Digitales Verkehrsmodell als Entscheidungsunterstützungssystem bei der Einführung von Elektrobussen und -müllfahrzeugen in Hanau

Das Forschungsprojekt „SimCityNet" befasste sich mit den Potenzialen alternativ angetriebener Fahrzeuge in kommunalen Flotten. Gemeinsam mit der Simulationsdienstleisterin SimPlan AG und der Frankfurt University of Applied Sciences wurden für die Hanauer Straßenbahn GmbH, Betreiber des öffentlichen Personennahverkehrs in Hanau, und Hanau Infrastruktur Service, u. a. verantwortlich für die Abfallwirtschaft in Hanau, jeweils ein digitales Verkehrsmodell (Vorstufe eines „digitalen Zwillings") entwickelt, mit denen verschiedene Szenarien zu unterschiedlichen Antriebs- und Fahrzeugmodellen, Ladestrategien und Flottenkonstellationen simuliert und bewertet werden konnten. Die Simulationsanwendung liefert u. a. flottenspezifische Prognosen über Auswirkungen auf den Betriebsablauf der beiden Praxispartner durch die Implementierung von batterieelektrischen und Brennstoffzellenfahrzeugen. Die erzielten Ergebnisse dienen als Entscheidungsunterstützung für die Einführung von emissionsfreien Bussen und Müllfahrzeugen in Hanau.

The research project "SimCityNet" dealt with the potential of alternatively powered vehicles in municipal fleets. Together with the simulation service provider SimPlan AG and the Frankfurt University of Applied Sciences, a digital traffic model (preliminary stage of a "digital twin") was developed for Hanauer Straßenbahn GmbH, operator of public transport in Hanau, and Hanau Infrastruktur Service, responsible for waste management in Hanau. Using the digital traffic model, various scenarios consisting of different drive and vehicle models, charging strategies and fleet constellations could be simulated and evaluated. The simulation application provides an analysis of fleet-specific effects on the operational process of the two application partners through the implementation of battery electric and fuel cell vehicles. The obtained results serve as a decision support for the introduction of zero-emission buses and waste collection vehicles in Hanau.

doi.org/10.53184/SVT6-2022-3

1 Hintergrund und Forschungsfrage

Mit dem Klimaschutzplan 2050 hat die Bundesregierung im Jahr 2016 eine langfristige Strategie aufgestellt, die das Ziel des Pariser Abkommens, einer weltweiten Treibhausgasneutralität in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts, verfolgt. Mittelfristig wird für das Jahr 2030 eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 55 % im Vergleich zu 1990 angestrebt. Ein wesentlicher Beitrag wird dabei dem Verkehrssektor auferlegt, indem 40 bis 42 % der Treibhausgasemissionen bis 2030 reduziert werden sollen (BMU 2020).

Das Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung sowie die EU-Richtlinie der Clean-Vehicles-Directive nehmen hierbei u. a. kommunale Flottenbetreiber in die Pflicht und definieren gezielte Maßnahmen zur Erreichung der Teilziele durch die Elektrifizierung von Kraftfahrzeugantrieben (BMDV 2021). Durch die Clean-Vehicles-Directive werden kommunalen Flottenbetreibern für zwei spezifische Referenzzeiträume konkrete Maßnahmen bei Fahrzeugneubeschaffungen vorgeschrieben. Neubeschaffungen zwischen August 2021 und 2025 müssen zu 45 % alternativ angetriebene Fahrzeuge beinhalten und von diesem Anteil müssen wiederum mindestens die Hälfte als emissionsfreie Antriebe gelten. Im zweiten Referenzzeitraum zwischen 2026 und 2030 soll der Anteil an alternativen Antrieben bei Fahrzeugneubeschaffungen zudem auf 65 % steigen (VDV 2021). Diese Vorgaben stellen kommunale Flottenbetreiber vor immense finanzielle Herausforderungen und erhöhen den Druck, kurz-, mittel- sowie langfristige betriebsstrategische Maßnahmen zu entwickeln und einzuleiten.

Die steigenden Zahlen an alternativ angetriebenen Bussen im öffentlichen Personennahverkehr in Deutschland zeigen, dass in den letzten Jahren bereits vielerorts erste Fahrzeuge in den Betriebsablauf integriert wurden (BMU 2021). Dispositive Herausforderungen entstehen durch die Erprobung erster E-Fahrzeuge sowie die Umstellung kleinerer Teile der Flotte auf E-Antrieb noch nicht. Die Frage, welche langfristigen Konsequenzen sich für Fahrpläne und Umläufe durch einen umfassenden Umstieg von größeren Teilen oder gar der gesamten Flotte eines Verkehrsunternehmens ergeben, erweist sich dabei schon als deutlich schwieriger und lässt sich mit einzelnen alternativ angetriebenen Fahrzeugen im Fuhrpark nicht beantworten. Mit den Auswirkungen auf den operativen Betrieb hat sich ein vom Land Hessen gefördertes Forschungsprojekt – SimCityNet – befasst.

