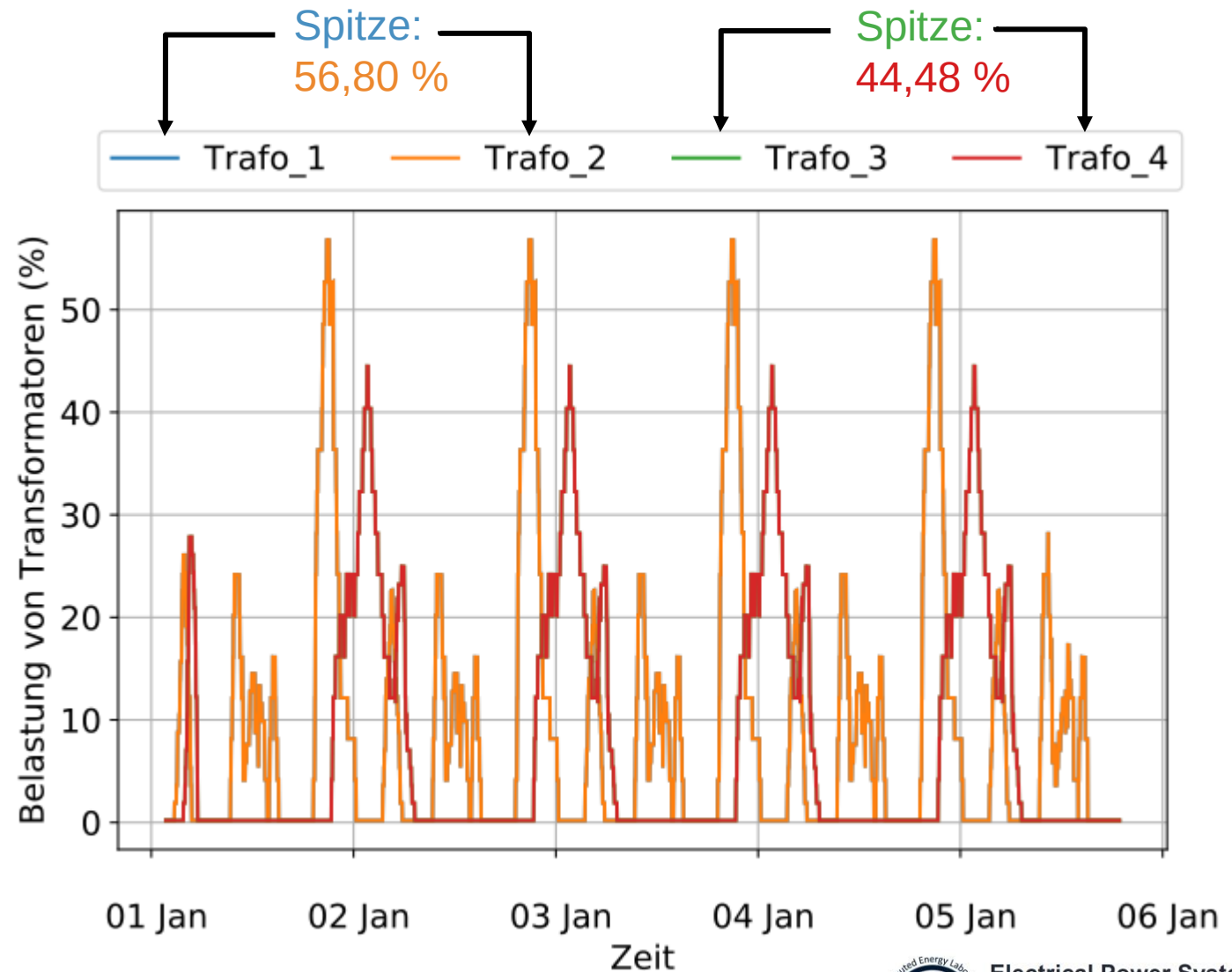
Belastung von Transformatoren Carport 1



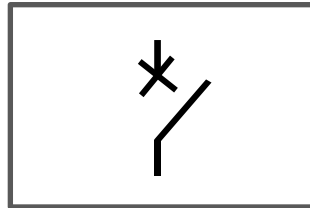
Geschlossener
Schalter

Anmerkungen:

