



SimCityNet

Digitaler Zwilling zur Konzeption und Bewertung von
E-Fahrzeugen in kommunalen Flotten

Gefördert von:



Fachbereich 1: Architektur · Bauingenieurwesen · Geomatik
Fachbereich 3: Wirtschaft & Recht



ReLUT - ResearchLab for Urban Transport

SimCityNet

Digitaler Zwilling zur Konzeption und Bewertung von E-Fahrzeugen in kommunalen Flotten

Abschlussbericht

Frankfurt University of Applied Sciences

Research Lab for Urban Transport

Verfasser/Innen:

Prof. Dr.-Ing. Josef Becker | Prof. Dr. Kai-Oliver Schocke | G r me Löw M.Eng. |
Janina Weppe

Kontakt: relut@fra-uas.de

Frankfurt am Main, November 2021

*Dieses Projekt (HA-Projekt-Nr.: 767/19-87) wird aus Mitteln des Förderprogramms
Elektromobilität in Hessen gefördert)*

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
1 Einleitung.....	10
1.1 Ausgangssituation	11
1.2 Methodik und Vorgehen	13
2 Ist-Analyse	17
2.1 Hanauer Straßenbahn GmbH.....	17
2.2 Hanau Infrastruktur Service	20
3 Simulationsszenarien.....	23
3.1 Soll-Konzepte für Hanauer Straßenbahn GmbH	23
3.1.1 Fahrzeugtechnische und infrastrukturelle Kenngrößen	24
3.1.2 Simulationsszenarien	28
3.2 Soll-Konzepte für Hanau Infrastruktur Service	29
3.2.1 Fahrzeugtechnische und infrastrukturelle Kenngrößen	29
3.2.2 Simulationsszenarien	31
4 Umlauf- und Tourenplanung.....	32
4.1 Umlaufplanung HSB	32
4.1.1 Manuelle Umlaufplanung HSB	33
4.1.2 Automatisierte Umlaufplanung HSB	38
4.2 Tourenplanung HIS.....	41
5 Modellaufbau	46
6 Ergebnisse	55
6.1 Ergebnisse HSB.....	55
6.1.1 Flotte bestehend aus einer Antriebstechnologie.....	55
6.1.2 Übergangs- und Mix-Szenarien	68

6.2	Ergebnisse HIS	79
6.3	Übertragbarkeit auf andere Verkehrsunternehmen und kommunale Entsorgungsbetriebe.....	94
7	Fazit und Ausblick.....	96
	Literaturverzeichnis.....	97
	Anhang	101

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitspakete (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	13
Abbildung 2: Liniennetzplan HSB – NVP 2019-2023 (Quelle: (HanauLNO, 2019)).....	18
Abbildung 3: eCitaro Solobus (Elektro) (Quelle: (EvoBus GmbH, 2018)).....	26
Abbildung 4: Citaro Solobus (Diesel) (Quelle: (EvoBus GmbH, 2019)).....	26
Abbildung 5: eCitaro Gelenkbus (Elektro) (Quelle: (EvoBus GmbH, 2018)).....	26
Abbildung 6: Citaro Gelenkbus (Diesel) (Quelle: (EvoBus GmbH, 2019))	26
Abbildung 7: Vorgehen für automatisierte Umlauf-Neuplanung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	33
Abbildung 8: Umlauflängen des Ist-Ablaufs – Solobus BEV Typ I (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	34
Abbildung 9: Umlauflängen des Ist-Ablaufs – Gelenkbus BEV Typ I (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	34
Abbildung 10: Flussdiagramm – Umlaufteilung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	36
Abbildung 11: Dispositive Übersicht der verknüpften Umläufe (Quelle: eigene Darstellung, ReLUT).....	38
Abbildung 12: Vorgehen für automatisierte Umlauf-Neuplanung (Quelle: SimPlan AG)	39
Abbildung 13: Umlauf tour, Linienfahrt und Fahrtsegment (Quelle: SimPlan AG).....	40
Abbildung 14: Ausgangssituation für die Tourenplanung (Quelle: SimPlan AG)	41
Abbildung 15: Vorgehen für Tourenplanung (Quelle: SimPlan AG).....	43
Abbildung 16: Ausschnitt des Kanten-Knoten-Modells von Hanau (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	44
Abbildung 17: Workflow Dateneingabe HIS (Quelle: SimPlan AG)	48
Abbildung 18: Simulationseingabemaske (Quelle: eigene Aufnahme ReLUT)	49
Abbildung 19: Visualisierung in interaktiver Karte (Quelle: eigene Aufnahme ReLUT).....	50
Abbildung 20: Visualisierung Auslastung Fahrzeugflotte (Quelle: eigene Aufnahme ReLUT).....	51
Abbildung 21: Visualisierung Fahrzeugeinsatz (Quelle: eigene Aufnahme ReLUT)	52
Abbildung 22: Visualisierung Energiemenge pro Tank-/Ladevorgang (Quelle: eigene Aufnahme ReLUT)	53
Abbildung 23: Exportieren der Daten (Quelle: eigene Aufnahme ReLUT)	54
Abbildung 24: Wasserstoffbedarf 100% Brennstoffzellenflotte (Quelle: SimPlan AG)	59
Abbildung 25: Fahrzeugmehrbedarf BEV-Szenarien (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	61

Abbildung 26: Zeitleiste Lademenge BEV Typ II (Quelle: SimPlan AG)	62
Abbildung 27: Energieverbrauch einer 100% BEV Typ I Flotte (Quelle: SimPlan AG).....	63
Abbildung 28: wöchentliche Betriebsleistung in den Experimenten (Quelle: SimPlan AG)	64
Abbildung 29: Gegenüberstellung der Fahrzeuginvestitionskosten (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	65
Abbildung 30: Betriebskosten Kraftstoff/Energie und Wartung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	66
Abbildung 31: Ökobilanz von Elektrobussen (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (EMCEL GmbH, 2020) und (Daimler AG, 2019))	67
Abbildung 32: Verteilung der monatlichen Betriebsleistung in Übergangsszenarien (Quelle: SimPlan AG).....	70
Abbildung 33: Täglicher Energieverbrauch Übergangsszenarien (Quelle: SimPlan AG).....	72
Abbildung 34: Tägliche Ladezeiten in Minuten BEV Typ II (Quelle: SimPlan AG)	73
Abbildung 35: Potenzial der lokal wöchentlichen CO ₂ -Einsparung bei grünem Antrieb (Quelle: SimPlan AG)....	73
Abbildung 36: Wöchentliche Betriebsleistung (Quelle: SimPlan AG)	75
Abbildung 37: Täglicher Strombedarf Exp-ID 9 bis 11 (Quelle: SimPlan AG).....	76
Abbildung 38: Täglicher Wasserstoffbedarf Exp-ID 9 bis 11 (Quelle: SimPlan AG)	76
Abbildung 39: Ladeverlauf der BEV im Mix am Bsp. Exp-ID 9 (Quelle: SimPlan AG)	77
Abbildung 40: Investitionskosten Mix-Experimente (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	78
Abbildung 41: Betriebskosten Mix (Quelle: SimPlan AG)	78
Abbildung 42: Gesamtdistanz pro Tour (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	80
Abbildung 43: Abfallmenge pro Tour (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	81
Abbildung 44: Energieverbrauch BEV Sommer/Winter (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	85
Abbildung 45: Verbrauchsentwicklung beim Übergang von einem zu fünf BEV (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	86
Abbildung 46: Lade-/Tankmenge pro Szenario in Woche 4 (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	88
Abbildung 47: Monatliche Lade-/Tankmenge pro Szenario (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	88
Abbildung 48: Verlauf Lademenge BEV für eine Woche (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	90
Abbildung 49: SoC der fünf BEV (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	91

Abbildung 50: Investitionskosten Fahrzeuge (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	91
Abbildung 51: Monatliche Betriebskosten für Kraftstoff/Energieträger und Wartung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	92
Abbildung 52: Einsparpotenzial der lokalen Emissionen durch HIS (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fahrzeugbestand in der Ist-Analyse (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	19
Tabelle 2: Behältervarianten in Tourenplanung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	20
Tabelle 3: tägliche/wöchentliche Tourenanzahl nach Fraktion (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	21
Tabelle 4: Standort Abfallsammelstelle (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	21
Tabelle 5: abstuftende Reichweiten des BEV Typ I (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	25
Tabelle 6: abstuftende Reichweiten des BEV Typ II (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	25
Tabelle 7: Reichweite des FCEV (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	25
Tabelle 8: Reichweiten des BEV und FCEV im Simulationsmodell (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	30
Tabelle 9: Möglichkeiten der Tourenplanung (Quelle: SimPlan AG)	32
Tabelle 10: Betrieblich geeignete Endhaltestellen für Umlaufteilung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	35
Tabelle 11: Szenarienparameter Simulationsmodelle (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	46
Tabelle 12: Experimentmatrix mit reiner Flotte aus einer Antriebstechnologie HSB (Quelle: SimPlan AG)	57
Tabelle 13: Lokale Emissionen pro Woche (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	66
Tabelle 14: Experimentmatrix Übergangs- und Mix-Szenarien HSB (Quelle: SimPlan AG)	69
Tabelle 15: Anteil BEV in Flotte gegenüber Anteil an Betriebsleistung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT).....	71
Tabelle 16: Experimentmatrix Übergangsszenarien HIS (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	83
Tabelle 17: Experimentmatrix Mix-Szenarien HIS (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)	87

Abkürzungsverzeichnis

BEV	Battery Electric Vehicle
BIO	Bioabfall
CEP	Clean Energy Partnership
CVD	Clean-Vehicle-Directive
Exp	Experiment
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FPersV	Fahrpersonalverordnung
GL	Gelenkbus
GUI	Graphical User Interface
HanauLNO	Hanau Lokale Nahverkehrsorganisation GmbH
HIS	Hanau Infrastruktur Service
HSB	Hanauer Straßenbahn GmbH
HVZ	Hauptverkehrszeit
Km	Kilometer
kWh	Kilowattstunden
LVP	Leichtverpackung
MW	Megawatt
NF	Niederflurtechnik
NVP	Nahverkehrsplan
NVZ	Nebenverkehrszeit
PBefG	Personenbeförderungsgesetz
PHEV	Plug-In-Hybridbus
PPK	Papier/Pappe/Kartonage
RM	Restmüll
SL	Solobus

SoC	State of Charge
TB	Trolley Bus
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen

Genderhinweis:

Allein aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen an einigen Stellen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten für alle Geschlechter.

