

# WIRTSCHAFTLICHKEITSUNTERSUCHUNG EINER ELEKTROBUS- FLOTTE MIT MAXIMIERUNG DER ELEKTRISCHEN BETRIEBSKILO- METER

Marius Madsen, Marc Gennat

Hochschule Niederrhein, SWK E<sup>2</sup> - Institut für Energietechnik und Energiemanagement,  
Reinarzstr. 49, 47805 Krefeld, Deutschland, Tel.: +49 2151 822-6697,  
E-Mail: [marius.madsen@hs-niederrhein.de](mailto:marius.madsen@hs-niederrhein.de), [marc.gennat@hs-niederrhein.de](mailto:marc.gennat@hs-niederrhein.de),  
[www.hs-niederrhein.de/swk-e2](http://www.hs-niederrhein.de/swk-e2)

**Kurzfassung:** In diesem Beitrag wird die Planung und Optimierung einer gemischten Elektro- und Dieselbusflotte für ein kommunales Verkehrsunternehmen präsentiert. Ziel und Zweck ist die Maximierung der elektrischen Laufleistung ohne Erweiterung der Gesamtzahl der Busse in der Flotte. Randbedingung ist, dass Umlaufpläne nicht verändert werden dürfen. Außerdem sind Elektrobusse ausschließlich im Depot zu laden. Ausgehend von dem bestehenden Umlaufplan werden die Umläufe ermittelt, die mit einer zu bestimmenden Batteriekapazität befahren werden können. Zur Maximierung der elektrisch gefahrenen Gesamtstrecke werden zwei Methoden, ganzzahlige lineare Optimierung und ein heuristischer Algorithmus angewandt und verglichen.

**Keywords:** Elektrobusse, ÖPNV, Optimierung, Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

## 1 Einleitung

Zurzeit sind Elektrobusse im Vergleich zu Dieselnissen nicht wirtschaftlich einsetzbar, obwohl die streckenabhängigen Kosten geringer sind, können die höheren Investitionsausgaben nicht ausgeglichen werden [Seeliger16, Hondius14]. In dieser Arbeit wird untersucht, inwiefern mit den in Deutschland zur Verfügung gestellten Zuschüssen für Elektrobusse ein wirtschaftlicher Break-Even erreicht werden kann, indem die elektrisch zurückgelegte Strecke von Elektrobusen durch die Kombination geeigneter Umläufe maximiert wird. Hierzu wird die Datenbank zur Umlaufplanung (Standardschnittstelle ÖPNV-Datenmodell 5.0 [VDV452]) des kommunalen Nahverkehrsanbieters SWK Mobil GmbH der Stadt Krefeld zunächst in ein Matlab-Modell überführt.

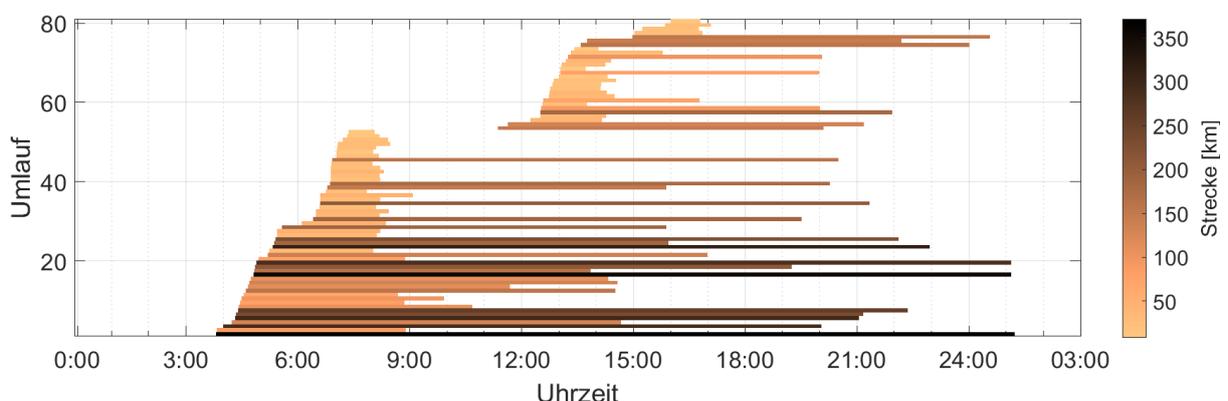


Abb. 1: Gelenkbus-Umläufe eines Montags

Ein Bus kann an einem Tag mehrere kurze Umläufe hintereinander oder einen einzigen langen Umlauf befahren. Wenn ein Elektrobus mehrere Umläufe hintereinander befährt und zwischen den Umläufen nachgeladen wird, kann pro Tag aufgrund der begrenzten Akkukapazität ggf. eine längere Strecke befahren werden, als durch das Abfahren eines möglichst langen Umlaufs. Die Energiebedarfe der einzelnen Umläufe sind je nach Bustyp, Wetter, Batterieauslegung, Strecke und Umlaufdauer unterschiedlich.

## 2 Problemformulierung und Nebenbedingungen

Es werden zunächst die Umläufe mit zehn Elektro-Gelenkbussen ( $n = 10$ ) untersucht. Des Weiteren wird zunächst nur ein einziger Tag betrachtet. Die Außentemperaturverläufe und damit die Energiebedarfe pro Umlauf und die zu fahrenden Umläufe sind tagesabhängig. Da jeweils ein Tag betrachtet wird, muss für jeden Tag des Jahres die Umlaufauswahl mit den jeweiligen Außentemperaturen und tagesspezifischen Fahrplänen neu durchgeführt werden.

