



Hochschule Niederrhein

University of Applied Sciences

SWK E²

**Institut für Energietechnik und
Energiemanagement**

Institute of Energy Technology and
Energy Management

Maximierung elektrischer ÖPNV-Betriebskilometer in Krefeld*

Doktorandenkolloquium

Innovative Energiesysteme und Energieeffizienz

SWK E² - Institut für Energietechnik und Energiemanagement

Marius Madsen | Marc Gennat

02.12.2019

*Diese Arbeit wurde von der SWK Mobil GmbH in einem gemeinsamen F&E-Projekt unterstützt

Agenda

Einleitung

Modellierung

Optimierung

DC-Infrastruktur

Zusammenfassung

Ausblick

Einleitung

In **Krefeld** basiert der öffentliche Verkehr auf Straßenbahnen und **Dieseln**ussen.

Solobusse: 2,15 Mio. km/a

Gelenkbusse: 2,25 Mio. km/a

(Lokale) **Emissionen** von Dieselnussen → Elektrobusse

Elektrobusse wirtschaftlich?

Einleitung

Stand der Technik: Elektrobusse sind **noch nicht wirtschaftlich** nutzbar [9]

- **Investitionen** sind **höher** als bei Dieselnissen [3]
 - Hohe Auswirkungen der Batteriekosten
- **Kilometerbezogene Kosten** sind **niedriger** als die von Dieselnissen [2,9]

Gegenstand der Untersuchung: Wirtschaftliche **Neubewertung** nach...

- **Maximierung** der **elektrisch** angetriebenen **Kilometerleistung** und
- **Minimierung** der **Batteriekapazität** bei der Verwendung von Elektrobussen
- Nutzung des bestehenden **Straßenbahnunterwerks** zum **Laden** von Elektrobussen [5]
 - Gleicher Spannungsbereich [10]
 - Geringere Investitionen in die Infrastruktur

Methode:



Agenda

Einleitung

Modellierung

Optimierung

DC-Infrastruktur

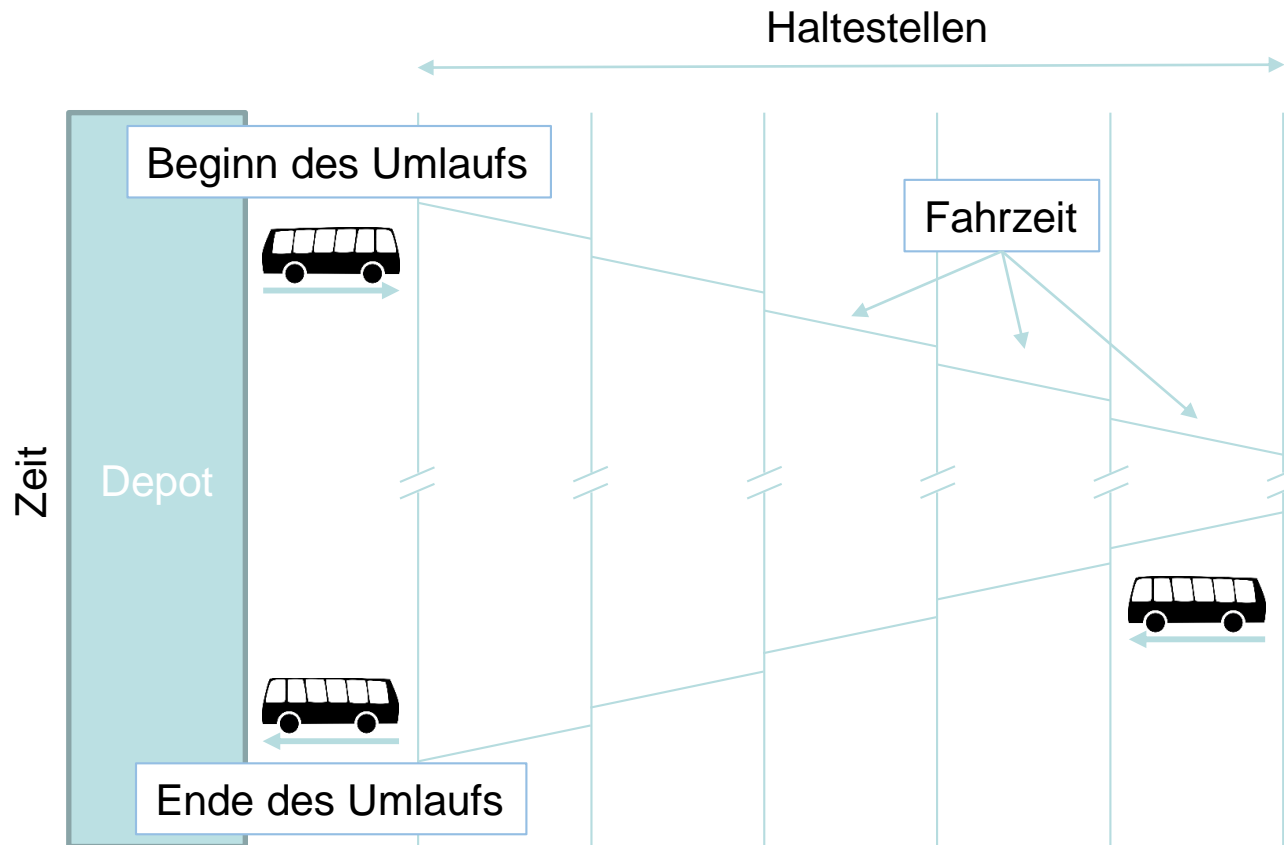
Zusammenfassung

Ausblick

Modellierung

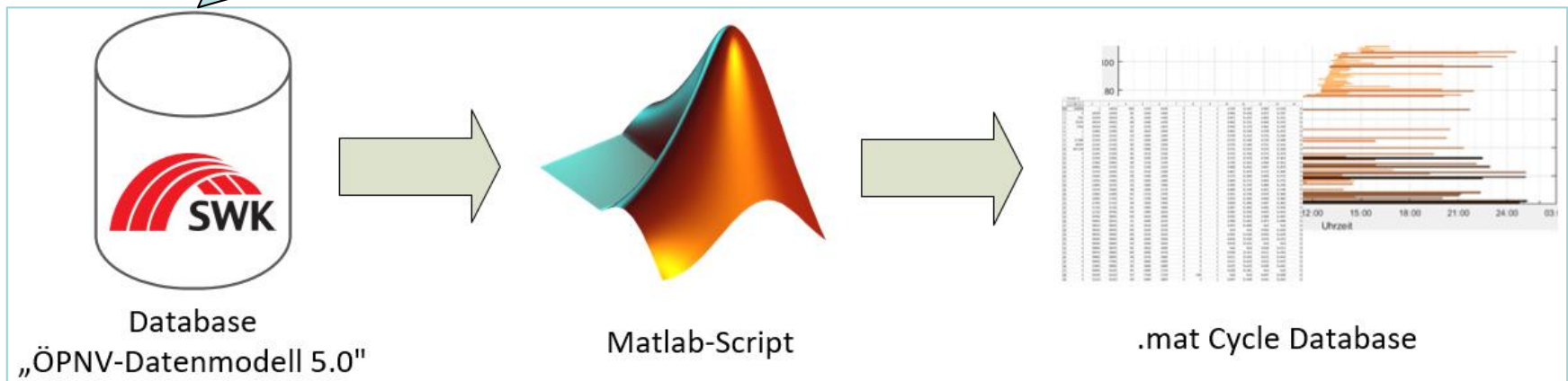
Wie werden Bus-Umläufe definiert?

