

Simulation des Einsatzes von Elektrofahrzeugen in Hanau

Potenzialanalyse für die Implementierung alternativ angetriebener Busse aus dem Forschungsprojekt SimCityNet

Prof. Dr.-Ing. Josef Becker, G r me Löw, M.Eng., Prof. Dr. Kai-Oliver Schocke, Frankfurt a. M.; Prof. Dr. Sven Spieckermann, Dipl.-Ing. Thomas Schulte, Hanau

In den vergangenen Jahren wurden bereits vielerorts erste Busse mit alternativen Antrieben in Pilotprojekten teilweise erprobt sowie in den bestehenden Betriebsablauf integriert. Dies bestätigen die steigenden Zahlen an alternativ angetriebenen Bussen in Deutschland, die allerdings bundesweit nur einen niedrigen Anteil der Fahrzeugflotten in Verkehrsbetrieben abdecken [1].

Derzeit werden vorrangig batterieelektrische Busse in den Betrieb integriert. Verkehrsunternehmen greifen dabei auf Fahrzeuge verschiedener Hersteller zurück. Brennstoffzellenbusse konnten sich bis dato noch nicht flächendeckend in Deutschland durchsetzen, sondern werden vermehrt in Städten eingesetzt, die kommunal eine ambitionierte Wasserstoffstrategie verfolgen oder punktuell auf Wasserstoff als Abfallprodukt im Stadtgebiet zurückgreifen können [2].

Klimapolitische Ziele, unter anderem des Pariser Abkommens, sowie die Clean-Vehicles-Directive stellen hingegen auch für Verkehrsunternehmen zukunftsweisende Vorgaben auf. Fahrzeugneubeschaffungen müssen im Zeitraum von August 2021 bis 2025 zu 45 Prozent alternative Antriebe haben. Davon müssen wiederum mindestens die Hälfte als emissionsfreie Fahrzeuge gelten. Im zweiten Referenzzeitraum zwischen 2026 und 2030 müssen 65 Prozent der Fahrzeugneubeschaffungen alternative Antriebe haben und mindestens 32,5 Prozent emissionsfrei sein [3].

Damit stehen der öffentliche Verkehr und insbesondere kommunale Flottenbetrei-

ber in den kommenden Jahren vor einer elementaren Herausforderung. Die Implementierung erster alternativ angetriebener Busse erweist sich noch als planerisch einfach beherrschbar. Die Umstellung größerer Teile der Flotte beziehungsweise der gesamten Flotte ist mit mehr Ungewissheit behaftet und mit einem hohen finanziellen Risiko verbunden. Zukunfts- und zielorientierte Lösungsansätze kann ein Simulationsmodell liefern, wie es im Rahmen des vom Land Hessen geförderten Forschungsprojektes SimCityNet entwickelt wurde.

Für die Hanauer Straßenbahn GmbH (HSB) und die Hanau Infrastruktur Service (HIS), die in der hessischen Stadt Hanau den Stadtlinien- sowie den Müllfahrzeuge-Betrieb organisieren, wurden im Forschungsprojekt SimCityNet gemeinsam mit der Simulationsdienstleisterin SimPlan AG und der Frankfurt University of Applied Sciences digitale Szenarien für eine nachhaltige Implementierung emissionsfreier Fahrzeuge entwickelt und analysiert. Das digitale Verkehrsmodell (Vorstufe eines „digitalen Zwilings“) bildet das komplette Straßennetz der Stadt Hanau ab. Auf einem solchen virtuellen Straßennetz lassen sich verschiedene Betriebskonzepte mit unterschiedlichen Antriebs- und Ladetechnologien, unterschiedlicher Infrastruktur sowie unterschiedlichen Zusammensetzungen der Fahrzeugflotten untersuchen und bewerten.

Anwendungsfall Hanau

Die HSB ist Betreiber des städtischen Personennahverkehrs in Hanau und verfügt über eine vollständig konventionell angetriebene Fahrzeugflotte von 64 Bussen

(37 Solo-, ein Midi- und 26 Gelenkbusse), wovon täglich drei Gelenkbusse sowie zwei Solobusse als Reserve vorgehalten werden. Zwölf Linien erschließen ein Liniennetz von circa 100 km und 170 Haltestellen. Abbilden lässt sich im Modell der ganzjährige Betrieb der HSB, wobei als Analysezeitraum eine Woche während des Schulbetriebs (Betriebsh chstleistung) betrachtet wird.