Es wird der Einsatz von Elektrobusen  $b \in B$  untersucht, wobei die Anzahl der Busse mit  $(|B| = 10)$  notiert ist. Der Betriebstag wird minutenweise mit  $t \in \{1, \dots, 1440\}$  diskretisiert und beginnt jeweils um 03:00 Uhr. Vorhandene Umläufe  $u \in U$  mit der Gesamtzahl  $(|U| = 81)$  dürfen nicht verändert werden. Ein Umlauf beginnt Betriebshofausfahrt und endet mit einer Betriebshofeinfahrt. Er beinhaltet Leerfahrten, Wendezeiten und Beförderungszeiten. [Schnieder15].

In Abb. 1 sind Gelenkbus-Umläufe eines Montags beispielhaft als Weg-Zeit-Diagramm dargestellt. Um zeitliche Überschneidungen zwischen den Tagen zu vermeiden, wird der Beginn eines Betriebstages auf 3:00 Uhr festgelegt.

Tabelle 1: Umläufe der Gelenkbusse mit den jeweiligen Energiebedarfen und Strecken (Beispiel eines Tages)

| i   | $t_{start}$<br>[min] | $t_{end}$<br>[min] | s<br>[km] | W<br>[kWh] |
|-----|----------------------|--------------------|-----------|------------|
| 1   | 49                   | 1333               | 371,490   | 739,3678   |
| 2   | 50                   | 353                | 87,808    | 174,6653   |
| 3   | 60                   | 1022               | 291,475   | 570,9325   |
| ... | ...                  | ...                | ...       | ...        |

Die wesentlichen Kennzahlen der Umläufe sind Zeitpunkte der Ausfahrt  $t_{start}$  und der Wiedereinfahrt  $t_{end}$  in den Betriebshof, der elektrische Energiebedarf  $W$  und die Strecke  $s$ . Die einzelnen Umläufe  $u$  lassen sich durch die Struktur  $u_i = (t_{start,i}, t_{end,i}, W_i, s_i)$  beschreiben.

Für die mathematische Darstellung wird die Entscheidungsmatrix  $x \in [0,1]^{u \times b}$  eingeführt, die im Folgenden beispielhaft für drei Elektrobusse und vier Umläufe dargestellt ist.

$$x = \begin{matrix} & \begin{matrix} b = 1 & b = 2 & b = 3 \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \begin{matrix} u = 1 \\ u = 2 \\ u = 3 \\ u = 4 \end{matrix} \end{matrix} \quad (1)$$

$$|e_b| = \sum_u x_{u,b} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Ein Bus kann an einem Tag mehrere Einsätze  $e \in E$  hintereinander befahren. Als Beispiel fährt der Bus  $b$  hintereinander die Umläufe 1,4 und 84.

$$E_b = \begin{pmatrix} E_{b,1} \\ E_{b,4} \\ E_{b,84} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_4 \\ u_{84} \end{pmatrix} \quad (3)$$

### 3 Algorithmus zur Bestimmung einer unteren Schranke

Aufgrund von zeitlichen Überschneidungen können Busse nicht beliebig viele Umläufe an einem Tag hintereinander befahren. Mit einem gegebenen Fahr- und Umlaufplan sind montags höchstens  $n_{e,max} = 3$  Buseinsätze pro Tag möglich. Die Gesamtzahl aller möglichen Kombinationen wird mit

$$n_{kombin} = \prod_{j=1}^{|B|} \sum_{i=1}^{n_{e,max}} \binom{|U| - j + 1}{i} \quad (4)$$

bestimmt, was für zehn Gelenkbusse mehr als  $n_{kombin} = 10^{48}$  Kombinationen bedeutet.

Mit kombinatorischen Verfahren kann die Optimierungsaufgabe nicht in hinreichend kurzer Zeit gelöst werden. Aus diesem Grund wird ein Algorithmus entwickelt, der in kurzer Zeit eine untere Schranke für das zu bestimmende Maximum der elektrisch zu fahrenden Kilometer liefert. Für einen einzelnen Elektrobus kann das tatsächliche Maximum und nicht nur eine untere Schranke mit dem hier eingeführten Algorithmus ermittelt werden.

Für die Betrachtung des gesamten Jahres werden die unteren Schranken der Maxima der elektrischen Betriebskilometer unter Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen (vgl.: [VDV236]), der tagesspezifischen Fahrpläne und in Abhängigkeit der jeweiligen Batteriespezifikationen für jeden einzelnen Tag des Jahres bestimmt.

#### 3.1 Kombination geeigneter Umläufe

Um die Kombination der Umläufe mit der höchsten Kilometerleistung pro Tag zu finden wurde ein Algorithmus entwickelt. Dieser Algorithmus ist in Abb. 2 als Nassi-Shneiderman-Diagramm dargestellt.

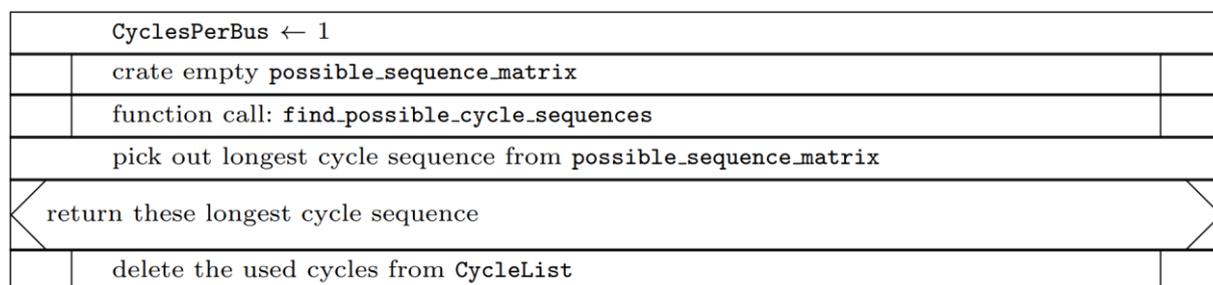


Abb. 2: Function: longest\_cycles\_sequence

Der Algorithmus ermittelt in einem ersten Schritt mit der Funktion *find\_possible\_cycle\_sequences* (Abb. 3) alle möglichen Umlauf-Kombinationen für jeden Tag und Bus. Diese Funktion überprüft, ob die vorgestellten Nebenbedingungen eingehalten sind. Dabei wird ebenfalls

die mögliche Ladezeit zwischen den Umläufen bestimmt. In einem zweiten Schritt wird die Kombination mit der höchsten elektrischen Kilometerleistung ausgewählt.