- Ein Umlauf beginnt mit der Depotausfahrt und endet mit einer Depoteinfahrt und kann verschiedene Linien und Routen beinhalten. [7]



Modellierung Datenbasis

Die SWK Mobil GmbH organisiert Umlaufinformationen nach der **Standardschnittstelle „ÖPNV-Datenmodell 5.0“**. [12]

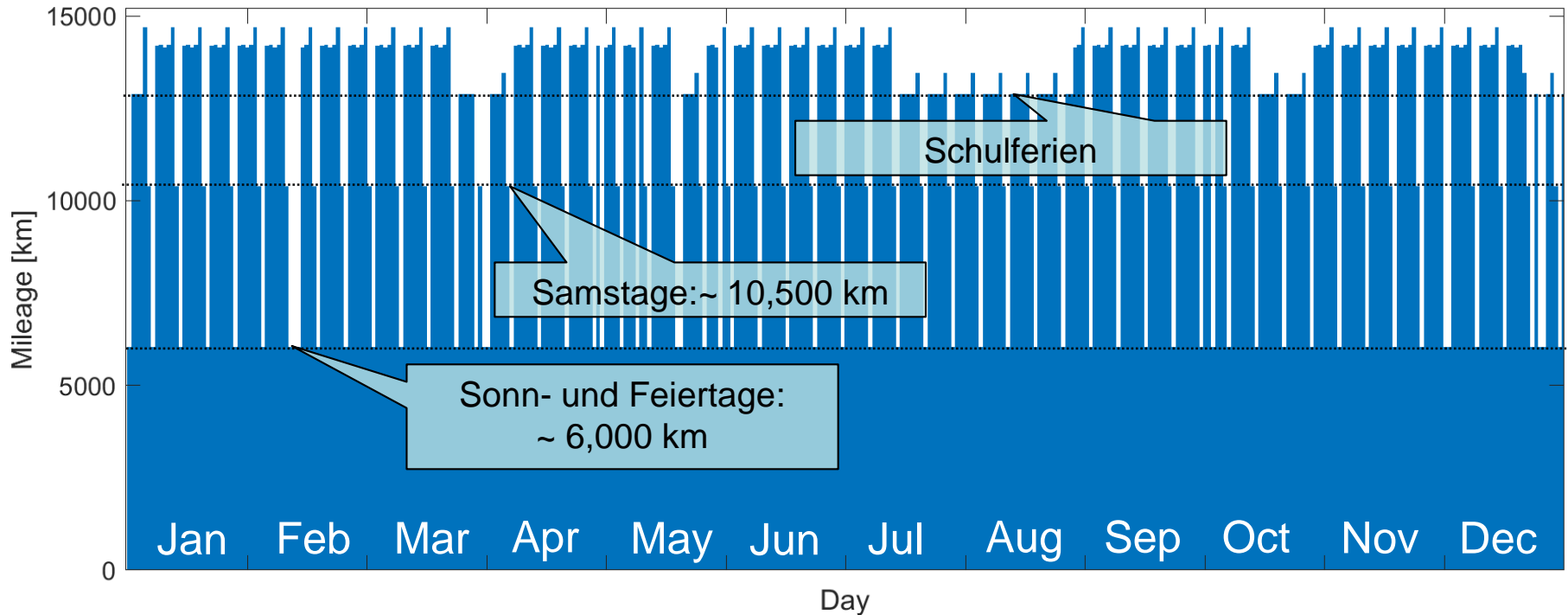


Ein Matlab-Script wurde erstellt, um die Datenbank zu **importieren**, die Umläufe für jede Tagesart **zusammenzustellen** und zu **speichern**.

Datengrundlage für Analyse, Optimierung und Simulation.

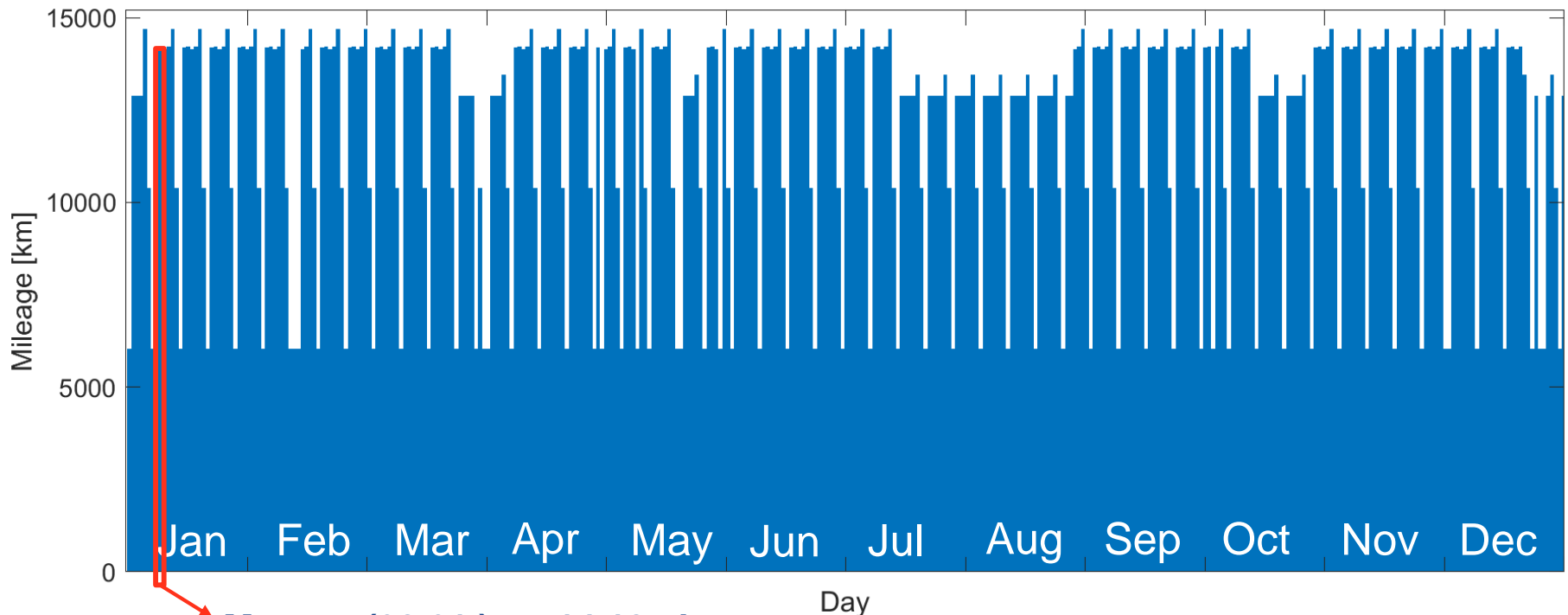
Modellierung Umlaufdatenbank

Umlaufdatenbank als **Summe der Tagesstrecken** aller Umläufe:



Modellierung Tagesstrecke

Umlaufdatenbank als **Summe der Tagesstrecken** aller Umläufe:



- Montag (08.01.): 14.187 km**
- Solobusse: 6.237 km
 - Gelenkbusse: 7.950 km → **Beispiel auf nächster Folie**