In Workshops mit der HSB wurden der Stand der Fahrzeugtechnik, unterschiedliche Ladestrategien sowie betriebliche Szenarien diskutiert und auf das Untersuchungsgebiet übertragen. Im Modell lassen sich Auswirkungen durch den Einsatz batterieelektrischer Busse (Battery Electric Vehicles – BEV) sowie Brennstoffzellenbusse (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV) abbilden, die als reine Fahrzeugflotte oder als eine Mischflotte, die beide Antriebstechnologien einsetzt, simuliert werden können. Opportunity-Charging wurde auf Grund einer Vorstudie als Betriebskonzept in Hanau ausgeschlossen.

Aus den Rahmenbedingungen haben sich die Vorgaben für die Konzeption der Simulationsmodelle ergeben, wie auch die erforderlichen Eingangsdaten. In Form einer technischen Beschreibung wurde die Modellierungslogik beschrieben, anhand der die Betriebsprozesse der HSB anschließend im Verkehrsmodell abgebildet wurden. Der Vergleich verschiedener Szenarien erfolgte durch die Implementierung der Ist-Prozesse mit konventionell angetriebenen Diesel-Bussen sowie fahrzeugspezifischen Soll-Prozessen mit alternativ angetriebenen Bussen.



Zum Autor

Prof. Dr.-Ing. Josef Becker (48) ist seit 2014 Professor für Schienenverkehrswesen und öffentlichen Verkehr an der Frankfurt University of Applied Sciences. Er ist dort unter anderem Mitglied des Research Lab for Urban Transport (ReLUT) und Studiengangsleiter im Master-Studiengang Infrastruktur – Wasser und Verkehr. Einen Forschungsschwerpunkt bildet die Mobilität im ländlichen Raum. Er schloss im Jahr 2005 seine Promotion an der TU Darmstadt ab. Im Anschluss war er fast zehn Jahre bei der Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH tätig.



Zum Autor

Gérôme Löw M.Eng. (29) ist seit 2019 an der Frankfurt University of Applied Sciences am Research Lab for Urban Transport (ReLUT) als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich Elektromobilität und Mobilität im ländlichen Raum. Zuvor hat er die Studiengänge Infrastrukturmanagement (M.Eng.) und Geoinformation und Kommunikationstechnik (B.Eng.) erfolgreich absolviert.



Zum Autor

Prof. Dr. Kai-Oliver Schocke (54) ist seit 2011 Professor für Produktion und Logistik an der Frankfurt University of Applied Sciences. Er ist zudem Direktor und Mitbegründer des Research Lab for Urban Transport (ReLUT). Seine Forschungsarbeiten beschäftigen sich unter anderem mit logistischen Lösungen für Belieferungen auf der letzten Meile.



Zum Autor

Prof. Dr. Sven Spieckermann (54) ist seit 2014 Vorstandssprecher der SimPlan AG. Er verantwortet Forschung und Entwicklung bei dem Hanauer Spezialisten für Simulationsstudien und Simulationssoftware. Als Honorarprofessor am Karlsruher Institut für Technologie gibt er im Rahmen von Lehraufträgen Simulationsexpertisen an Studenten in Karlsruhe, Darmstadt und Braunschweig weiter.



Zum Autor

Dipl.-Ing. Thomas Schulte (59) ist seit 2017 Geschäftsführer der Hanauer Straßenbahn GmbH. Seit 1994 hat er Führungspositionen bei privaten und kommunalen Bahn- und Busgesellschaften inne. Zuvor war er mehrere Jahre in einem Ingenieurbüro planerisch tätig.

konnte im Projektumfang nicht abgedeckt werden. Umgesetzt wurde die Vorstufe eines digitalen Zwillings, bei der Betriebsdaten aus der Dispositionssoftware der HSB exportiert, in das Modell eingelesen und bei Bedarf zurücktransferiert werden können. Der Datenaufbau des Simulationsmodells beinhaltet:

- Konfigurationsparameter,
- Betriebsdaten und
- Betriebsparameter.

Konfigurationsparameter beschreiben Daten, die innerhalb des Modells variabel parametrisiert werden können und aus denen sich verschiedene Simulationsexperimente erstellen lassen. Beispielhafte Parameter sind die Auswahl von Referenzfahrzeugen (Antriebstechnologie, Reichweite, Tank-/Batteriekapazität, Ladekurven), die Ladeinfrastruktur (Standort, Ladeleistung pro Ladepunkt, Gesamtnetzlast) oder auch sonstige Parameter, wie die Auswirkung von unterschiedlichen Außentemperaturen auf die Einsatztauglichkeit der Fahrzeuge. Relevante Kriterien für diese Parameterausprägungen wurden erhoben und in geeigneter Weise aufbereitet.

