Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²
Institut für Energietechnik und Energiemanagement
Institute of Energy Technology and Energy Management

Wirtschaftlichkeitsuntersuchung einer Elektrobusflotte mit Maximierung der elektrischen Betriebskilometer*

16. Symposium Energieinnovation

SWK E² - Institut für Energietechnik und Energiemanagement

Marius Madsen | Marc Gennat

12.02.2020

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

SWK

Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences

SWK E²

Agenda

Einleitung

Modellierung

Algorithmus zur Bestimmung einer unteren Schranke

Ganzzahlige lineare Optimierung

Zusammenfassung und Ausblick

Einleitung

In Krefeld basiert der öffentliche Verkehr auf Straßenbahnen und **Dieselbussen**.

Solobusse: 2,15 Mio. km/a

Gelenkbusse: 2,25 Mio. km/a

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

Elektrobusse wirtschaftlich?

Einleitung

Stand der Technik

Elektrobusse sind noch nicht wirtschaftlich nutzbar [10]

- **Investitionen** sind **höher** als bei Dieselbussen [4]
  - Hohe Auswirkungen der Batteriekosten
- **Kilometerbezogene Kosten** sind **niedriger** als die von Dieselbussen [3,10]

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

- **Maximierung** der **elektrisch** angetriebenen **Kilometerleistung** und
- **Minimierung** der **Batteriekapazität** bei der Verwendung von Elektrobussen

Methode:

Agenda

Einleitung

Modellierung

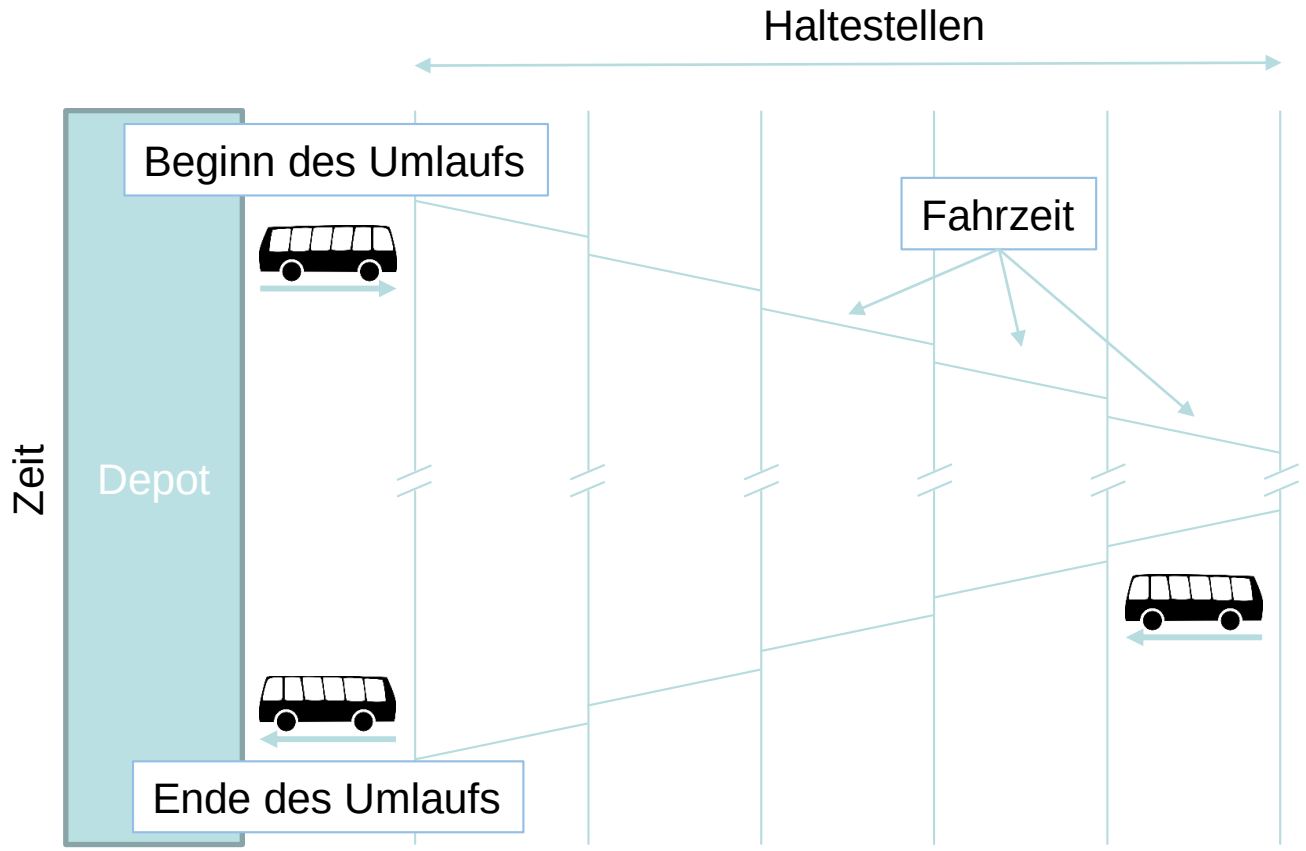
Algorithmus zur Bestimmung einer unteren Schranke

Ganzzahlige lineare Optimierung

Zusammenfassung und Ausblick

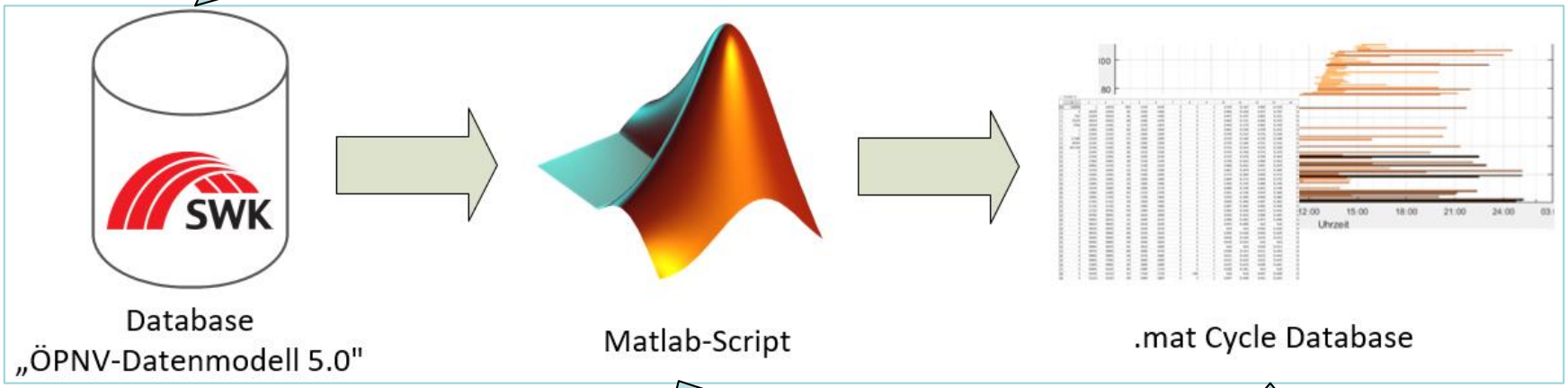
Modellierung
Wie werden Bus-Umläufe definiert?

- Ein Umlauf beginnt mit der Depotausfahrt und endet mit einer Depoteinfahrt und kann verschiedene Linien und Routen beinhalten. [9]



Modellierung
Datenbasis

Die SWK Mobil GmbH organisiert Umlaufinformationen nach der **Standardschnittstelle „ÖPNV-Datenmodell 5.0“.** [14]



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.