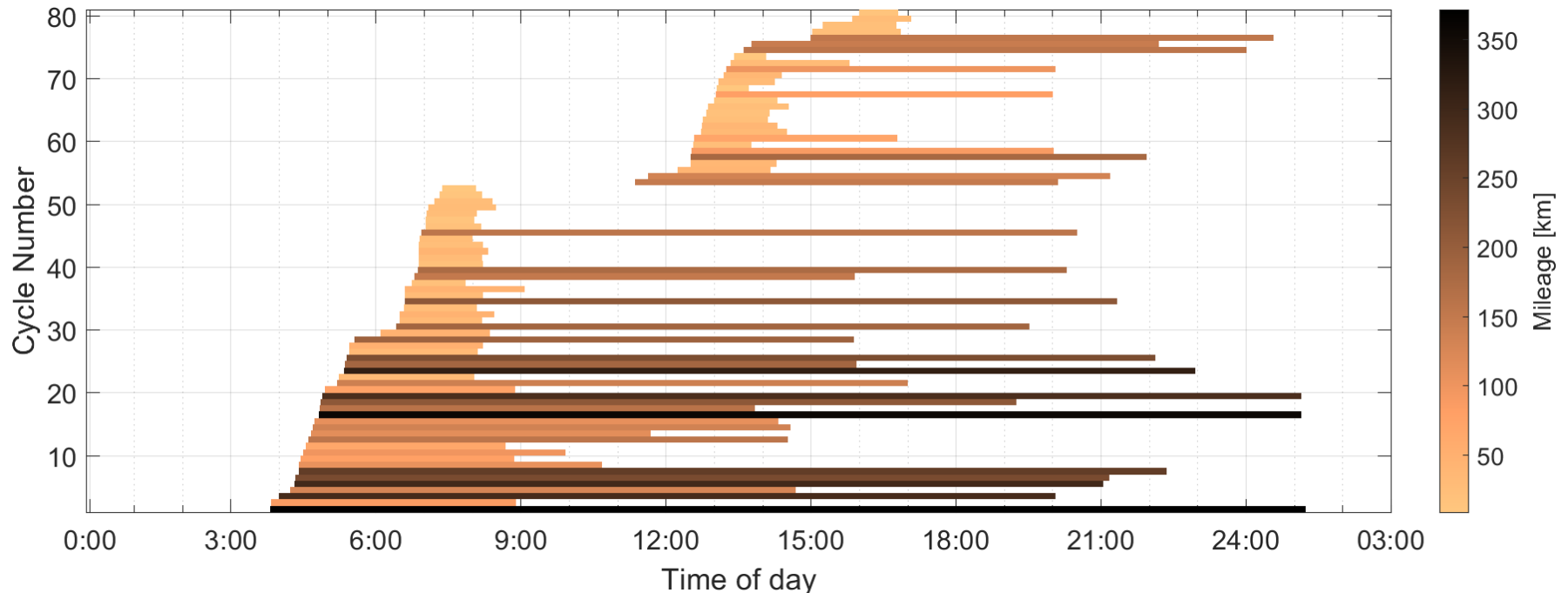
Modellierung

Analyse der modellierten Umläufe

Beispiel:

Gelenkbusse | Tagesart: (nicht-Schulferien-) **Montag** | Summe: 7.950 km

Anzahl der (Gelenkbus-) Umläufe: 81



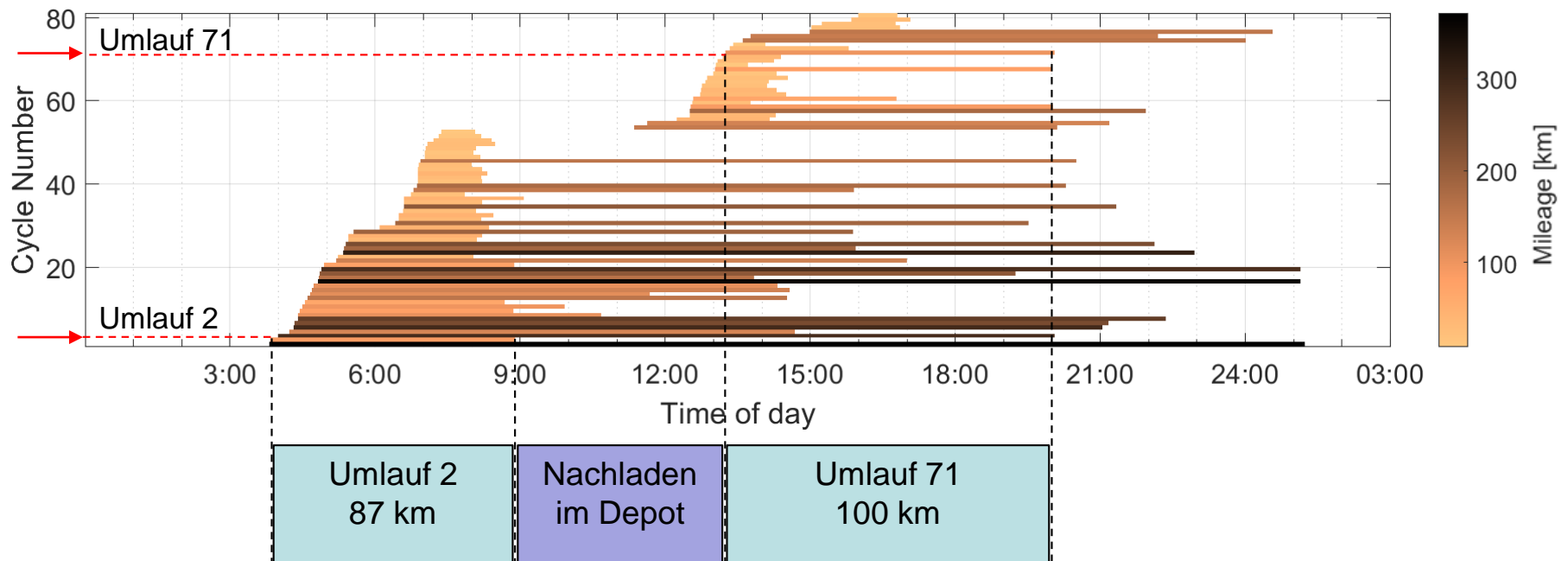
→ **Nicht alle Umläufe sind zur gleichen Zeit zu befahren**

Modellierung

Analyse der modellierten Umläufe

Beispiel:

Gelenkbusse | Tagesart: (nicht-Schulferien-) **Montag**



In diesem Beispiel: **187 km** elektrisch gefahrene Strecke mit einer **100 km-Batterie**

Agenda

Einleitung

Modellierung

Optimierung

DC-Infrastruktur

Zusammenfassung

Ausblick

Optimierung Kombination von geeigneten Umläufen

Ausgangslage: Ein Bus kann.....

- einen **langen Umlauf**, oder
- **mehrere kurze Umläufe** hintereinander befahren.
 - Dies ermöglicht ggf. ein **Zwischenladen** im Depot (→ Höhere Tagesfahrleistung).

Herausforderung: Entwicklung einer **Heuristik**, um die Umläufe zu kombinieren. Ziel ist:

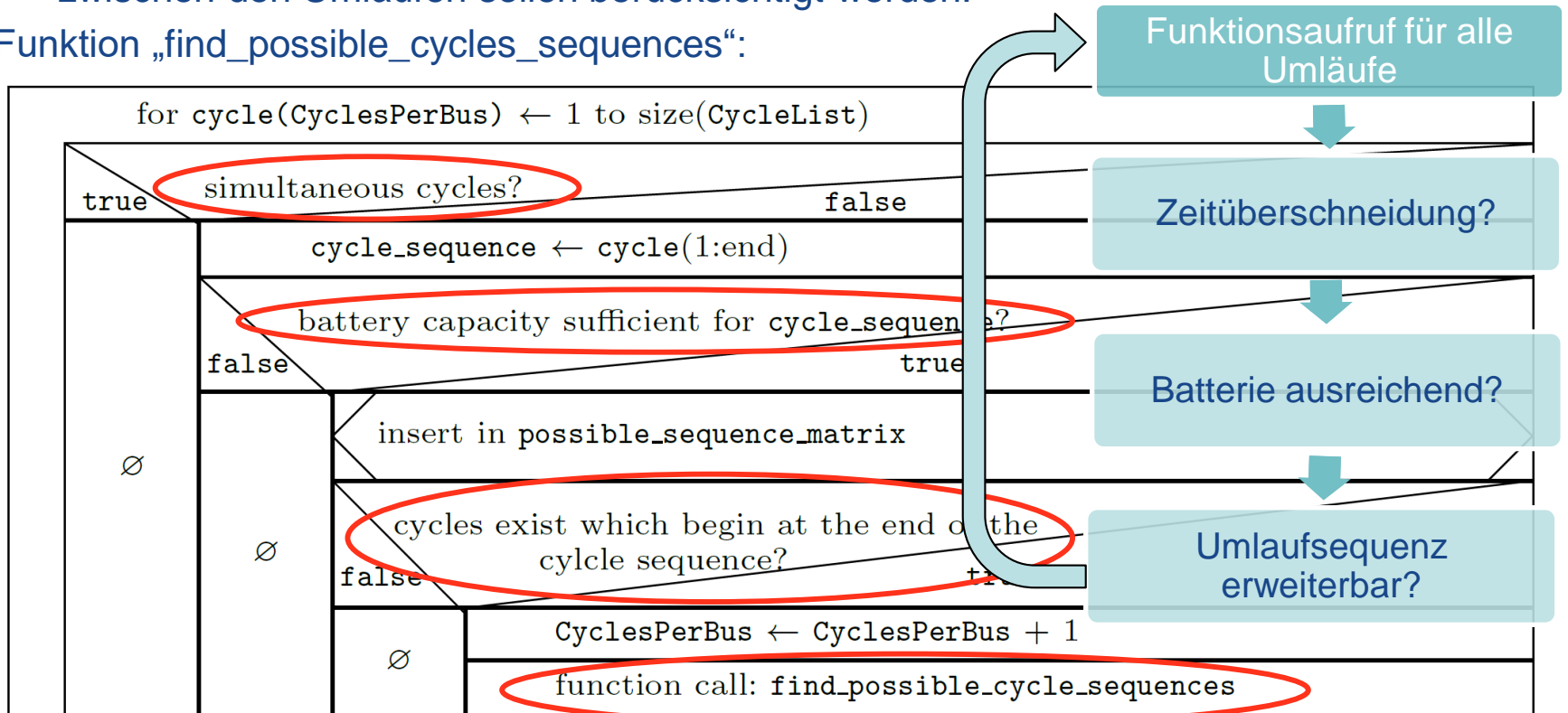
- **Minimierte Batteriekapazität**
- **Maximierte elektrische Strecke**

Zusätzliche Bedingungen: Der **Energiebedarf** der einzelnen Umläufe **variiert** je nach: **Bustyp, Wetter, Batteriegröße** (Gewicht), **Umlaufspezifikationen**.