■ Verfasser

Prof. Dr. Josef Becker
josef.becker@fb1.fra-uas.de

Prof. Dr. Kai-Oliver Schocke
Dekan im FB 3 Business and Law
schocke@fb3.fra-uas.de

Gérôme Löw, M. Eng.
gerome.loew@fb1.fra-uas.de

Frankfurt University of Applied Sciences
Research Lab for Urban Transport (ReLUT)
Nibelungenplatz 1 – HoST
60318 Frankfurt am Main

Dr.-Ing. Nadia Galaske
nadia.galaske@simplan.de

Prof. Dr. Sven Spieckermann
sven.spieckermann@simplan.de

SimPlan AG
Sophie-Scholl-Platz 6
63452 Hanau

Das Forschungsprojekt SimCityNet verfolgte den methodischen Ansatz, eine Simulationsanwendung zu entwickeln, mit der sich die Potenziale von alternativen Antrieben in kommunalen Flotten bestimmen lassen. Mit dem Simulationsmodell können unterschiedliche betriebliche Szenarien untersucht und bewertet werden. Ebenfalls kann das Simulationsmodell als Entscheidungsunterstützung für die zukünftige Flottenplanung dienen. Einen anwendungsnahen Praxisbezug erhält das Simulationsmodell durch zwei in Hanau ansässige kommunale Flottenbetreiber. Gemeinsam mit der Simulationsdienstleisterin SimPlan AG und der Frankfurt University of Applied Sciences wurden zwei Modelle entwickelt, die den Fahrbetrieb der Hanauer Straßenbahn GmbH (HSB) als lokaler Betreiber des öffentlichen Personennahverkehrs und der Hanau Infrastruktur Service (HIS) als kommunalen Entsorgungsbetrieb abbilden.

2 Simulationsszenarien

2.1 Methodik

Gemeinsam mit den beiden Anwendungspartnern wurden die Betriebsabläufe analysiert sowie entsprechende Daten erhoben. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden Konzepte definiert, die einen möglichen Einsatz alternativ angetriebener Fahrzeuge in Hanau beschreiben. Die erhobenen Daten und die Konzeptionierung lieferten die Vorgaben für die Entwicklung des Simulationsmodells und die Implementierung der Betriebsabläufe in das digitale Verkehrsmodell. Die zugrunde liegende Modellierungslogik wurde als technische Dokumentation festgehalten. Gemeinsam mit den Anwendungspartnern wurden verschiedene Szenarien analysiert und darauf basierend Handlungsempfehlungen abgeleitet.

2.2 Hanauer Straßenbahn GmbH

Als Betreiber des städtischen Personennahverkehrs in Hanau befördert die HSB jährlich mehr als 14 Millionen Fahrgäste auf einem Liniennetz mit 12 Linien und 170 Haltestellen mit einer Gesamtlänge von über 100 km. Der Fuhrpark besteht aus 64 Bussen (37 Solo-, 1 Midi- und 26 Gelenkbusse), wovon täglich drei Gelenkbusse sowie zwei Solobusse als Reserve vorgehalten werden. Zum Untersuchungszeitpunkt besteht die gesamte Fahrzeugflotte der HSB aus konventionell angetriebenen Bussen.

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

Tabelle 1: Als Eingangsparameter wurden Referenzfahrzeugmodelle mit typischen Fahrzeugreichweiten definiert

Eine von der HSB beauftragte Vorstudie zeigte auf, dass ein Konzept mit einer Gelegenheitsladung an Zwischen- oder Endhaltestellen in Hanau ungeeignet ist. Dieses Konzept wurde daher im Rahmen des Forschungsprojekts im Simulationsmodell nicht behandelt. Untersucht werden im Modell die Potenziale von batterieelektrischen Bussen und Brennstoffzellenbussen in verschiedenen Zusammensetzungen des Fuhrparks im Hinblick auf die Fahrzeugeigenschaften verschiedener Elektrobusanbieter und -antriebe. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die im Simulationsmodell parametrierten Referenzfahrzeugmodelle mit den fahrzeugspezifischen maximalen Reichweiten.

2.3 Hanau Infrastruktur Service

Die Hanau Infrastruktur Service ist als Eigenbetrieb der Stadt Hanau u. a. für den Bereich Abfallwirtschaft im Stadtgebiet von Hanau verantwortlich. Der Betriebsablauf organisiert sich anhand eines vorgegebenen Abfallkalenders, aus dem sich zyklische Touren (wöchentliche, 2-wöchentliche und 4-wöchentliche Abfallentsorgung) bilden. Unterschieden wird zwischen den vier Abfallfraktionen Restmüll (RM), Papier/Pappe/Kartonage (PPK), Leichtverpackungen (LVP) und Bio-Abfall (BIO), die sich täglich auf neun bzw. zehn Touren aufteilen. Für alle Touren sind aufgrund der anfallenden Abfallmenge zwei Sammelvorgänge erforderlich, um die enthaltenen Abfallbehälter zu entleeren. Abgeschlossen wird ein Sammelvorgang durch die Entleerung des Müllfahrzeugs an einer der vier Abfallsammelstellen für die jeweilige Abfallfraktion (RM, PPK, LVP und BIO), wobei diese Deponien bis auf die Abfallfraktion Leichtverpackung außerhalb des Stadtgebiets von Hanau liegen und zum Teil lange Fahrwege mit sich bringen.