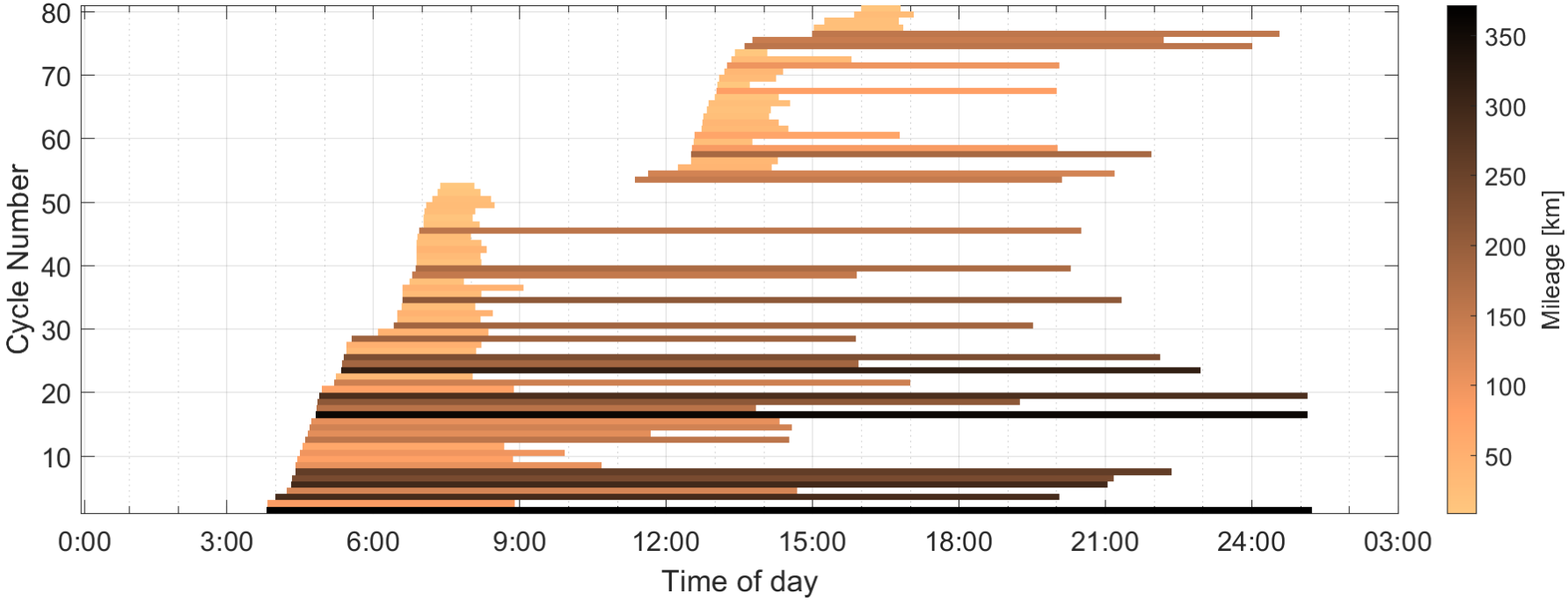
Modellierung

Analyse der modellierten Umläufe

Beispiel:

Gelenkbusse Tagesart: **Montag** (keine Ferien) Summe: 7.950 km

Anzahl der (Gelenkbus-) Umläufe**: 81**



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

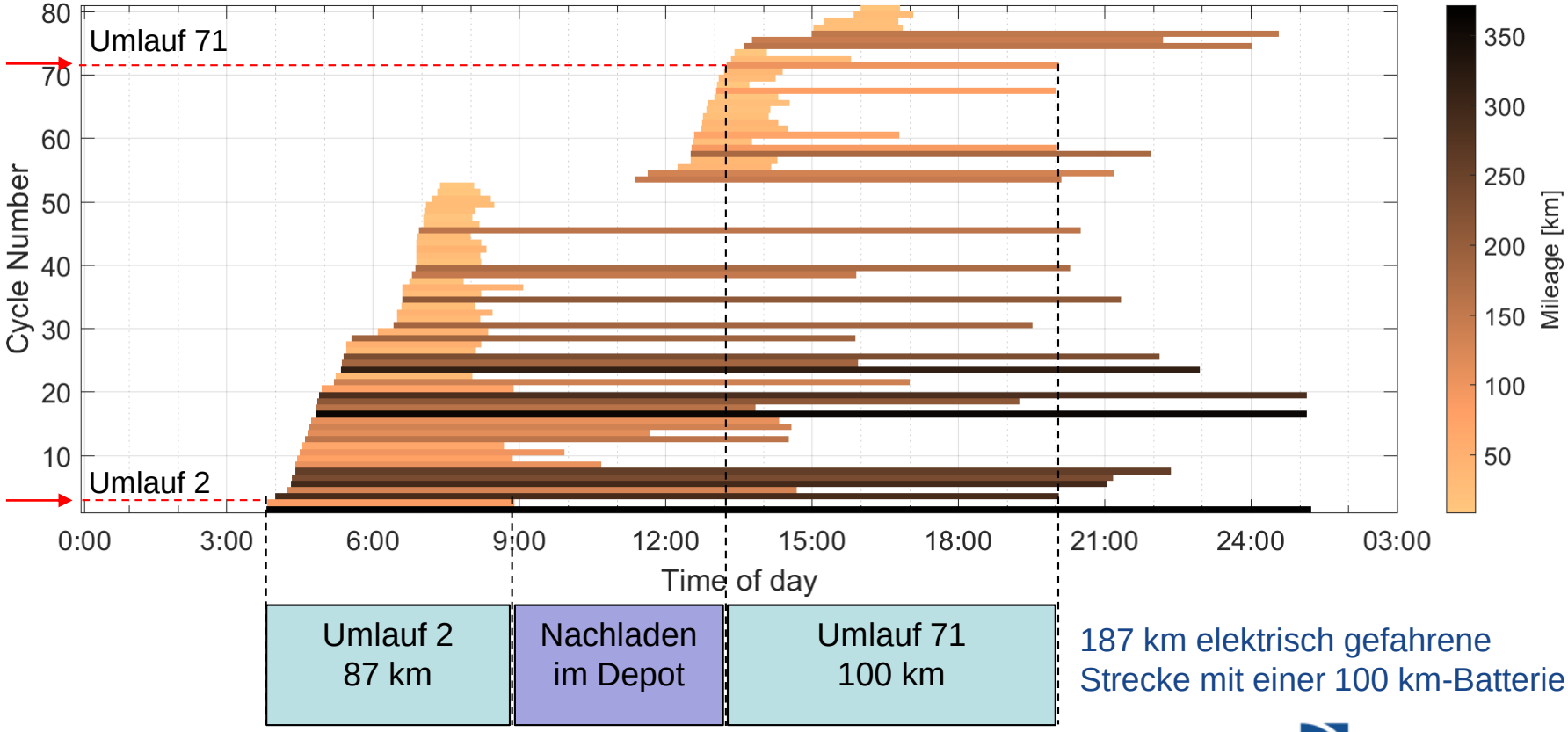
Modellierung

Analyse der modellierten Umläufe

Beispiel:

Gelenkbusse Tagesart: **Montag** (keine Ferien) Summe: 7.950 km

Anzahl der (Gelenkbus-) Umläufe**: 81**



187 km elektrisch gefahrene Strecke mit einer 100 km-Batterie

SWK
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²

Agenda

Einleitung

Modellierung

Algorithmus zur Bestimmung einer unteren Schranke

Ganzzahlige lineare Optimierung

Zusammenfassung und Ausblick

Algorithmus
Kombination von geeigneten Umläufen

Ausgangslage: Ein Bus kann.....

- **einen langen Umlauf**, oder
- **mehrere kurze Umläufe** hintereinander befahren**.**

  → Dies ermöglicht auch **Zwischenladen** im Depot (→ Höhere Tagesfahrleistung).

Herausforderung:

- Entwicklung einer **Heuristik**, um Umläufe zu kombinieren.

Ziel:

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

Zusätzliche Bedingungen:

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

Algorithmus
Warum ein Algorithmus?

- **Maximal drei Buseinsätze pro Tag und Bus** aufgrund zeitlicher Überschneidungen

$$n_{kombin} = \prod_{j=1}^{|B|} \sum_{i=1}^{n_{e,max}=3} \binom{|U| - j + 1}{i}$$

- Für zehn Gelenkbusse ergeben sich mehr als $\mathrm{n_{kombin}} = \mathbf{10^{48}}$ **Kombinationen**

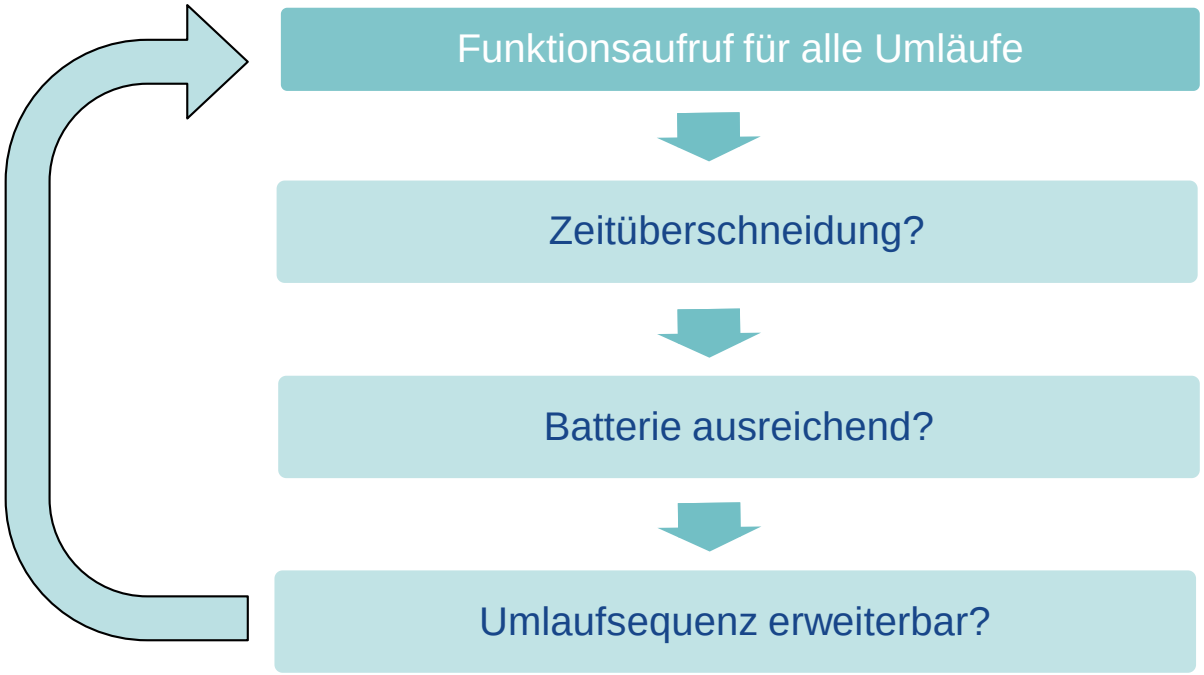
→ **Mit kombinatorischen Verfahren keine Lösung in hinreichend kurzer Zeit**