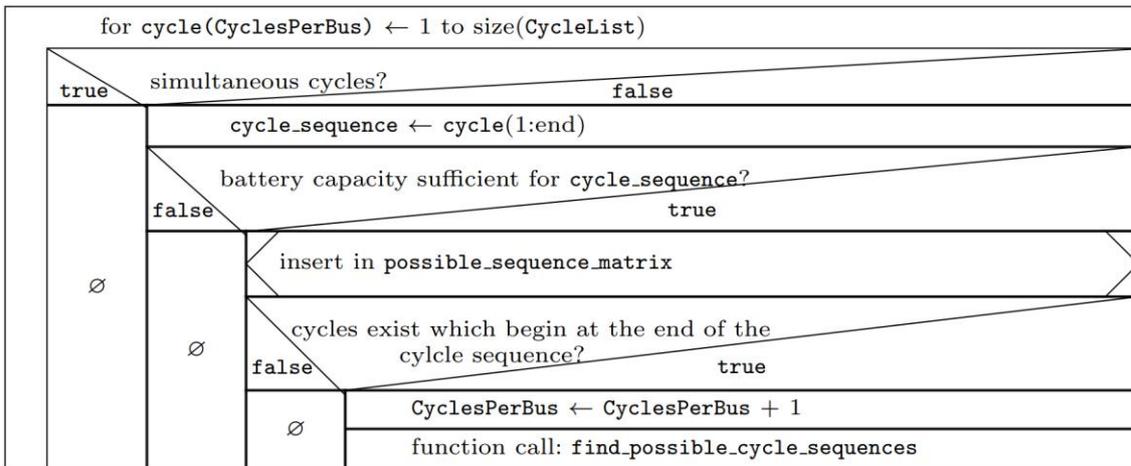


Abb. 3: Funktion: find\_possible\_cycle\_sequences

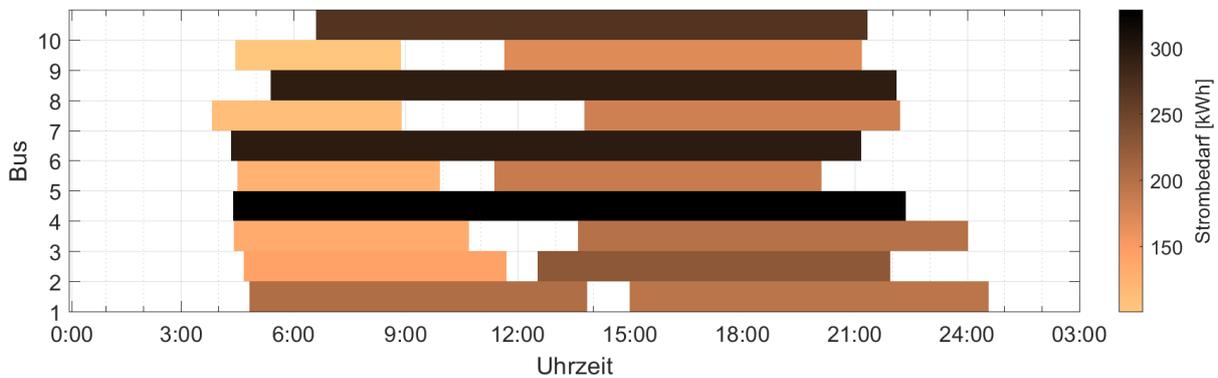


Abb. 4: Maximierung der elektrischen Tagesstrecke durch Kombination der Umläufe

Ein mögliches Ergebnis ist in Abb. 4 für die Kombination der geeignetsten Gelenkbus-Umläufe dargestellt als Beispiel für einen Tag.