Betriebsdaten bilden die Voraussetzung zur Konzeption eines Verkehrsmodells. Diese Daten beinhalten Informationen zu Linienverläufen, Haltestellenstandorten und Fahrplan- sowie Umlaufplanung. Der Detaillierungsgrad auf der Visualisierungsebene ist abhängig von der Datenverfügbarkeit und -aufbereitung. Für Hanau konnten betriebsrelevante Daten aus der etablierten Dispositionssoftware der HSB exportiert, aufbereitet und in die Simulationsanwendung eingepflegt werden und liefern auf der Visualisierungsebene eine sehr gute Lösung für den Modellnutzer.

Betriebsparameter beinhalten erhobene Daten, die für die Analyse und Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Szenarien ausschlaggebend sind. Durch sie lassen sich die Auswirkungen alternativ angetriebener Busse in der Fahrzeugflotte analysieren und bewerten. Beispielhaft lassen sich verschiedene Kennzahlen zu wirtschaftlichen oder umweltbezogenen Implikationen identifizieren.

Die vorangehend beschriebenen Daten werden außerhalb des Simulationsmodells als Excel-Dateien geführt. Bei Simulationsstart greift das Modell auf diese Inhalte zu. Diese technische Umsetzung bietet der HSB die Möglichkeit, nach Projektabschluss die Konfigurationsparame-

Digitales Verkehrsmodell

Das Verkehrsmodell ist mit der Multi-Methoden-Simulationssoftware AnyLogic erstellt. Gewählt wurde das Softwarepaket auf Grund der hohen Anpassungsfähigkeit der Java-Programmierung und der branchenspezifischen Bibliotheken, agentbasierter Modellierung und diskret ereignis-

basierter Simulation sowie einem Modul für geografische Informationssysteme. Um das Niveau eines digitalen Zwillings zu erreichen, sind eine kontinuierliche Verbindung und der Austausch von Informationen zwischen der realen Welt und dem digitalen Modell erforderlich. Ein solcher Datenaustausch von Echtzeit-Informationen über Live-Tracking der Fahrzeuge

ter ändern oder ergänzen zu können und beispielsweise weitere Analysen mit einem neuen Referenzfahrzeugmodell durchzuführen. Die Modellierung beinhaltet eine Benutzungsoberfläche (Graphical User Interface – GUI) mit der vor Simulationsbeginn den verschiedenen Konfigurationsparametern eindeutige Startwerte zugewiesen werden und mit der sich unterschiedliche Simulationsexperimente parametrieren lassen. Die GUI ermöglicht es auch, einzelne Kenngrößen, wie unterschiedliche Fahrzeuganzahlen oder Ladeleistungen, zu spezifizieren und Auswirkungen auf den Betriebsablauf hervorzuheben.

Die Visualisierung der Betriebsabläufe erfolgt anhand einer interaktiven Karte, die auf OpenStreetMap-Kartenmaterial aufbaut (Abb. 1). Die Haltestellen im Stadtgebiet sind durch grüne Punkte auf der Karte lokalisiert. Modelliert sind die Bewegungen der Busse entsprechend dem hinterlegten Fahrplan. Farblich gekennzeichnet sind die verschiedenen Antriebstechnologien der Fahrzeuge mit den verbleibenden Reichweiten der Fahrzeuge. Durch die interaktive Auswahl eines Busses werden die auf der zu bedienenden Linie enthaltenen Haltestellen rot markiert. Zudem können verschiedene Betriebsprozesse graphisch nachverfolgt werden. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die aktuelle Auslastung der Fahrzeugflotte während der Simulation. Donnerstags gegen 23:00 Uhr befinden sich dabei viele Busse bereits im Ladeprozess (gelber Zustandsbalken). Einzelne Fahrzeuge werden noch im Linienbetrieb



Abb. 1: Dargestellt ist die kartenorientierte Visualisierung des Simulationsmodells. Die Busse bewegen sich anhand des Fahrplans realitätsnah durch das Stadtgebiet und geben fahrzeug-spezifische Informationen zu Antriebstechnologie, Ladestand und Reichweite an.

Screenshot: Frankfurt UAS

eingesetzt (grüner Zustandsbalken) oder wurden im Anschluss an einen Umlauf kurz zwischengeladen und erneut für Abendverkehre eingesetzt.

Das im Rahmen des Projektes entwickelte Verkehrsmodell umfasst neben Simulationsmodellen auch mathematische Modelle. Auf Grund zu geringer Fahrzeugreichweiten (und Ladezeiten), insbesondere bei batterieelektrischen Fahrzeugen, ist die Übernahme der heutigen Umlaufplanung nicht ohne weiteres möglich. Daher kön-

nen in der GUI neben der Ist-Umlaufplanung auch manuell modifizierte Umläufe importiert oder Neuberechnete Umläufe aufgerufen werden, die anhand einer entwickelten Heuristik auf eine spezifizierte Flottenkonfiguration angepasst sind. Die Heuristik greift dabei grundlegende Kriterien einer Umlaufplanung auf und berechnet für Szenarien mit alternativen Antrieben neue ressourceneffiziente Umläufe, angepasst an die in den Konfigurationsparametern eingepflegten Reichweiten für batterieelektrische und Brennstoffzellenbusse.