Optimierung Kombination von geeigneten Umläufen

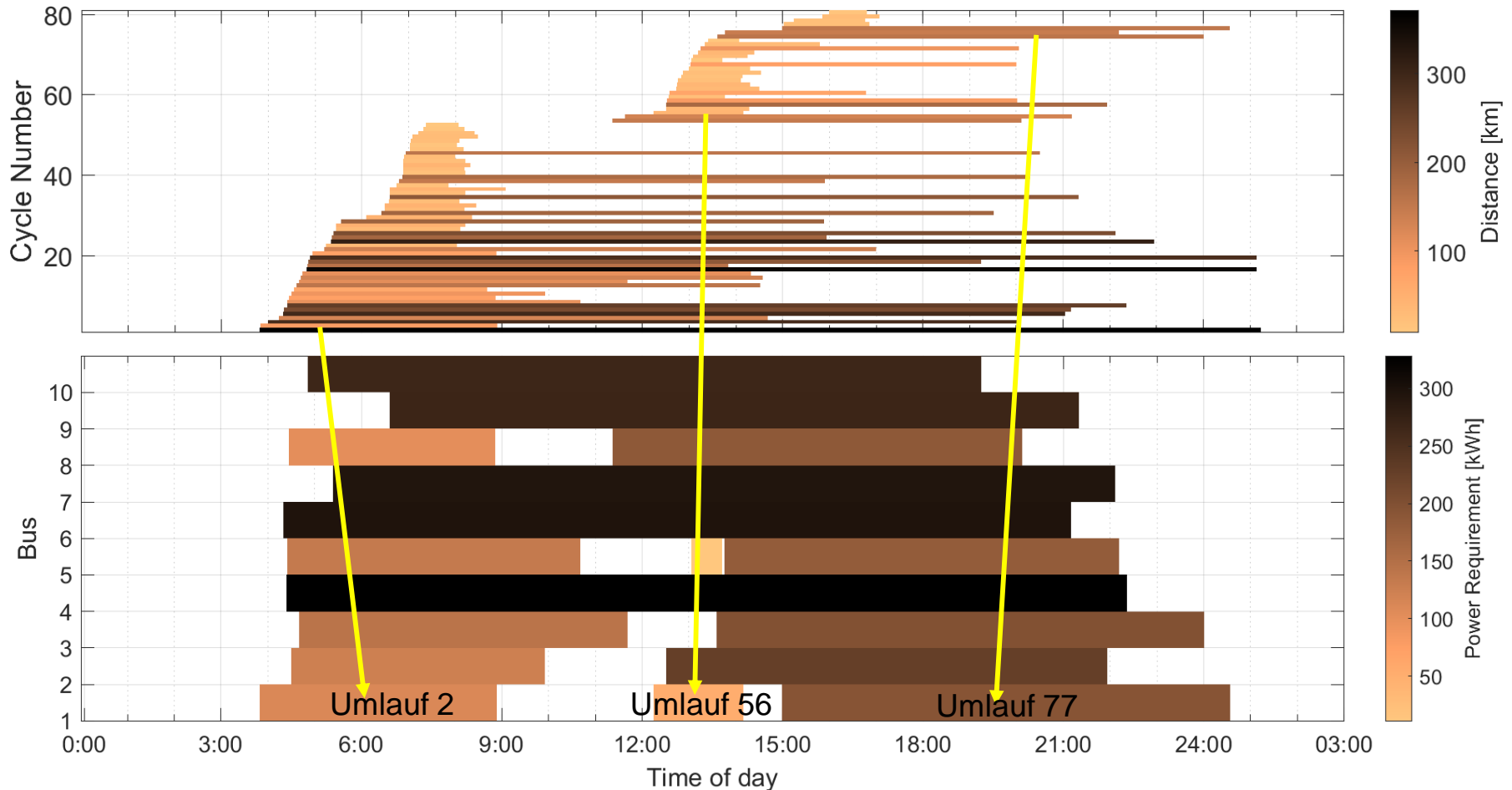
- Erster Schritt: **Finden** und **Auswählen** von möglichen **Kombinationen**.
- Die erforderlichen **Heiz- und Kühlenergiebedarfe** und die **mögliche Ladezeit** zwischen den Umläufen sollen berücksichtigt werden.

Funktion „find_possible_cycles_sequences“:



Optimierung Kombination von geeigneten Umläufen

Ein mögliches Ergebnis für **zehn Gelenkbusse** als **Beispiel für einen Tag**:

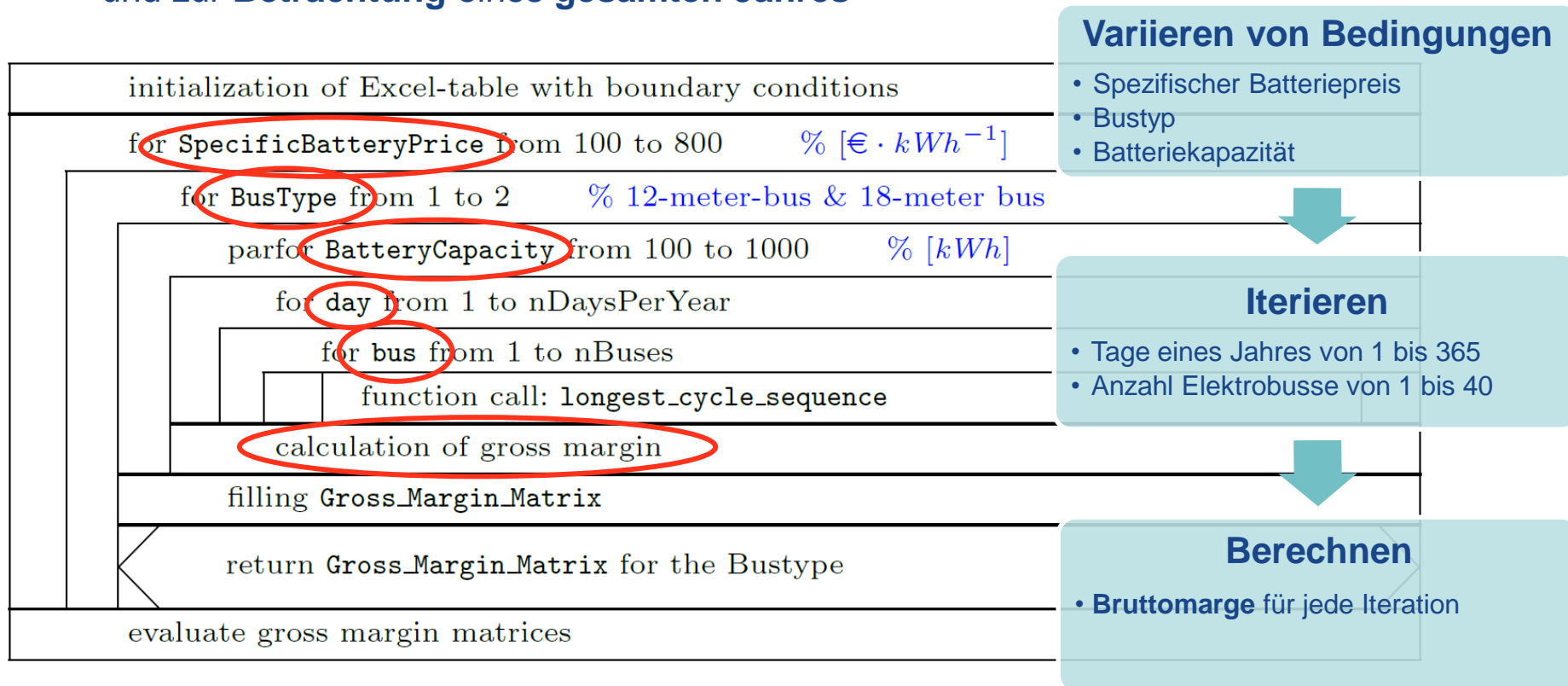


Zu diesem Zweck wird die Funktion für **jeden Bus** nacheinander aufgerufen.