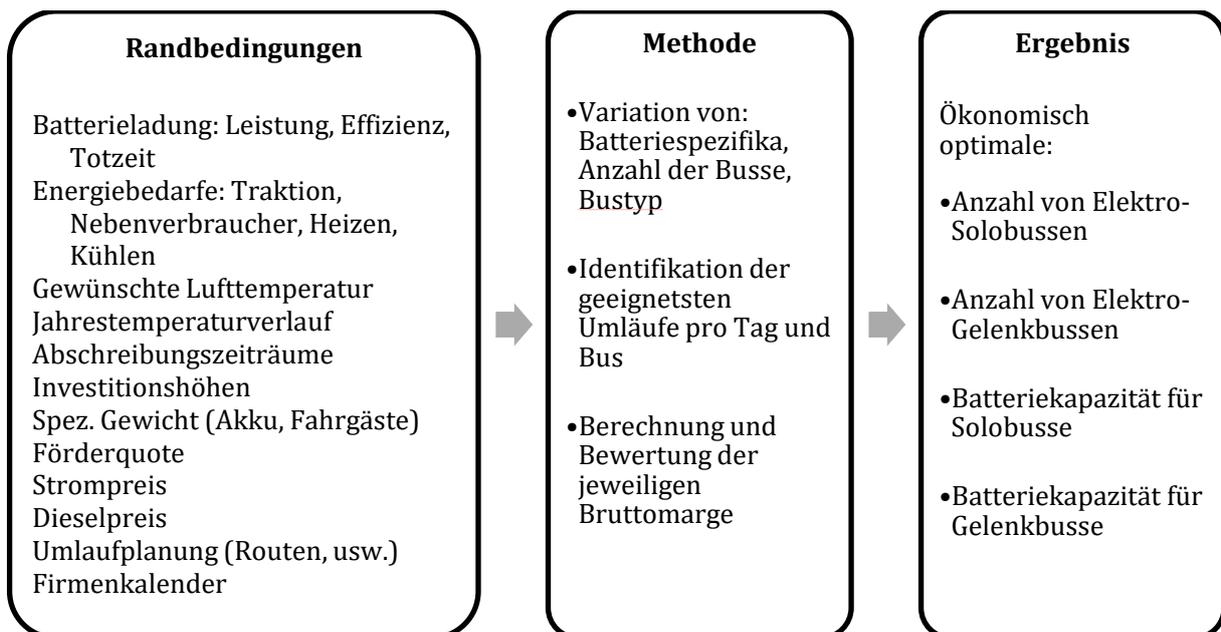


Abb. 5: Modellparameter

### 3.2 Erweiterung des Algorithmus zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

Bislang wurde die Kilometerleistung der einzelnen Tage und Busse maximiert. Für die Betrachtung eines ganzen Jahres ist eine Erweiterung notwendig. Die zentralen Parameter des erweiterten Algorithmus sind in Abb. 5 dargestellt.

Für die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit unter gegebenen Randbedingungen, wurde der dargestellte Algorithmus erweitert mit einer übergeordneten Funktion (siehe Abb. 6). Dieser erweiterte Algorithmus ermittelt für eine Elektrobusflotte die minimalen Kosten und die maximale elektrische Kilometerleistung.

Für einen einzelnen Bus berechnet dieses Verfahren die beste Lösung. Für mehrere Busse kann eine optimale Lösung nicht garantiert werden, da die Heuristik nicht garantieren kann, ein globales Optimum zu finden (vgl. [Gennat19]).

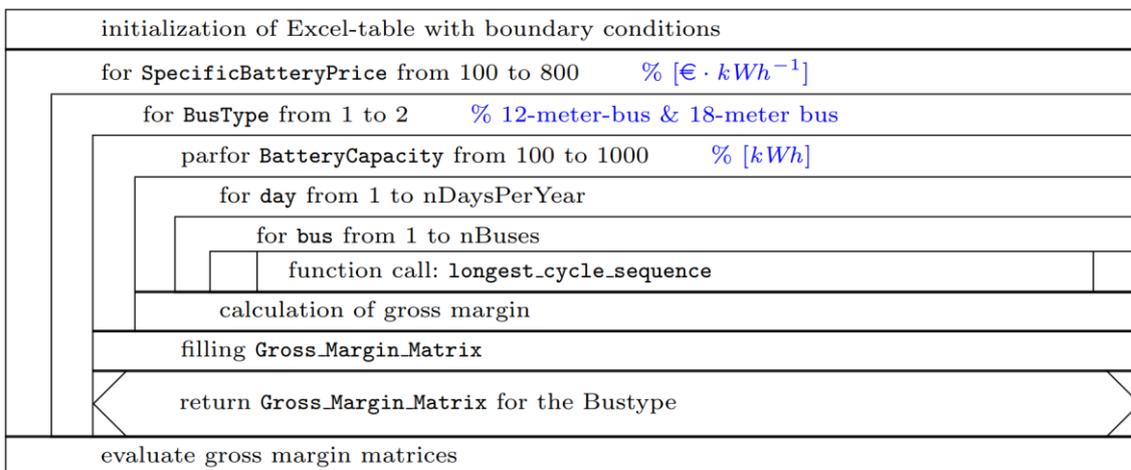


Abb. 6: Struktur des erweiterten Algorithmus

Die mögliche tägliche Fahrleistung je Bus nimmt mit der Anzahl der Busse ab. In den Sommerferien können maximal 16 Elektro-Gelenkbusse an Wochentagen betrieben werden, an Sonntagen, je nach Wetterlage, nur fünf. Ein wirtschaftliches Optimum wird also bei einer geringen Anzahl von Elektrobusen erwartet.

### 3.3 Ergebnisse der Maximierung der elektrischen Betriebskilometer

Auch bei der Maximierung der elektrisch gefahrenen Kilometer ist eine wirtschaftlich sinnvolle Anschaffung von Elektrobusen auch mit einer angenommenen Förderquote von 40 Prozent zu den heutigen Marktpreisen nicht möglich. Abb. 7 zeigt die Bruttomarge als Funktion des spezifischen Batteriepreises und der Batteriekapazität für drei Elektro-Gelenkbusse. Ein Break-Even wird erreicht, wenn die spezifischen Preise für Traktionsbatterien unter 480 Euro pro Kilowattstunde sinken. Bei diesen Batteriepreisen von etwa 480 Euro pro Kilowattstunde wird das wirtschaftlich beste Ergebnis mit drei Elektro-Gelenkbussen erzielt. Das Ergebnis unterscheidet sich nur gering von dem mit einer Anzahl von fünf Elektrobusen.

Für einen wirtschaftlichen Einsatz von Elektro-Solobussen darf ein Batteriepreis von 450 Euro pro Kilowattstunde nicht überschritten werden. Es gibt in Krefeld mehr Gelenkbus-Umläufe als Solobus-Umläufe, daher gibt es für die Kombination von Gelenkbus-Umläufen höhere Potentiale.