ANZEIGE



VDV Akademie

- » 7. VDV-Symposium Multimodalität
17.-18.05.2022 in Darmstadt
- » 6. VDV-Zukunftskongress
Autonomes Fahren im Öffentlichen Verkehr
24.-25.05.2022 in München
- » 1. VDV-Bildungskonferenz
31.05.-01.06.2022 in Frankfurt
- » 13. VDV-Elektrobuskonferenz und
Fachmesse ElekBu
12.-13.07.2022 in Berlin

VDV-Akademie · Kamekestraße 37-39 · 50672 Köln
0221 57979-173 · akademie@vdv.de · www.vdv-akademie.de



Abb. 2: Während der Simulation können Betriebsprozesse überwacht und bewertet werden. Dargestellt ist hier der aktuelle Betriebszustand der einzelnen Busse im Simulationsdurchlauf. Screenshot: Frankfurt UAS

Tabelle 1: In der Tabelle sind die für die Simulation maßgebenden Reichweiten der Referenzfahrzeugmodelle beschrieben.

Übersicht der Referenzfahrzeugmodelle	Solobus	Gelenkbus
Batterieelektrischer Bus mit geringerer Reichweite (in folgenden Grafiken auch BEV Typ I genannt)	170 km	200 km
Batterieelektrischer Bus mit größerer Reichweite (in folgenden Grafiken auch BEV Typ II genannt)	350 km	350 km
Brennstoffzellenbus	350 km	400 km

Simulationsergebnisse

Das entwickelte digitale Verkehrsmodell bietet die Möglichkeit, fundierte Analysen für den Einsatz alternativ angetriebener Busse in Hanau durchzuführen. Potenzielle verschiedener Antriebstechnologien und Fahrzeugmodelle konnten für die HSB identifiziert werden und liefern eine Entscheidungsunterstützung für strategische Planungen hinsichtlich der Gestaltung des Betriebshofs sowie zukünftiger Beschaffungen von Elektrobusen. Simuliert wurden Szenarien, die eine kurz-, mittel- sowie langfristige Flottenplanung mit batterieelektrischem und Brennstoffzellenantrieb vorsehen. Sowohl die Auswirkungen durch Umstellungsvorhaben auf eine Antriebs-technologie als auch die Wirksamkeit einer gemischten Fahrzeugflotte in verschiedenen Flottenkonstellationen wurden untersucht.

Zur Typisierung von Referenzfahrzeugen wurden marktübliche Fahrzeugmodelle definiert. Batterieelektrische Busse wurden durch zwei Referenzmodelle abgebildet.

Das erste Fahrzeugmodell ist beschrieben mit einer geringeren Reichweite von 170 km für Solo- und 200 km für Gelenkbusse unter Normalbedingungen (Tabelle 1). Das zweite batterieelektrische Fahrzeugmodell sieht eine größere Reichweite von jeweils 350 km für Solo- und Gelenkbusse vor (Tabelle 1). Um den Leistungsverlust einer Batterie über die Jahre zu modellieren, wurden vier Alterungsstufen definiert, die eine abnehmende Batteriekapazität repräsentieren und den Flottenstand über die vier Cluster gleichmäßig verteilt. Brennstoffzellenbusse werden durch ein Referenzfahrzeug abgebildet, welches eine Reichweite von 350 km für Solo- und 400 km für Gelenkbusse vorhält. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die definierten Referenzfahrzeugmodelle, deren unterschiedlichen Reichweiten für die nachfolgenden Ergebnisse signifikant einflussnehmend sind.

Flotte mit einer Antriebsart

Der Ist-Ablauf mit Diesel-Bussen stellt den Referenzzustand der Analyse dar, anhand dessen sich die betrieblichen Auswirkungen