Der Fuhrpark der HIS umfasst 16 Müllfahrzeuge, die nicht variabel für alle Abfallfraktionen eingesetzt werden können und von denen vier Fahrzeuge als Reserve vorgehalten werden. Neben den Touren für die vier Abfallfraktionen betreibt die HIS täglich zwei oder drei Touren für gewerblichen Müll und Sperrmüll, die allerdings auf individuelle Anfrage erfolgen und somit in das Simulationsmodell und in die Analyse nicht einbezogen werden konnten. Untersucht werden im Modell die betrieblichen Auswirkungen durch den Einsatz von batterieelektrischen und Brennstoffzellen-Abfallsammelfahrzeugen mit der Restriktion, dass die Touren nicht verändert werden dürfen. Als Referenzfahrzeugmodell für ein batterieelektrisches Abfallsammelfahrzeug wurde ein Fahrzeug mit einer maximalen Reichweite von 250 km definiert. Das Referenzfahrzeugmodell mit Brennstoffzellenantrieb hat eine maximale Reichweite von 500 km.

3 Simulationsanwendung

Entwickelt wurde das Simulationsmodell mit der Multi-Methoden-Simulationssoftware AnyLogic. Mittels branchenspezifischer Bibliotheken, der Kombination verschiedener Simulationsmethoden und einem Modul für geografische Informationssysteme ließ sich bei der Modellierung der Betriebsprozesse auf der Visualisierungsebene das Niveau eines digitalen Verkehrsmodells erreichen.

Die zugrunde liegende Datenstruktur der Simulationsmodelle ist in Bild 1 beispielhaft für das Modell der Hanau Infrastruktur Service dargestellt. Mit dem Modell sind die Konfigurationsparameter und die erhobenen sowie aufbereiteten Betriebsdaten verknüpft, die als Excel-Listen geführt sind und auf deren Inhalte das Modell bei Simulationsstart zugreift. In der Konfigurationsdatei sind simulationsspezifische Parameter (Antriebstechnologie, Fahrzeugmodell, Ladeinfrastruktur, Ladeverhalten etc.) definiert, die vor Simulationsbeginn durch den Modellnutzer in einer modellierten Benutzeroberfläche (Graphical User Interface, GUI) parametriert werden können (Bild 1). Die GUI

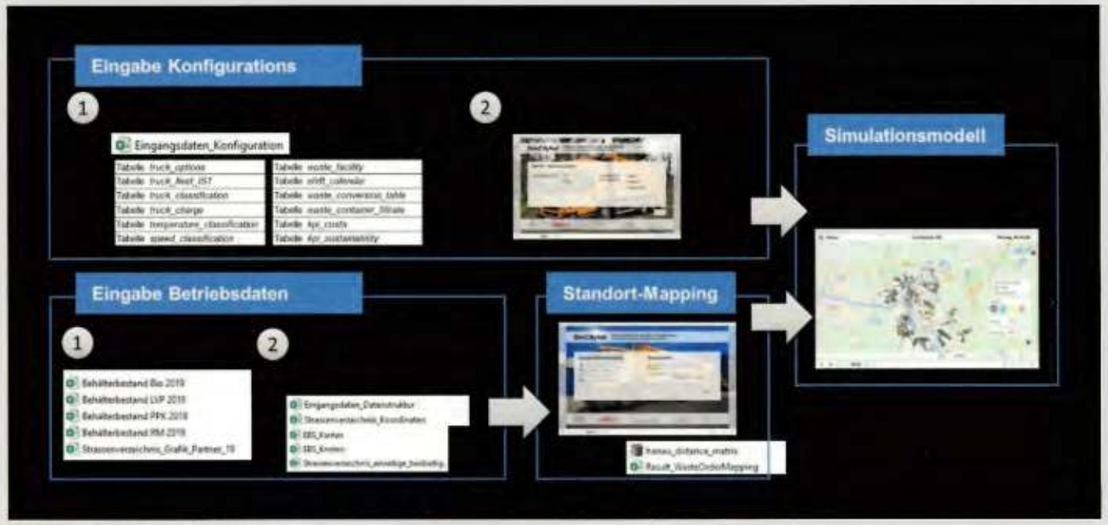


Bild 1: Datenstruktur des Modells der HIS

Bild 2: Das digitale Verkehrsmodell zeigt die Fahrzeugbewegungen auf den einzelnen Linien im Stadtgebiet Hanau

ermöglicht es, durch die Spezifikation von Kenngrößen Szenarien intuitiv zu parametrieren, wie z. B. die Flottenzusammensetzung hinsichtlich Fahrzeuganzahl und -modelle oder die Ladestrategien. Die Betriebsdaten beinhalten betriebliche Informationen, wie z. B. die Datenbank zu Abfallbehältern, Tourenzuweisungen und Straßenverzeichnisse für die HIS bzw. Linienverläufe, Haltestellenstandorte und Umlaufplanung für die HSB. Diese Daten sind für die Implementierung der Betriebsprozesse im digitalen Verkehrsmodell Voraussetzung.