- Gleiche Lastverteilung zwischen verbundenen Transformatoren



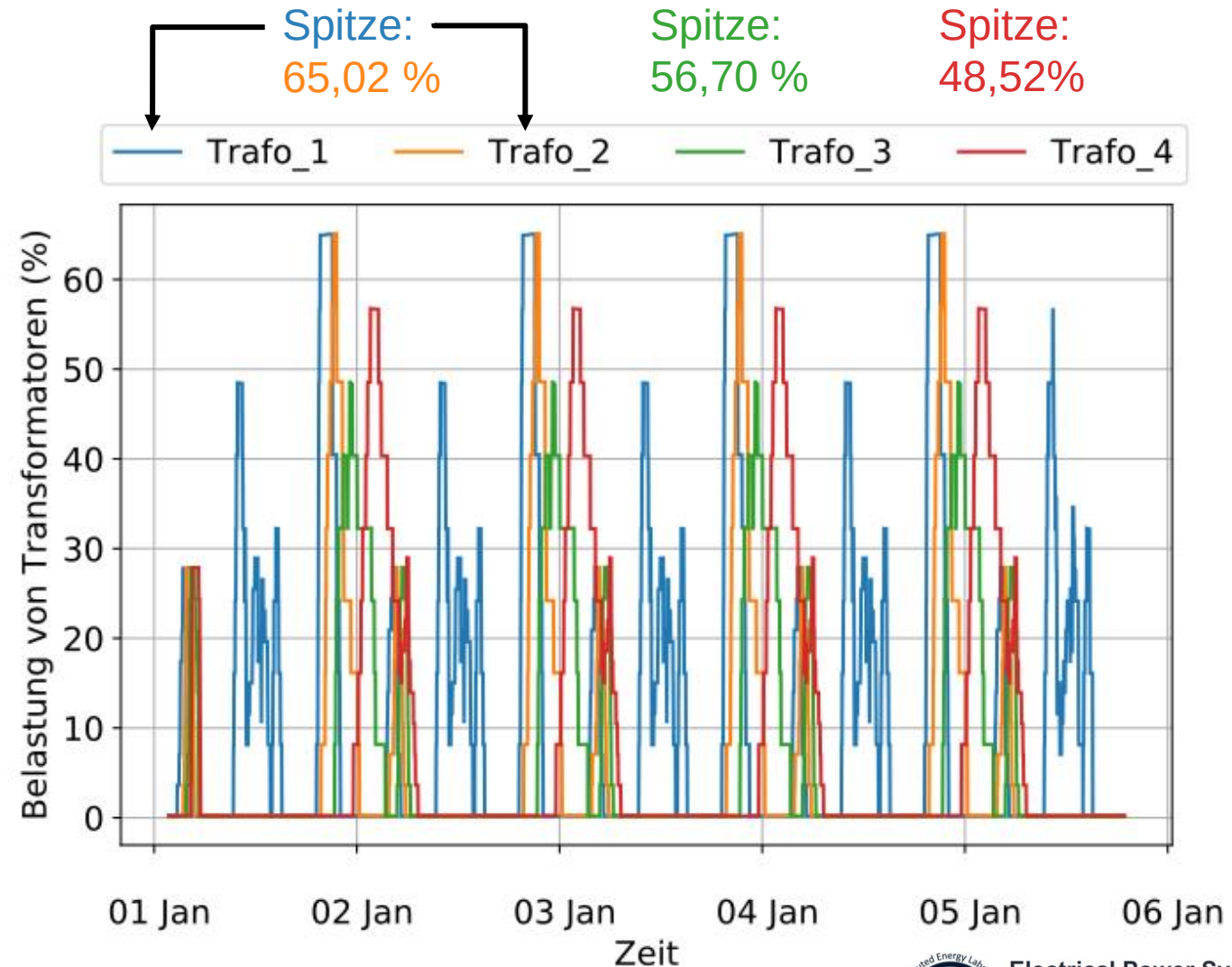
Belastung von Transformatoren Carport 1



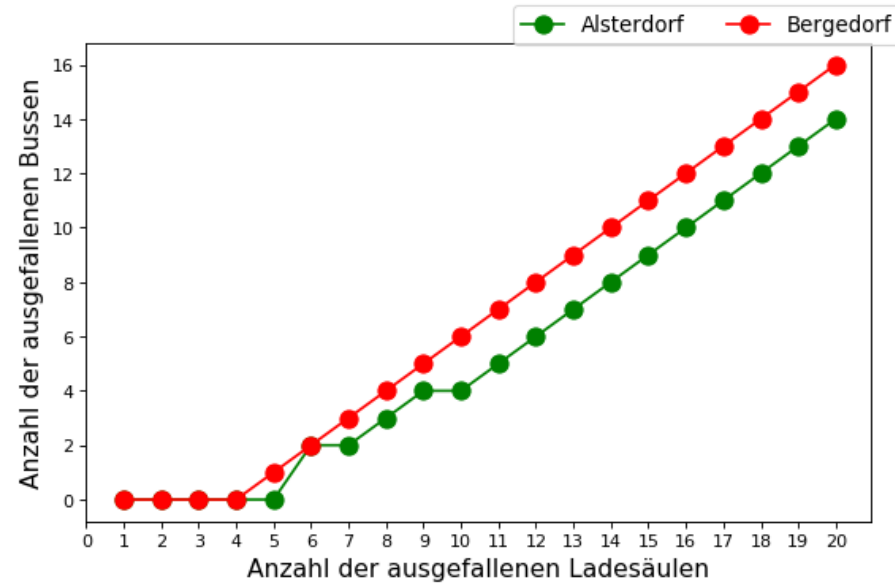
Offener
Schalter