SWK
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²

Algorithmus
Kombination von geeigneten Umläufen

- Erster Schritt: **Finden** und **Auswählen** möglicher **Kombinationen**
- Erforderliche **Heiz-** und **Kühlenergiebedarfe** und **mögliche Ladezeit** zwischen Umläufen sollen berücksichtigt werden

Funktion „find_possible_cycles_sequences“:



Algorithmus
Algorithmus

Implementierung der **Funktion** in einen **Algorithmus....**

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

Variieren von Bedingungen

- Spezifischer Batteriepreis
- Bustyp
- Batteriekapazität

Iterieren

- Tage eines Jahres von 1 bis 365
- Anzahl Elektrobusse von 1 bis 40

Berechnen

- **Bruttomarge** für jede Iteration

SWK
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²

Algorithmus
Einbettung in übergeordneten 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.)
- Firmenkalender

Methode

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

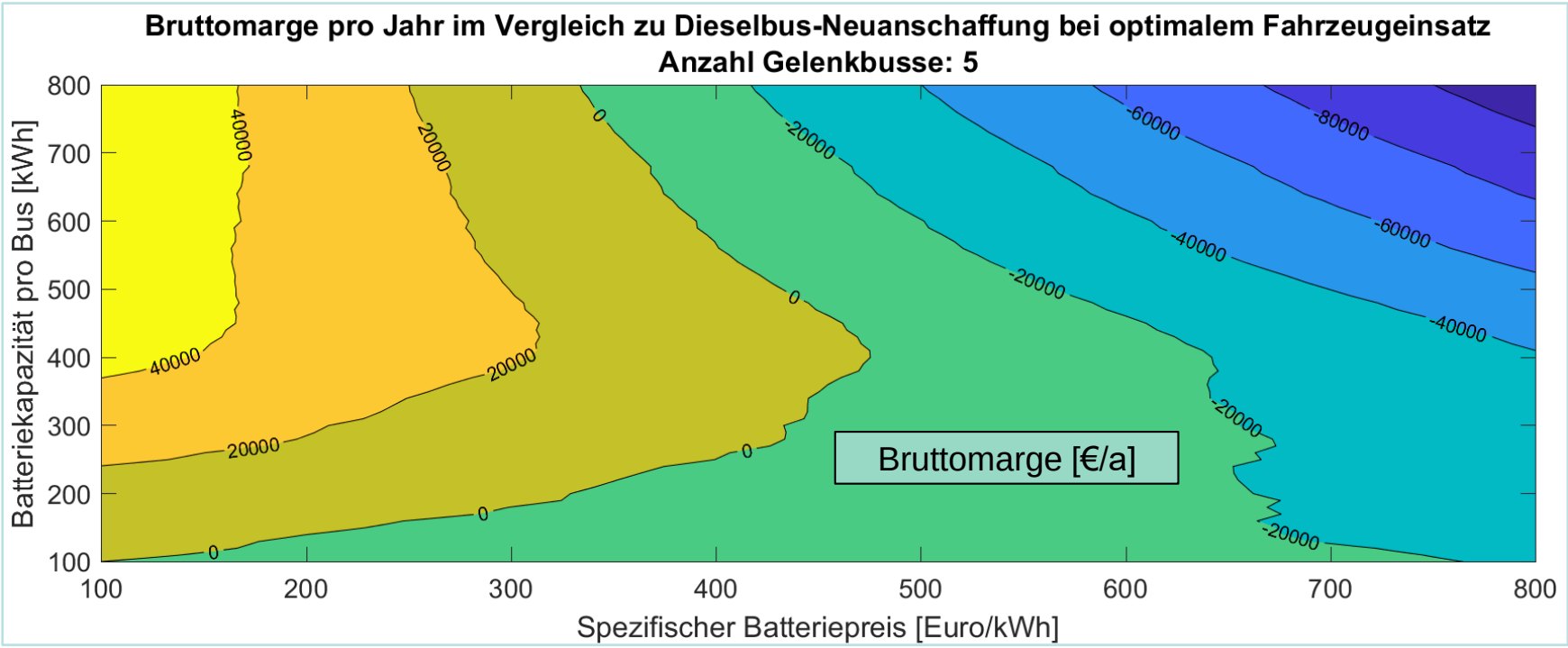
Ergebnis

Ökonomisch optimale:

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

Algorithmus
Ergebnisse (Gelenkbusse)

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



- Gelenkbusse können in Krefeld wirtschaftlich eingesetzt werden, wenn der spezifische Batteriepreis **unter 480 €/kWh fällt.**
  - Aktueller Batterie**zellen**preis: **107 €/kWh** [1]
  - Aktueller Batterie**pack**preis: **600 - 1000 €/kWh** [4,5,11]

SWK
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²

Agenda

Einleitung

Modellierung

Algorithmus zur Bestimmung einer unteren Schranke

Ganzzahlige lineare Optimierung

Zusammenfassung

Ausblick

Ganzzahlige lineare Optimierung

Formulierung als ganzzahliges lineares Optimierungsproblem

Formulierung der Zielfunktion:

$$\max_{x} \; c^T x \qquad \text{u.d.N.} \qquad A_i \cdot x \leq d_i \qquad \forall\, i \in \{1, \dots, |d|\},$$

Entscheidungsvektor x mit Länge $|x| = |U| \cdot |B|$ ist

$$x^T = (\underbrace{x_{u=1}\; x_{u=2} \cdots x_{u=|U|}}_{b=1} \quad \underbrace{x_{u=1}\; x_{u=2} \cdots x_{u=|U|}}_{b=2} \quad \underbrace{x_{u=1}\; x_{u=2} \cdots x_{u=|U|}}_{b=3})$$

Vektor c ($|c| = |x|$) beinhaltet **Streckenlängen** der Umläufe für alle Elektrobusse

$$c^T = (\underbrace{s_{u=1}\; s_{u=2} \cdots s_{u=|U|}}_{b=1} \quad \underbrace{s_{u=1}\; s_{u=2} \cdots s_{u=|U|}}_{b=2} \quad \underbrace{s_{u=1}\; s_{u=2} \cdots s_{u=|U|}}_{b=3})$$

Ganzzahlige lineare Optimierung

1. Nebenbedingung

Jeder Umlauf kann **maximal** von einem (Elektro-) **Bus** befahren werden:

$$\sum_{b=1}^{|B|} x_{(b-1)\,|U|+u} \leq 1 \quad \forall\, u \in U$$

Nebenbedingung des IP:

$$A_i \cdot x \leq d_i$$

Formulierung der Nebenbedingung für das IP:

$$\begin{matrix} & b=1 & & & b=2 & & & & b=3 & & & \\ A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & & & & & & & & & & & d_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

SWK Hochschule Niederrhein University of Applied Sciences SWK E²

Ganzzahlige lineare Optimierung

2. Nebenbedingung

Ein Bus darf **nicht mehrere Umläufe gleichzeitig** befahren:

$$t_{start}, e_{i,b} \geq t_{end}, e_{i-1,b} + \Delta t \quad \forall\, i \in [2, |e_b|] \qquad \forall\, b \in B$$

Nebenbedingung des IP:

$$A_i \cdot x \leq d_i$$

Beispiel: Zeitliche Überschneidung von Umlauf 1 und 3:

$$\begin{matrix} & b=1 & & & & b=2 & & & & b=3 & & \\ A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} & & & & & & & & & & & \end{matrix} \qquad d_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

SWK Hochschule Niederrhein University of Applied Sciences SWK E²

Ganzzahlige lineare Optimierung

3. Nebenbedingung

Traktionsbatterien dürfen **nicht komplett entladen** und **nicht** zu **über 100%** geladen sein. **Zwischenladungen** sind **nur im Depot** zwischen den Umläufen erlaubt.

$$\delta \leq SoC_{b,t} \leq 1 \quad \forall\, b \in B, \qquad t \in \{1, \dots, 1440\}$$

Nebenbedingung des IP:

$$A_i \cdot x \leq d_i$$

Beispiel: Verbot der Umlaufkombinationen 1, 2 und 4 für alle Busse

$$\begin{matrix} & b=1 & & & & b=2 & & & & b=3 & & \\ A_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \qquad d_3 = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