Da die Daten der HIS keine Reihenfolge der Sammelvorgänge innerhalb der Behälterdatenbank inkludieren und die Umlaufplanung der HSB keine auf Elektrobus, insbesondere auf batterieelektrische Fahrzeuge, angepassten Umläufe enthält, ist die Übernahme der Tourenplanung sowie der Umlaufplanung der HIS und HSB nicht ohne Weiteres möglich und erfordert eine vorgeschaltete Berechnung von Touren und Umläufen (Bild 1). Mathematische Modelle liefern dabei über eine entwickelte Heuristik für die HIS eine Behälterreihenfolge innerhalb der definierten Touren-Cluster und für die HSB eine ressourceneffiziente Umlaufplanung, die auf eine spezifizierte Fahrzeugflotte angepasst wird.

Die Betriebsabläufe sind über eine interaktive Karte visualisiert, die auf ein integriertes OpenStreetMap-Kartenmaterial aufbaut (Bild 2). Dargestellt sind die Bewegungen der Busse im Stadtgebiet entsprechend der hinterlegten Haltestellen- und Fahrplandaten. Die Antriebsart der Fahrzeuge und die aktuellen Reichweitenangaben sind durch verschiedene Fahrzeugsymbole dargestellt. Durch die interaktive Auswahl eines Fahrzeugs können die aktuellen betrieblichen Informationen zum entsprechenden Fahrzeug eingesehen werden. Zudem lassen sich neben der Visualisierung über das Kartenmaterial verschiedene Betriebsparameter, wie die Auslastung der Fahrzeugflotte (Bild 3) und Ladeinfrastruktur, der Betriebszustand einzelner Fahrzeuge sowie anfallender Energiebedarf, während des Simulationsdurchlaufs grafisch mitverfolgen.

4 Ergebnisse

Infolge der Clean-Vehicles-Directive stehen kommunale Flottenbetreiber vor der Herausforderung, zeitnah strategische Entscheidungen zu treffen, die nicht nur kurzfristig erste Fahrzeuge in den Betriebsprozess integrieren, sondern bestenfalls auch mittel- bis langfristige betriebsstrategische Lösungen anbieten. Das entwickelte Simulationsmodell bietet dabei die Möglichkeit, unterschiedliche Flottenzusammensetzungen in einer virtuellen Umgebung risikofrei zu testen. Planerisch bewerten lassen sich neben den Auswirkungen einer gesamten Flottenumstellung auf alternative Antriebe auch individuelle Übergangsphasen, die bspw. als Mischflotte zunächst noch einen signifikanten Anteil an Dieselfahrzeugen beinhalten. In verschiedenen Betriebsszenarien und Übergangsphasen wurden für die Hanauer Straßenbahn GmbH und die Hanau Infrastruktur Service die Potenziale für den Einsatz von batterieelektrischen (battery electric vehicles, BEV) und Brennstoffzellenfahrzeugen (fuel cell electric vehicles, FCEV) in Hanau ermittelt. Die Vergleichbarkeit der Szenarien entsteht durch die Betrachtung des heutigen Betriebsablaufs mit einer reinen Dieselflotte, welcher den Referenzzustand der Analyse darstellt. Die Ergebnisse liefern planerische Erkenntnisse hinsichtlich der zukünftigen Gestaltung der notwendigen Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof und der Beschaffung von Fahrzeugen mit alternativem Antrieb. Einen Vorteil für HSB und HIS bietet der Standort der eigenen Betriebshöfe, die direkt nebeneinanderliegen und somit eine geteilte Infrastruktur für Ladestationen und Wasserstoff-Tankstelle ermöglichen.

4.1 Hanauer Straßenbahn GmbH

Der Einsatz emissionsfreier Fahrzeuge wurde für die Busflotte der HSB sowohl für die Implementierung einer einzelnen Antriebstechnologie für die gesamte Flotte als auch für eine Mischflotte, die die Antriebsarten BEV und FCEV in einem Betriebskonzept kombiniert, untersucht. Die Einführung von Brennstoffzellenbussen erweist sich dabei als betrieblich unproblematisch, begründet durch die hohen Fahrzeugreichweiten, die für die tägliche Betriebsleistung der Busse in Hanau ausreichen, und durch eine vergleichbare Prozesszeit für einen Tankvorgang verglichen mit einem Dieselbus. Diese betriebsbestimmenden Kenngrößen führen zu dem Ergebnis, dass die Umstellung des heutigen Betriebs auf eine reine Brennstoffzellenflotte zu keiner Veränderung der Fahrzeuganzahl im Fuhrpark führen würde. Die Herausforderung zur Umsetzung eines solchen Betriebskonzepts liegt vor allem in der Zulieferung und Speicherung eines solch immensen (grünen) Wasserstoffbedarfs sowie den damit verbundenen hohen Betriebs- und Investitionskosten.