1 Einleitung

Die Elektromobilität ist eine der sich am dynamischsten weiterentwickelnden Innovationsthemen zur Erreichung eines urbanen Lebensstils. Im Schienenpersonennah- und Fernverkehr (SPNV und SPFV) wird die Elektromobilität bereits seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich betrieben (FGSV, 2016). Die klimapolitischen Ziele in Deutschland unterstreichen die Dynamik im Mobilitätsfeld. Bis 2030 sollen 55% der Treibhausgase in Deutschland gegenüber 1990 reduziert werden (BMU, 2020). Nicht nur der Anstieg an Elektroautos in den letzten Jahren bestätigt dies (BMVI a, 2021). Auch Betreiber kommunaler Flotten werden hierbei verstärkt in die Pflicht gerufen (BMVI b, 2021).

Die Clean-Vehicles-Directive erhöht den Druck auf Verkehrsunternehmen und kommunale Entsorgungsbetriebe, indem seit dem 02.08.2021 bis Ende 2025 nur noch 55% der Neubeschaffungen als Diesel-Fahrzeuge zulässig sind und zwischen 2026 und 2030 mind. 65% der Neubeschaffungen elektrisch betriebene Fahrzeuge sein müssen (VDV b, 2021). Das Projekt SimCityNet setzt gezielt auf die Potenziale von Elektrobussen im öffentlichen Linienverkehr sowie elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge in städtischen Entsorgungsbetrieben, indem verschiedene Konzepte zur Implementierung von E-Fahrzeugen analysiert und bewertet werden.

Viele Verkehrsunternehmen und Entsorgungsbetriebe haben bereits erste alternativ angetriebene Fahrzeuge in Pilotprojekten getestet und auch in den Betrieb integriert (PricewaterhouseCoopers GmbH, 2020). Die gut abschätzbare tägliche Fahrleistung der eingesetzten Fahrzeuge verhilft eine zuverlässige Planung von Elektrofahrzeugen trotz zum Teil mangelhafter und auch unsicheren Reichweitenvorgaben (VDV a, 2021). Die Umstellung größerer Teile der Flotte bzw. sogar der gesamten Flotte birgt indes ein finanzielles (VDV, 2019) sowie betriebsstrategisches Risiko, zu dessen Minderung dieses Forschungsprojekt einen Beitrag leisten soll.

Ziel des Projektes SimCityNet ist ein Simulationsmodell zu erstellen, mit dem sich die Auswirkungen des Einsatzes alternativ angetriebener Fahrzeuge auf den Betrieb bewerten lassen. Praxisbezug erhält das digitale Verkehrsmodell am Beispiel der Stadt Hanau, indem die Betriebsabläufe des lokalen Verkehrsunternehmens, Hanauer Straßenbahn GmbH, und des kommunalen Entsorgungsunternehmens, der Hanau Infrastruktur Service, in das Modell implementiert werden. Mit dem digitalen Zwilling des Hanauer Straßennetzes können unterschiedliche betriebliche Szenarien untersucht und bewertet werden und als Entscheidungsträger für zukünftige Flottenplanungen dienen.

Der Bericht gliedert sich wie folgt: Zunächst werden in Kapitel 2 die Betriebsabläufe beider Praxispartner vorgestellt. In Kapitel 3 werden Konzepte für den Betrieb mit alternativen Antrieben beschrieben. Die Datenaufbereitung sowie –Struktur im Verkehrsmodell werden in Kapitel 4 und 5 beschrieben. Die Ergebnisse verschiedener Simulationsszenarien werden in Kapitel 6 beschrieben.

1.1 Ausgangssituation

Stand der Umsetzung

Als alternativ angetriebene Fahrzeuge, werden jene bezeichnet, deren Antriebe aufgrund der Konstruktion oder Energieart von den auf den Markt etablierten abweichen. Dazu gehören beispielsweise Fahrzeuge mit Elektroantrieb oder Hybridantrieb sowie Antriebe mit Wasserstoff, Autogas oder Erdgas (ADAC, 2021).

Für die Implementierung von Elektrobussen in die Fahrzeugflotte bieten sich verschiedene Fahrzeugkategorien an, die sich in Oberleitungsbusse/Trolley Busse (TB), Batteriebusse (BEV), Brennstoffzellenbusse (FCEV) und Plug-In-Hybridbusse (PHEV) unterteilen. Zu den rein elektrischen Antrieben werden allerdings nur TB, BEV und FCEV gezählt. Diese Kategorien nutzen verschiedene Antriebstechnologien und lassen sich durch unterschiedliche Fahrzeugkonzepte in den Betrieb integrieren (PricewaterhouseCoopers GmbH, 2020).

Einige Verkehrsunternehmen in Deutschland haben bereits erste E-Busse in den Betrieb integriert. Zu Beginn des Jahres 2021 waren 647 rein elektrisch angetriebene Busse im Einsatz. Mehr als die Hälfte davon wurden im Jahr 2020 in Betrieb genommen, was auf die gestiegene Relevanz schließen lässt, klimafreundliche Antriebe im Verkehr zu integrieren. Voraussetzung für diesen Aufschwung stellen dabei verschiedene Richtlinien, die in den Klimaschutzstrategien der Politik verfolgt werden, dar. (PricewaterhouseCoopers GmbH, 2020)

Im Forschungsprojekt SimCityNet stellen Batterie- und Brennstoffzellenbusse den Rahmen der Analyse. Stand 2020 hat sich das Fahrzeugkonzept eines batterieelektrischen Busses am stärksten in Deutschland durchgesetzt. Insgesamt wurden 502 BEV in Deutschland beschafft. Die Anzahl der Neubeschaffungen hat sich dabei seit 2017 jedes Jahr verdoppelt und zeigt die Relevanz der Steigerung der E-Mobilität im straßengebundenen ÖPNV und wird sich durch ein steigendes Angebot der Hersteller intensivieren. Brennstoffzellenbusse haben sich in Deutschland noch nicht etabliert, sind durch städtisch und unternehmensintern wasserstoffbezogene Strategien allerdings in wenigen Städten dennoch in größerer Anzahl vertreten, wie bspw. in Köln. Insgesamt gibt es in Deutschland 64 FCEV (Stand 2020).

Rechtliches

Anlass für das Forschungsprojekt SimCityNet stellen die gesetzlichen Vorgaben zur Erreichung umweltverträglicherer Ziele im Verkehrssektor auf europäischer, bundes- und landesweiter Ebene dar.

EU-Richtlinie (2014/94/EU) über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe

Das Europäische Parlament hat dabei bereits 2014 eine Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe verabschiedet, die die Voraussetzung für den Umstieg in die Elektromobilität schafft. Mit dieser Richtlinie sollen einheitliche Vorschriften und Maßnahmen in den EU-Ländern definiert werden. Festgesetzt sind Mindestvorgaben für die einzelnen Mitgliedsstaaten, die an die nationalen Strategien ansetzen.

Die Richtlinie legt für Deutschland Ziele bezüglich des Aufbaus von Infrastrukturen zur Versorgung mit alternativen Kraftstoffen wie Erdgas, Wasserstoff und Strom als Ersatz für konventionelle Kraftstoffe vor (Europäische Union, 2014). Ein wichtiger Baustein der Vorgaben an die Mitgliedsstaaten ist darüber hinaus die Bereitstellung entsprechender Nutzerinformationen bezüglich des Ausbaus bundesweiter Infrastrukturen zur Schaffung eines europaweiten Netzes. Deutschland unterstreicht diesen Ansatz mit dem Ziel einer interoperablen, nutzerfreundlichen und technologisch zeitgemäßen Tank- und Ladeinfrastruktur in Deutschland. Voraussetzung für den Umstieg müssen europaweit einheitliche Regeln zur Digitalisierung der verorteten Infrastruktur, Authentifizierung, Tarifstrukturen und Bezahlssystemen sein (BMVI, 2020).

Klimaschutzplan 2050

Im Jahr 2016 hat die Bundesregierung zudem den Klimaschutzplan 2050 verabschiedet, mit dem Deutschland der im Pariser Abkommen geforderten Klimaschutzlangfriststrategie nachkommt. Ziel des Pariser Abkommens ist die Treibhausgasneutralität in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts. Mit dem Klimaschutzplan 2050 setzt sich Deutschland mittelfristig für 2030 das Ziel die Treibhausgase um 55% gegenüber 1990 zu senken. Ein wesentlicher Beitrag kommt dabei u. a. dem Verkehrssektor zu, indem 40-42% der Treibhausgasemissionen in besagtem Zeitraum reduziert werden (BMU, 2020). Im *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050* werden gezielte Maßnahmen zur Erreichung der Teilziele definiert. Großes Potenzial steckt dabei in der Elektrifizierung des öffentlichen Nahverkehrs und Förderung von Busflotten mit elektrischen, wasserstoffbasierten und Biogas-Antrieben (BMWV, 2021).

Clean-Vehicles-Directive

Mittels der Clean-Vehicles-Directive (CVD) werden die klimapolitischen Ziele zusätzlich gestützt. Geregelt werden durch die CVD die Beschaffung emissionsarmer und -freier Antriebe in kommunalen Flotten. Die Richtlinie bezieht sich dabei sowohl auf emissionsarme und -freie Pkw sowie leicht und schwere Nutzfahrzeuge, wie Busse im ÖPNV und Abfallsammelfahrzeuge in kommunalen Entsorgungsbetrieben (BMVI c, 2021). Maßgebliche Bestimmungen für ÖPNV-Unternehmen sowie Betreiber von kommunalen Flotten setzen zwei Referenzzeiträume: Seit dem Inkrafttreten der CVD seit dem 02.08.2021 sind im ersten Referenzzeitraum bis Ende 2025 nur noch 55% der Neubeschaffungen als Diesel-Fahrzeuge zulässig. Mindestens 22,5% der Neubeschaffungen müssen dabei zudem nach der Clean-Vehicles-Directive als „emissionsfrei“ gelten. Im zweiten Referenzzeitraum zwischen 2026 und 2030 müssen 65% der Neubeschaffungen elektrisch betriebene Fahrzeuge sein sowie mindestens 32,5% der Fahrzeuge „emissionsfreie“ sein. (VDV b, 2021)

1.2 Methodik und Vorgehen

Zur Bewertung der Potenziale von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben in kommunalen Flotten wurde ein digitaler Zwilling erstellt, der die betrieblichen Prozesse der HSB und HIS abbildet und mit dem sich verschiedene Szenarien simulieren und untereinander vergleichen lassen. Zur Erstellung des Simulationsmodells hat sich hierfür ein geeignetes Verfahren bewährt (vgl. Abbildung 1). Dabei wurden in Workshops die Betriebsabläufe im Ist-Ablauf von den Praxispartnern beschrieben und die Daten erhoben. Angelehnt an die gewonnenen betrieblichen und infrastrukturellen Erkenntnisse wurden geeignete Soll-Szenarien beschrieben, die einen möglichen Einsatz alternativ betriebener Fahrzeuge in Hanau darstellen. Gleichzeitig wurde als Grundlage für die spätere Simulation ein digitales Verkehrsmodell der Stadt Hanau erstellt, in welches anschließend die Ist-Abläufe sowie später auch die Soll-Konzepte implementiert wurden. Die Implementierung der Prozesse war eine stark iterativ geprägte Projektphase, in der stetig Abläufe validiert, überarbeitet und neu implementiert wurden. Abschließend lag ein Simulationsmodell vor, welches unterschiedliche Antriebstechnologien und Betriebskonzepte kombiniert und abbildet.