SWK Hochschule Niederrhein University of Applied Sciences SWK E²

Ganzzahlige lineare Optimierung

Ergebnisse und Vergleich

Solver	Ermittelte Gesamtstrecke [km]	Benötigte Rechenzeit [s]
Algorithmus	2271,70	0,05
Gurobi [2]	2277,28	1,48
Intlinprog [6]	2277,28	49.587,23

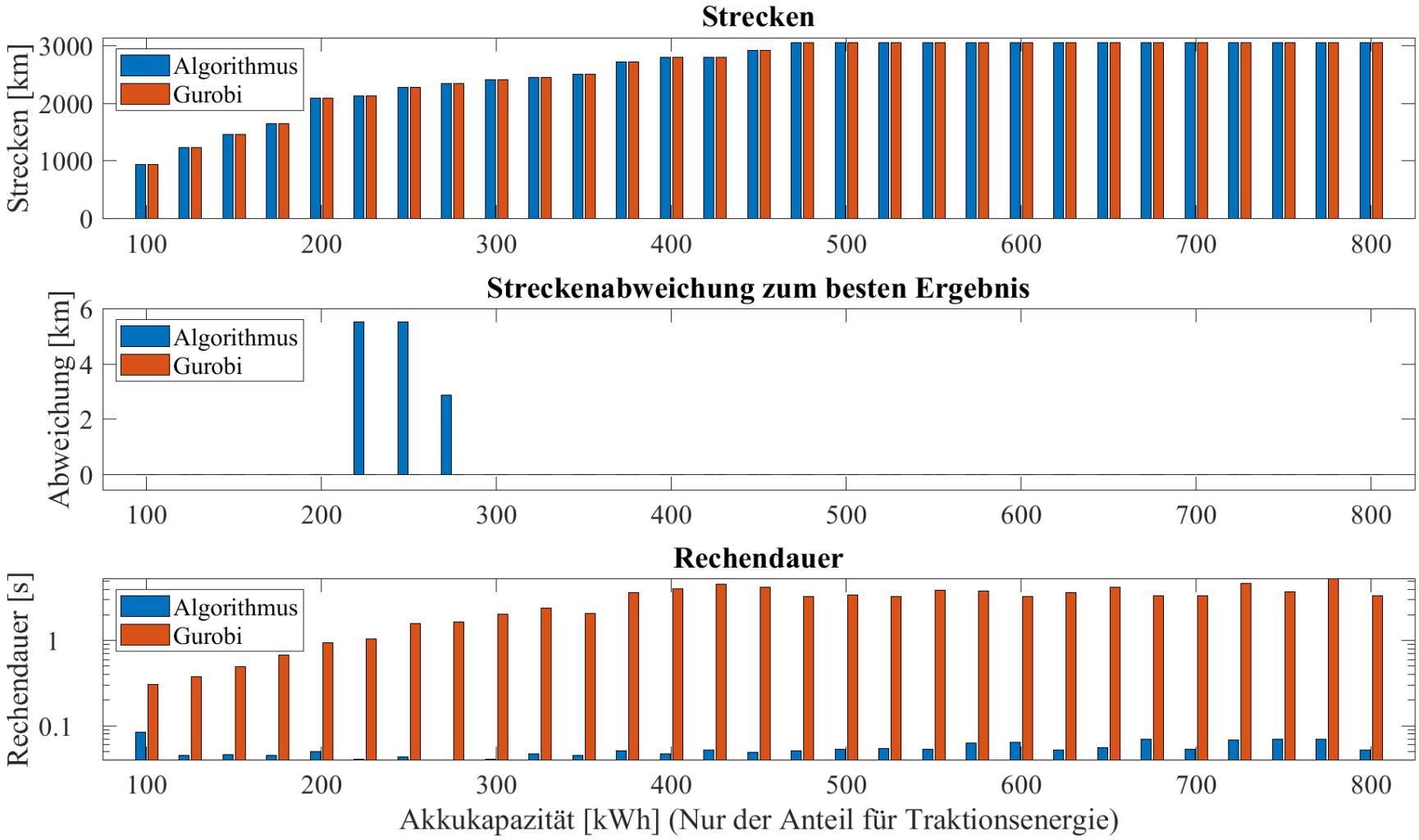
In diesem Beispiel:

- Abweichung der Heuristik um 5,6 km (**≈ 0,25%)** vom optimalen Ergebnis
- Andererseits wesentlich geringere Rechenzeit mit dem Algorithmus

→ Abwägung zwischen Genauigkeit und Rechenzeit

Ganzzahlige lineare Optimierung

Ergebnisse und Vergleich



SWK
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²

Agenda

Einleitung

Modellierung

Algorithmus

Ganzzahlige lineare Optimierung

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung:

- **Mithilfe ganzzahliger linearer Optimierung** können **optimale Umlaufzuteilungen** bestimmt werden.
- **Aufgrund** der **Rechenzeit** wird jedoch der **Algorithmus** genutzt.
- In Krefeld können Elektrobusse wirtschaftlich eingesetzt werden, wenn die Batteriepreise **480 €/kWh** unterschreiten.

Ausblick:

- In weiterführenden Untersuchungen
  - Aufbrechen und Optimieren der Umläufe
  - Intelligentes Lademanagement (Strompreise, Regelenergie, Ladelastverteilung)
- Modellierung der CO_2-Bepreisung (Internalisierung externer Effekte)

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!

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. Gurobi Optimization: Gurobi Optimizer 9.0. http://www.gurobi.com/download/gurobi-optimizer/ (besucht am 17.01.2020)
3. Hondius, H.: Was sparen Elektrobusse wirklich? Wirkungsgrade von Elektrobussen im Vergleich zu Dieselbussen vor dem Hintergrund der Konsequenzen der Energiewende. Der Nahverkehr, Vol. 32, No. 10, 2014, pp. 38-42.
4. Kunith, A.: Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs, Springer Vieweg,2017. doi:10.1007/978-3-658-19347-8
5. 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
6. Mathworks: Intlinprog - Mixed-integer linear programming (MILP). https://de.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html (besucht am 17.01.2020)
7. Müller-Hellmann, A.: Stadtbahnen und Elektromobilität - Ideen zu einer Symbiose. Der Nahverkehr, Vol. 30, No. 3, 2012, pp. 10-14.
8. Müller-Hellmann, A.: Vielfalt der Ladestrategien. Variationsmöglichkeiten von Betriebsweisen, Ladeverfahren und -strategien für den Batteriebuseinsatz im ÖPNV. Der Nahverkehr, Vol. 36, Sonderheft Elektrobusse, 2018, pp. 9-12.
9. Schnieder, L.: Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr, VDI & Springer Vieweg, 2018. doi:10.1007/978-3-662-57318-1
10. 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.
11. Seeliger, A., Jeschull S., Krönauer B., Limberg S., Schreiner C., Albuquerque C., de Souza M., Verza M.: Elektrobusse im ÖPNV, HS Niederrhein, 2016.
12. Tschöke, H.: Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, Springer Vieweg, 2015. doi:10.1007/978-3-658-04644-6
13. van Liemt, C.: Stadt Bingen - Referenzstandort für Elektromobilität, Diplomica Verlag, 2018.
14. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): VDV Standardschnittstelle Liniennetz/Fahrplan, VDV-Schriften 2013.

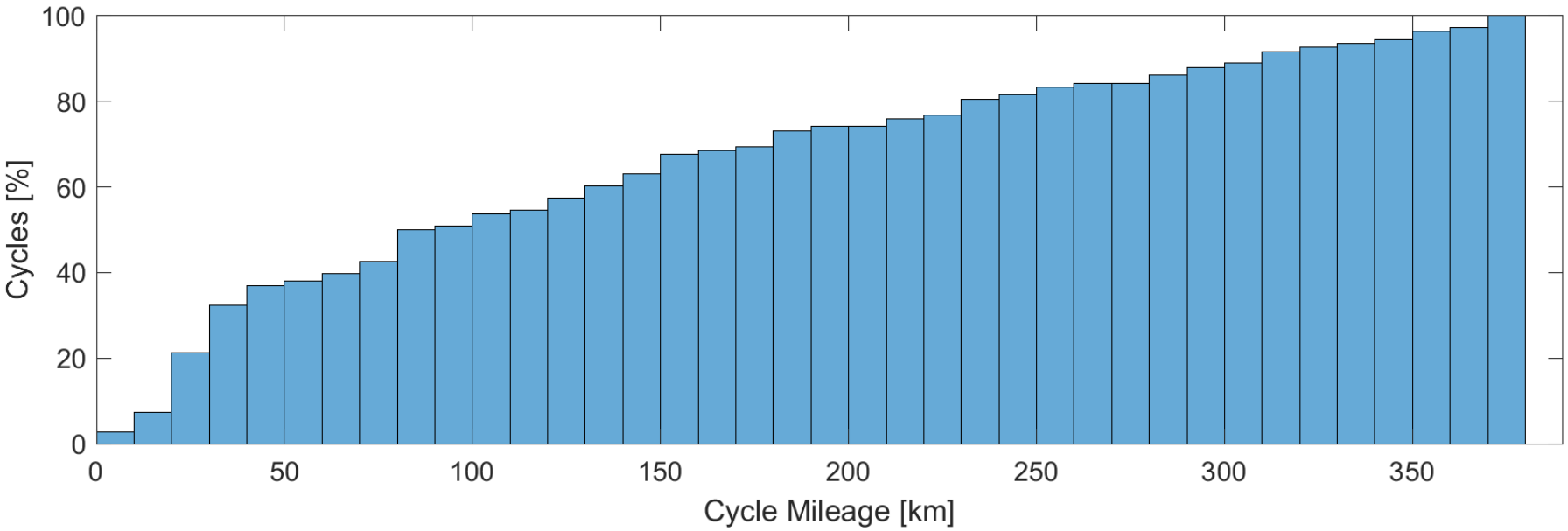
Impressum

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 Tel: +49 (0)2151 822-6697	marc.gennat@hs-niederrhein.de Tel: +49 (0)2151 822-5112