Optimierung Algorithmus

Implementierung der Funktion in einen Algorithmus....

- zur **Bestimmung** der **Kosteneffizienz** für verschiedene **Bedingungen**
- und zur **Betrachtung** eines **gesamten Jahres**



Optimierung Algorithmus

Parameter:

Randbedingungen

- Batterieladung: Leistung, Effizienz, Totzeit
- Energiebedarfe: Traktion, Nebenverbraucher, Heizen, Kühlen
- Gewünschte Lufttemperatur
- Jahrestemperaturverlauf
- Abschreibungszeiträume
- Investitionshöhen
- Spez. Gewicht (Akku, Fahrgäste)
- Förderquote
- Strompreis
- Dieselpreis
- Umlaufplanung (Routen, usw.)
- Firmenkalendar

Methode

- Variation von: Batteriespezifika, Anzahl der Busse, Bustyp
- Identifikation der geeignetsten Umläufe pro Tag und Bus
- Berechnung und Bewertung der jeweiligen Bruttomarge

Ergebnis

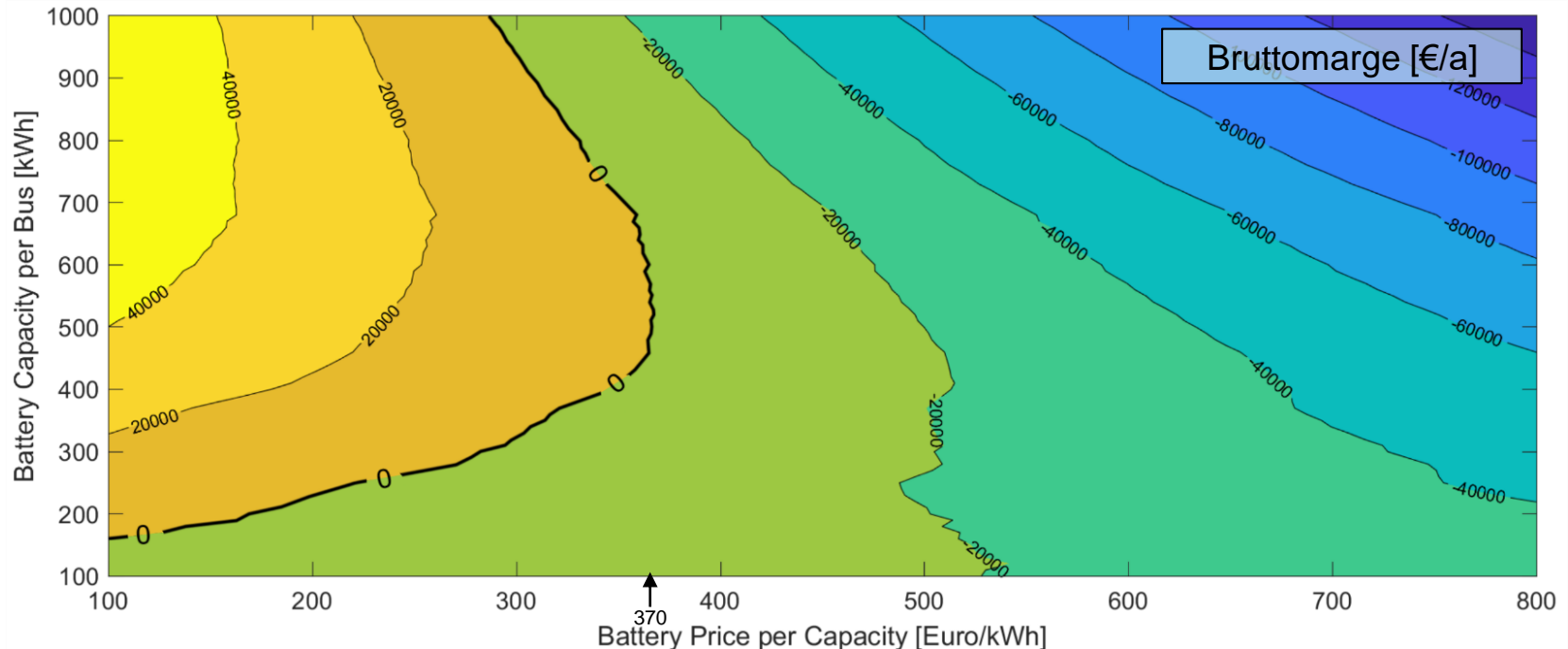
Ökonomisch optimale:

- Anzahl von Elektro-Solobussen
- Anzahl von Elektro-Gelenkbussen
- Batteriekapazität für Solobusse
- Batteriekapazität für Gelenkbusse

Optimierung

Ergebnisse (Gelenkbusse)

- Die **Bruttomargen-Matrix** ist als Beispiel für drei Busse dargestellt:



- Drei Gelenkbusse** können in Krefeld wirtschaftlich eingesetzt werden, wenn der spezifische Batteriepreis **unter 370 €/kWh** fällt.
 - Aktueller Batteriezellenpreis: **107 €/kWh**
 - Aktueller Batteriepackpreis: **600 - 1000 €/kWh**

[1]

[3,4,9]

Agenda

Einleitung

Modellierung

Optimierung

DC-Infrastruktur

Zusammenfassung

Ausblick

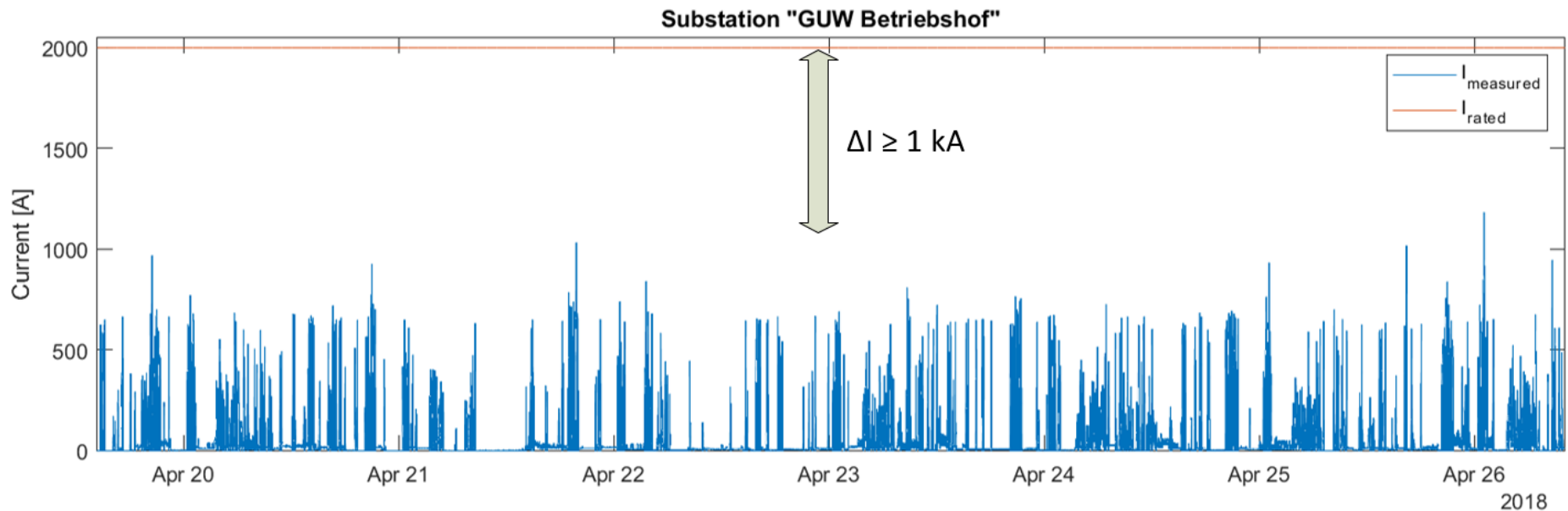
Gemeinsame Nutzung der Straßenbahn-Infrastruktur