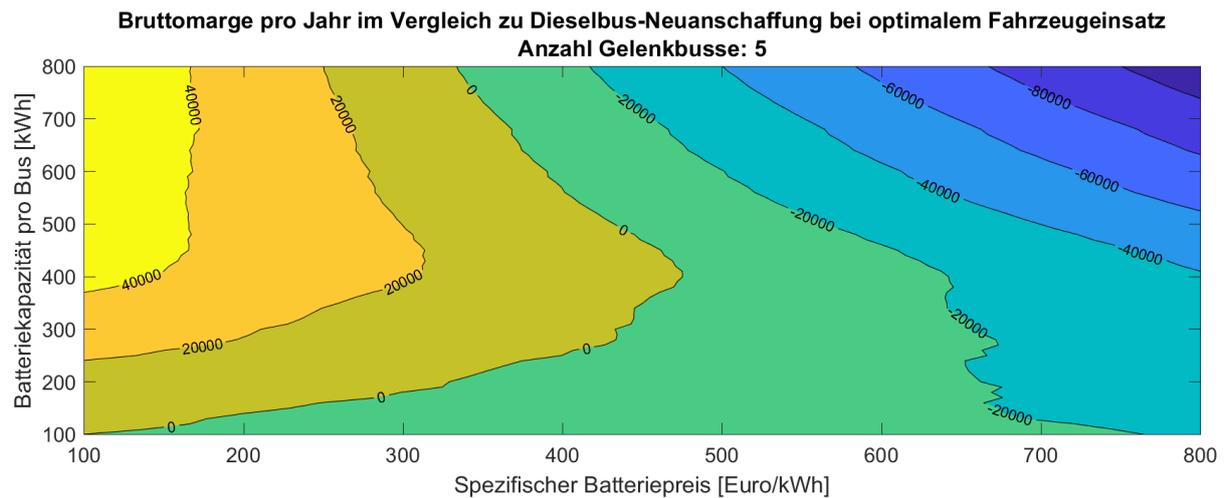


Abb. 7: Bruttomargen bei einer Beschaffung von fünf Elektro-Gelenkbussen

## 4 Ganzzahlige lineare Optimierung zur Bestimmung des garantierten Maximums

### 4.1 Formulierung als ganzzahliges lineares Optimierungsproblem

Aufgrund der hohen Anzahl der Kombinationen sind kombinatorische Methoden nicht geeignet, um in hinnehmbarer Zeit zu einem optimalen Ergebnis zu kommen. Stattdessen wird das Optimierungsproblem in ein ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (engl.: Integer Programming, IP) umgewandelt. Das Problem ist hier ganzzahlig, da ein Bus einen Umlauf entweder ganz oder gar nicht befahren darf. Die Zielfunktion wird definiert mit

$$\max_x c^T x \quad \text{u.d.N.} \quad A_i \cdot x \leq d_i \quad \forall i \in \{1, \dots, |d|\}, \quad (5)$$

wobei  $x$  der zu bestimmende Vektor mit der Länge  $|x| = |U| \cdot |B|$  ist. Hierbei werden für jeden Bus die Komponenten des binären Entscheidungsvektors, ob ein Umlauf gefahren werden soll oder nicht, in der Form

$$x^T = (\overset{b=1}{x_{u=1} \ x_{u=2} \ \dots \ x_{u=|U|}} \ \overset{b=2}{x_{u=1} \ x_{u=2} \ \dots \ x_{u=|U|}} \ \overset{b=3}{x_{u=1} \ x_{u=2} \ \dots \ x_{u=|U|}}) \quad (6)$$

aneinandergehangen. Der Vektor  $c$  ( $|c| = |x|$ ) beinhaltet die Streckenlängen der einzelnen Umläufe für alle Elektrobusse und wird mit

$$c^T = (\overset{b=1}{s_{u=1} \ s_{u=2} \ \dots \ s_{u=|U|}} \ \overset{b=2}{s_{u=1} \ s_{u=2} \ \dots \ s_{u=|U|}} \ \overset{b=3}{s_{u=1} \ s_{u=2} \ \dots \ s_{u=|U|}}) \quad (7)$$

notiert. Maximal ein Elektrobus darf den Umlauf  $u$  fahren. Diese Nebenbedingung wird mit

$$\sum_{b=1}^{|B|} x_{(b-1)|U|+u} \leq 1 \quad \forall u \in U. \quad (8)$$

definiert. Wenn die Summe für einen Umlauf  $u$  gleich Null ist, wird dieser Umlauf von einem Dieselbus befahren. Für das IP wird diese Nebenbedingung beispielhaft für drei Busse und vier Umläufe aufgebaut mit

$$A_1 = \begin{matrix} & b=1 & & b=2 & & b=3 \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, & d_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \end{matrix} \quad (9)$$

Als weitere Nebenbedingung kommt hinzu, dass ein Bus nicht mehrere Umläufe gleichzeitig befahren kann. Jeder Bus mit mehr als einem Umlauf startet frühestens nach dem Ankommen plus der Zeit  $\Delta t$ . In dieser Zeit wird der Bus rangiert und ein Fahrerwechsel kann stattfinden.

$$t_{start, e_{i,b}} \geq t_{end, e_{i-1,b}} + \Delta t \quad \forall i \in [2, |e_b|], \quad \forall b \in B \quad (10)$$

Diese Nebenbedingung mit drei Bussen wird implementiert durch

$$A_2 = \begin{matrix} & b=1 & & b=2 & & b=3 \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, & d_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \end{matrix} \quad (11)$$

In diesem Beispiel würden sich die Umläufe 1 und 3 zeitlich überschneiden.

Im Krefelder Stadtgebiet treten keine großen Höhenunterschiede auf, weswegen die strecken-spezifischen Traktionsenergiebedarfe  $W_{Traktion}$  als konstant angenommen werden können. Die zeitspezifischen Strombedarfe setzen sich aus den Nebenverbräuchen  $P_{Nebenv}$  und den Kühl-  $P_{Kühl}$  bzw. Heizleistungen  $P_{Heiz}$  zusammen.

In der Zeit zwischen zwei Einsätzen kann ein Elektrobus im Depot mit dem Ladestrom  $P_{Laden}$  geladen werden. Die nutzbare Energiekapazität der Traktionsbatterie  $C_{Bat}$  ist für alle Elektrobusse gleich. Der Ladestand der Traktionsbatterien der einzelnen Elektrobusse wird durch die Funktion  $SoC_b(t, E)$  beschrieben. Für jede betrachtete Zeiteinheit wird der  $SoC_b$  mit

$$SoC_{b,t} = SoC_{b,t-1} + \frac{(P_{Laden} - P_{Nebenv} - P_{Kühl} - P_{Heiz}) \cdot 60s - W_{Traktion} \cdot s_t}{C_{Bat}} \quad (12)$$

bestimmt, wobei  $s_t$  die zurückgelegte Strecke in der Minute vor  $t$  ist.