Die Auswirkungen des Einsatzes von batterieelektrischen Fahrzeugen wurden mittels zwei Referenzfahrzeugmodellen untersucht. Definiert sind diese durch marktübliche Fahrzeugreichweiten für batterieelektrische Busse, die ein Referenzfahrzeugmodell mit einer geringeren Fahrzeugreichweite sowie eines mit einer höheren Reichweite abbilden (Tabelle 1). Für die Ladeinfrastruktur wurde eine Ladeleistung von 150 kW parametriert und eine Ladestrategie verfolgt, mit der Busse auf einen Ladezustand (State of Charge, SoC) von 100 % aufgeladen werden. Hierbei wurden die Ladekurve und die ladezustandsabhängige Ladegeschwindigkeit der jeweiligen Fahrzeugmodelle berücksichtigt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass ein rein batterieelektrischer Betrieb mit der heutigen Flottengröße von 64 Fahrzeugen nicht zu bewerkstelligen ist. Bei beiden Referenzfahrzeugmodellen ist mit einem Mehrbedarf an Fahrzeugen zu planen. Die Ursachen sind geringere Fahrzeugreichweiten als bei Dieselbussen, ein erhöhter Verbrauch im Winter von bis zu ca. 40 % sowie lange Ladeverläufe. Bild 4 veranschaulicht die Auswirkungen auf die Flottengröße für beide Referenzfahrzeugmodelle unter Normalverbrauch im Frühling und bei einem Worst-Case-Szenario im Winter. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Umstellung auf das Referenzfahrzeugmodell mit geringerer Reichweite unter Normalverbrauch zu einer Flottengröße von 76 Fahrzeugen führt. Im Winter werden als Folge sinkender Fahrzeugreichweiten, die vor allem auf den hohen Energieverbrauch der Heizung zurückzuführen sind, 93 Busse benötigt, was einem Mehrbedarf an Fahrzeugen von 45 % entspricht. Die Implementierung des Referenzfahrzeugmodells mit größerer Reichweite kann diesen immensen Mehrbedarf für die HSB reduzieren. Im Winter werden allerdings ebenfalls elf zusätzliche Busse benötigt, was eine Erweiterung des Fuhrparks von 17 % bedeutet.

Die Chance für ein ressourceneffizientes Betriebskonzept liegt in einer Mischflotte, bei der Brennstoffzellenfahrzeuge für längere Umläufe und batterieelektrische Fahrzeuge für kürzere Umläufe in Hanau eingesetzt werden. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die einzelnen Simulationsexperimente, die

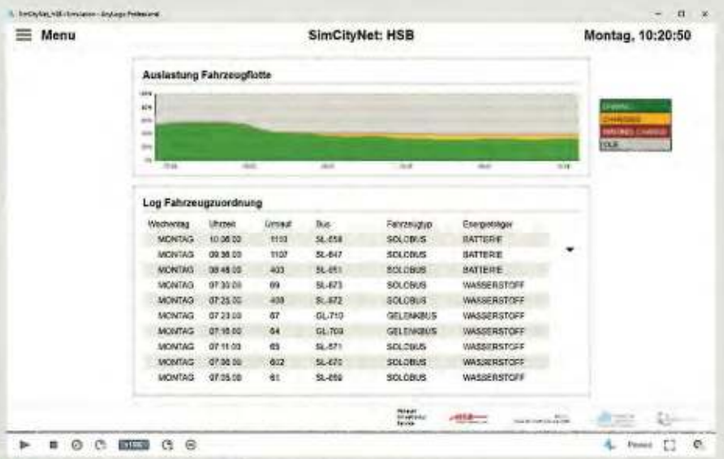


Bild 3: Aktuelle Auslastung der Fahrzeugflotte während der Simulation

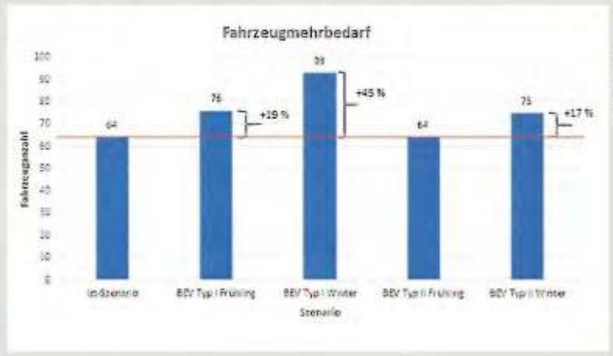
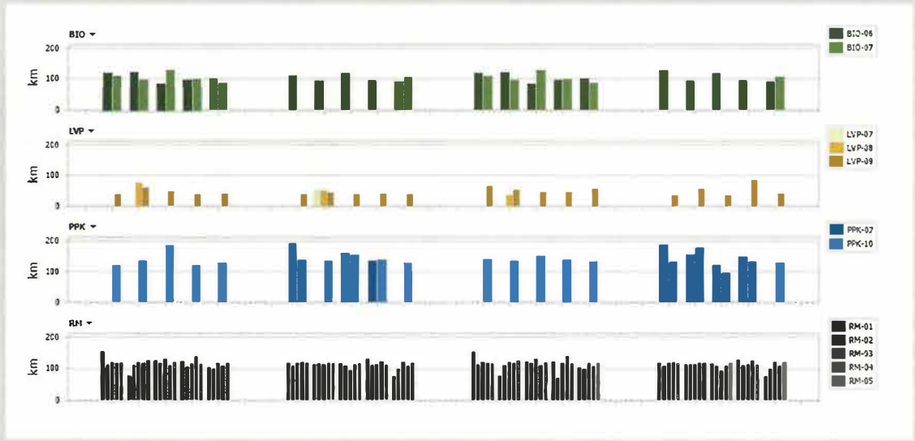