Anmerkungen:

- Lastspitzen höher als verbundenen Transformatoren
- Normalbetrieb



Zuverlässigkeitsanalyse der Busbetriebshöfe

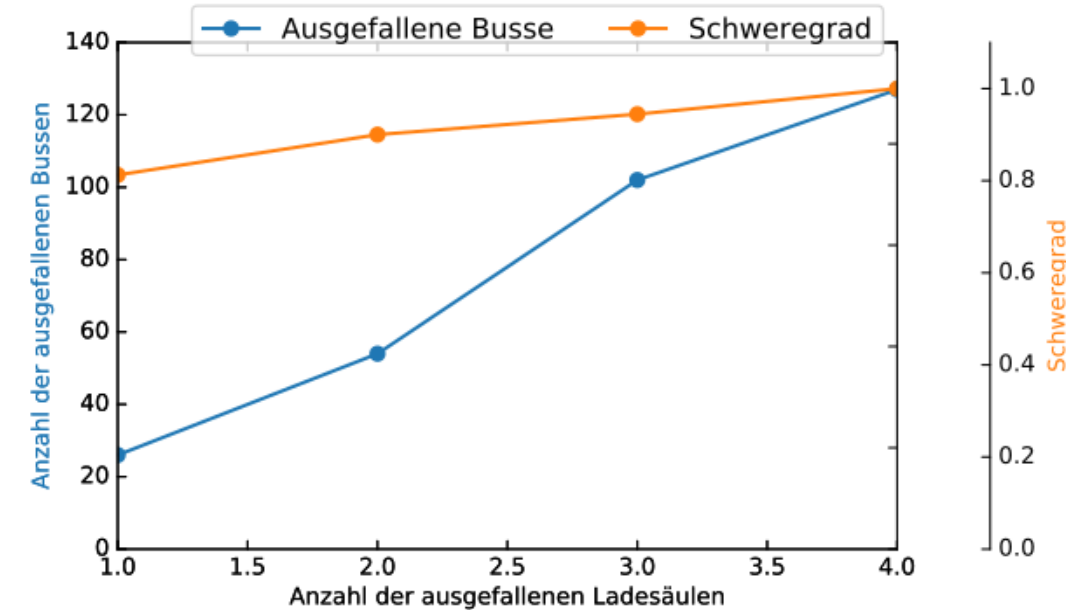
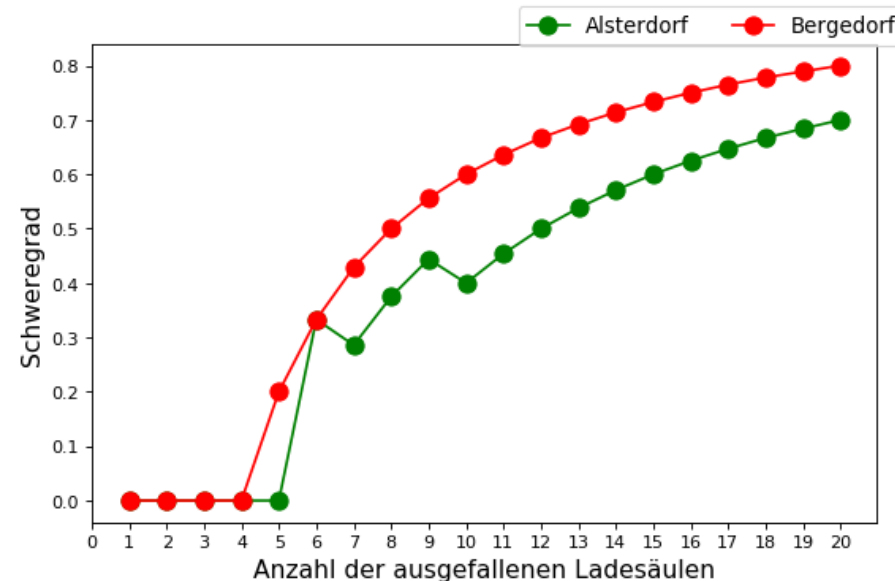