Anhang
Strecke pro Umlauf

Umlaufdatenbank als Histogramm der Umlaufstrecken:

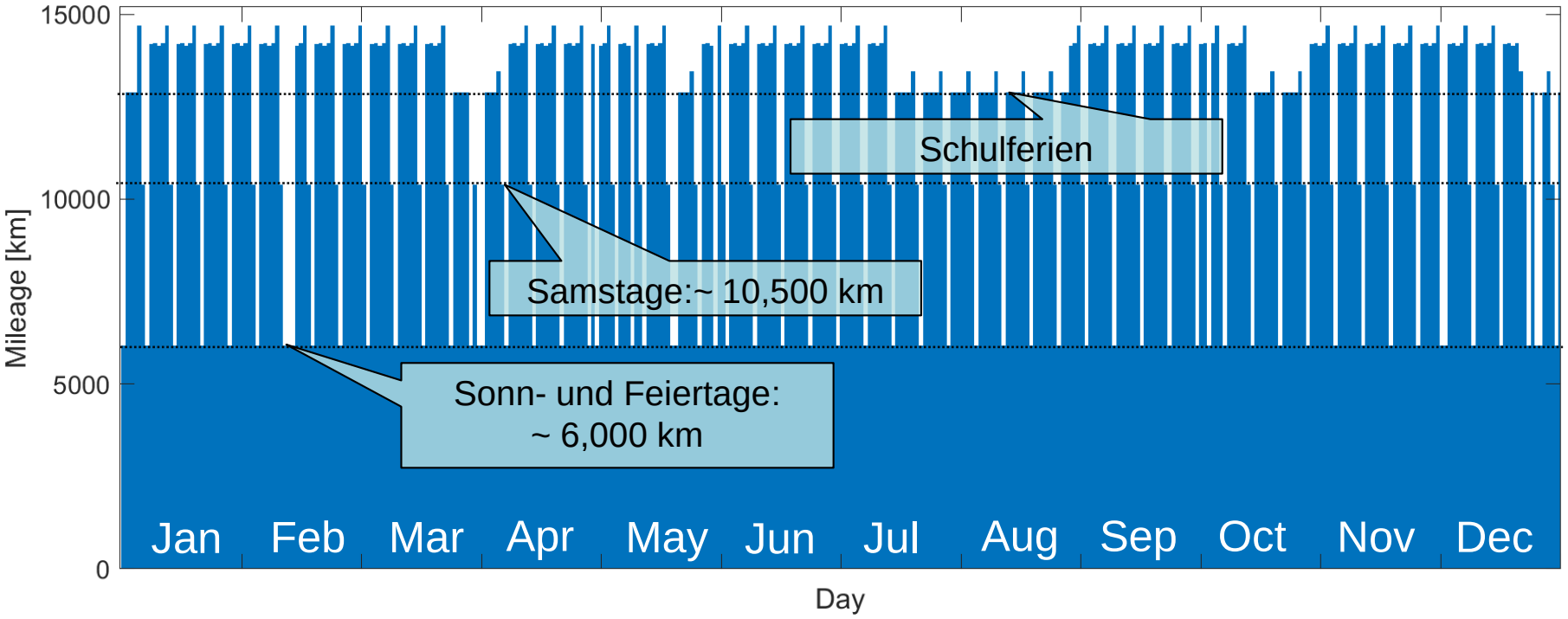


Beispiel:

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

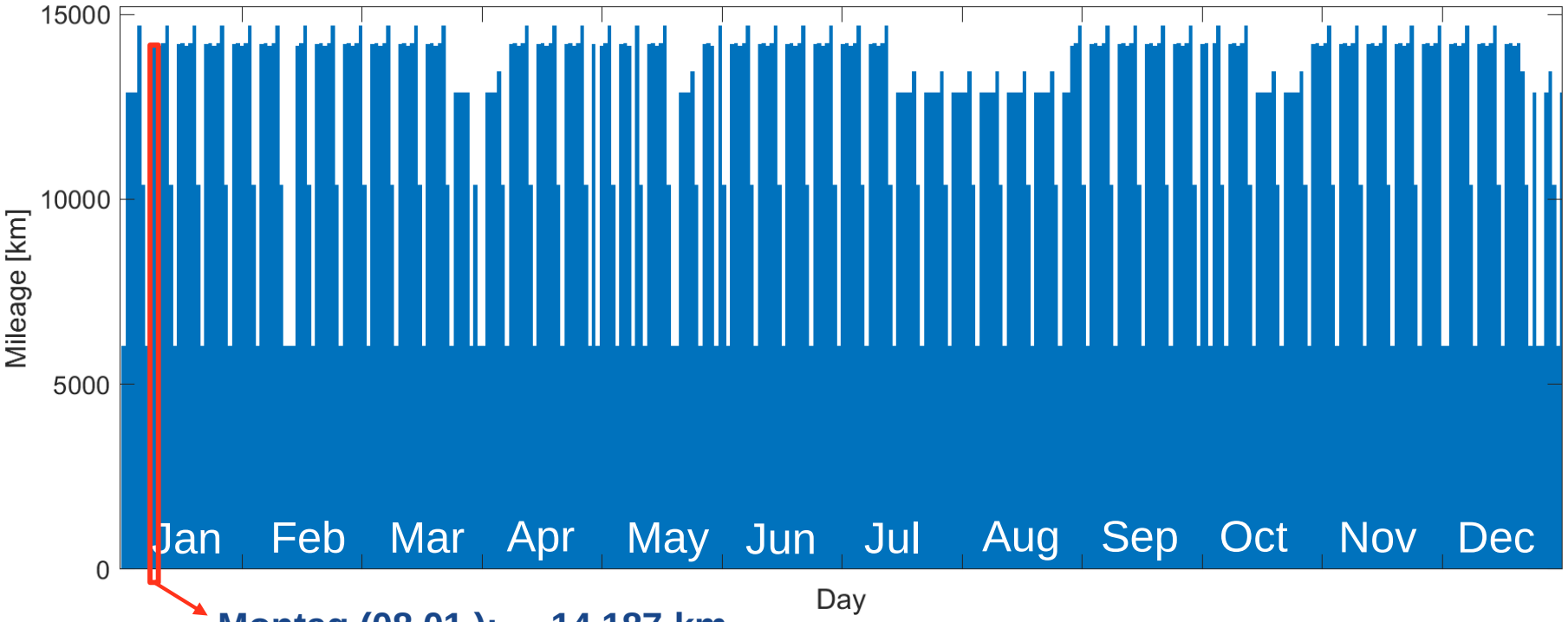
Anhang
Umlaufdatenbank

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



Anhang
Tagesstrecke

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

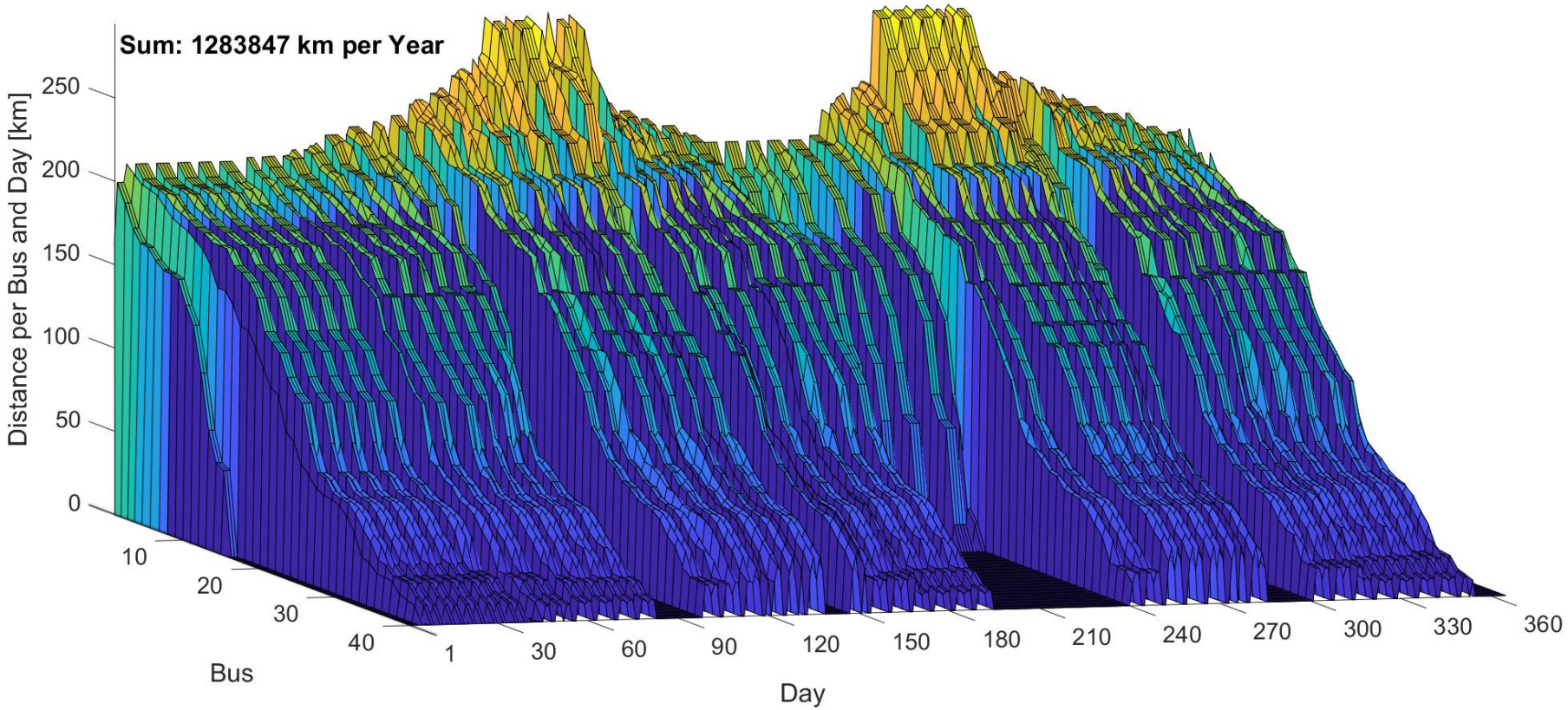


Montag (08.01.): **14.187 km**

- Solobusse: 6.237 km
- Gelenkbusse: 7.950 km → **Beispiel auf nächster Folie**

Anhang
Optimierungs-Algorithmus

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



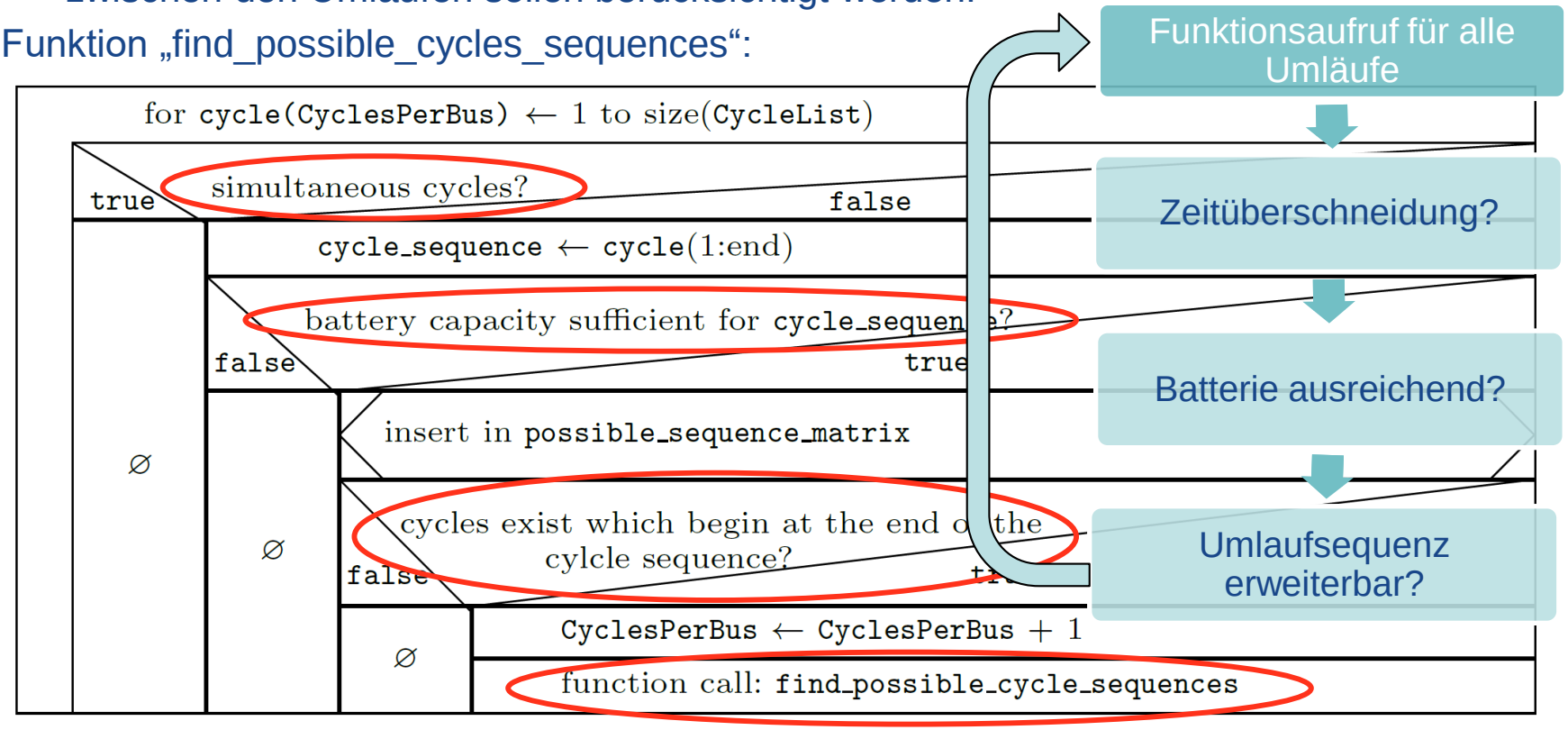
→ Nächster Schritt: Iteration mit **unterschiedlichen Batteriekapazitäten** und **Bestimmung der Bruttomarge**

SWK
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²

Anhang: Algorithmus
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“:

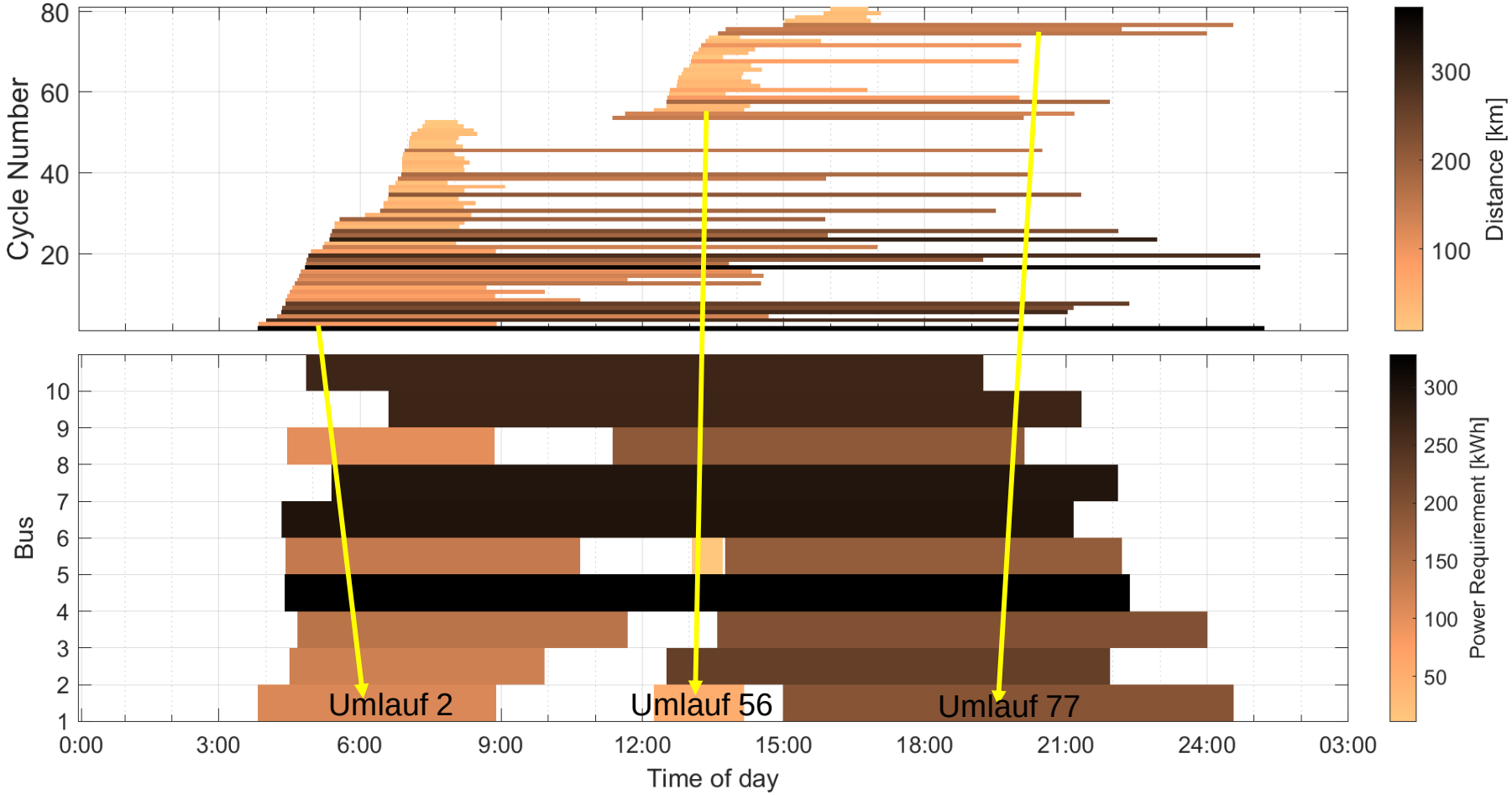


SWK
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²

Anhang: Algorithmus

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.