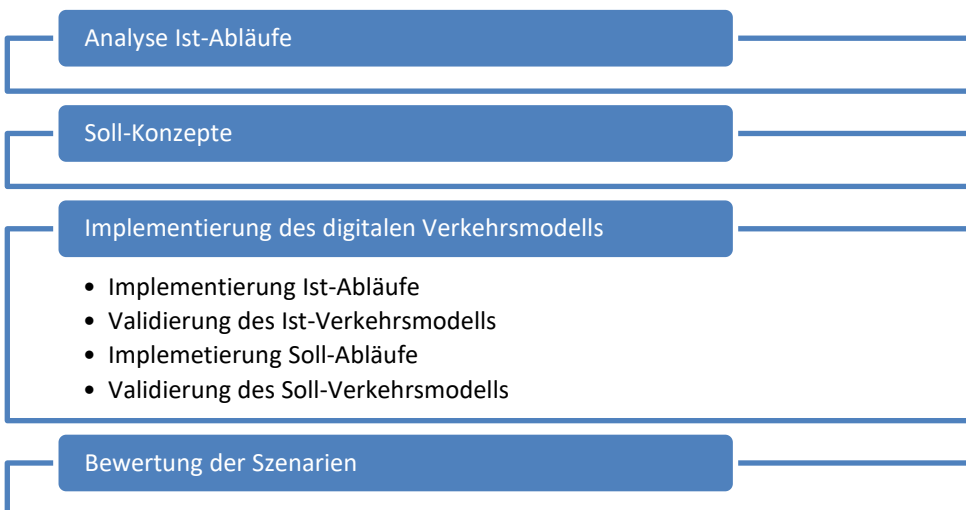


Abbildung 1: Arbeitspakete (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Analyse Ist-Abläufe

In der Ist-Analyse wurden jeweils mit den beiden Projektpartnern (HSB und HIS) Workshops durchgeführt, in denen die betrieblichen und organisatorischen Abläufe analysiert und dokumentiert wurden. Neben der Betriebsplanung bilden zudem Fuhrpark und Infrastruktur zentrale Aspekte, um einen digitalen Zwilling zu erstellen. Leitfaden der Betriebsplanung für das Verkehrsunternehmen stellt der lokale Nahverkehrsplan dar, welcher in einer frühen Projektphase mit einer Neuaufstellung für den Zeitraum 2019-2023 aktuelle Entwicklungen des Nahverkehrs in Hanau in das Simulationsmodell mit einfließen ließ. Neben der Beschreibung der betrieblichen Prozesse lag zudem der Fokus auf dem bestehenden Datenbestand der beiden Unternehmen,

der als Grundlage dienen soll, um die betrieblichen Prozesse der Unternehmen digital abzubilden. Hauptaugenmerk kommt hier zunächst dem Datenstand der Disposition und Fahrdienstleitung zu, um Aussagen zum Detaillierungsgrad und der Darstellung von Linienverläufen, Umläufen und Touren im digitalen Zwilling treffen zu können. Daten der Werkstattleitung helfen zudem bei der Beschreibung der technischen Details der Fahrzeugflotte. Die Ist-Analyse ist für das Simulationsmodell eine essenzielle Projektphase, in der bereits Vorgaben und Bedingungen an das Verkehrsmodell definiert werden.

Soll-Konzepte

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Ist-Analyse wurden Soll-Konzepte entwickelt, die einen möglichen Betrieb mit alternativen Antrieben darstellen. Auch in dieser Projektphase wurden mit den Projektpartnern zunächst Workshops durchgeführt mit dem Primärziel erste denkbare Konzepte für Hanau zu diskutieren sowie unrealistische Umsetzungen bereits frühzeitig auszuschließen.

In Vorbereitung auf diese Workshops erfolgte eine umfassende Literaturrecherche zum gegenwärtigen Stand der Technik. Im Fokus standen die verschiedenen Antriebstechnologien, insbesondere in Bezug auf mögliche Fahrzeugreichweiten sowie Fahrzeugkapazitäten (Passagiere bzw. Abfallvolumen), aber auch unterschiedliche Ladestrategien, die aktuell in Verkehrs- und Entsorgungsunternehmen eingesetzt werden. Es wurden aktuelle Testprojekte, aber auch vorangeschrittene Projekte in Unternehmen mit etabliertem Fahrzeugeinsatz von alternativ angetriebenen Bussen bzw. Abfallsammelfahrzeugen recherchiert. Diese dienen der Datengenerierung von gesammelten Erfahrungen im Einsatz alternativ angetriebener Fahrzeuge. Für die Recherche wurde Literatur der Bibliothek der Frankfurt UAS, Google Scholar sowie aktuelle Fachzeitschriften verwendet.

Mit Hilfe der recherchierten Kenngrößen und Konzeptansätze sowie den Erkenntnissen und Daten aus der Ist-Analyse konnten in den Workshops verschiedene Soll-Konzepte für Hanau entwickelt werden, die im weiteren Schritt als Simulationsszenarien näher dokumentiert wurden und konzeptrelevante Leitfragen für die Modellentwicklung sowie Simulationsvarianten beinhalten. Vereinzelt konnten zudem bereits einzelne Konzeptvarianten aus betrieblicher oder infrastruktureller Sicht ausgeschlossen werden und wurden demnach im weiteren Projektverlauf nicht näher betrachtet.

Implementierung des digitalen Verkehrsmodells

Das Simulationsmodell untersucht die in den Soll-Konzepten beschriebenen Szenarien auf ihre Einsatztauglichkeit und ermöglicht eine Bewertung sowie einen Vergleich dieser. Zur Vorbereitung der Modellentwicklung wurde aufbauend auf die Dokumentation der Ist-Analyse und Soll-Konzeption eine Modellbeschreibung von der SimPlan AG formuliert, welche die simulationsspezifischen Aspekte aufgreift und beschreibt. In dieser wird das zu modellierende System hinsichtlich des Datenaufbaus und -struktur beschrieben

sowie der Aufbau der Eingabemaske für den Nutzer erläutert. Die in der Ist-Analyse erhobenen Daten wurden aufbereitet und die technische Implementierung für das Einlesen, Speichern und Verwalten der Daten ist in der Modellbeschreibung aufgeführt. Des Weiteren beinhaltet das Dokument die technische Beschreibung der Modellierungslogik. Mit Hilfe der Modellbeschreibung wurde anschließend durch die SimPlan AG das digitale Verkehrsmodell mit der Software AnyLogic erstellt.

Die Implementierung der Betriebsabläufe der HSB und HIS umfassen, wie Abbildung 1 zu entnehmen ist, mehrere Phasen. Im ersten Schritt wurden die Ist-Abläufe implementiert, die in der ersten Projektphase erhoben wurden. In der Validierung der Ist-Abläufe wurde geprüft, ob das Simulationsmodell die aktuelle Realität als digitalen Zwilling abbildet. In einem mehrstufigen Prozess wurden hierbei Abweichungen zur Realität identifiziert und behoben. Anschließend wurde das Modell um die relevanten Soll-Konzepte erweitert, um unterschiedliche Szenarien mit dem Simulationsmodell zu konfigurieren und zu simulieren.

Aus dem Datenbestand der beiden Projektpartner ergaben sich im Laufe des Projektes zudem zwei weitere Arbeitspakete, die für die Implementierung des Verkehrsmodells als unabdingbar bewertet wurden. Der gegenwärtige Stand der Technik erforderte eine auf die Reichweite von elektrisch betriebenen Fahrzeugen angepasste Betriebsplanung. Im Rahmen des Projektes spiegelt sich diese durch eine neu konzipierte Umlaufplanung wider, die anhand vom Modellnutzer vorgegebener max. Reichweiten ermittelt wird.

Für die HIS ist keine neue Tourenermittlung erforderlich, allerdings musste für vordefinierte Touren eine Behälterreihenfolge ermittelt werden. Der Datenbestand umfasste keine Reihenfolge der Behälter innerhalb der einzelnen Touren, da jeder Fahrer diese individuell fährt und sie somit nicht reproduziert werden konnten.

Die Validierung der Soll-Abläufe zeichnete sich im Projektverlauf als ein stark iterativ geprägter Prozess ab, in dem in unterschiedlichen Modellstadien Unstimmigkeiten identifiziert, validiert, behoben und anschließend wieder neu geprüft wurden und sich auf diese Weise einem idealen Betriebsablauf angenähert wurde.

Bewertung der Szenarien

Grundlage für die Bewertung der Szenarien stellen die definierten Soll-Konzepte dar. Aus diesen Konzepten und den im Modell möglichen Eingabefunktionen wurden gemeinsam mit den beiden Projektpartnern Szenarien entwickelt. Die definierten Szenarien wurden in einer Experimentmatrix festgehalten, anschließend simuliert und als Ergebnisse visuell aufbereitet. Als sinnvolles Vorgehen zeichnete sich der gegenseitige Austausch mit den Praxispartnern durch wiederkehrende Workshops ab, zwischen denen neue Experimente simuliert und als Ergebnisse vorbereitet wurden. Diese wurden innerhalb der Workshops gemeinsam analysiert sowie diskutiert und aufbauend auf den Erkenntnissen wurden für den nächsten Workshop neue Experimente definiert. Auf diese Weise ließen sich betriebliche Konzepte bzw. Potenziale identifizieren und hervorheben, welche ohne Simulationsmodell vorab eher als ungeeignet eingestuft wurden.