Auslastung des Unterwerkes

Unterwerk auf dem Betriebshof

- Gleicher Spannungsbereich wie das von Elektrobussen (**700 V**)
- Der Gleichrichter hat einen Nennstrom von **2000 A**

Auslastung wurde **eine Woche lang gemessen**:

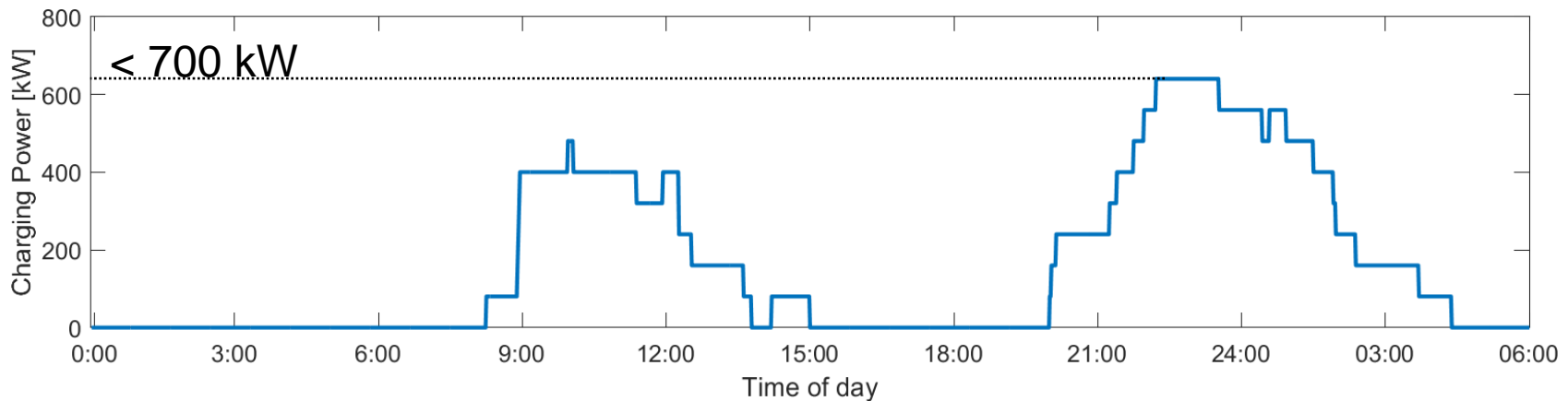


→ **1000 A (700 kW) sind jederzeit verfügbar**, ohne den Straßenbahnbetrieb zu gefährden.

Gemeinsame Nutzung der Straßenbahn-Infrastruktur

Simulation der Optimierungsergebnisse

Die Ladeleistung am Beispiel eines Montags mit einer Ladeleistung von 80 kW pro Bus. 5 Solobusse (450 kWh) und 5 Gelenkbusse (500 kWh):



Ergebnisse:

- **Zehn** Elektrobusse können mit dem **bestehenden Unterwerk** versorgt werden
- **Nicht** alle Busse müssen **gleichzeitig** geladen werden

Ausblick: Möglicherweise **weitere Potenziale** durch **intelligentes Lademanagement**

- Nutzung der gesamten 2000 A des Unterwerks (wenn keine Straßenbahn fährt)
- Verteilung der erforderlichen Ladelast über die mögliche Zeitspanne

Agenda

Einleitung

Modellierung

Optimierung

DC-Infrastruktur

Zusammenfassung

Ausblick

Zusammenfassung und weitere Ergebnisse

Zusammenfassung:

- In Krefeld können Elektrobusse wirtschaftlich eingesetzt werden, wenn die Batteriepreise **370 €/kWh** unterschreiten.
- Die **Straßenbahninfrastruktur** kann zum **Laden von Elektrobussen** genutzt werden.
 - Die teure **Anschaffung** von **Transformator** und **Gleichrichter kann entfallen**.
 - **Keine Auswirkungen** auf den **Straßenbahnbetrieb**.

Weitere Ergebnisse:

- Zusätzliche elektrisch gefahrene Strecke durch dynamische Umlaufkombination: ~25%.
- Ordnet eine **intelligente Depot-Management-Software** den Umläufen wetterspezifisch Elektrobusse zu, so sind im **Mischbetrieb** mit bis zu etwa 50 % Elektrobussen **keine Reservebusse erforderlich**.

Agenda

Einleitung

Modellierung

Optimierung

DC-Infrastruktur

Zusammenfassung

Ausblick

Ausblick

In weiterführenden Untersuchungen können **weitere Potenziale** identifiziert werden:

- **Aufbrechen** und Optimieren der **Umläufe**
- **Intelligentes Lademanagement**
 - Nutzung **günstiger Strompreise**
 - Teilnahme am **Regelenergiemarkt**
 - **Nutzung der vollen 2000 A des Unterwerkes**
 - wenn keine Straßenbahn fährt
 - Supercaps?
 - **Verteilung** der erforderlichen Ladelast über die **mögliche Zeitspanne**

Wenn es politisch gewünscht ist, **externe Effekte** wie CO₂-Emissionen oder Lärmemissionen zu **internalisieren**, **müssen** sich die **Rahmenbedingungen ändern**.

Zum Beispiel:

- **Besteuerung** von fossilen Kraftstoffen
- Höhere **Subventionen** von Elektrobussen



Literatur

1. Ahlswede, A.: Weltweite Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien von 2013 bis 2020 , Statista, 2019. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/534429/umfrage/weltweite-preise-fuer-lithium-ionen-akkus>
2. Hondius, H.: Was sparen Elektrobusse wirklich? Wirkungsgrade von Elektrobussen im Vergleich zu Dieselnissen vor dem Hintergrund der Konsequenzen der Energiewende. Der Nahverkehr, Vol. 32, No. 10, 2014, pp. 38-42.
3. Kunith, A.: Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs, Springer Vieweg, 2017. doi:10.1007/978-3-658-19347-8
4. Lehner, S., Rogge, M., Becker, J., Sauer, D.: Battery Design for Successful Electrification in Public Transport. Energies, Vol. 8, No. 7, 2015, pp. 6715-6737. doi:10.3390/en8076715
5. Müller-Hellmann, A.: Stadtbahnen und Elektromobilität - Ideen zu einer Symbiose. Der Nahverkehr, Vol. 30, No. 3, 2012, pp. 10-14.
6. Müller-Hellmann, A.: Vielfalt der Ladestrategien. Variationsmöglichkeiten von Betriebsweisen, Ladeverfahren und -strategien für den Batteriebus Einsatz im ÖPNV. Der Nahverkehr, Vol. 36, Sonderheft Elektrobuse, 2018, pp. 9-12.
7. Schnieder, L.: Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr, VDI & Springer Vieweg, 2018. doi:10.1007/978-3-662-57318-1
8. Schwarze, J., Schroeteler, K., Hasler, P., Anemüller, S.: Köln setzt auf E-Mobilität auch im Busverkehr. Der Nahverkehr, Vol. 35, No. 6, 2017, pp. 39-44.
9. Seeliger, A., Jeschull S., Krönauer B., Limberg S., Schreiner C., Albuquerque C., de Souza M., Verza M.: Elektrobuse im ÖPNV, HS Niederrhein, 2016.
10. Tschöke, H.: Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, Springer Vieweg, 2015. doi:10.1007/978-3-658-04644-6
11. van Liemt, C.: Stadt Bingen - Referenzstandort für Elektromobilität, Diplomica Verlag, 2018.
12. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): VDV Standardschnittstelle Liniennetz/Fahrplan, VDV-Schriften 2013.