Die Traktionsbatterien dürfen zu keiner Zeit soweit entladen werden, dass die Reservekapazität genutzt werden muss. Die Batterien können auf maximal 100% aufgeladen werden. Mit der Reservekapazität  $\delta$ , dessen Energieinhalt bei der Fahrplanung nicht berücksichtigt werden soll, kann nun als weitere Bedingung mit

$$\delta \leq SoC_{b,t} \leq 1 \quad \forall b \in B, \quad t \in \{1, \dots, 1440\} \quad (13)$$

angegeben werden. Diese Nebenbedingung wird notiert mit

$$A_3 = \begin{matrix} & b=1 & & b=2 & & b=3 \\ \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, & d_3 = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \end{matrix} \quad (14)$$

wobei in diesem Beispiel die Kombination Umläufe 1, 2 und 4 für alle Busse ausgeschlossen wird. Die rechte Seite der Ungleichheitsbedingung ist für ein Ausschluss von einer Dreierkombination  $d_{3,1} = 2$ , um in diesem Beispiel die Kombination der Umläufe 1 und 4 nicht zu verhindern. Weitere nicht-kombinierbare Umlaufpaare werden auf die gleiche Weise definiert und unten an  $A$  angehängt.

Da bestimmt werden kann, wie viele Umläufe maximal pro Bus und Tag gefahren werden können ( $n_{e,max}$ ), kann der Lösungsraum mit

$$A_4 = \begin{pmatrix} b=1 & b=2 & b=3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad d_4 = \begin{pmatrix} n_{e,max} \\ n_{e,max} \\ n_{e,max} \end{pmatrix} \quad (15)$$

weiter eingegrenzt werden. Die Matrizen  $A_1$  bis  $A_4$  werden vertikal aneinandergereiht und als Matrix  $A$  dem Solver übergeben. Das Gleiche gilt für den Vektor  $d$ .

## 4.2 Gegenüberstellung und Bewertung

Die Ergebnisse des Algorithmus, der nur untere Schranken liefert, werden mit den beiden IP-Solvern *Intlinprog* [Intlinprog20] und *Gurobi* [Gurobi20] verglichen. Es wird beispielhaft ein Montag ausgewählt, an dem  $|U| = 80$  verschiedenen Umläufe den  $|B| = 10$  Bussen zugeteilt werden können. Die Batteriegröße wird mit  $C_{Bat} = 250 \text{ kWh}$  angenommen und die Ladeleistung im Depot mit  $P_{Laden} = 80 \text{ kW}$ . Für das Rangieren der Busse auf dem Betriebshof und dem Fahrerwechsel sind  $\Delta t = 4 \text{ min}$  vorgegeben.

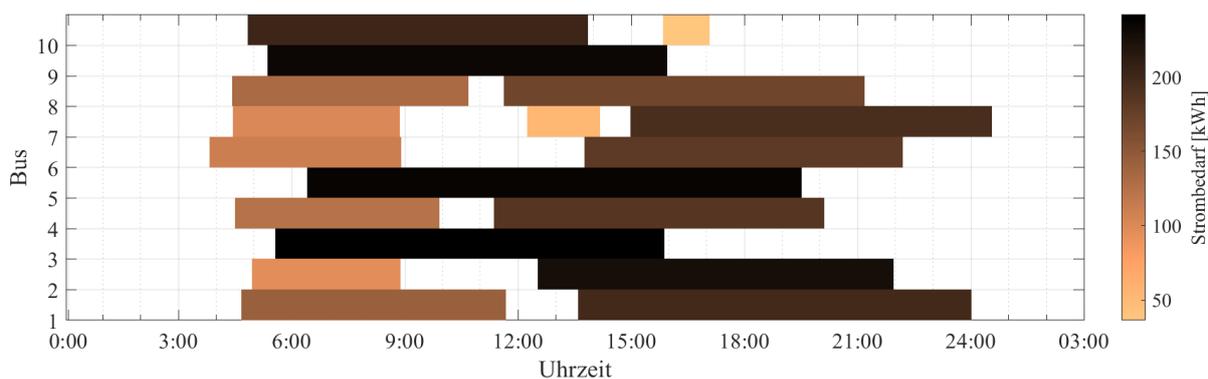


Abb. 8: Kombination der Umläufe mit Gurobi

Die Ergebnisse von *Intlinprog* und *Gurobi* sind gleich und liefern das optimale Ergebnis, wenn diese nicht vorzeitig mit einem Fehler abbrechen. Dies ist in der hier gezeigten Untersuchung nicht aufgetreten. Ein Ergebnis ist in Abb. 8 dargestellt.

Die ermittelten elektrisch gefahrenen Gesamtstrecken pro Tag sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Solver

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

Die untere Schranke des Algorithmus weicht demnach etwa 5,6 Kilometer, was etwa 0,25 Prozent entspricht, vom optimalen Ergebnis ab. Aufgrund der hohen Rechenzeit wird *Intlinprog* im Folgenden nicht mehr betrachtet. In Abb. 9 ist der Algorithmus und der lineare Solver für verschiedene Batteriekapazitäten von 100 bis 800 Kilowattstunden in 25 Kilowattstunden-Schritten für zehn Busse gegenübergestellt.