Zur Bewertung eines Szenarios wurden neben der Aussage zur Funktionsfähigkeit eines Szenarios verschiedene Kenngrößen protokolliert:

- Auslastung der Ladeinfrastruktur (pro Ladestation / Gesamt)
- Fahrstrecke, Fahrtdauer und Abfallleistung pro Tour
- Ladezustand der Fahrzeugflotte
- Gesamtenergiebedarf pro Energieträger (pro Fahrzeug / Gesamtflotte)
- Gesamtenergieverbrauch pro Energieträger (pro Fahrzeug / Gesamtflotte)
- Zusätzliche Fahrstrecke zur Ladeinfrastruktur

Methodenkritik

Die Methodik der Simulation bietet ein hohes Potenzial umfassende Auswirkungen durch verschiedene Einflüsse (Parameter) zu bewerten. Ausschlaggebendes Kriterium für den Detaillierungsgrad des Verkehrsmodells und schließlich auch der Belastbarkeit der Analyse und Ergebnisse ist die Datenverfügbarkeit. Daten ermöglichen es Prozesse abzubilden und den Betriebsablauf zu rekonstruieren. Ohne das Abbild des Ist-Ablaufes können keine Auswirkungen auf heutige Betriebsabläufe für die Zukunft abgeleitet und bewertet werden.

Eine unzureichende Verfügbarkeit an Daten kann dazu führen, dass Betriebsabläufe nicht vollends der Realität entsprechen. Fehlende Datensätze müssen neu erhoben und anschließend intensiv validiert werden, um sich Betriebsabläufen adäquat anzunähern und fordern daher einen hohen Arbeitsaufwand ein.

Ein weiteres Risiko der Methodik besteht in der Kompetenz zur Pflege der IT-Infrastruktur und Programmierfähigkeit. Die Kompetenzen befähigen Defizite im Modellstand zu identifizieren und Fehlerketten zu beheben.

2 Ist-Analyse

2.1 Hanauer Straßenbahn GmbH

Die Hanauer Straßenbahn GmbH ist Betreiber des öffentlichen Personennahverkehrs der Stadt Hanau. Grundlage für den Betrieb stellt der lokale Nahverkehrsplan (NVP) dar. Betrachtet wird der NVP (2019-2023) mit den zum Fahrplanwechsel am 15. Dez. 2019 abgeänderten Linien und Fahrplänen. Zwölf Linien, die dem Liniennetzplan-Hanau (Abbildung 2) entnommen werden können, erschließen ein Liniennetz von ca. 100 km und 170 Haltestellen. Die HSB betreibt eine jährliche Fahrleistung von 2.374.000 km und hält sich im NVP noch die Möglichkeit vor eine weitere Linie einzuführen, sofern das Pioneer-Gelände in den nächsten Jahren als Wohngebiet umfunktioniert wird (HanauLNO, 2019).

Die gesamte Fahrzeugflotte besteht aus konventionell angetriebenen Fahrzeugen. Die Buslinien verkehren überwiegend im Stadtgebiet, wobei einzelne Linien den Druck nach alternativen Antrieben verstärken, da diese durch die Fußgängerzonen Hanaus geführt werden. Neben innerstädtischem Verkehr betreibt die HSB Punkt-zu-Punkt-Verbindungen im freigestellten Schülerverkehr, bei denen Schulkassen mittels Sonderfahrten von der Schule zum Sportplatz/Schwimmbad befördert werden. Der freigestellte Schülerverkehr werden im Simulationsmodell nur sekundär abgebildet, da lediglich dargestellt wird, dass im jeweiligen Betriebszeitraum die Fahrzeuge nicht zur Verfügung stehen und anschließend entsprechend der Fahrleistung nachgeladen werden müssen. Der genaue Fahrtverlauf mit Zwischenhalten wird jedoch nicht abgebildet. Der freigestellte Schülerverkehr wird als Datensatz für Kalenderwoche 13 aus dem Jahr 2019 herangezogen und exemplarisch für den Fahrzeugeinsatz einer Vor-Corona-Woche im Modell berücksichtigt.

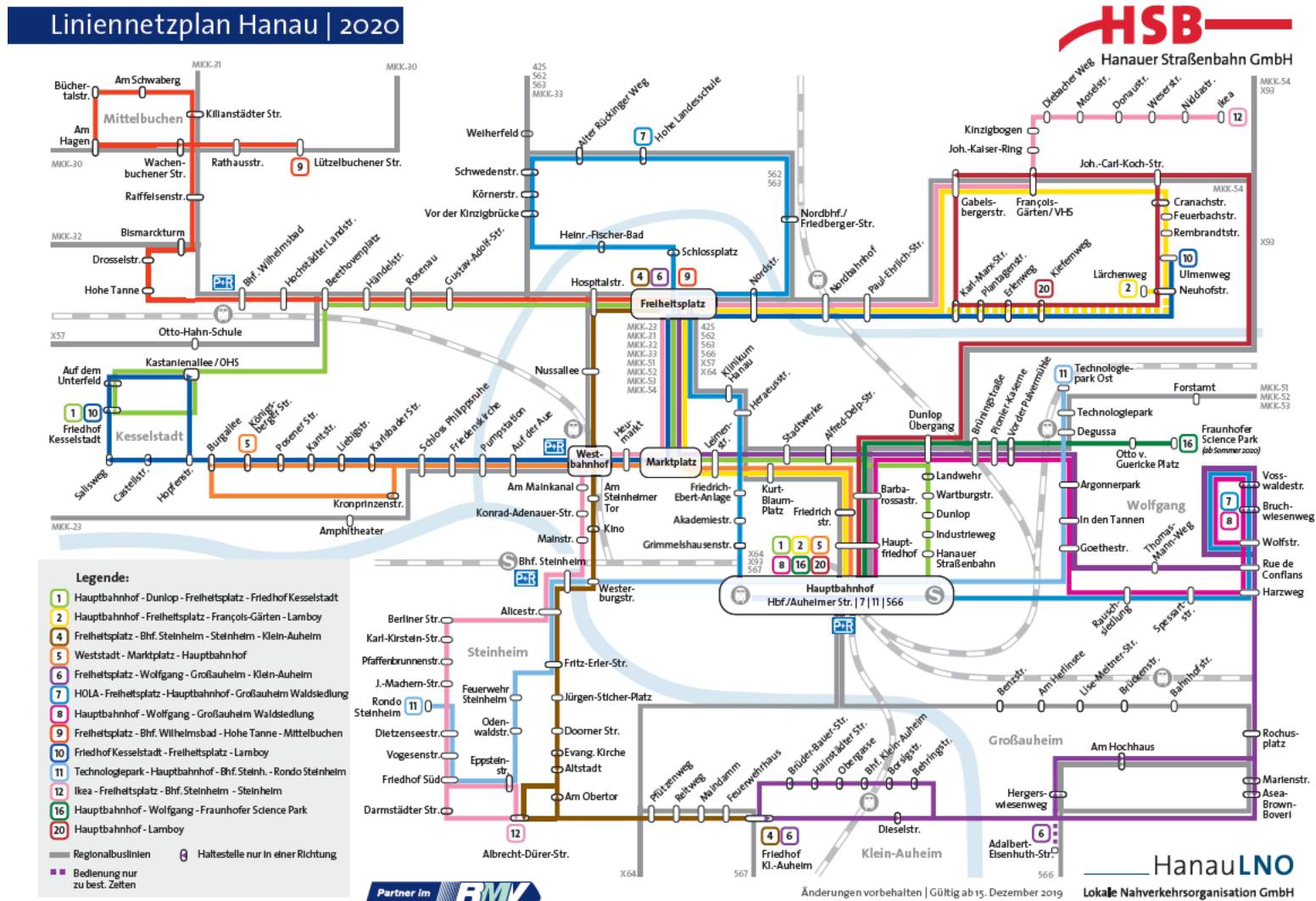


Abbildung 2: Liniennetzplan HSB – NVP 2019-2023 (Quelle: (HanauLNO, 2019))

Fuhrpark

Der Fuhrpark der HSB besteht aus 64 Fahrzeugen (26 Gelenkornibusse, 1 Midi Bus, 37 Solobusse).

Diese gliedern sich wie folgt auf die jeweiligen Fahrzeugtypen:

Tabelle 1: Fahrzeugbestand in der Ist-Analyse (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Fahrzeugtyp	Anzahl	altes Fahrzeugmodell: Kapazität	neues Fahrzeugmodell: Kapazität	Sitzplätze	Stehplätze
Gelenkbus	26	140	153	45	108
Midibus	1	60			
Standardsolobus	37	80	99	27	72

Im Fuhrpark sind täglich drei Gelenkbusse sowie zwei Standardsolobusse als Reserve vorgesehen. Der aufgeführte Midibus wird auf Grund einer Baustelle auf Linie 20 eingesetzt, um eine enge Baustellendurchfahrt zu passieren. Im digitalen Zwilling wird ein solches Fahrzeugmodell allerdings nicht berücksichtigt, sondern der Betrieb unter Normalverkehr mit Solo- und Gelenkbussen abgebildet. Das Durchschnittsalter der Fahrzeuge liegt bei ca. 7,5 Jahren. Die Fahrzeuge werden aktuell über 12 Jahre abgeschrieben, in gutem Zustand jedoch auch bis zu 16 Jahren eingesetzt. Für batterieelektrischen Fahrzeuge besteht die Vorgabe, dass die Fahrzeuge zwei Batteriebensdauern überstehen (ca. 16 Jahre), um jedes Fahrzeug möglichst wirtschaftlich einzusetzen.

28 Fahrzeuge sind mit einer Zählanlage ausgestattet und können somit aussagekräftige Fahrgastzahlen auf einzelnen Streckenabschnitten liefern. Die seit Fahrplanwechsel (Dez. 2019) bis zu Beginn der Corona-Pandemie erhobenen Fahrgastzahlen ließen keine erhebliche Diskrepanz zwischen den prognostizierten und erhobenen Daten erkennen, sodass die geplanten Fahrzeugtypen (Solo- und Gelenkbus) für das Simulationsmodell übernommen wurden.

