

Weiterentwicklung des SORT-Modells zur Verbrauchsermittlung

Beispiel der Studie zur Dekarbonisierung des Regionalbusverkehrs im RMV-Gebiet

Dr.-Ing. Alexander Bunzel, Dipl.-Ing. Reinhard Schmidt, Dresden;
Dipl.-Ing. (FH) Torsten Schmidt, Hofheim a. Ts.



Abb. 1: Vergleich der CVD-relevanten Fahrzeugklassen im Busbereich.

Grafik: [1]

Eines der Ziele des Rhein-Main-Verkehrsverbundes (RMV) für die Mobilität 2035 ist die schrittweise Emissionsreduktion hin zu einem emissionsfreien öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV). Im Rahmen der Energiewende soll dazu unter anderem eine klimaneutrale Antriebsenergie genutzt werden. In diesem Zusammenhang hat die Fahrzeugmanagement Region Frankfurt Rhein-Main GmbH (fahma) – eine 100-Prozent-Tochter des RMV – eine detaillierte Machbarkeitsstudie in Auftrag gegeben, die sich mit dem Einsatz von alternativ angetriebenen Fahrzeugen im regionalen Busverkehr in Aufgabenträgerschaft des RMV befasst.

Auf Basis der Erkenntnisse aus der technologieoffenen Bewertung verschiedener alternativer Antriebskonzepte sollen die jeweils geeignetsten ermittelt und erforderliche organisatorische Anpassungen hinsichtlich der Vergabe von Linien abgeleitet werden. Hierzu werden alle regionalen Buslinien auf Basis von Linien Eckdaten (zum Beispiel Umlauflänge, Topographie, Linienwegvarianten) und der technischen Leistungsdaten verschiedener Fahrzeugkonzepte bewertet. Der RMV entwickelt daraus ein Zielkonzept zur Dekarbonisierung des regionalen Busver-

kehrs, identifiziert Handlungsfelder und leitet mögliche Maßnahmen ab.

Im Rahmen der Vergabe der Studierenerstellung konnte die VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH (VCDB) beauftragt werden. Schon die erste grobe Analyse der Strukturdaten zeigte, dass die klassischen sogenannten Standardised-on-Road-Test-Cycles (SORT)-Modelle bei der Betrachtung des Regionalbusverkehrs an ihre Grenzen stoßen. Vor allem die Indizien der sehr hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten sowie die großen Haltestellenabstände der untersuchten Linien gehen nicht mit der SORT-Definition einher. In der Machbarkeitsstudie wird allerdings für jede der über 90 Regionalbuslinien im RMV eine Technologieentscheidung gefordert. Dabei sind folgende Antriebs- und Lade-/Tankkonzepte zu berücksichtigen:

- Gelegenheitslader,
- Übernachtslader sowie
- Brennstoffzellenbusse, als Range-Ex-tender oder als reines Brennstoffzellenfahrzeug.

Um diese Vorgaben umsetzen zu können, soll das zu entwickelnde Untersuchungsmodell auf der obersten Aggregations-ebene anhand von geeigneten, verbrauchs-

spezifizierenden Ersatzzyklen eine erste Bewertung erlauben. Für eine genaue Aussage je Linie erfolgt anschließend eine linienreine Umlaufplanung. Als Vergleich zu den fiktiv ermittelten Umlaufplänen werden zudem linienreine Umlaufpläne mit Dieselnissen erstellt. Dadurch wird ein umfassender Vergleich ermöglicht.

Motivation

Das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG) stellt die Überführung der Clean Vehicles Directive (CVD) in nationales Recht dar und muss seit dem 2. August 2021 bundesweit durch öffentliche sowie Sektorenauftraggeber angewendet werden. Der darin festgelegte Gültigkeitsbereich für die Anwendung im Bussektor beschränkt sich auf die Fahrzeugklasse M3 Klasse I und damit auf den klassischen Stadtbus. Überlandbusse (Fahrzeugklasse M3 Klasse II) sind bislang nicht von den vorgeschriebenen Beschaffungsquoten betroffen.