Bild 4: Fahrzeugmehrbedarf mit batterieelektrischen Bussen

Tabelle 2: In einer Experimentmatrix werden die durchgeführten Simulationsdurchläufe entsprechend der Parametrierung dokumentiert

Exp ID	Fahrzeug anzahl	Diesel				Batterie				Wasserstoff				Umlaufplanung	Batterie	Ladeinfrastruktur			Zusatzverbrauch Temperatur	Status
		%	Gesamt	SL	GL	%	Gesamt	SL	GL	%	Gesamt	SL	GL		Fzg-Modell	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
8	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

Bild 5: Gesamtdistanz der Touren in Hanau



eine solche Mischflotte zum Gegenstand hatten. Jede Zeile in der dargestellten Experimentmatrix in Tabelle 2 stellt einen eigenen Simulationsdurchlauf dar, in der die modifizierten Parameterausprägungen dokumentiert sind. Farblich grün hinterlegte Zeilen stellen ein betriebstaugliches Szenario dar. Experimente, die gelb hinterlegt sind, haben hingegen zu einem Simulationsabbruch geführt, da die gewählten Parameterausprägungen nicht ausgereicht haben, um den Fahrplan in Hanau vollständig zu betreiben. Alle dargestellten Experimente analysieren die Machbarkeit für den Worst-Case-Fall im Winter.

Die ersten Zeilen in Tabelle 2 (in der Spalte Exp ID mit der Nummer von 0 bis 5) bilden die Übergangsphasen ab, in denen noch der Großteil der Flotte aus Dieselbussen besteht. Die Ergebnisse zeigen, dass kurz- bis mittelfristig erste batterieelektrische Fahrzeuge in den Betriebsablauf integriert werden können, ohne einen Mehrbedarf an Fahrzeugen zu erzeugen. Die Einführung von 30 batterieelektrischen Bussen (in der Spalte Exp ID mit der Nummer 4 und 5) führt in Hanau ebenfalls noch zu keinem Mehrbedarf an Fahrzeugen.

Die Auswirkungen einer Mischflotte aus BEV und FCEV wird in Tabelle 2 in der Spalte Exp ID mit der Nummer 6 bis 11 analysiert. Ein Flottenmix mit ca. 20 Brennstoffzellenbussen würde in Kombination mit dem batterieelektrischen Referenzfahrzeugmodell mit geringerer Reichweite zu einem Fahrzeugmehrbedarf von 20 % führen (Exp ID 6 und 7). Ein erfolgreiches Betriebskonzept bei gleichbleibender Flottengröße liefert diesel- be Anzahl an Brennstoffzellenbussen in Kombination mit dem batterieelektrischen Referenzfahrzeugmodell mit größerer Fahrzeugreichweite (Exp ID 8).

Wichtige Entscheidungsgrundlage für die betriebsstrategischen Maßnahmen liefern neben den flottenspezifischen Auswirkungen vor allem auch die betriebswirtschaftlichen Aspekte. Alternative Antriebe weisen ein großes Potenzial auf, Betriebskosten zu senken. Der höhere Energiebedarf im Winter für batterieelektrische Busse macht sich indes auch in den Betriebskosten bemerkbar. Aufgrund unterschiedlich hoher Verbräuche im Jahresverlauf könnte eine rein batterieelektrisch betriebene Flotte im Vergleich zu heute die Betriebskosten für Strom, Treibstoff sowie Wartung der Fahrzeuge zwischen 43 und 24 % senken. Selbst in Anbetracht

eines heute (noch) hochpreisigen Wasserstoffs könnte eine reine Brennstoffzellenflotte die Betriebskosten um 19 % senken. Eine Mischflotte aus BEV und FCEV würde die Betriebskosten um 22 % senken.

4.2 Hanau Infrastruktur Service

Für die Touren der vier Abfallfraktionen (Restmüll, Papier/Pappe/Kartonage, Leichtverpackungen und Bio-Abfall) setzt die HIS täglich – je nach Verteilung der Touren – neun oder zehn Fahrzeuge ein. Davon werden täglich fünf Fahrzeuge für Restmüll-Touren eingesetzt. Restriktion für die Simulationsanalyse ist, dass die bestehenden Touren nicht neu geclustert oder geteilt werden dürfen und ein Mehrbedarf an Fahrzeugen ausgeschlossen ist. Zudem können Fahrzeuge nicht täglich zwischen allen Abfallfraktionen getauscht werden, sodass eine fahrzeugspezifische Zuweisung zu den Abfallarten im digitalen Verkehrsmodell vorgenommen werden muss. Untersucht werden ebenfalls die Potenziale von batterieelektrischen und Brennstoffzellenfahrzeugen. Als Ladestrategie wird eine Ladung nach Abschluss der Tour auf 100 % des Ladezustands (State of Charge, SoC) verfolgt.