Betriebsplanung

Die Disposition erfolgt über die Umlaufplanung mittels der Software Mobile.Plan der innovation in traffic systems SE (init SE). Aktuell gibt es keine Restriktion bei der Verknüpfung von Fahrzeug und Linie. Die Zuordnung der Solo- und Gelenkbusse auf einen Umlauf erfolgt anhand der Vorgaben zur Fahrzeugkapazität.

Der Hanauer Hauptbahnhof ist der wichtigste Knoten im öffentlichen Verkehr in Hanau. Ein weiterer zentraler Knoten und Schnittstelle für den städtischen und regionalen Busverkehr ist der Freiheitsplatz. Für den Personalwechsel sind drei definierte Wechsellpunkte vorgesehen: Depot, Hauptbahnhof und Freiheitsplatz. Der Personalwechsel erfolgt im Depot, sofern ein Fahrzeugschaden vorliegt oder wenn ein Gelenkbus zwischen

Hauptverkehrszeit (HVZ) und Nebenverkehrszeit (NVZ) mit einem Solobus ausgetauscht wird. Die Betankung, Reinigung sowie Wartung und Reparaturen erfolgen ebenfalls auf dem Betriebshof.

In NVZ liefern Anrufsammeltaxis ein zusätzliches Mobilitätsangebot. Durch eine 30-minütige Voranmeldung erfolgt die Beförderung mittels lokalem Taxiunternehmen, wobei der Ein- und Ausstieg nur an Haltestellen des öffentlichen Verkehrs erfolgt. Der Verkehr der Anrufsammeltaxis wird nicht im Simulationsmodell abgebildet.

2.2 Hanau Infrastruktur Service

Die Hanau Infrastruktur Service befasst sich im Bereich Abfallentsorgung mit der Abfallsammlung entsprechend eines vorgegebenen Abfallkalenders für das Stadtgebiet. Dieser Abfallkalender definiert, welche Abfallbehälter an welchen Wochentagen eingesammelt werden – aus denen sich zyklische Touren bilden. Es wird unterschieden zwischen vier verschiedenen Abfallarten (Fraktionen): Restmüll (RM), Papier/Pappe/Kartonage (PPK), Leichtverpackung (LVP) und Bioabfall (BIO). Für alle Behälter ist ein festgelegter Standort definiert. Neben Behältern, die am Straßenrand eingesammelt werden, gibt es vereinzelt Behälter, die mittels einer Servicepauschale zusätzlich vom Personal aus einem Innenhof, Einfahrt o.ä. abgeholt werden müssen. Zusätzlich gibt es Sammeltouren von gewerblichen Müll und Sperrmüll, die allerdings auf individueller Anfrage erfolgen und somit keiner regelmäßigen Tourenplanung entsprechen. Da sie aus diesem Grund nicht reproduzierbar sind, werden diese Touren im Rahmen des Simulationsmodells nicht abgebildet. Zudem wird der Fuhrpark des Bereichs Straßenreinigung der HIS im Projekt nicht behandelt.

Behälter und Touren

Als Gefäße werden verschiedene Behältervarianten in Hanau eingesammelt. Neben unterschiedlichem Volumen unterscheiden sich diese zudem durch den Abholzyklus und dem Behälterstandort mit bzw. ohne Serviceleistung (vgl. Tabelle 2). Die Behälter sind gekennzeichnet in welchem Abholzyklus und mit welchem Füllvolumen diese gesammelt werden. Die Serviceart definiert von wem die Behälter vorbereitend an die Straße gebracht werden: vom Kunden selbst (ohne Service) oder vom Personal der HIS (mit Service).

Tabelle 2: Behältervarianten in Tourenplanung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Fraktion	Behältervolumen	Abholfrequenz	Serviceart
RM	80 l, 120 l, 240 l, 770 l, 1100 l	1- oder 2-wöchig	mit/ohne
PPK	120 l, 240 l, 1100 l	4-wöchig	mit/ohne
LVP	120 l, 240 l, 1100 l	4-wöchig	mit/ohne
BIO	120 l, 240 l, 1100 l	2-wöchig	mit/ohne

Die Touren bestehen aus vordefinierten Clustern an Behälterstandorten derselben Fraktion und werden jeweils von einem Abfallsammelfahrzeug bedient. Jede Tour wiederholt sich regelmäßig (wöchentlich, 2-wöchentlich oder 4-wöchentlich), kann allerdings in der Reihenfolge der Behälterstandorte je nach Fahrer individuell gesammelt werden und beruht auf den Erfahrungen der Besatzung. Neben den gewerblichen und Sperrmülltours gibt es entsprechend dem Abfallkalender täglich neun bzw. zehn Touren. Diese teilen sich auf in fünf RM-Touren sowie einer variierenden täglichen Tourenanzahl der restlichen Fraktionen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: tägliche/wöchentliche Tourenanzahl nach Fraktion (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Fraktion	Touren/Tag	Touren/Woche
RM	5	25
PPK	1-2	5-9
LVP	1-3	5-7
BIO	1-2	6-10

Fuhrpark und Abfallsammelstellen

Die Fahrzeuge der HIS haben unterschiedliche Ladevolumen und sind nicht variabel für alle Fraktionen einsetzbar. Insgesamt umfasst die Flotte der HIS 16 Fahrzeuge. Für Gewerbe- und Sperrmülltours werden drei Fahrzeuge vorgehalten, die ggf. auch für RM-Touren eingesetzt werden können. Zudem werden vier Fahrzeuge als Reserve vorgehalten. Eine Zuordnung der möglichen Sammelfraktionen einschließlich des max. Nutzlast der Fahrzeuge ist in Anhang B dargestellt. Sobald ein Fahrzeug vollgeladen ist, wird die Tour unterbrochen und es erfolgt eine Fahrt zur Abladestelle. Für die Entleerung des Fahrzeugs sind an der Abfallsammelstelle ca. 15 Minuten eingeplant. Für die verschiedenen Abfallfraktionen nimmt die HIS verschiedene Deponien in Anspruch. Eine Übersicht über die Sammelstellen gibt Tabelle 4.

Tabelle 4: Standort Abfallsammelstelle (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Fraktion	Betreiber	Straße	PLZ	Ort
RM	EVO Offenbach	Dietzenbacher Straße 189	63069	Offenbach a.M.
PPK	MKK AWZ Hailer	Deponiestraße 4	63571	Gelnhausen
LVP	Betriebshof HIS	Daimlerstraße 5	63542	Hanau
BIO	Veolia	Am Seegraben 30	63505	Langenselbold

Tourenpersonal

Jeder Tour ist ein Fahrer mit zwei Ladern zugeordnet. Die Betriebstage beschränken sich auf Montag bis Freitag. Die Arbeitszeiten sind von montags bis mittwochs von 06:00 - 14:30 Uhr sowie donnerstags und freitags von 06:00 – 14:00 Uhr. Während dieser Dienstzeit erfolgt zwischen 08:30 Uhr und 11:00 Uhr eine 30-minütige Pause im Betriebshof. Das Besatzungsteam kann innerhalb dieses Zeitfenster eigenständig entscheiden, wann die Pause am sinnvollsten ist. Zusätzlich sind die letzten 20 Minuten jeder Schicht als Waschzeit auf dem Betriebshof eingeplant. Touren die auf einen Feiertag fallen, werden an Samstagen vor- oder nachgearbeitet.

Tourenplanung

Die Zuordnung von Behältern zu einer Tour erfolgt aus einer Behälterdatenbank. Durch das städtische Wachstum in Hanau in den letzten Jahren wurde der Behälterstand stetig erweitert, allerdings die Touren nicht neu geclustert. Aus diesem Grund sind die bestehenden Touren gewachsen, sodass inzwischen nicht immer örtlich zusammenhängende Sammelgebiete vorhanden sind. Aus den Basistouren werden aktuelle Tagespläne erstellt, die zudem unterjährige An- und Abmeldungen von Behältern beinhalten. Die Tourenplanung besteht aus Behältern zugeordneten Adressen, die allerdings keiner betrieblich optimierten Reihenfolge unterliegen, sondern viel mehr anhand Erfahrungen der Fahrer individuell gesammelt werden. Aktuell erfolgt eine komplette Neuplanung der Touren durch einen externen Dienstleister, deren Touren im Laufe des Jahres 2021 eingesetzt werden und sowohl eine neue Clusterung von örtlichen Sammelgebieten vornimmt als auch eine definierte Reihenfolge der Behälter vorgibt. Diese Neu-Touren konnten allerdings im Rahmen des Projektes SimCityNet fristbedingt nicht implementiert werden, weshalb die aktuellen Touren im Simulationsmodell abgebildet wurden.

Neben der Behälterdatenbank bietet sich ein GIS-Straßenmodell des städtischen Straßenreinigungsdienstes der HIS an, um die Touren in einem Kanten-Knoten-Modell abzubilden.

3 Simulationsszenarien

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen aus der IST-Analyse wurden im nächsten Schritt Soll-Konzepte für den Einsatz von Fahrzeugen mit alternativem Antrieb bei der HSB und HIS entwickelt. Für Elektrobusse bieten sich betrieblich verschiedene Ladekonzepte an, die auf Batteriekapazität der Fahrzeuge sowie Ladeinfrastruktur an Haltestellen und Betriebshof maßgebend Einfluss nehmen (Müller-Hellmann, 2018). In Workshops wurden der aktuelle Stand der Fahrzeugtechnik, verschiedene Ladestrategien und betriebliche Szenarien diskutiert und auf das Untersuchungsgebiet übertragen. Dabei wurden bereits in einer frühen Projektphase erste Konzeptvarianten ausgeschlossen, die nachfolgend aufgelistet sind:

- Langfristig planen die HSB und HIS nur vollelektrische Batteriefahrzeuge sowie Brennstoffzellenfahrzeuge als Bestandteil der emissionsfreien Fahrzeugflotte ein. Oberleitungsbusse wurden auf Grund fehlender und gleichzeitig auch für das Städtebild unerwünschter Infrastruktur ausgeschlossen.
- Ein Betriebskonzept mittels Opportunity-Charging an End- bzw. Zwischenhaltestellen wurde seitens HSB ausgeschlossen, da in den letzten Jahren bereits viele Haltestellen modernisiert wurden und eine erneute Umbaumaßnahme ausgeschlossen ist. Dies trifft u.a. auch auf den Freiheitsplatz zu, der einen ÖPNV-Knoten für viele Linien in Hanau bildet. Zudem schließen Halte- und Wendezeiten in vielen Umläufen eine Zwischenladung an Haltestellen betrieblich und wirtschaftlich aus.
- Sowohl HSB als auch HIS setzen bei der Ladetechnik auf eine konduktive Ladung. Eine automatisierte Fahrzeugladung über Stromabnehmer (Pantograph) oder Induktion wurden ausgeschlossen. Grund hierfür sind hohe Kosten sowie technische Problemanfälligkeit (Burmeister, 2019) und bauliche Interessen in Hanau.