Typischerweise können Fahrzeuge, die im Regionalbusverkehr und auch im Stadtbusverkehr eingesetzt werden, sowohl der Klasse I als auch der Klasse II zugehören. Beim regionalen Busverkehr des RMV liegt der Anteil an Klasse-II-Fahr-



Zum Autor

Dr.-Ing. Alexander Bunzel (35) arbeitet seit 2020 bei der VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH im Team Innovative Verkehrssysteme und leitet dieses seit 2021. Im Rahmen seiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter von 2013 bis 2020 an der Technischen Universität Dresden entstand seine Dissertation zum Thema „Leistungsbedarfsbestimmung elektrifizierter Stadtbusse im Linieneinsatz“. Bunzel hat Elektrotechnik mit Vertiefung Automatisierungstechnik an der Berufsakademie Bautzen studiert und anschließend das Studium der Elektrotechnik mit Vertiefung Automatisierungs- und Regelungstechnik an der TU Dresden absolviert.



Zum Autor

Dipl.-Ing. Reinhard Schmidt (41) arbeitet seit 2019 bei der VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH im Team Innovative Verkehrssysteme – Elektromobilität. Er ist Projektleiter und seine besondere Expertise liegt im Bereich der Ladeinfrastruktur- und Wasserstofftechnik. Das Studium der Elektrotechnik mit der Vertiefung Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik absolvierte er an der Technischen Universität Ilmenau, anschließend war er dort von 2013 bis 2019 als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig.



Zum Autor

Dipl.-Ing. (FH) Torsten Schmidt (39) ist seit Januar 2019 bei der Fahrzeugmanagement Region Frankfurt RheinMain GmbH (fahma) tätig. Er baut das Geschäftsfeld zur Beschaffung und Bereitstellung von Fahrzeugen des strabengebundenen ÖPNV auf und koordiniert die Machbarkeitsstudie des RMV zu Dekarbonisierung des Regionalbusverkehrs. Nach einem Studium der Verkehrssystemtechnik an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH) arbeitete Schmidt zunächst fünf Jahre bei der OWL Verkehr GmbH in Bielefeld. Danach war er sechs Jahre im Hause traffiQ in Frankfurt für die Anforderungen an die Fahrzeuge (Bus und Schiene) sowie die Fahrgastinformation verantwortlich.

zeugen gegenwärtig bei rund 25 Prozent. Dabei ist die Wahl der Fahrzeugklasse in der Regel den Verkehrsunternehmen überlassen. Die Abbildung 1 gibt einen kompakten Überblick zur Klassifizierung der Fahrzeuge [2].

Das RMV-Bediengebiet erstreckt sich über Orts- und Stadtgrenzen hinaus ins Umland, sodass die eingesetzten Fahrzeuge ein breites Spektrum an Anforderungen abdecken müssen. Dazu gehören, neben hohen Kilometerlaufleistungen je Fahrzeugumlauf, große Haltestellenabstände, eine hohe Maximalgeschwindigkeit sowie verhältnismäßig wenig verkehrsbedingte Haltebedarfe durch Interaktion mit anderen Teilnehmern im Straßenverkehr. Die Charakteristik unterscheidet sich damit vom reinen Innenstadtverkehr deutlich.

Für die Umstellung der Verkehrsleistung auf alternative Antriebe ist die Kenntnis des zu erwartenden Fahrzeugenergiebedarfs der jeweilig eingesetzten Technologie obligatorisch. Über diese Abschätzung können Aussagen zu erzielbaren Reichweiten unter verschiedenen Randbedingungen sowie die Positionierung/Dimensionierung notwendiger Lade- oder Tankinfrastruktur generiert werden.

Trotz verschiedener Alternativen, wie der direkten Fahrzeugvermessung oder den modellbasierten Simulationen, wird in der Praxis der Verbrauch überwiegend mittels SORT-Zyklen überschlägig geschätzt. Fahrzeughersteller spezifizieren reale Traktionsverbräuche ihrer Busse anhand definierter, synthetischer Ersatzfahrzyklen. Verkehrsunternehmen wiederum clustern ihre zu befahrende Strecke, applizieren darauf die Teilverbräuche und kumulieren diese zu einem Gesamtverbrauch.