Anmerkungen:

- Keine Auswirkung auf den Betrieb bis 4 Ladesäulen
- Annahme: keine Blockierung

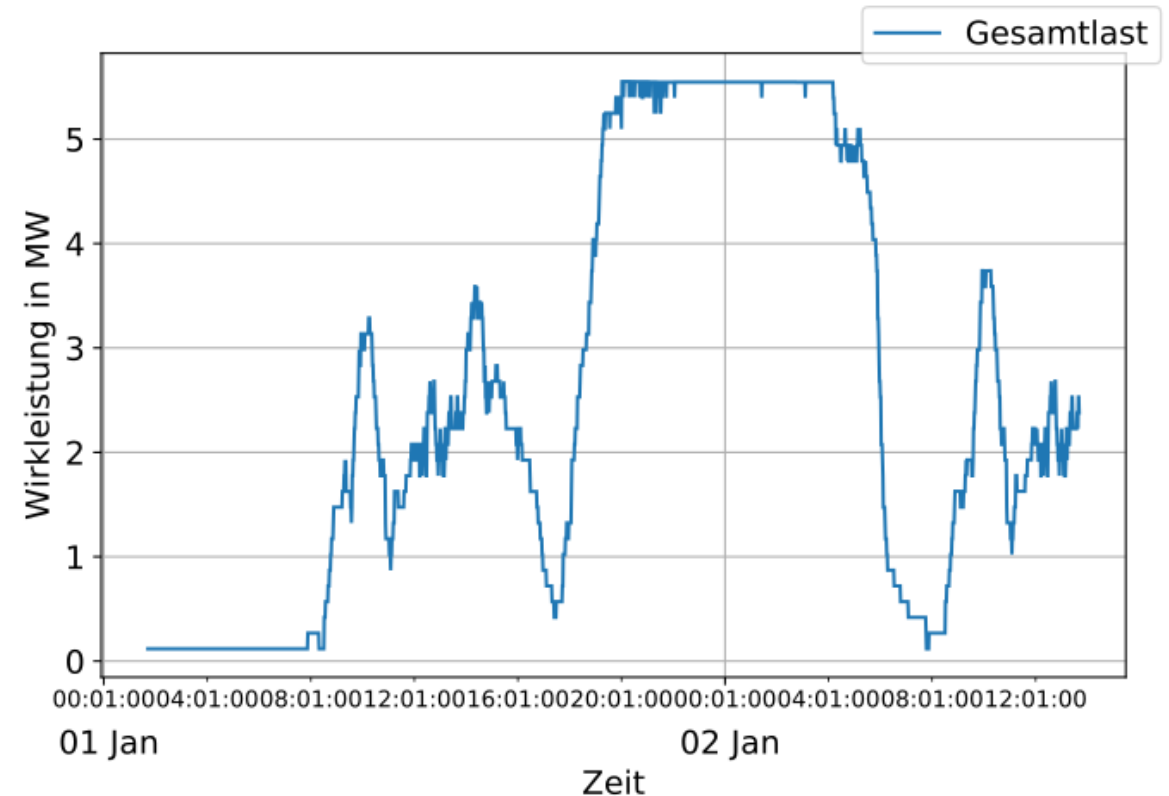
Analyse des Schweregrads:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{NF} \text{Ausgefallene Ladesäulen}}{\sum_{i=1}^{NB} \text{Betroffene Busse}}$$