Impressum

SWK E² - Institut für Energietechnik und Energiemanagement

Hochschule Niederrhein

Reinarzstr. 49

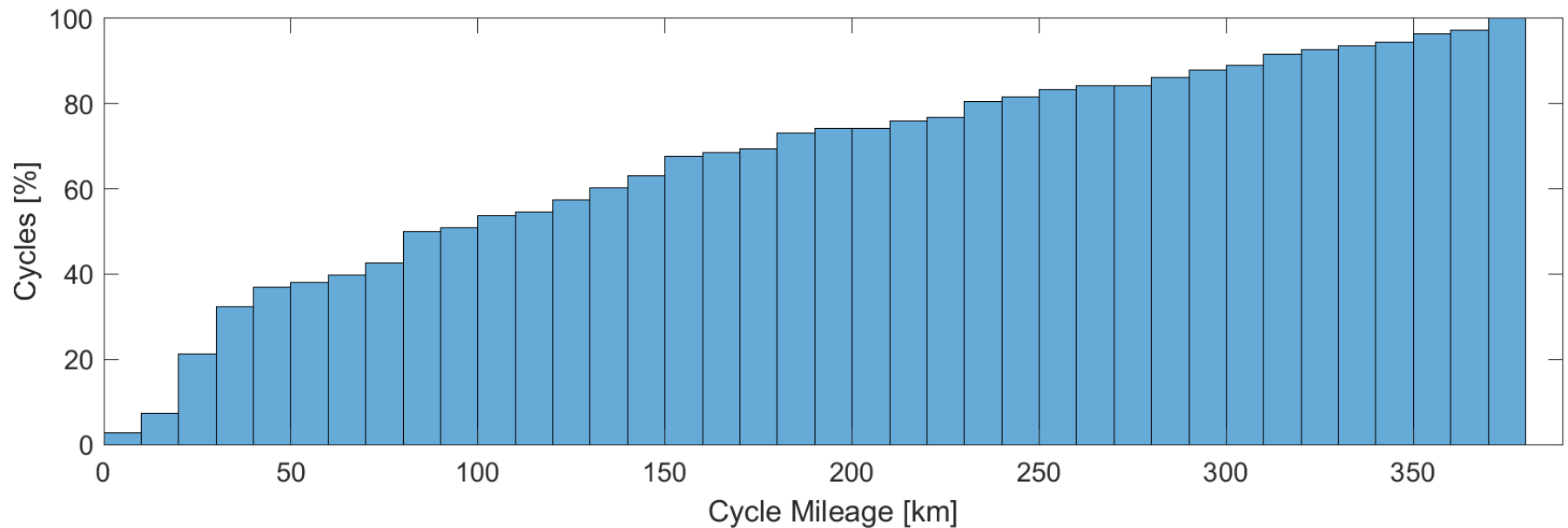
47805 Krefeld

Marius Madsen, M.Eng.	Prof. Dr.-Ing. Marc Gennat
marius.madsen@hs-niederrhein.de	marc.gennat@hs-niederrhein.de
Tel: +49 (0)2151 822-6697	Tel: +49 (0)2151 822-5112

Anhang

Strecke pro Umlauf

Umlaufdatenbank als Histogramm der Umlaufstrecken:



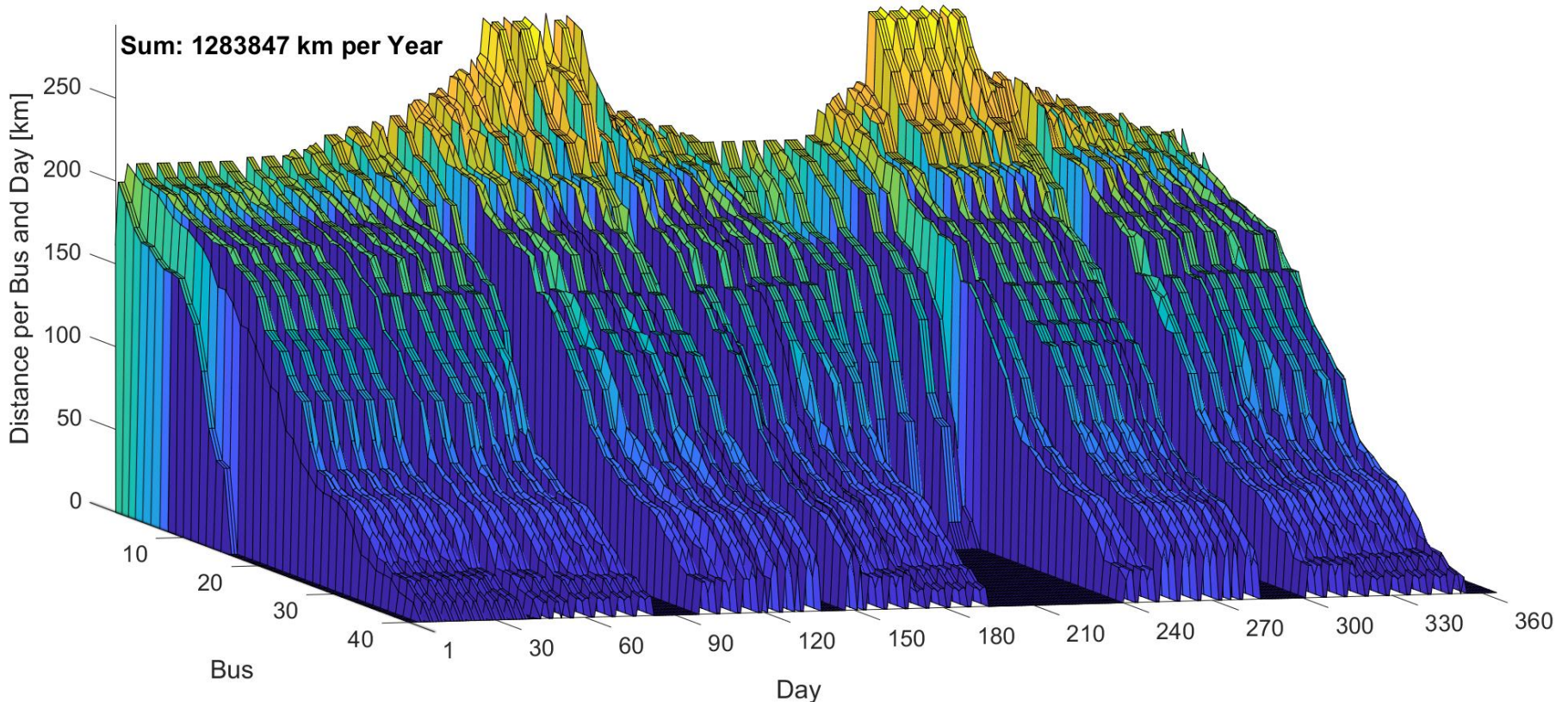
Beispiel:

Elektrobusse mit einer Reichweite von 140 km können 60% aller Umläufe befahren. Dies entspricht jedoch nur 25 % der Tagesgesamstrecke

Anhang

Optimierungs-Algorithmus

Ein mögliches Zwischenergebnis für 40 Gelenkbusse mit einer Batteriekapazität von 500 kWh:

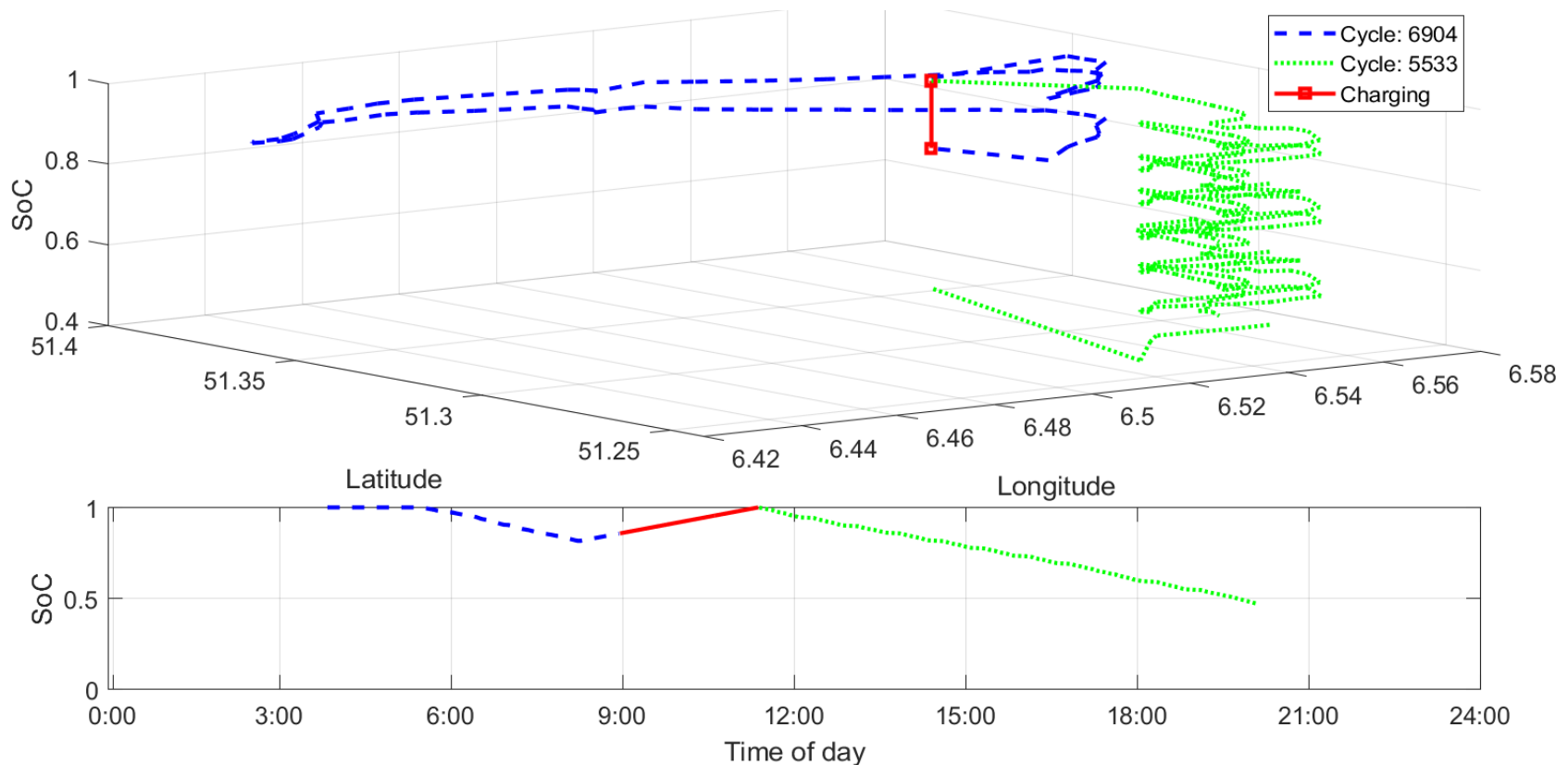


→ Nächster Schritt: Iteration mit **unterschiedlichen Batteriekapazitäten** und **Bestimmung der Bruttomarge**

Anhang

Simulation: Überprüfung auf sicheren Betrieb

- Monte-Carlo-Simulation mit der Temperaturhistorie der letzten 10 Jahre.
- Beispiel für einen Bus an einem Tag:

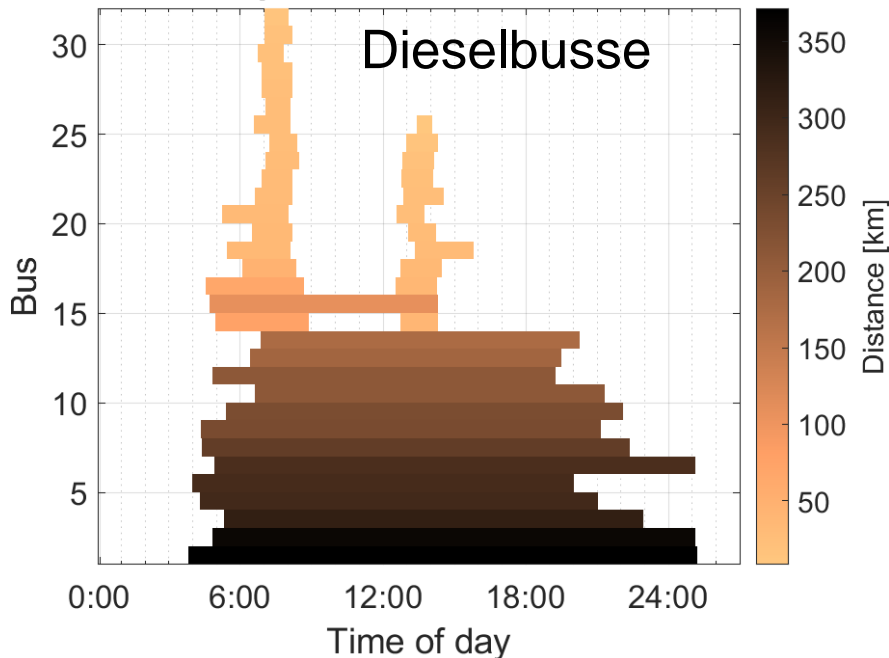


Anhang

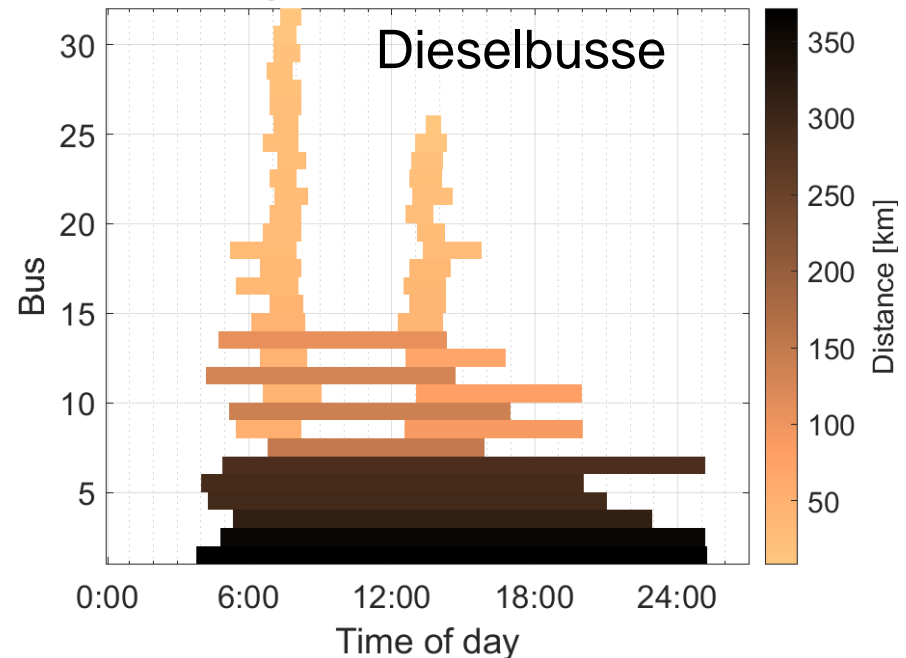
Reservebusse

- Ordnet eine **intelligente Depot-Management-Software** den Umläufen wetterspezifisch elektrische Busse zu, so sind in einem Mischbetrieb mit bis zu ca. 50 % elektrischen Bussen keine Reservebusse erforderlich.

18-Meter Diesel Buses Day:8, Day Type: 1
Required diesel buses: 32



18-Meter Diesel Buses Day:134, Day Type: 1
Required diesel buses: 32



Anhang

Opportunity-Charging vs. Overnight-Charging

Overnight Charging: Die volle Ladung der Akkus in der Nacht im Depot.

- Hohe Flexibilität des Busses
- Hohes Gewicht (und hohe Kosten) des Akkus
- Begrenzte Reichweite

Opportunity Charging: Das Aufladen der Akkus zwischendurch während des Umlaufs.

- Kleinere Batterie
- Investitionen in Zwischenladestationen
- Kaum Reichweitenproblem, dafür Bindung an die ausgebauten Routen
- Die Ladezeiten sind wichtig und müssen eingehalten werden

[6]



Hochschule Niederrhein

University of Applied Sciences

SWK E²

**Institut für Energietechnik und
Energiemanagement**

Institute of Energy Technology and
Energy Management