gen durch den Einsatz emissionsfreier Antriebe aufzeigen lassen. Zur Vergleichbarkeit wurde daher zunächst das Ist-Szenario simuliert und anschließend verschiedenen Zukunftsszenarien gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Brennstoffzellenbussen ohne weiteres möglich ist. Die Fahrzeugreichweite des Referenzfahrzeugmodells ist ausreichend, um alle bestehenden Umläufe der heutigen Umlaufplanung zu bedienen. Tankprozesse von FCEV sind zudem im zeitlichen Kontext vergleichbar mit denen eines Diesel-Busses. Auf Grund ähnlicher simulationsrelevanter Kenngrößen zwischen Diesel- und Brennstoffzellenbussen sind keine zusätzlichen Fahrzeuge in der Flotte erforderlich, um die gegenwärtige Umlaufplanung der HSB umzusetzen. Hohe Investitionskosten für Brennstoffzellenfahrzeuge sowie hohe Kosten zur Herstellung oder Anlieferung von Wasserstoff machen die Umsetzung einer reinen Brennstoffzellenflotte in Hanau allerdings schwierig, zumal die Anlieferung und Speicherung von (grünem) Wasserstoff in einer solchen Größenordnung noch nicht geklärt ist.

Die Implementierung batterieelektrischer Fahrzeuge unterstellt, dass für jedes Fahrzeug ein eigener Ladepunkt mit einer Ladeleistung von maximal 150 kW auf dem Betriebshof vorgesehen ist. Elektrobusse werden entsprechend der Parametrierung auf einen Ladezustand (State of Charge – SoC) von 100 Prozent aufgeladen. Die Simulationsergebnisse zeigen für beide batterieelektrischen Referenzfahrzeuge, dass der Betrieb einer reinen BEV-Flotte zu einem Mehrbedarf an Fahrzeugen führt. Das resultiert aus dem immensen Zusatzverbrauch von circa 40 Prozent im Winter. Zur Einhaltung der ganzjährigen Betriebs- und Fahrplanpflicht nach §21 und §40 Personenbeförderungsgesetz (PBefG) müssen in der Simulation die Wintermonate als betrieblicher Worst-Case betrachtet werden. Ein batterieelektrisches Szenario führt unter temperaturspezifischen Normalbedingungen für das Referenzfahrzeugmodell mit geringerer Reichweite (Tabelle 1), gegenüber der heutigen Flottengröße von 64 Bussen, zu einer Steigerung um zwölf Busse. Die zusätzlich abnehmende Reichweite im Winter durch den Zusatzverbrauch und das Erfordernis einer angepassten Umlaufplanung führen dazu, dass insgesamt 93 Busse erforderlich sind. Dies würde für die HSB einen Fahrzeugmehrbedarf um 45 Prozent bedeuten, um den Betrieb ganzjährig zu gewährleisten (Abb. 3). Das Referenzfahrzeugmodell mit einer grö-