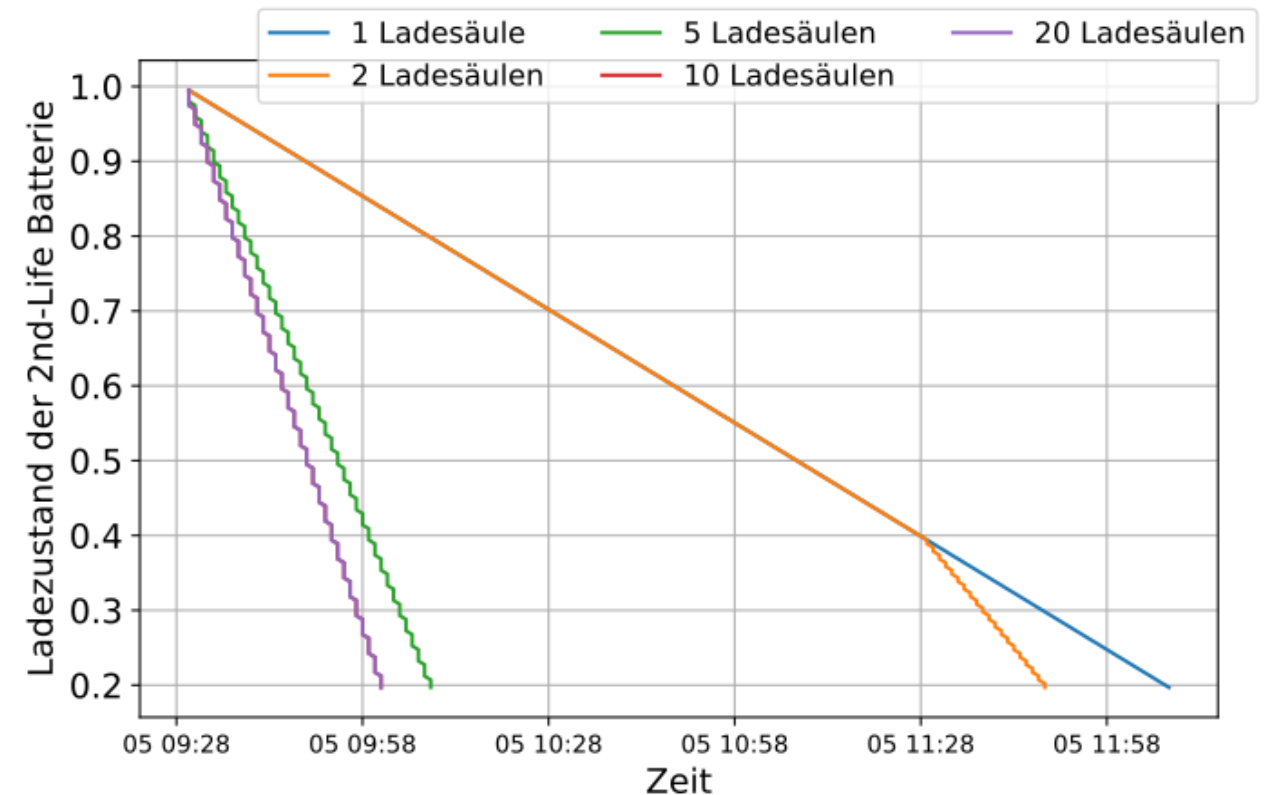
Notstromversorgung Alsterdorf

- N-1 Zuverlässigkeitsanalyse
- Betrachten der Versorgung durch die Verbindung mit der U-Bahn
 - 5 – 10 MW
- Einfluss auf den Betrieb



Notstromversorgung Bergedorf

- Leistung und Kapazität des Batteriespeichers
 - 2 x 420 kW
 - 495 kWh
- Unterschied zwischen Bergedorf und Alsterdorf



M. Eskander, A. Jahic, D. Schulz, Reliability Analysis of Large-Scale Electric Bus Depots Based on Different Failure Scenarios“, to be published in *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Edmonton, Canada, 2020

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Helmut-Schmidt-Universität
Fakultät für Elektrotechnik
Elektrische Energiesysteme
Holstenhofweg 85
22043, Hamburg