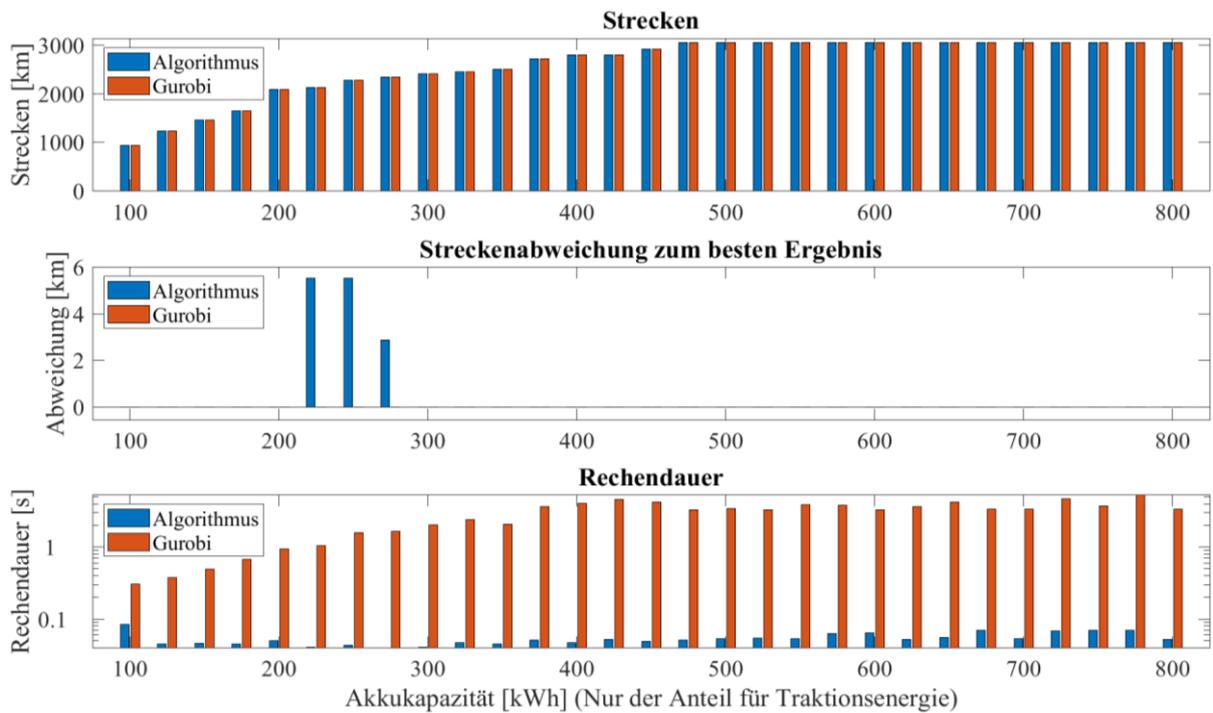


Abb. 9: Gegenüberstellung Solver und Algorithmus mit unterschiedlichen Akkukapazitäten

Für die meisten Akkukapazitäten liefert der Algorithmus das richtige Ergebnis. Die maximale Abweichung beträgt 5,6 Kilometer.

In Abb. 10 ist der Algorithmus und der Solver für 1 bis 25 Elektrobusse mit einer Akkukapazität von 250 Kilowattstunden gegenübergestellt. In diesen Gegenüberstellungen wird jeweils nur die benötigte Traktionsenergie betrachtet, Energiebedarfe für Klimatisierung, Heizung, Lüftung, Licht, usw. werden an dieser Stelle nicht betrachtet.

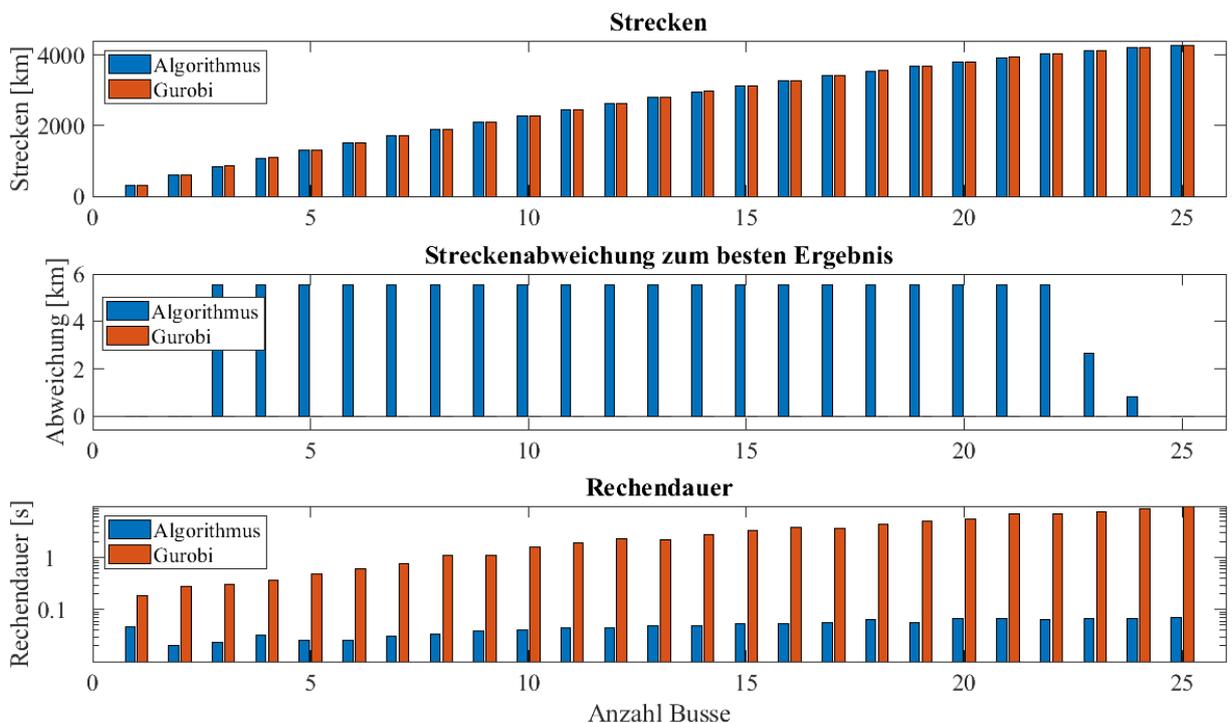


Abb. 10: Gegenüberstellung Solver und Algorithmus mit unterschiedlichen Anzahl von Elektrobusen (250 kWh)