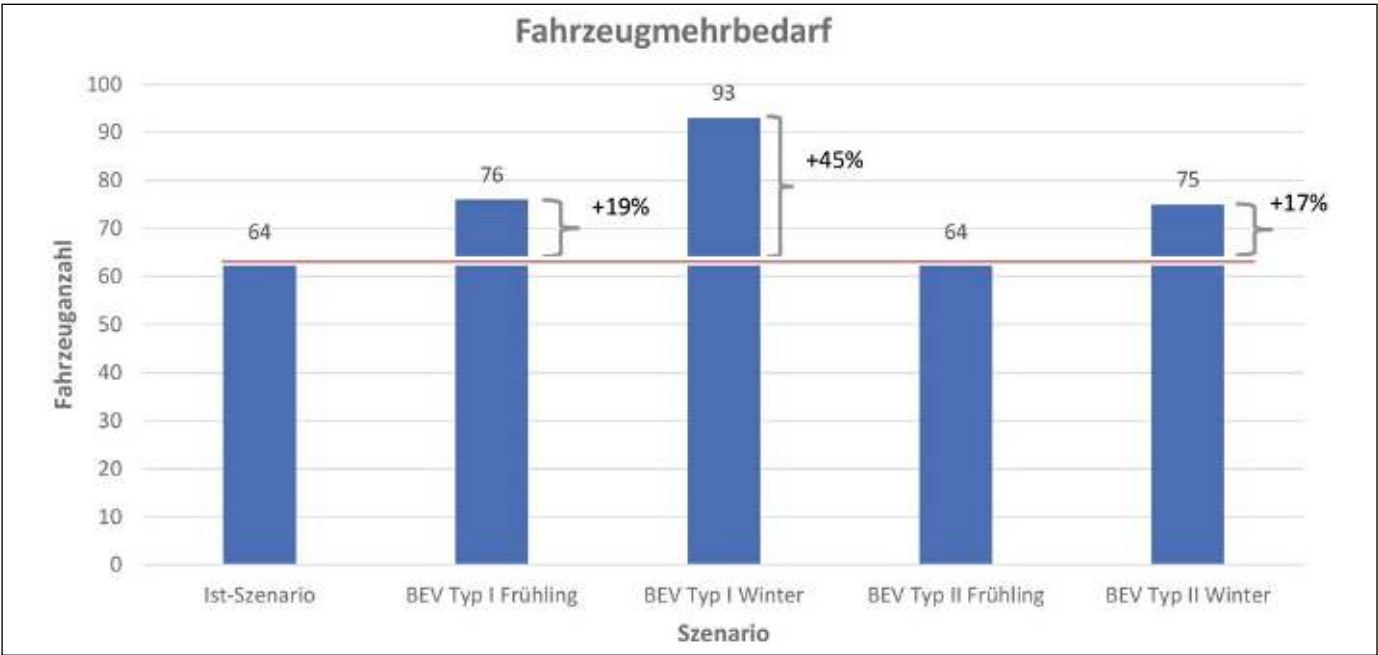


Abb. 3: Gegenübergestellt ist der Mehrbedarf an Fahrzeugen mit verschiedenen Referenzfahrzeugen. Grafik: Frankfurt UAS

ßeren Batteriereichweite (Tabelle 1) senkt diesen Mehrbedarf an Bussen. Unter Normalbedingungen sind keine zusätzlichen Fahrzeuge erforderlich. Der Betrieb im Winter unterliegt hingegen auch für dieses Fahrzeugmodell einer Neuberechnung von Umläufen und umfasst eine Fahrzeugflot-

te von 75 Bussen, was einer Zunahme um 17 Prozent für die HSB bedeutet (Abb. 3). Ein signifikanter Mehrbedarf entfällt dabei auf die Solobusse. Die Neuberechnung von Umläufen für Wintermonate beinhalten höhere Leerfahrten und resultiert in einer steigenden Betriebsleistung von 2,5 Pro-

zent für das Referenzfahrzeugmodell mit geringerer Reichweite und von 1,1 Prozent für das Referenzfahrzeugmodell mit einer Reichweite von 350 km.

Neben flottenspezifischen Auswirkungen lassen sich auch betriebswirtschaftliche

Tabelle 2: In einer Experimentmatrix sind simulationsspezifische Parameterausprägungen verschiedener Experimente dokumentiert. „BEV Typ I“ entspricht hier dem batterieelektrischen Referenzfahrzeugmodell mit geringer Reichweite und „BEV Typ II“ dem Referenzfahrzeugmodell mit größerer Reichweite.

Exp ID	Fahrzeuganzahl	Diesel				Batterie				Wasserstoff				Umlaufplanung	Batterie Fzg-Modell	Ladeinfrastruktur			Zusatzverbrauch Temperatur	Status
		%	Gesamt	SL	GL	%	Gesamt	SL	GL	%	Gesamt	SL	GL			Anzahl	Leistung	Gesamt		
0	64	-	61	35	26	*	3	3	0	-	-	-	-	Bestehende	BEV Typ I	3	150	250	Winter	OK
1	64	-	61	35	26	*	3	3	0	-	-	-	-	Bestehende	BEV Typ II	3	150	250	Winter	OK
2	64	-	58	33	25	*	6	5	1	-	-	-	-	Bestehende	BEV Typ I	6	150	500	Winter	OK
3	64	-	58	33	25	*	6	5	1	-	-	-	-	Bestehende	BEV Typ II	6	150	500	Winter	OK
4	64	-	34	20	14	-	30	18	12	-	-	-	-	Bestehende	BEV Typ I	30	150	2500	Winter	OK
5	64	-	34	20	14	-	30	18	12	-	-	-	-	Bestehende	BEV Typ II	30	150	2500	Winter	OK
	64	-	-	-	-	-	46	26	20	-	18	12	6	Bestehende	BEV Typ I	46	150	4500	Winter	Fehler
	64	-	-	-	-	-	46	26	20	-	18	12	6	Neu	BEV Typ I	46	150	4500	Winter	Fehler
	68	-	-	-	-	-	50	28	22	-	18	12	6	Neu	BEV Typ I	50	150	4500	Winter	Fehler
	70	-	-	-	-	-	52	30	22	-	18	12	6	Neu	BEV Typ I	52	150	4500	Winter	Fehler
	73	-	-	-	-	-	52	30	22	-	21	14	7	Neu	BEV Typ I	52	150	4500	Winter	Fehler
6	77	-	-	-	-	73%	56	34	22	27%	21	14	7	Neu	BEV Typ I	56	150	4500	Winter	OK
	79	-	-	-	-	-	59	37	22	-	20	13	7	Neu	BEV Typ I	59	150	4500	Winter	Fehler
7	81	-	-	-	-	75%	61	39	22	25%	20	13	7	Neu	BEV Typ I	60	150	4500	Winter	OK
	64	-	-	-	-	-	46	26	20	-	18	12	6	Bestehende	BEV Typ II	46	150	4500	Winter	Fehler
	64	-	-	-	-	-	44	26	18	-	20	12	8	Bestehende	BEV Typ II	44	150	4500	Winter	Fehler
	64	-	-	-	-	66%	42	26	16	34%	22	12	10	Bestehende	BEV Typ II	42	150	4500	Winter	OK
	61	-	-	-	-	-	39	25	14	-	22	12	10	Bestehende	BEV Typ II	39	150	4500	Winter	OK
	60	-	-	-	-	-	38	25	13	-	22	12	10	Bestehende	BEV Typ II	38	150	4500	Winter	OK
9	59	-	-	-	-	63%	37	25	12	37%	22	12	10	Bestehende	BEV Typ II	37	150	4500	Winter	OK
10	59	-	-	-	-	64%	38	26	12	36%	21	11	10	Bestehende	BEV Typ II	38	150	4500	Winter	OK
11	59	-	-	-	-	66%	39	27	12	34%	20	10	10	Bestehende	BEV Typ II	39	150	4500	Winter	OK
	59	-	-	-	-	-	40	28	12	-	19	9	10	Bestehende	BEV Typ II	40	150	4500	Winter	Fehler
	60	-	-	-	-	68%	41	29	12	32%	19	9	10	Bestehende	BEV Typ II	41	150	4500	Winter	OK
	61	-	-	-	-	-	43	31	12	-	18	8	10	Bestehende	BEV Typ II	43	150	4500	Winter	Fehler
	64	-	-	-	-	-	46	34	12	-	18	8	10	Bestehende	BEV Typ II	46	150	4500	Winter	Fehler