Alle Konzepte beruhen auf der Voraussetzung, dass der Betriebshof entsprechend den Konzepten ertüchtigt wird und es entstehen keine Restriktionen bspw. in Bezug auf die anfallende Energiemenge am Betriebshof oder Flächenverfügbarkeit im Depot.

3.1 Soll-Konzepte für Hanauer Straßenbahn GmbH

Der digitale Zwilling bildet den Regelbetrieb einer gesamten Woche während des Schulbetriebs ab, um somit die max. Fahrzeugauslastung im Jahr zu bewerten. Das Verkehrsmodell stellt den Linienfahrplan über die bestehenden oder neu konzipierten Umläufe dar. Der Linienverlauf und die Haltestellen lassen sich mittels GIS-Daten aus der bestehenden Dispositionssoftware (INIT.SE) reproduzieren und die Umlaufplanung enthält alle relevanten Informationen, um zeitlich fahrplanrelevante Kriterien, wie Ausrück- und Ankunftszeit im Depot, Fahrzeit zwischen Haltestellen, Ein- und Ausstiegszeiten an Haltestellen sowie Wende- und Standzeiten an Endhaltestellen im Modell implementieren zu können.

3.1.1 Fahrzeugtechnische und infrastrukturelle Kenngrößen

Modellrelevante Fahrzeugtypen

Entscheidungsgrundlage für die betriebliche Analyse des Einsatzes alternativer Antriebe bilden die technischen Details mit Fokus auf die Reichweite solcher Fahrzeuge. Der Betrieb wird sowohl mit batterieelektrischen Bussen, als auch Brennstoffzellenbussen untersucht. Für die Analyse wurden hierfür zwei batterieelektrische Fahrzeugmodelle definiert, die als Referenzfahrzeuge für die Simulation dienen. Diese sind sowohl ein gängiges Fahrzeugmodell mit geringerer Reichweite von 170 km (im nachfolgenden als „Typ I“ bezeichnet), als auch mit größerer Reichweite von 350 km (im nachfolgenden „Typ II“ bezeichnet). (HERRY Consult GmbH, TU Wien, & VerkehrsConsulting OG, 2018) Für das Brennstoffzellenfahrzeug wurde ein marktübliches Fahrzeugmodell mit 350 km Reichweite definiert (EMCEL GmbH, 2019).

Batteriekapazität im Alterungsprozess

Fahrzeughersteller geben unter gegenwärtigem Stand der Technik als Restkapazität nach Ende der Batteriegarantie von acht Jahren eine Batteriekapazität von 70 % an (Harendt, Galati, Körner, & Läßle, 2017). Um die hohen Investitionen für Elektrobusse über eine längere Betriebszeit abschreiben zu können, wurden Alterungsstufen mit entsprechenden Restkapazitäten auf Grund der Abnutzung der Batterie definiert. Dies ermöglicht einen Fahrzeugeinsatz, wie im Ist-Zustand über 16 Jahre mit dem Vorteil, dass nur zwei Batterien über die Lebenszeit des Fahrzeugs eingesetzt werden müssen.

Bei einem FCEV ist die Alterung der Brennstoffzelle im Vergleich zur Fahrzeugabschreibung vernachlässigbar. Brennstoffzellenmodule sind sehr stabil gegen Energieverluste, sodass über die Lebenszeit des Moduls von keinem nennenswerten Verlust der Kapazität ausgegangen werden muss.

Maßgebende Fahrzeugreichweiten

Ziel des digitalen Zwillings ist es zu gewährleisten, dass nicht nur Ergebnisse mit einer Neu-Flotte abgebildet werden. Um diesen Kapazitätsverlust der Batterie zu berücksichtigen wurde eine kalendarische Alterung unterstellt (Bunzel, Richter, Morawietz, & Prof. Dr.-Ing. Bäker, 2018). Aus diesem Grund wurden vier Alterungsstufen der Batterie (100%, 85%, 70% und 50%) definiert. Da die HSB gewillt ist auch Batterien, die noch nach Ablauf der Gewährleistungsfrist funktionstüchtig sind einzusetzen, wurde zusätzlich eine Kategorie mit 50%. Eine Grundannahme für die Untersuchung im Simulationsmodell ist eine stetig gleichbleibende Fahrzeugbeschaffung, sodass zu jeder Zeit gleich viele Fahrzeuge aus jeder Alterungsstufe vorhanden sind sowie eine Erneuerung der Batterie nach acht Jahren. Aus dieser Annahme ergeben sich folgende Reichweiten für die genannten modellrelevanten Fahrzeugtypen (vgl. Tabelle 5-7).

BEV Typ I (mit geringerer Reichweite)

Tabelle 5: abstuftende Reichweiten des BEV Typ I (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Solobus		Gelenkbus	
Reichweite bei 100%:	170 km	Reichweite bei 100%:	200 km
Reichweite bei 85%:	144,5 km	Reichweite bei 85%:	170 km
Reichweite bei 70%:	119 km	Reichweite bei 70%:	140 km
Reichweite bei 50%:	85 km	Reichweite bei 50%:	100 km

BEV Typ II (mit größerer Reichweite)

Tabelle 6: abstuftende Reichweiten des BEV Typ II (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Solobus		Gelenkbus	
Reichweite bei 100%:	350 km	Reichweite bei 100%:	350 km
Reichweite bei 85%:	297,5 km	Reichweite bei 85%:	297,5 km
Reichweite bei 70%:	245 km	Reichweite bei 70%:	245 km
Reichweite bei 50%:	175 km	Reichweite bei 50%:	175 km

FCEV

Tabelle 7: Reichweite des FCEV (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Solobus	Gelenkbus
350 km	400 km

Fahrgastkapazitäten

Die Herstellerangaben zu den max. Fahrgastkapazitäten der Fahrzeuge bemessen sich anhand des zulässigen Gesamtgewichts. Da Batteriemodule einen hohen Anteil des Fahrzeugleergewichts einnehmen, sind die Herstellerangaben zur Fahrgastkapazität bei Elektrobussen deutlich geringer als bei Dieselfahrzeugen. Die Angaben für konventionelle Diesel-Busse lassen sich in der Realität allerdings auf Grund zu geringer Freifläche nicht erreichen. Der Vergleich der Grundrisse zwischen Diesel- und Elektrofahrzeugen hingegen zeigt, dass das verfügbare Sitzplatzangebot sowie die gegebenen Freiflächen als äquivalent angenommen werden kann (vgl. Abbildung 3-6). Demnach lassen sich auch die Fahrgastkapazitäten für Elektrobusse als äquivalent zu den aktuellen Dieselfahrzeugen annehmen.

Da pandemiebedingt keine belastbaren Fahrgastzahlen für die neuen Linien ab Fahrplanwechsel Dezember 2019 vorliegen, werden die in den Umlaufkarten prognostizierten Fahrzeugtypen (Solobus, Gelenkbus) für die Untersuchung angenommen.

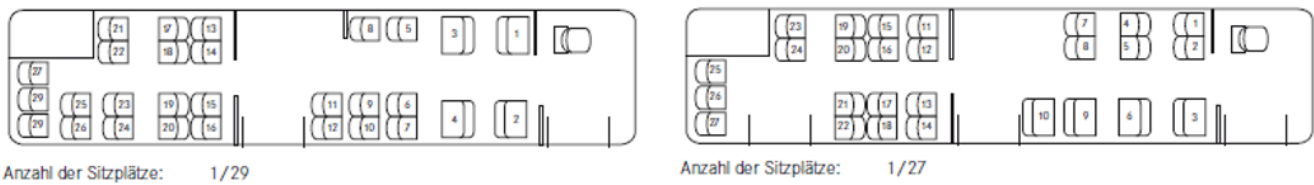


Abbildung 3: eCitaro Solobus (Elektro) (Quelle: (EvoBus GmbH, 2018))

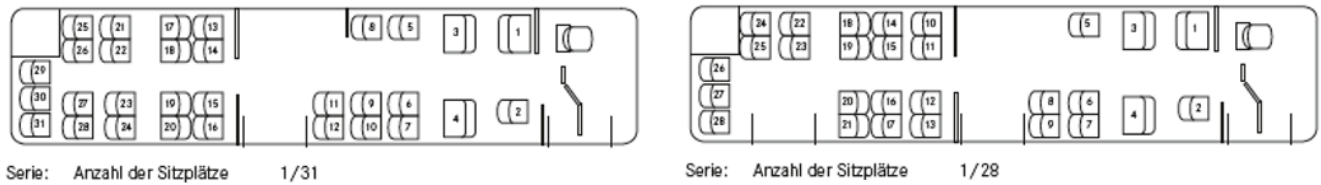


Abbildung 4: Citaro Solobus (Diesel) (Quelle: (EvoBus GmbH, 2019))

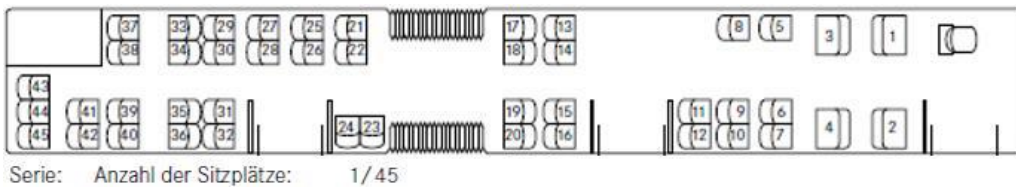


Abbildung 5: eCitaro Gelenkbus (Elektro) (Quelle: (EvoBus GmbH, 2018))

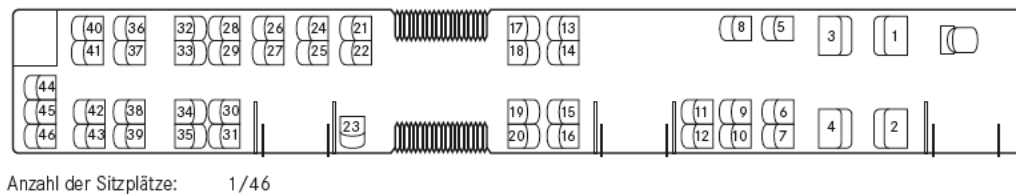


Abbildung 6: Citaro Gelenkbus (Diesel) (Quelle: (EvoBus GmbH, 2019))

Ladeinfrastruktur

Die Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge befindet sich für alle Konzepte auf dem Betriebshof. Die Stromversorgung erfolgt für alle BEV ausschließlich über konduktive Ladung. Um das Rangieren von fertiggeladenen Fahrzeugen auf dem Betriebshof zu vermeiden, wird für jedes Fahrzeug ein Ladepunkt vorgehalten. Entgegen einer systematischen Koordination der Ladestärke einzelner Fahrzeuge komplementär zu einem Lademanagementsystem, werden im Simulationsmodell alle Fahrzeuge mit einer vom Modellnutzer vorgegeben Ladestärke gleichzeitig geladen.