Es ist davon auszugehen, dass die Verwendung von SORT-Ersatzzyklen innerhalb der Machbarkeitsstudie durch die abweichende Charakteristik im Regionalbusverkehr zu einer unzureichenden Genauigkeit führt. Ein Indiz dafür stellt die Maximalgeschwindigkeit dar: im schnellsten SORT-Teilschnitt (SORT 3, letztes Trapez) liegt die Maximalgeschwindigkeit bei 60 km/h und damit deutlich unterhalb der maximal gefahrenen Geschwindigkeiten im RMV-Gebiet.

Dieser Beitrag greift die Themenstellung der Verbrauchsschätzung von Regionalbuslinien mit Hilfe von synthetischen Ersatzzyklen auf und macht sie zum Gegenstand seiner Untersuchung. Dabei wird zunächst

geklärt, wie stark sich die vom Dieselfarb bekannte Verbrauchsminderung von SORT 1 über SORT 2 bis hin zu SORT 3 bei Bussen mit elektrifiziertem Antriebsstrang und der Möglichkeit zur Rekuperation ausprägt. Anschließend werden synthetische Ersatzzyklen konzipiert, die sich potenziell zur Charakterisierung von Regionalbuslinien eignen. In Verbindung mit einem physikalischen Fahrzeugmodell werden simulationsbasiert Traktionsverbräuche kalkuliert und im Kontext der aufgeworfenen Themenstellung diskutiert.

Besonderheiten im regionalen Busverkehr und Diskussion synthetischer Fahrzyklen

Im Vergleich zum klassischen, innerstädtischen Betrieb weicht der Regionalbuseinsatz in einer Vielzahl von Rahmenbedingungen ab, wodurch sich der Fahrzeugenergieverbrauch abweichend ausprägt. Als besonders verbrauchsrelevant sind beispielsweise die gesteigerte Maximalgeschwindigkeit und die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit hervorzuheben. Dies lässt sich durch den quadratischen Einfluss der Geschwindigkeit begründen, woraus eine entsprechend hohe energetische Wirkung resultiert [3].

Größere Haltestellenabstände und weniger verkehrsbedingte Halte (weniger Interaktion mit Verkehrsteilnehmern/Regelanlagen) führen im Vergleich zum innerstädtischen Einsatz zu weniger Bremsereignissen. Ein elektrifiziertes Fahrzeug hat im Regionaleinsatz weniger Möglichkeiten über die Rekuperation Energie zurückzugewinnen.

Eine größere Flächenausdehnung der Umläufe führt tendenziell zu einem höheren Einfluss unterschiedlicher Topographiebedingungen, sodass auch diese Einflussgröße auf den Fahrzeugenergieverbrauch einwirkt. Zudem fordert der Regionalverkehr ein höheres Maß an Sicherheit im Betrieb. Um Störungen durch Verkehrseinschränkungen (beispielsweise Sperrungen) ausgleichen zu können, sind größere Umleitungen als im Stadtverkehr wahrscheinlich.

Die Intention hinter den klassischen SORT-Fahrzyklen liegt in der Abbildung von schwerem Stadtverkehr bis hin zum Vortortverkehr. Ein SORT-Zyklus besteht aus der Abfolge von drei aneinandergereihten Geschwindigkeitsverläufen, die jeweils eine Trapezform ausbilden. Diese Trapeze sind mit Stillstandzeiten voneinander getrennt,

Tab. 1: Vergleich realer Fahrzeugverbräuche beim Absolvieren von SORT-Zyklen.

Verbrauch	Diesel Referenz	Hersteller (batterieelektrischer Standardsolobus)					
		#1	#2	#3	#4	#5	Mittel
SORT 1:1 (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
SORT 2:1 (%)	84,00	91,89	93,58	96,13	98,12	88,07	93,19
SORT 3:1 (%)	78,00	89,62	93,36	90,49	96,02	87,16	91,29

Tab. 2: Vergleich existierender und konzeptionierter, synthetischer Fahrzyklen.

