

WIRTSCHAFTLICHKEITSUNTERSUCHUNG EINER ELEKTROBUSFLOTTE MIT MAXIMIERUNG DER ELEKTRISCHEN BETRIEBSKILOMETER

Marius MADSEN¹, Marc GENNAT¹

Einleitung

Zurzeit sind Elektrobusse im Vergleich zu Dieselnissen nicht wirtschaftlich einsetzbar, obwohl die streckenabhängigen Kosten geringer sind, können die höheren Investitionsausgaben nicht ausgeglichen werden [3] [1]. 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 [6]) des kommunalen Nahverkehrsanbieters SWK Mobil GmbH der Stadt Krefeld zunächst in ein Matlab-Modell überführt.

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.

Problemformulierung und Nebenbedingungen

Es werden im Folgenden 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 tagespezifischen Fahrplänen neu durchgeführt werden.

Es wird der Einsatz von Elektrobusen $b \in B$ ($|B| = 10$) untersucht. Der Betriebstag wird minutenweise $t \in \{1, \dots, 1440\}$ diskretisiert und beginnt jeweils um 03:00 Uhr. Vorhandene Umläufe $u \in U$ ($|U| = 81$) dürfen nicht verändert werden. Ein Umlauf beginnt Betriebshofausfahrt und endet mit einer Betriebshofeinfahrt. Er beinhaltet Leerfahrten, Wendezeiten und Beförderungszeiten. [2]

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

i	t_{start} [min]	t_{end} [min]	s [km]	W [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 Aus- t_{start} und Wiedereinfahrt t_{end} in den Betriebshof, der elektrische Energiebedarf W und die Strecke s . Die einzelnen Umläufe u lassen sich durch $u_i = (t_{\text{start},i}, t_{\text{end},i}, W_i, s_i)$ beschreiben. Ein Bus kann an einem Tag mehrere Umläufe bzw. Einsätze

$e \in E$ hintereinander befahren. Als Beispiel ist ein Einsatzplan durch $E_b = \begin{pmatrix} E_{b,1} \\ E_{b,5} \\ E_{b,84} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_5 \\ u_{84} \end{pmatrix}$ gegeben, in

dem ein Bus hintereinander die Umläufe 1, 5 und 84 fährt.

¹ Hochschule Niederrhein, SWK E² - Institut für Energietechnik und Energiemanagement, Reinartzstr. 49, 47805 Krefeld, Germany, +49 2151822 6697, marius.madsen@hs-niederrhein.de, www.hs-niederrhein.de/swk-e2

Algorithmus zur Bestimmung einer unteren Schranke des Maximums

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

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

angegeben werden, was für zehn Gelenkbusse mehr als $n_{\text{combin}} = 10^{48}$ Kombinationen bedeutet. In dieser Arbeit wird ein Algorithmus angewandt, der in hinreichend 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 Maximal der elektrischen Betriebskilometer unter Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen (vgl.: [5]), der tagesspezifischen Fahrpläne und in Abhängigkeit der jeweiligen Batteriespezifikationen für jeden einzelnen Tag des Jahres bestimmt.

Ergebnisse

Auf Basis der durch den Algorithmus ermittelten unteren Schranken kann die Wirtschaftlichkeit einer Beschaffung von Elektrobusen für Krefeld neu bewertet werden. Die Preise der Traktionsbatterien müssen für Gelenkbusse auf unter 370 Euro pro Kilowattstunde fallen um eine Elektrobusflotte wirtschaftlich betreiben zu können. In Krefeld gibt es mehr Gelenkbusumläufe als Solobusumläufe, daher gibt es bei den Solobusumläufen ein geringeres Potential bei der Auswahl geeigneter Kombinationen.

Eine Wirtschaftlichkeit kann unter den gegebenen Randbedingungen für drei Elektro-Gelenkbussen ermittelt werden. Hiermit können 227.000 km im Jahr elektrisch zurückgelegt werden. Unter Anwendung der Emissionsfaktoren des deutschen Strommixes (474 g CO₂/kWh [4]) und von Diesel (2.650 g CO₂/Liter [7]) können 72 Tonnen CO₂ pro Jahr vermieden werden. Mit fortschreitend sinkenden CO₂-Emissionsfaktoren im deutschen Strommix wird sich dieser Wert kontinuierlich verbessern.

Referenzen

- [1] Hondius, H.: Was sparen Elektrobusse wirklich? Wirkungsgrade von Elektrobusen im Vergleich zu Dieseln im Hintergrund der Konsequenzen der Energiewende. Der Nahverkehr, Vol. 32, No. 10, 2014, pp. 38–42.
- [2] Schnieder, L.: Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr, VDI & Springer Vieweg, 2015.
- [3] Seeliger, A., Jeschull S., Krönauer B., Limberg S., Schreiner C., Albuquerque C., de Souza M., Verza M.: Elektrobusse im ÖPNV, HS Niederrhein, 2016.
- [4] Umweltbundesamt (UBU): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 -2018. Dessau-Roßlau, 2019.
- [5] 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.
- [6] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): VDV Standardschnittstelle Liniennetz/Fahrplan, VDV-Schriften 2013.
- [7] Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag (WD): Dokumentation CO₂-Emissionen im Verkehrsbereich. WD 8 - 3000 -056/19. Deutscher Bundestag, 2019.