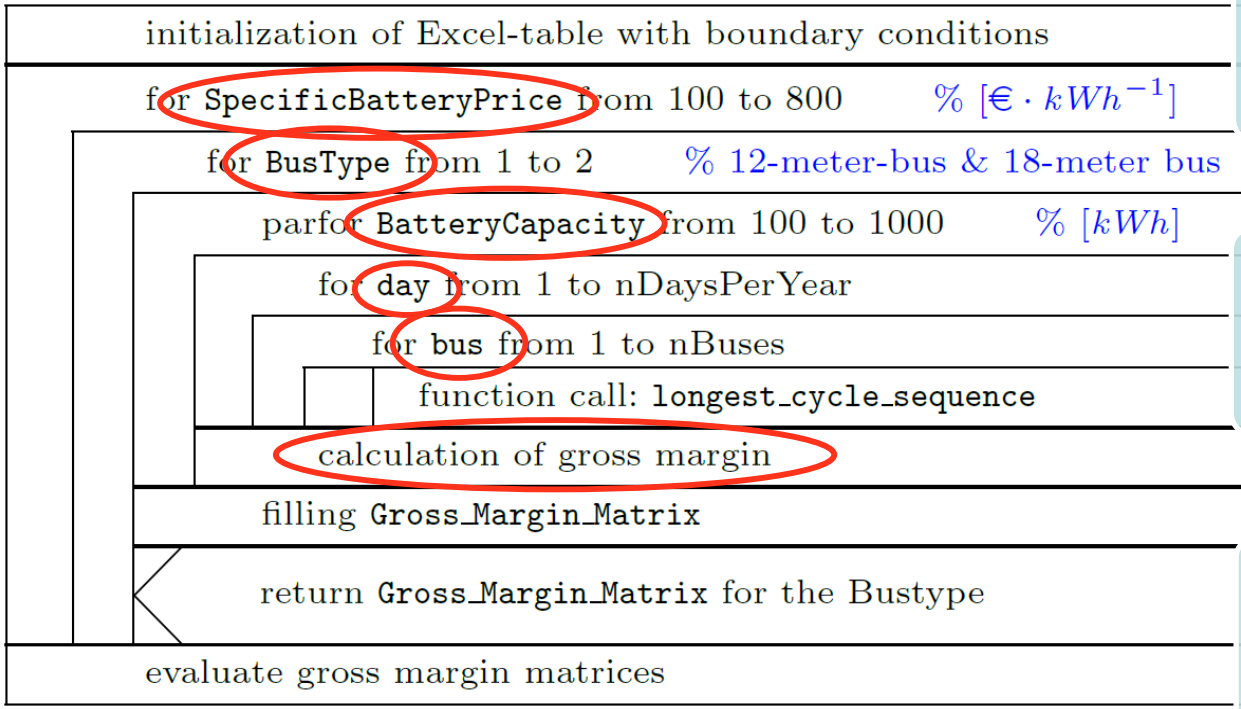
SWK
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²

Anhang: Algorithmus

Algorithmus

Implementierung der **Funktion** in einen **Algorithmus....**

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



Variieren von Bedingungen

- Spezifischer Batteriepreis
- Bustyp
- Batteriekapazität

Iterieren

- Tage eines Jahres von 1 bis 365
- Anzahl Elektrobusse von 1 bis 40

Berechnen

- **Bruttomarge** für jede Iteration

SWK Hochschule Niederrhein University of Applied Sciences SWK E²

Anhang: Ganzzahlige lineare Optimierung

Eingrenzung des Lösungsraumes

Bestimmung von $n_{e,max}$ für jeden Tag mit einer Heuristik.

→ Ausschluss von im vorhinein bekannten nicht-möglicher Kombinationen:

$$A_4 = \begin{pmatrix} \overbrace{1 & 1 & 1 & 1}^{b=1} & \overbrace{0 & 0 & 0 & 0}^{b=2} & \overbrace{0 & 0 & 0 & 0}^{b=3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \qquad d_4 = \begin{pmatrix} n_{e,max} \\ n_{e,max} \\ n_{e,max} \end{pmatrix}$$

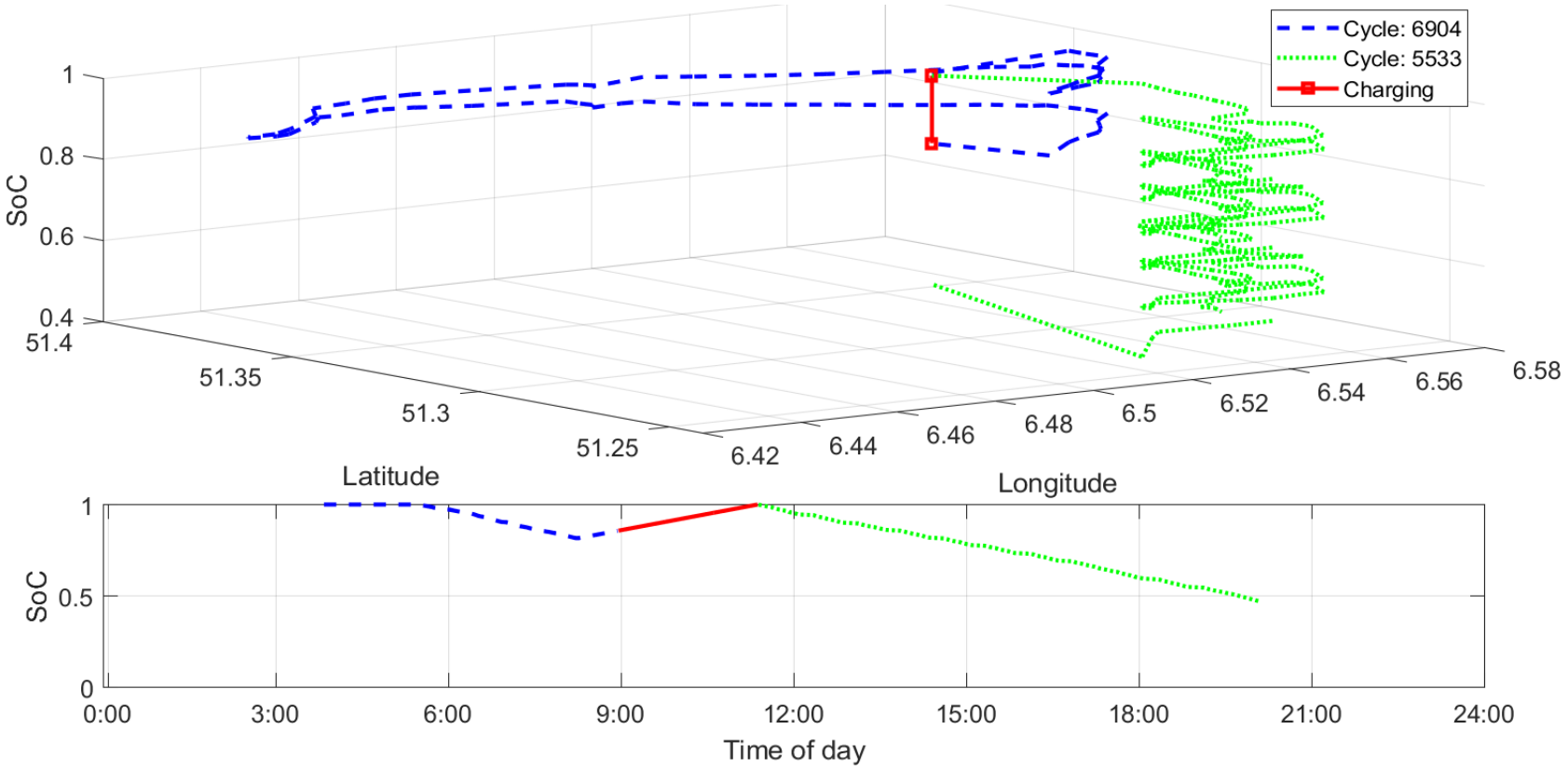
Anschließend Übergabe an Solver in der Form:

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{pmatrix} \qquad d = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{pmatrix}$$

SWK Hochschule Niederrhein University of Applied Sciences SWK E²

Anhang
Simulation: Überprüfung auf sicheren Betrieb

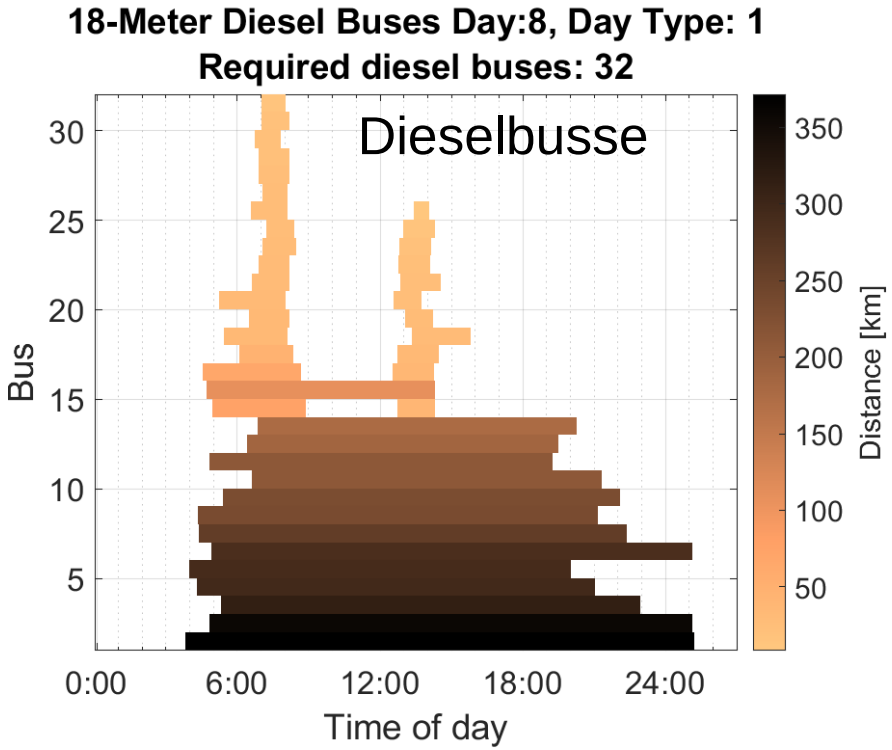
- Monte-Carlo-Simulation mit der Temperaturhistorie der letzten 10 Jahre.
- Beispiel für einen Bus an einem Tag:

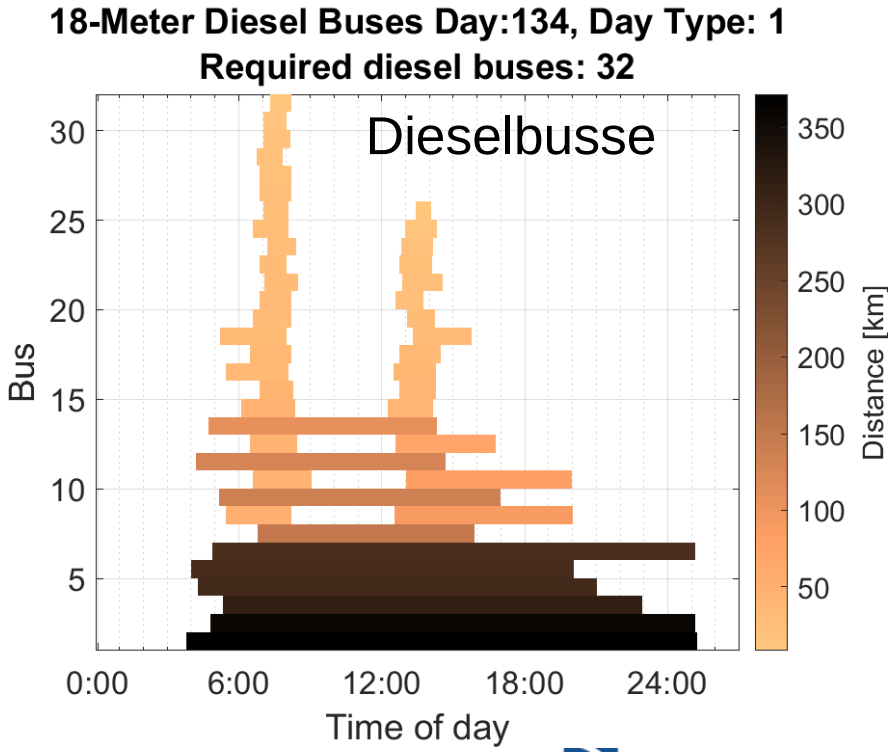


SWK
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²

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.

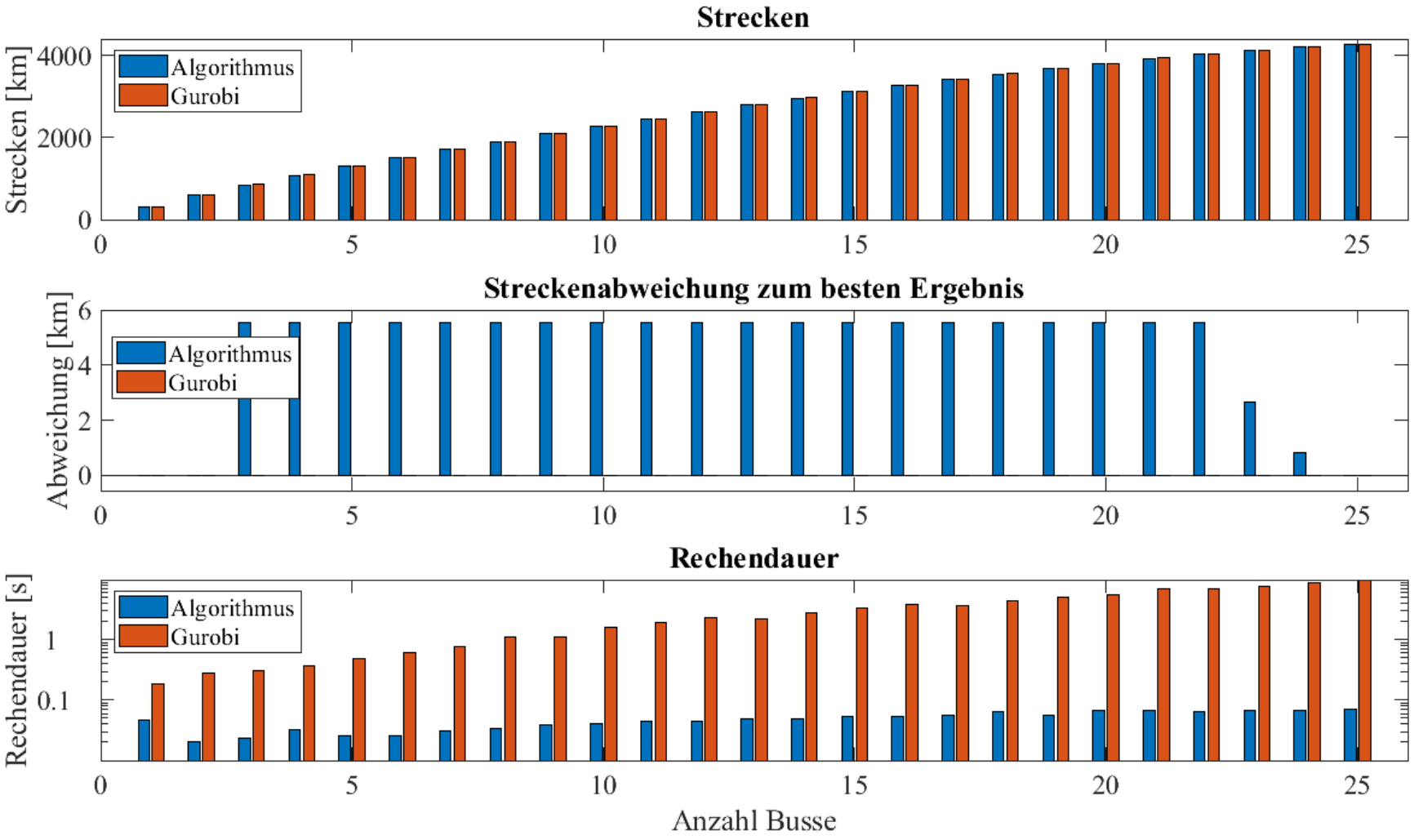




SWK
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²

Anhang

Ganzzahlige lineare Optimierung, Ergebnisse und Vergleich



SWK
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²

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

[8]

Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences
SWK E²
Institut für Energietechnik und Energiemanagement
Institute of Energy Technology and Energy Management