	SORT 1	SORT 2	SORT 3	Regio 1	Regio 2	Regio 3	Regio 4
v _{konstant} (km/h)	20/30/40	20/40/50	30/50/60	40/50/60	40/50/70	40/60/70	40/70/80
v _{mittel} (km/h)	12,1	18,0	25,3	27,9	31,10	34,7	38,2
Stopp (s)	20/20/20	20/20/20	20/10/10	20/10/10	20/10/10	20/10/10	20/10/10
Strecke (m)	520,0	920,0	1.450,0	1.720,0	2.120,0	2.720,0	3.550,0

Tab. 3: Vergleich simulierter Fahrzeugverbräuche beim Absolvieren von SORT- und Regio-Zyklen.

Verbrauch	SORT 1	SORT 2	SORT 3	Regio 1	Regio 2	Regio 3	Regio 4
Solobus, Bezug zu SORT 1 (%)	100,00	91,17	91,12	87,60	87,43	82,40	83,99
Gelenkbus, Bezug zu SORT 1 (%)	100,00	89,76	88,36	84,61	83,28	77,83	78,17

die beispielsweise eine Haltestellensituation im realen Verlauf imitieren. Abschließend komplettiert eine weitere Pause den Zyklus. In den trapezförmig ausgeprägten Geschwindigkeitsverläufen sind die Phasen konstante Beschleunigung (flexible Werte), konstante Geschwindigkeit (20, 30, 40, 50, 60 km/h) sowie konstantes Bremsen (Beschleunigung jeweils $-0,8 \text{ m/s}^2$) aneinandergereiht. Durch die Kombination dreier unterschiedlicher Trapeze ergeben sich für den jeweiligen Zyklus charakteristische Merkmale. Dazu zählt beispielsweise die Durchschnittsgeschwindigkeit. Sie beträgt für die drei SORT-Zyklen 12,1 km/h, 18,0 km/h und 25,3 km/h [4].

Verbrauchseinfluss der SORT-Fahrzyklen

Aus den synthetischen Fahrzyklen lassen sich noch keine konkreten Fahrzeugverbrauchsangaben ableiten. Dafür müssen die Geschwindigkeits-Zeit-Abläufe beispielsweise von einem Fahrzeug absolviert oder über eine Simulation computertechnisch ausgewertet werden. Dieser Beitrag analysiert zunächst real durchgeführte Fahrzeugvermessungen, wobei besonders das Verhältnis der sich einstellenden Verbräuche zueinander im Fokus stehen soll.

Die Tabelle 1 fasst fünf Messwertprotokol-

le aktueller, batterieelektrischer Fahrzeuge der 12-Meter-Klasse und eines Dieselfahrzeugs zusammen. Es sind jeweils die Ergebnisse für SORT 1 bis SORT 3, normiert auf den SORT-1-Wert, aufgeführt. Für die Dieselreferenz ergeben sich im SORT 2 eine Verbrauchseinsparung von 16 Prozent und im SORT 3 von 22 Prozent. Diese Tendenz lässt sich grundsätzlich auch bei den batterieelektrischen Fahrzeugen erkennen, jedoch ist die Ausprägung weniger stark. Im Mittel (Tabelle 1, rechte Spalte) liegen ihre SORT-2-Verbräuche nur knapp sieben Prozent und die SORT-3-Werte etwa neun Prozent unterhalb der SORT-1-Messung.

ANZEIGE

VCDB

**Urbane Mobilität.
Gemeinsam gestalten.**

Wir beraten Sie. Wir planen für Sie.

Innovative Verkehrssysteme • Fahrzeugtechnik • Verkehrsplanung • Verkehrstechnik • Infrastrukturplanung • Werkstattplanung

www.vcdb.de

Konzeptionierung synthetischer Regionalbus-Zyklen

Die oben beschriebene SORT-Bildungsvorschrift wird im Folgenden manipuliert, um gezielt Zyklus-Attribute, wie die Durchschnitts- und die Maximalgeschwindigkeit, zu verändern. Dazu werden die Beschleunigungskoeffizienten, die Zeitdauern der Stillstandsphasen sowie die Streckenlänge je Trapez neu definiert.