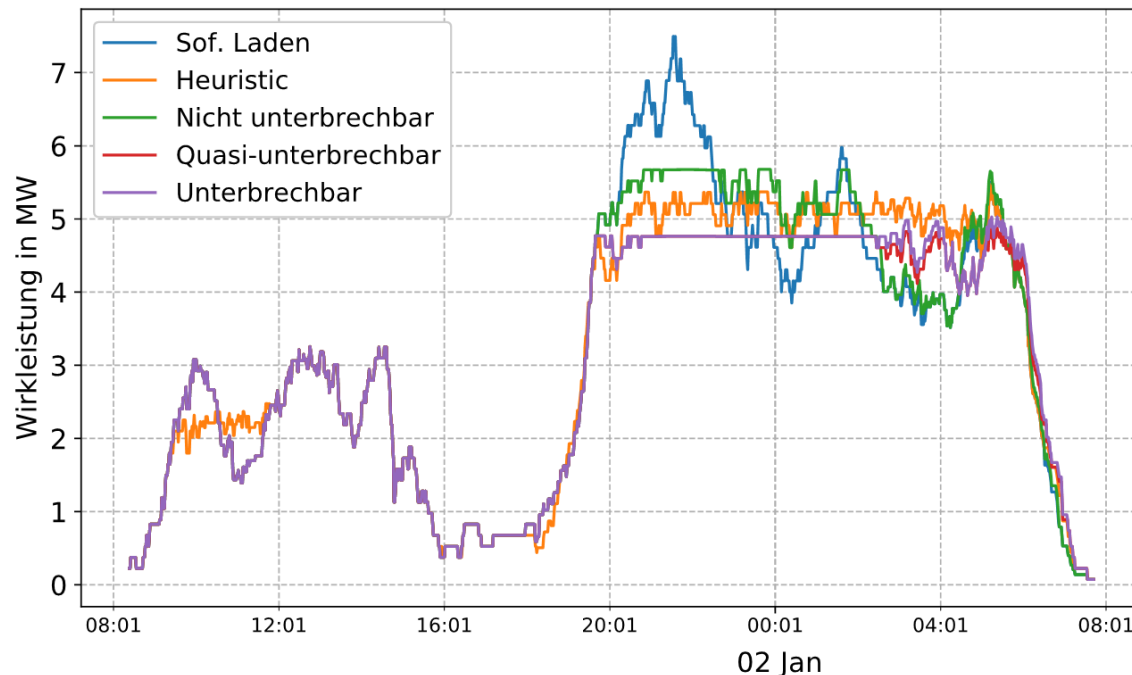
www.hsu-hh.de/ees



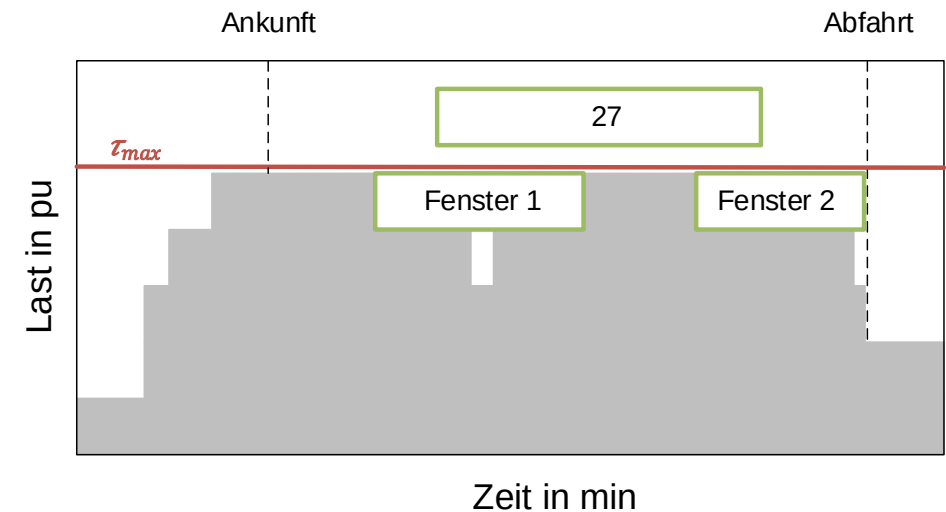
Fachgebietsleiter:
Prof. Dr.-Ing. habil.
Detlef Schulz
detlef.schulz@hsu-hh.de
+49-40-6541-3083

Optimierung der Ladevorgänge zur Reduzierung der Lastspitze – Trennung der Ladevorgänge

Algorithmus	Lastspitze in MW	Gleichzeitigkeit in %	Senkung der Lastspitze in %
Sofort	7,49	38,58	-
Heuristic	5,47	28,18	26,9
Nicht unterbrechbar	5,67	29,13	24,3
Quasi-unterbrechbar	5,02	25,98	32,9
Unterbrechbar	4,87	24,41	34,9



Nicht unterbrechbar (komplett geladen)	Vorgang beenden	Vorgang teilen	
	NEIN	NEIN	
Quasi-unterbrechbar (teilweise geladen)	Vorgang beenden	Vorgang teilen	
	JA	NEIN	
Unterbrechbar (teilweise geladen)	Vorgang beenden	Vorgang teilen	
	JA	JA	



A. Jahic, M. Eskander, D. Schulz, "Preemptive vs. non-preemptive charging schedule for large-scale electric bus depots," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*, Bucharest, Romania, 2019