Für Brennstoffzellenfahrzeuge wird ebenfalls eine Wasserstoff-Tankinfrastruktur auf dem Betriebshof errichtet. Für Szenarien mit sehr wenigen FCEV, für die die Investitionen einer Wasserstoff-Infrastruktur nicht wirtschaftlich ist (< 10 Fahrzeuge), kann zudem auf eine lokale öffentliche Tankstelle in Hanau – MTV Förster GmbH – zurückgegriffen werden. Im Simulationsmodell muss demnach vom Nutzer definiert werden an

welchem Standort die Infrastruktur im Verkehrsmodell lokalisiert ist, um ggf. zusätzliche Leerkilometer für Fahrten zur und von der öffentlichen Tankstelle zu berechnen. Die Batterie in den Brennstoffzellenfahrzeugen werden im Modell nicht im Sinne eines Range-Extenders eingesetzt, sondern als Pufferbatterie, sodass keine tägliche Batterieladung erforderlich ist. Die Tankdauer für Brennstoffzellenfahrzeuge liegt bei ca. zehn Minuten.

Ein umfassendes Ausbaukonzept für den Betriebshof wird im Rahmen eines parallel laufenden Projektes der HSB und HIS mit der European Electrical Bus Company GmbH (EEBC) entwickelt und daher im Rahmen dieses Projektes nicht tiefgründig behandelt. Lediglich die kurz-, mittel- bis langfristigen Ausbaustufen hinsichtlich eines max. Energiebedarfs auf dem Betriebshof sind aus diesem Projekt als Bemessungsgrundlage für ein strategisches Ladeverhalten der Fahrzeuge im Projekt SimCityNet berücksichtigt.

Sommer und Wintermonate

Die Tabellen 5-7 zeigen die Fahrzeugreichweiten unter Normalverbrauch an einem milden Sommertag. Im Winter entsteht ein zusätzlicher Verbrauch für das Beheizen des Fahrgastinnenraums (Knote, Haufe, & Saroch, 2017). Um einen ganzjährigen Betrieb abzubilden, lassen sich anhand verschiedener Außentemperaturbereiche verschiedene Monate simulieren, um ein Konzept als einsatztauglich im Worst-Case-Szenario bewerten zu können. Die Vorgaben für Innenraumtemperaturen von Linienbussen sind in der VDV-Schrift 236/1 definiert. Ein wirtschaftliches Konstrukt erfordert daher eine angepasste Umlauf- und Dienstplanung für die verschiedenen Jahreszeiten, welche dem Fahrpersonal zusätzliche Flexibilität abverlangt und mit dem Betriebsrat abgestimmt werden muss (Käppeler, 2019).

Das Simulationsmodell bietet zudem die Eingabemöglichkeit an Auswirkungen mittels einer Diesel-Zusatzheizung im Fahrzeug zu simulieren, um zusätzlichen Reichweitenverlust durch Nebenverbraucher für das Beheizen des Fahrgastinnenraums bei BEV zu vermeiden. Eine Diesel-Heizung kann den Batterieverbrauch gegenüber einer elektrischen Heizung um ca. 38% senken (Bünnagel, 2020).

Für Brennstoffzellenfahrzeuge ist ein solcher Zusatzverbrauch im Winter nicht erforderlich. Die Heizung kann bei einem FCEV aus der Abwärme der Brennstoffzelle betrieben werden (Limbrunner, 2018).

Topographie

Topografisch ausgeprägte Gelände mit viel Steigung und Gefälle resultieren ebenfalls in einem höheren Energieverbrauch alternativ angetriebener Fahrzeuge. Bei der Planung elektrisch betriebener Flotten muss das Höhenprofil einzelner Linien im Detail analysiert werden (Schreven & Rogge, 2020). Die Stadt Hanau weist kein prägnantes Höhenprofil auf, sodass ein zusätzlicher Verbrauch in der Simulation nicht berücksichtigt werden muss.

3.1.2 Simulationsszenarien

In den Soll-Szenarien soll untersucht werden, welche Auswirkungen der Einsatz von alternativ angetriebenen Fahrzeugen auf die Fahrzeugflotte nimmt. Neben kurzfristigen Auswirkungen durch den Austausch einzelner Fahrzeuge, stellt sich vor allem die Frage nach einer betrieblich sinnvollen Umstellung der gesamten Flotte im Endausbau, um Potenziale zu identifizieren und strategische Maßnahmen zu entwickeln. Aus diesem Grund lassen sich folgende Soll-Szenarien entwickeln, die im weiteren Projektverlauf inhaltlich verfeinert wurden.

Ist-Ablauf

Der Ist-Ablauf stellt die betriebliche und wirtschaftliche Vergleichsgrundlage dar, dem die Auswirkungen durch den Einsatz alternativ angetriebener Fahrzeuge gegenübergestellt werden. Die gesamte Flotte besteht aus konventionell angetriebenen Fahrzeugen. Die Tankinfrastruktur befindet sich auf dem Betriebshof und wird von der HIS mitgenutzt.

Übergangsszenarien

In den Übergangsszenarien werden erste Fahrzeuge der Flotte durch Elektrobusse ersetzt, um einen schritthaften Übergang in den nächsten Jahren zu untersuchen. Der Übergang wird mit einer sehr niederschweligen Anzahl an Elektrofahrzeugen abgebildet, der einen kurzfristigen Betriebsablauf abbildet, allerdings auch als eine mittelfristige Planungsgrundlage mit dem Ersetzen der halben Diesel-Flotte. Für Diesel-Fahrzeuge besteht die Infrastruktur auf dem Betriebshof. BEV werden ebenfalls auf dem Betriebshof geladen. FCEV werden bei geringer Fahrzeuganzahl an der Tankstelle des Betriebs „Försters“ getankt. Bei mehr als zehn Brennstoffzellenfahrzeugen wird ebenfalls eine Tankinfrastruktur auf dem Betriebshof errichtet.

Endszenarien

Mit Hilfe des Simulationsmodells soll für einen möglichen Endausbau eine betriebswirtschaftlich geeignete Flottenzusammensetzung gefunden werden. Betrachtet werden der Austausch der Flotte durch batterieelektrische Busse, Brennstoffzellenbusse sowie ein Mix aus unterschiedlicher Anzahl an Fahrzeugen dieser beiden Antriebstechnologien. In diesem Fall werden durch die Vorgaben im Algorithmus Brennstoffzellenfahrzeuge längeren Umläufen zugewiesen und batterieelektrische Fahrzeuge kürzeren Tagesumläufe zugeordnet. Ein solcher Mix bietet sich aus Sicht der zuvor dargestellten Reichweitenunterschiede zwischen den Antriebstechnologien an sowie kostengünstigen und emissionsfreien Lösungen für den innerstädtischen Nahverkehr (Limbrunner, 2018).

3.2 Soll-Konzepte für Hanau Infrastruktur Service

Die HIS betreibt im 4-wöchentlichen-Zyklus einen Abfallkalender in Hanau. Um alle Touren abzubilden, werden im Verkehrsmodell der HIS aus diesem Grund vier Wochen abgebildet. Für alle Soll-Konzepte werden die aktuellen Touren betrachtet. Die Datengrundlage gibt an, an welchem Wochentag welcher Behälter von welchem Fahrzeug geleert wird. Unterschieden wird innerhalb der Touren zwischen den vier Fraktionen RM, PPK, LVP und BIO.

3.2.1 Fahrzeugtechnische und infrastrukturelle Kenngrößen

Modellrelevante Fahrzeugtypen

Die Fahrzeugtechnologie in der Elektromobilität für Abfallsammelfahrzeuge weist erheblichen Bedarf in der Entwicklung auf. Der Herstellermarkt ist in Europa sehr überschaubar. Zudem befand sich dieser zu Projektbeginn überwiegend noch in der Testphase und aktuell noch nicht in Serienproduktion. Grundlage für die Analyse stellt daher das BEV-Fahrzeugmodell Futuricum Collect 26E vom Schweizer Elektro-Nutzfahrzeughersteller Designwerk Products AG dar (Designwerk Products AG, 2020). Gewählt wurde dieses Fahrzeugmodell, da umfangreiche Testergebnisse aus dem Testbetrieb vorliegen, u.a. auch in Frankfurt a.M.. Um den Betrieb mittels Brennstoffzellentechnologie bewerten zu können, werden die fahrzeugtechnischen Details des FAUN-Bluepowers im Simulationsmodell hinterlegt (FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG, 2020).

Batteriekapazität im Alterungsprozess

Die Designwerk Products AG sieht die Lebensdauer der Batterie bei 10 Jahren bzw. 500.000 km. Nach diesen Grenzwerten hat die Batterie eine Restkapazität von 80%. Für den Sammelbetrieb zeigten Testbetriebe einen Verbrauch von 190kWh/100km vor. Für normale Fahrten zwischen Betriebshof/Abfallsammelstelle und Sammelgebiet liegt der Verbrauch bei 120kWh/100km.. (Schimanski, 2019) Bei der HIS werden die Fahrzeuge über acht Jahre abgeschrieben. Im täglichen Toureneinsatz werden die Fahrzeuge zehn Jahre lang eingesetzt und werden anschließend ein bis zwei Jahre als Ersatzfahrzeuge vorgehalten. Das Streckenverhältnis in Hanau innerhalb einer Tour von Sammelvorgang zu normaler Fahrt liegt bei 20:80.