Der Solver oder Algorithmus wird vom übergeordneten Programm, das durch alle Tage, Bus-typen, Batteriegrößen und -Preise iteriert, mehrere Millionen Mal aufgerufen (vgl. Abb. 6). Aufgrund der kurzen Rechendauer eines Durchlaufs des Algorithmus liegt die Gesamtrechendauer mit Parallelisierung auf insgesamt 12 Kernen von zwei X5690-CPU's und etwa 74 Giga-byte Arbeitsspeicher bei etwa zwei Tagen. Mit dem linearen Solver würden Jahre benötigt. Daher wird die Ungenauigkeit von etwa 0,25 Prozent des Algorithmus zugunsten der Rechenzeit in Kauf genommen.

## 5 Fazit und Ausblick

Mithilfe der ganzzahligen linearen Optimierung können optimale Umlaufzuteilungen bestimmt werden. Die Güte des heuristischen Algorithmus aus Kapitel 3 kann durch den Vergleich mit dem optimalen Ergebnis bewertet werden. Allerdings ist die Rechenzeit der ganzzahligen linearen Optimierung um mehrere Größenordnungen höher als die des Algorithmus. Aus diesem Grund wird der Algorithmus bei dieser rechenintensiven Aufgabe herangezogen.

Auf Basis der durch den Algorithmus ermittelten unteren Schranken kann die Wirtschaftlichkeit einer Beschaffung von Elektrobussen für Krefeld neu bewertet werden. Die Preise der Traktionsbatterien müssen für Gelenkbusse auf unter 480 Euro pro Kilowattstunde fallen um eine Elektrobusflotte von drei Elektrobussen wirtschaftlich betreiben zu können.

Mit den drei Elektrobussen können insgesamt 243.000 km im Jahr elektrisch zurückgelegt werden, was deutlich über durchschnittlichen Werten von etwa 60.000 Kilometern pro Bus und Jahr liegt. Unter Anwendung der Emissionsfaktoren des deutschen Strommixes (474 g CO<sub>2</sub>/kWh [UBA19]) und von Diesel (2.650 g CO<sub>2</sub>/Liter [WD19]) können 72 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr vermieden werden. Mit fortschreitend sinkenden CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren im deutschen Strommix wird sich dieser Wert kontinuierlich verbessern.

Obwohl die Preise für Batteriezellen gesunken sind [Ahlswede19], liegen die Preise für Batteriepacks bei 600 bis 1000 Euro pro Kilowattstunde [Kunith17, Lehner15, Seeliger16]. Ein rein wirtschaftlicher Betrieb von Elektrobussen ist in Krefeld demnach noch nicht möglich.

Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Ergebnisse auf Städte mit einer ähnlichen Anzahl von Umläufen übertragen lässt. Daher können Elektrobusse in solchen Städten unter aktuellen Bedingungen ebenfalls noch nicht ökonomisch eingesetzt werden (vgl. [Schwarze15, vanLiemt18]).

Wenn es politisch gewünscht ist, externe Effekte wie CO<sub>2</sub>- oder Lärmemissionen zu internalisieren, müssen sich die Rahmenbedingungen ändern. Dies könnte eine Besteuerung von fossilen Brennstoffen oder eine höhere finanzielle Förderung von Elektrobusse sein. Diese Änderungen hätten eine hohe Auswirkung auf die Ausgangsbedingungen dieser Studie.

Weder die tatsächlichen Fahrpläne noch die Umläufe wurden in dieser Studie geändert. Nur bestehende Umläufe wurden den Elektrobussen täglich zugeordnet. In weiterführenden Untersuchungen können durch das Aufbrechen und Optimieren der Umläufe weitere Potentiale ermittelt werden.

## 6 Referenzen

- [Ahlsvede19] Ahlsvede, 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>
- [Gennat19] Gennat, M., Madsen M.: Design of an Electric Bus Fleet and Determination of Economic Break-Even. Operations Research 2019, Springer 2020. (Im Veröffentlichungsprozess)
- [Gurobi20] Gurobi Optimization: Gurobi Optimizer 9.0. <http://www.gurobi.com/download/gurobi-optimizer/> (besucht am 17.01.2020)
- [Hondius14] 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.
- [Intlinprog20] Mathworks: Intlinprog - Mixed-integer linear programming (MILP). <https://de.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html> (besucht am 17.01.2020)
- [Kunith17] Kunith, A.: Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs, Springer Vieweg, 2017.
- [Lehner15] 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.
- [Schnieder15] Schnieder, L.: Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr, VDI & Springer Vieweg, 2015.
- [Seeliger16] Seeliger, A., Jeschull S., Krönauer B., Limberg S., Schreiner C., Albuquerque C., de Souza M., Verza M.: Elektrobusse im ÖPNV, HS Niederrhein, 2016.
- [Schwarze15] 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.
- [UBA19] Umweltbundesamt (UBA): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 -2018. Dessau-Roßlau, 2019.
- [vanLiemt18] van Liemt, C.: Stadt Bingen – Referenzstandort für Elektromobilität, Diplomica Verlag, 2018.
- [VDV236] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): Klimatisierung von Linienbussen der Zulassungsklassen 1 und 2, für konventionell angetriebene Diesel- und Gasbusse sowie für Hybrid-, Brennstoffzellen- und Elektrobusse, VDV-Schriften 2015.
- [VDV452] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): VDV Standardschnittstelle Liniennetz/Fahrplan, VDV-Schriften 2013.
- [WD19] Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag (WD): Dokumentation CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrsbereich. WD 8 -3000 -056/19. Deutscher Bundestag, 2019.