Bild 5 visualisiert die tägliche Fahrleistung der Touren für einen gesamten Monat, aufgeteilt auf die Betriebstage von Montag bis Freitag. Aufgrund der Standorte der Abfallsammelstellen für Papier/Pappe/Kartonage (PPK) und Restmüll (RM), die außerhalb des Stadtgebiets Hanau liegen, bilden diese die längsten Touren. Die Leichtverpackungstouren sind hingegen vergleichsweise relativ kurz, da der gesammelte Abfall zunächst auf dem Betriebshof der HIS zwischengelagert wird und somit keine größeren Betriebsfahrten zu Deponien außerhalb des Stadtgebiets enthalten sind.

Müllfahrzeuge mit einem Brennstoffzellenantrieb können alle bestehenden Touren in Hanau betreiben. Die Fahrzeugeigenschaften von Brennstoffzellen-Müllfahrzeugen, wie hohe Reichweiten und kurze Tankzeiten, ermöglichen die Umstellung der Flotte ohne Auswirkungen auf den Betriebsablauf der HIS. Batterieelektrische Abfallsammelfahrzeuge kommen indes durch einen hohen Zusatzverbrauch im Winter sowie eine abnehmende Batteriekapazität über die Jahre zu Reichweitenproblemen bei den einzelnen Touren. Bewertet wurde, welche Touren sich für den Betrieb mit batterieelektrischen Fahrzeugen eignen. Die Analyse der Touren zeigt auf, dass LVP- und BIO-Touren das größte Potenzial aufweisen, durch batterieelektrische Fahrzeuge betrieben zu werden. Die Simulationsergebnisse liefern zudem die Erkenntnis, dass maximal fünf batterieelektrische Fahrzeuge bei der HIS eingesetzt werden können. Diese müssen neben den LVP- und BIO-Touren auch kleinere RM-Touren übernehmen. PPK- und größere RM-Touren können demgegenüber nur durch Brennstoffzellenfahrzeuge bedient werden.

Die Kombination beider Antriebstechnologien birgt den Vorteil, den Energiebedarf zu senken. Der Bedarf an Wasserstoff überlagert dabei den Strombedarf, wobei eine höhere Anzahl an BEV in der Flotte (vier bzw. fünf BEV) einen höheren Effekt bei der Reduzierung des Wasserstoffbedarfs erzielen, indem nicht nur kürzere LVP- und BIO-Touren mit diesen gesammelt werden, sondern auch vergleichsweise längere RM-Touren.

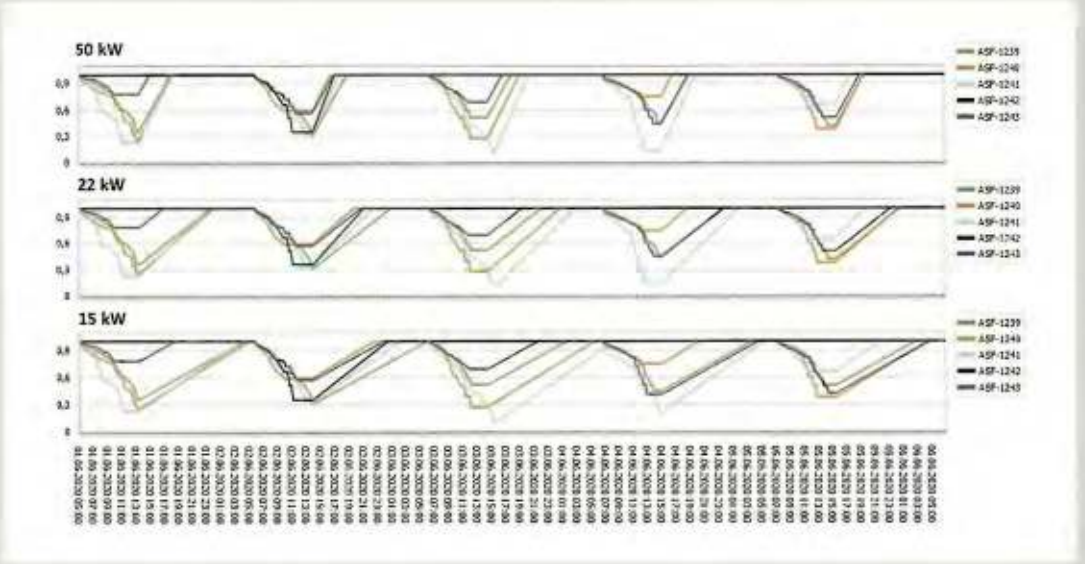


Bild 6: State of Charge der batterieelektrischen Fahrzeuge in einer Mischflotte mit unterschiedlicher Ladeleistung