Auswirkungen identifizieren. Alternativ angetriebene Flotten reduzieren die Betriebskosten. Eine batterieelektrische Flotte kann unter Normalverbrauch im Vergleich zu heute mit Diesel-Antrieb die Betriebskosten um 43 Prozent senken. In Wintermonaten sind die Betriebskosten nur um 24 Prozent niedriger. Eine Brennstoffzellenflotte kann diese lediglich um 19 Prozent senken aufgrund des aktuell marktüblich hohen Wasserstoffpreises.

Flotte mit gemischter Antriebsart

Mit dem Ziel, den Mehrbedarf an Fahrzeugen für die HSB zu minimieren, wurden Szenarien simuliert, die sowohl BEV als auch FCEV im Flottenmanagement kombinieren. Tabelle 2 zeigt einige Simulationsexperimente, die dieses Flottenkonzept abbilden. Die ersten Experimente, gekennzeichnet durch die Experimentnummern 0–6 in der ersten Spalte der Tabelle (Exp ID 0–6) stellen zunächst kurz- und mittelfristige Übergangsszenarien dar, die noch einen größeren Anteil an Diesel-Bussen beinhalten. Die anschließenden Experimente bewerten die Einsatztauglichkeit verschiedener Flottenzusammensetzungen für eine langfristige Flottenplanung. Gelb hinterlegte Experimente führen zu einem Simulationsabbruch, da die vorgenommene Parametrierung den Fahrplan der HSB nicht vollumfänglich betreiben kann und einzelne Umläufe nicht bedient werden. Grün hinterlegte Experimente haben zu einer erfolgreichen Simulationsrechnung geführt und können gegebenenfalls in nachfolgenden Schritten weiter optimiert werden.

Den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass kurz- bis mittelfristig bereits ein Großteil

der Umläufe in Hanau mit batterieelektrischen Bussen betrieben werden kann. Die Umstellung der halben Fahrzeugflotte würde noch zu keinem Mehrbedarf an Fahrzeugen führen. Je höher die Reichweite emissionsfreier Fahrzeuge ist, desto wirkungsvollere verkehrliche und umweltverträglichere Ergebnisse lassen sich erreichen. Für batterieelektrische Flotten mit geringer Fahrzeugreichweite (Tabelle 1) kann der Betrieb nur mit im Vergleich zu heute unveränderter Flottengröße umgesetzt werden, wenn eine hohe Anzahl an Brennstoffzellenbussen eingeführt wird. Die Implementierung von circa 20 FCEV in Kombination mit Batteriebusen bedeutet eine Flottenerweiterung um 20 Prozent gegenüber heute (Exp ID 6 und Exp ID 7). Für Batteriebusse mit einer Reichweite von 350 km erzielt die Kombination mit derselben Anzahl an FCEV eine erfolgreiche Simulation bei gleichbleibender Flottengröße zu heute (Exp ID 8). Der Mix beider Antriebstechnologien reduziert die Investitionskosten für die Fahrzeugflotte, da die Flottengröße konstant gehalten werden kann. Demgegenüber stehen indes Investitionen für verschiedene Infrastrukturen auf dem Betriebshof der HSB. Gleichzeitig lassen sich die Betriebskosten für Antriebsenergie und Wartung um 22 Prozent gegenüber einer reinen Dieselflotte senken. Eine Mix-Flotte kann zudem extreme Ladespitzen durch eine hohe Anzahl gleichzeitig zu ladender Batteriebusse verhindern. Außerdem lassen sich wichtige Erkenntnisse für die Ertüchtigung des Betriebshofs aus den durchgeführten Untersuchungen ableiten. Die vielfältigen Simulationsszenarien liefern darüber hinaus Erkenntnisse hinsichtlich geeigneter Ladestrategien und eines geeigneten Lademaneagements für Hanau.