Für die Trapeze mit einer Maximalgeschwindigkeit von 70 km/h und 80 km/h werden konstante Beschleunigungswerte eingeführt, die sich an realistischen Fahrleistungen orientieren [5]. Sie betragen 0,32 m/s² und 0,36 m/s². Die Schrittweite der Zuwächse bei den mittleren Geschwindigkeiten zwischen den konzipierten Zyklen ist mit 3 km/h etwa nur halb so groß gewählt, wie es bei den SORT-Zyklen der Fall ist. Dieses Vorgehen lässt eine feiner abgestufte Verbrauchsschätzung bei differenzierten Randbedingungen zu.

Alle festgelegten Parameter fasst die Tabelle 2 zusammen. Vergleichend dazu sind auch die Festlegungen für die SORT Zyklen aufgeführt. Für die neu definierten Zyklen wird zudem die Nomenklatur „Regio 1“ bis „Regio 4“ gewählt.

Alle Zyklen aus der Tabelle 2 werden folgend in Verbindung mit einem physikalischen Fahrzeugmodell aus der Literatur angewendet, welches das Verhalten eines batterieelektrischen Fahrzeugs der 12-Meter- sowie der 18-Meter-Klasse simuliert und hinreichend genaue Verbrauchswerte kalkuliert [6]. Die Simulationsergebnisse sind in Tabelle 3, abermals normiert auf den SORT-1-Verbrauchswert, dargestellt

Das Modell prägt für den Solobus die SORT-2- und SORT-3-Verbräuche nahezu identisch aus. Sie liegen etwa neun Prozent unterhalb des Bezugswertes und damit in einer ähnlichen Grö-

ßenordnung, wie Hersteller #1 in Tabelle 1. Erwartungsgemäß ordnen sich die Werte für die konzipierten Regio-Zyklen noch darunter ein. Der Effizienzgewinn steigt mit zunehmender Durchschnittsgeschwindigkeit bis 34,7 km/h weiter an, bis er schließlich ab dem Regio-4-Zyklus in einen Mehrverbrauch (Vergleich: Regio 3) umschlägt.

Ein sehr ähnliches Bild ergibt sich für den Gelenkbus. Auch hier liegen SORT-2- und SORT-3-Verbrauch sehr dicht beieinander. Bezogen auf den SORT-1-Wert sind sie etwa zehn Prozent effizienter. Wird das Simulationsmodell mit den Regio-Zyklen angeregt, lässt sich ebenfalls eine Verbrauchsminderung bis hin zum dritten von vier Zyklen ausweisen. Erst im Regio-4-Zyklus steigt der Verbrauchswert wieder leicht an.

Innerhalb der untersuchten Fahrzyklen wird für beide untersuchten Gefäßgrößen der geringste Verbrauch jeweils bei einer Trapezfolge von 40, 60 und 70 km/h sowie den Pausenzeiten 20, 10 und 10 s erzielt. Die zugehörige Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt etwa 34 km/h, sodass minimale Energiebedarfe für Streckenabschnitte von RMV-Linien mit ebensolchen oder möglichst ähnlichen Eigenschaften zu erwarten sind.

Ausblick

Bereits jetzt müssen Linien mit Regionalbuscharakter auf alternativ angetriebene Busse umgestellt werden. Dafür werden praxisnahe Energieverbrauchswerte benötigt. Innerhalb der vorliegenden Untersuchung wird die Anwendung der SORT-Zyklen, respektive deren Bildungsvorschrift, zur Abschätzung von Fahrzeugenergieverbräuchen im Regionalbuseinsatz beim RMV diskutiert.