Der Nachteil einer längeren Ladezeit von batterieelektrischen Fahrzeugen kommt bei einem Abfallsammelbetrieb nicht zum Tragen. Die Betriebszeiten der HIS von 6:00 bis ca. 14:00 Uhr bieten im Anschluss an den Sammelvorgang ein ausreichendes Zeitfenster, um die Müllfahrzeuge zu laden und hohe Ladespitzen zu vermeiden. Bild 6 stellt für ein Szenario mit fünf batterieelektrischen Fahrzeugen den Ladezustand (State of Charge, SoC) jedes einzelnen BEV in verschiedenen Farben dar. Abgebildet ist der Ladezustand der Fahrzeuge für eine gesamte Woche im Winter. Durch verschiedene Ladeleistungen (50 kW, 22 kW und 15 kW) können die Auswirkungen im Ladeverhalten gegenübergestellt werden. Zu Betriebsstart (6:00 Uhr) sinkt der Ladezustand und wird nach Tourenende (ca. 14:00 Uhr) wieder auf 100 % SoC aufgeladen. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei einer Ladeleistung von 50 kW die Fahrzeuge bereits relativ früh einen SoC von 100 % erreichen. Tatsächlich stünde weit mehr Zeit für den Ladeprozess zur Verfügung. Mit einer Ladeleistung im Wechselstrombereich von 22 kW wird das verfügbare Ladezeitfenster bereits deutlich besser ausgenutzt. Eine 15-kW-Ladung führt dazu, dass die Müllfahrzeuge erst kurz vor dem Ausrücken einen SoC von 100 % erreichen bzw. an einzelnen Tagen den Betrieb mit einem geringeren SoC von 100 % starten (siehe blaue Linie).

Bild 6 liefert darüber hinaus die Erkenntnis, dass die Fahrzeuge mit einer planungssicheren Restkapazität ins Depot zurückkehren. Das Müllfahrzeug mit der hellblauen SoC-Linie bedient eine verhältnismäßig längere RM-Tour und beansprucht die Batteriekapazität nahezu vollständig.

Eine Mischflotte bietet für die HIS Synergiepotenziale, da die Lade- und Tank-Infrastruktur mit der HSB geteilt werden könnte. Der Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen in der Flotte senkt zusätzlich das Investitionsvolumen für Fahrzeuge mit alternativem Antrieb. Die Auswirkungen einer Mischflotte zeichnen sich auch in den Betriebskosten ab. Eine reine Brennstoffzellenflotte senkt die Betriebskosten im Vergleich zu heute um 29 %. Aufgrund eines vergleichsweise hohen Wasserstoffpreises sinken die Betriebskosten mit steigender Anzahl an batterieelektrischen Fahrzeugen in der Fahrzeugflotte. Durch den Einsatz einer Mischflotte mit fünf batterieelektrischen und fünf Brennstoffzellen-Müllfahrzeugen könnten die Betriebskosten im Vergleich zu heute um 36 % gesenkt werden.

5 Fazit und Ausblick

Für den Betrieb der Hanauer Straßenbahn GmbH und Hanau Infrastruktur Service können mit dem digitalen Verkehrsmodell verschiedene Betriebsszenarien mit alternativen Antrieben simuliert und bewertet werden. Die zugrunde liegende Datenstruktur bietet dem Modellnutzer den großen Vorteil, Konfigurationsparameter und Betriebsdaten intuitiv zu pflegen, anzupassen und zu ergänzen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der betriebsstrategischen Entscheidungsunterstützung und liefern eine Planungsgrundlage für die Umstellung auf alternative Antriebe. Die Simulationsanwendung kann auch auf andere Kommunen und Verkehrsunternehmen übertragen werden. Die Übertragbarkeit unterliegt allerdings einem gewissen Analyse- und Modellierungsaufwand, um die spezifischen Bedingungen vor Ort zu berücksichtigen. Eine Erweiterung des Modells um ein Opportunity-Charging-Konzept mit Zwischenladungen an Zwischen- und Endhaltestellen ist zudem bei Bedarf ebenfalls grundsätzlich möglich. Durch die freie Konfigurationsmöglichkeit der Fahrzeugflotte und der Ladeinfrastruktur lassen sich ebenfalls neue Erkenntnisse in der Batterieforschung sowie Fahrzeugentwicklung anwenderfreundlich in das digitale Verkehrsmodell einbinden und bewerten.

Literaturverzeichnis

BMDV (20. Januar 2021): Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge. Von Bundesministerium für Digitales und Verkehr: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/clean-vehicles-directive.html, abgerufen am 4.1.2022

BMU (6. Oktober 2020): Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzstrategie. Von Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: https://www.bmu.de/themen/klimaschutz-anpassung/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050, abgerufen am 4.1.2022

BMU (25. Juni 2021): Schulze: BMU-Förderung war wichtige Initialzündung für Verkehrswende im öffentlichen Nahverkehr. Von Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: https://www.bmu.de/pressemitteilung/schulze-bmu-foerderung-war-wichtige-initialzuendung-fuer-verkehrswende-im-oeffentlichen-nahverkehr, abgerufen am 4.1.2022

VDV (2021): Umsetzung der Clean-Vehicles-Directive (CVD). Von VDV – Die Verkehrsunternehmen: https://www.vdv.de/umsetzung-cvd.aspx, abgerufen am 4.1.2022