Fazit

Die erarbeitete Simulationsanwendung bietet der Hanauer Straßenbahn GmbH die Möglichkeit fundierte Analysen durchzuführen und Potenziale für den Einsatz alternativ angetriebener Fahrzeuge zu identifizieren. Konzepte zum Gelegenheitsladen an Zwischen- und Endhaltestellen wurden bei dem erstellten digitalen Zwilling in der aktuellen Fassung nicht berücksichtigt, sind allerdings bei Bedarf ergänzbar. Die Übertragbarkeit des Verkehrsmodells auf weitere Kommunen und Verkehrsunternehmen ist grundsätzlich möglich und erwünscht, erfordert jedoch einen gewissen Arbeitsaufwand zur Anpassung an die Bedingungen vor Ort. Ein hoher Mehrwert liegt darin, Konfigurationsparameter, Eingangsdaten und Eingangsparameter außerhalb des Modells anpassen und ergänzen zu können. Dies birgt die Chance, den fortschreitenden Stand der Fahrzeugentwicklung und Batterieforschung aufzugreifen und zukünftig in weiteren Szenarien abbilden und bewerten sowie nachhaltigkeitsrelevante Zielgrößen quantifizieren zu können.

Literatur/Anmerkungen

- [1] BMU. (25. Juni 2021). Schulze: BMU-Förderung war wichtige Initialzündung für Verkehrswende im öffentlichen Nahverkehr. Von Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/schulze-bmu-foerderung-war-wichtige-initialzuendung-fuer-verkehrswende-im-oeffentlichen-nahverkehr>, abgerufen am 08.12.2021.
- [2] PricewaterhouseCoopers GmbH. (2020). E-Bus-Radar – Wie elektrisch ist der öffentliche Nahverkehr?
- [3] VDV. (2021). Umsetzung der Clean Vehicles Directive (CVD). Von VDV – Die Verkehrsunternehmen: <https://www.vdv.de/umsetzung-cvd.aspx>, abgerufen am 08.12.2021.

Zusammenfassung/Summary

Simulation des Einsatzes von Elektrofahrzeugen in Hanau

Mit der Clean Vehicles Directive steht der öffentliche Verkehr vor einer großen Herausforderung hinsichtlich zukünftiger Ausgestaltungen von Fahrzeugflotten mit alternativem Antrieb. Das Forschungsprojekt SimCityNet greift diese Forschungsfrage auf und liefert zukunfts- und zielorientierte Lösungsansätze für eine nachhaltige Integration von Elektrobusen in den öffentlichen Personennahverkehr. Das gesamte Straßennetz einer Kommune, wie hier der Stadt Hanau, kann in einem digitalen Verkehrsmodell (Vorstufe eines „digitalen Zwillings“) abgebildet werden. Auf einem solchen virtuellen Straßennetz lassen sich dann verschiedene Betriebskonzepte mit unterschiedlichen Antriebs- und Ladekonzepten, unterschiedlicher Infrastruktur sowie unterschiedlichen Zusammensetzungen der Fahrzeugflotte untersuchen und bewerten. Die Ergebnisse sind eine hilfreiche Grundlage für Planung und Betrieb des ÖPNV in Hanau sowie für die Dimensionierung der benötigten Infrastruktur im Betriebshof.

Simulation of the use of electric vehicles in Hanau

With the Clean Vehicles Directive, public transport is facing a major challenge with regard to future designs of vehicle fleets with alternative drive systems. The SimCityNet research project addresses this research question and provides future and result-oriented solution approaches for the sustainable integration of electric buses in local public transport. The complete road network of a municipality, such as the city of Hanau in this case, can be mapped in a digital model (preliminary stage of a “digital twin”). On a virtual road network, various operating concepts with different drive and charging concepts, different infrastructures and different vehicle fleet compositions can be examined and evaluated. The results are helpful for planning and operating public transport in Hanau as well as for dimensioning the necessary infrastructure in the depot.