Es werden synthetische Zyklen zur Nachbildung von Regionalbuseinsätzen konzipiert, umgesetzt und dann in Verbindung

mit einem Fahrzeugsimulationsmodell angewendet. Dabei ist festzustellen, dass mit zunehmender Durchschnittsgeschwindigkeit der Regio-Zyklen der spezifische Verbrauch sukzessive absinkt. Erst ab etwa 38 km/h im Durchschnitt steigt er wieder leicht an.

Für die Verbrauchsberechnung innerhalb der RMV-Studie werden für jede Linie zunächst die entsprechenden SORT- oder Regio-Klassen und zusätzliche Topographie-Klassen zugewiesen. Basierend auf einer detaillierten Umlaufplanung für jede Linie und Fahrzeugtechnologie stehen dem RMV nun praxisnahe Verbrauchswerte zur Verfügung. In Verbindung mit konkreten Fahrzeugkonfigurationen lassen sich daraus Reichweiten ableiten. Auf Basis dieser Datenlage sind ferner die Untersuchung von weiteren Linien beziehungsweise Linieneinsätzen sowie die Erstellung einer Gesamtstrategie geplant.

Die Daten sollen zukünftig noch mit in der Praxis erfassten Daten aus ersten Pilotprojekten, wie zum Beispiel der „Lernwerkstatt Brennstoffzellenbusse“ im Landkreis Gießen verglichen werden.

Literatur/Anmerkungen

- [1] Schmidt, Torsten, fahma, 7.10.2021: Präsentation „Ansätze und Projekte zur Dekarbonisierung des regionalen Busverkehrs des RMV“.
- [2] Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz vom 9. Juni 2021 (BGBl. I S. 1691).
- [3] Schütz, Thomas (2013): Hucho – Aerodynamik des Automobils. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [4] UITP (2014): UITP project 'SORT', Standardised on-road test cycles, New edition UITP 2014.
- [5] Böhnke, Sascha. (2006): „Supertest Citaro LE Ü“, In: Busfahrer Magazin, 2006, S. 14–21, https://www.busfahrer magazin.de/fm/2348/BF0306_14-21_LNS.pdf, abgerufen am 03.10.2019.
- [6] Bunzel, Alexander (2020): „Leistungsbedarfsbestimmung elektrifizierter Stadtbusse im Linieneinsatz“, Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden.
- [7] Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates – vom 20. Juni 2019 – zur Änderung der Richtlinie 2009/ 33/ EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge.

Zusammenfassung/Summary

Weiterentwicklung des SORT-Modells zur Verbrauchsermittlung

Im Kontext einer Machbarkeitsstudie zum Einsatz alternativ angetriebener Fahrzeuge im regionalen Busverkehr wird eine Vielzahl realer Buslinien technologieoffen bewertet. Das methodische Vorgehen stützt sich auf synthetische Fahrverlaufszyklen mit hinterlegten Verbrauchskennwerten. Dieser Ansatz wird als tauglich eingestuft, jedoch sind in der Literatur vorhandene Zyklen zur Abbildung von Eigenheiten des regionalen Busverkehrs, wie höhere Maximal- und Durchschnittsgeschwindigkeiten, weniger gut geeignet. Der Beitrag konzipiert neuartige Ersatzzyklen durch eine bewusste Manipulation der bekannten Bildungsvorschrift. In Verbindung mit einem physikalischen Fahrzeugmodell werden anschließend simulationsbasiert Traktionsverbräuche für elektrifizierte Solo- und Gelenkbusse kalkuliert und im Kontext der aufgeworfenen Themenstellung diskutiert.

Further development of the SORT model for consumption determination

In the context of a feasibility study on the use of alternatively powered vehicles in regional bus transport, a large number of real bus routes are evaluated in a technology-open manner. The methodological approach is based on synthetic driving cycles with stored consumption parameters. This approach is considered to be suitable, but existing cycles in the literature are less suitable for the representation of peculiarities of regional bus transport, such as higher maximum and average speeds. The paper designs novel replacement cycles through a deliberate manipulation of the known formation rule. In connection with a physical vehicle model, traction consumption for electrified solo and articulated buses is then calculated on the basis of simulation and discussed in the context of the topic raised.