Im Simulationsmodell wird die Batterie im FCEV ebenfalls als Pufferbatterie abgebildet, sodass die Alterung der Brennstoffzelle im Vergleich zur Fahrzeugabschreibung vernachlässigbar ist.

Maßgebende Fahrzeugreichweiten

Die Restkapazität der Batterie des BEV von Futuricum liegt nach 10 Jahren bei 80%. Da Fahrzeuge bei der HIS noch zwei Jahre als Reservefahrzeuge vorgehalten werden, wurde zusätzlich eine geringere Stufe mit 70% im Simulationsmodell integriert, um den Worst-Case-Fall mitabbilden zu können. Mit den zuvor genannten Verbräuchen und einem Verhältnis von 80:20 von normalen Fahrten ohne Sammelvorgang und Fahrten mit

Sammelvorgang innerhalb einer Tour ergeben sich die in Tabelle 8 ermittelten Reichweiten in den verschiedenen Batteriealterungsstufen. Die Fahrzeuge beider Antriebstechnologien haben eine zulässige Nutzlast von 10t.

Tabelle 8: Reichweiten des BEV und FCEV im Simulationsmodell (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Futuricum Collect 26E	FAUN - Bluepower
Reichweite bei 100%: 253 km	500 km
Reichweite bei 90%: 228 km	
Reichweite bei 80%: 203 km	
Reichweite bei 70%: 178 km	

Ladeinfrastruktur

Die HIS wird, wie auch bereits aktuell bei der Diesel-Infrastruktur, zukünftig die Lade-/Tankinfrastruktur der HSB mitnutzen. Aus diesem Grund muss im Simulationsmodell untersucht werden, welche Anzahl an BEV für den Betrieb der HIS geeignet sind und welche Anzahl an Ladestationen und Ladeenergie sich daraus ergeben. Für den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen ist zudem die erforderliche tägliche Menge an Wasserstoff relevant, um die Wasserstoffinfrastruktur geeignet dimensionieren zu können.

Da die Fahrzeuge der HIS bereits alle gegen 14:00 Uhr zum Betriebshof zurückkehren und ein Rangieren der Fahrzeuge nicht sinnvoll ist, wird für jedes Fahrzeug ein konduktiver Ladepunkt vorgesehen. Vorteil der HIS ist der lange Zeitraum bis zum Beginn der neuen Touren am nächsten Tag (ca. 06:00 Uhr), der sich für eine Batterieladung mit niedriger Ladestärke anbieten würde. Das Simulationsmodell bildet lediglich das Ladeverhalten der Abfallsammelfahrzeuge ab und kein gemeinsames Lademanagement mit der HSB. Anhand der Ergebnisse gilt es im Folgenden zu schauen, wann über den Tag gesehen Lade-Peaks bei der HSB entstehen, um Fahrzeuge der HIS gezielt in den Schwachzeiten zu laden.

Im Simulationsmodell kann zudem als Standort der Tankinfrastruktur der Betrieb – MTV Förster GmbH – ausgewählt werden. In den Simulationskonzepten wird allerdings vorausgesetzt, dass die HSB ausreichend Brennstoffzellenfahrzeuge inklusive einer eigenen Tankinfrastruktur auf dem Betriebshof beschafft. Die Tankdauer für FCEV-Abfallsammelfahrzeuge liegt ebenfalls bei ca. zehn Minuten (Reichenbach, et al., 2019).

Sommer und Wintermonate

Der Nebenverbraucher für das Beheizen des Fahrgastinnenraumes fällt bei einem Elektro-Abfallsammelfahrzeug nicht so hoch aus, wie bei einem Elektrobuss. Dennoch ist der Verbrauch im Winter signifikant höher, als an einem milden Sommertag. Aus diesem Grund werden auch für die HIS alle Konzepte sowohl im Sommer als auch Winter betrachtet.

3.2.2 Simulationsszenarien

Anders als für die HSB, sollen die Soll-Szenarien der HIS keine Auswirkungen des Einsatzes von alternativ angetriebenen Fahrzeugen auf die Größe der Fahrzeugflotte zeigen. Da Touren im Rahmen des Projektes nicht von Grund auf neu geclustert werden können liegt der Fokus im Simulationsmodell zu untersuchen, welche Tour von welchem elektrischen Fahrzeugmodell betrieben werden kann. Aus diesem Grund lassen sich folgende Soll-Szenarien entwickeln, die im weiteren Projektverlauf inhaltlich verfeinert wurden.

Ist-Ablauf

Um den Ist-Ablauf zu validieren, stellt der digitale Zwilling des Betriebs mit konventionell angetriebenen Fahrzeugen die Vergleichsgrundlage für im Anschluss zu untersuchende Soll-Konzepte. Für die Betankung der Fahrzeuge wird die Tankinfrastruktur der HSB genutzt.

Übergangsszenarien

In den Übergangsszenarien werden erste Fahrzeuge der Flotte durch Elektrobusse ersetzt, um einen kurz- bis mittelfristigen Übergang in den nächsten Jahren zu untersuchen. Da die HIS bereits ein Brennstoffzellenfahrzeug bestellt hat, wurde dieses in allen Soll-Konzepten integriert. Auf Grund der kleinen Flottengröße lässt sich der Übergang anhand einzelner Fahrzeuge sehr detailliert analysieren. Bei allen Antriebstechnologien wird auf die Lade-/Tankinfrastruktur der HSB zugegriffen.

Endszenarien

Mit Hilfe des Simulationsmodells soll für einen möglichen Endausbau eine betriebswirtschaftlich geeignete Flottenzusammensetzung gefunden werden. Im Fokus stehen die Reichweiten der Fahrzeuge im Einklang mit den unterschiedlichen Tourenlängen. Neben dem betrieblichen Einsatz einer rein batterieelektrisch betriebenen Flotte oder rein wasserstoffbetriebenen Flotte stellt sich auch die Frage nach einem geeigneten Mix-Szenario unter Zuweisung bestimmter Fraktionen zu den verschiedenen Antriebstechnologien.

4 Umlauf- und Tourenplanung

In Anbetracht der Umlauflängen der HSB ermöglichen es die aktuellen Reichweiten von batterieelektrischen Bussen nicht alle Umläufe, ohne eine Zwischenladung zu betreiben. Aus diesem Grund wurde die Umlaufplanung anhand der technisch möglichen Reichweiten angepasst sowie neu konzipiert.

Zudem kann aus dem Datenstand der HIS keine Reihenfolge der zu sammelnden Behälter ausgelesen werden. Zu leerende Behälter sind zu Touren zusammengefasst und auch mit Standortkoordinaten hinterlegt. Für diese Behälter wird mittels eines Algorithmus eine Reihenfolge der Behälter in den Touren definiert.

Um die Umläufe der HSB und Touren der HIS im Simulationsmodell abzubilden, gibt es verschiedene Varianten, die mit unterschiedlich hohem Aufwand verbunden sind (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Möglichkeiten der Tourenplanung (Quelle: SimPlan AG)

Variante	Einschränkungen Aussagekraft Ergebnisse der Variantenuntersuchung	Aufwand der Umsetzung in der Simulation
Verwenden der IST-Tourenplanung für die SOLL-Szenarien	Möglicherweise keine Umsetzbarkeit bei geringerer Reichweite der Fahrzeuge	Niedrig
(Einfache) Modifikation der vorhandenen IST-Tourenplanung, z.B. Teilen von Umläufen, manuell	Möglicherweise nicht-optimaler Einsatz der vorhandenen Ressourcen	Niedrig-Mittel
(Einfache) Modifikation der vorhandenen IST-Tourenplanung, z.B. Teilen von Umläufen, automatisiert	Möglicherweise nicht-optimaler Einsatz der vorhandenen Ressourcen	Mittel-Hoch
Neuplanung von Touren	Bestmögliche Verwendung der Ressourcen	Extrem hoch

4.1 Umlaufplanung HSB

Durch die drei definierten Wechsellpunkte für das Personal (Depot, Freiheitsplatz, Hauptbahnhof) lassen sich mit Hilfe der Umlaufplanung Dienstpläne erzeugen. Diese müssen zusätzlich den Richtlinien der Fahrpersonalverordnung (FPersV) §1 unterliegen sowie Artikel 4, 6, 9 und 12 der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 des Europäischen Parlaments und Rates. Auf Grund hoher Komplexität bei der Integration in die Heuristik wurden Personalwechsel und Dienstpläne im Simulationsmodell nicht abgebildet. Bei der Konzeption zeichnete sich ein zweistufiger methodischer Ansatz ab. Zunächst wurde eine manuelle Umlaufplanung erstellt, bei der bestehende Umläufe mit zu großer Fahrleistung manuell geteilt werden. Diese manuelle Umlaufplanung beinhaltet ebenfalls keine vollständige Personalplanung, allerdings konnte bei der Teilung der Umläufe Personal-Lenkzeiten berücksichtigt werden. Nachteil dieses methodischen Ansatzes ist, dass Leerfahrten nicht optimiert

geplant sind und eine manuelle Umlaufplanung jeweils für eine max. Fahrzeugreichweite individuell erstellt werden muss. Dementgegen steht eine automatisierte Umlaufplanung, die diese methodischen Schwächen aufgreift und anhand des Fahrplanbuches Umläufe für eine max. Reichweite automatisiert neu erstellt. Die gesetzlich vorgeschriebenen Lenk- und Ruhezeiten aus der Fahrpersonalverordnung (PersV) sind in diesem Ansatz nicht enthalten, weshalb im Ergebnis kein optimaler Personaleinsatz sichergestellt werden kann.

4.1.1 Manuelle Umlaufplanung HSB

Randbedingung für die Konzeption der manuellen Umläufe sind die Fahrzeugreichweiten, welche in Kapitel 3.1.1 definiert wurden. Bestehende Umläufe aus der Diesel-Umlaufplanung, deren Länge innerhalb der maßgebenden Fahrzeugreichweiten eines Konzeptes liegen, sind beibehalten. Umläufe deren Fahrleistung über die max. Fahrzeugreichweiten hinausgehen, wurden angepasst und in zwei oder ggf. mehrere Umläufe aufgeteilt.

Methodik manuelle Umlaufplanung

Bei der Entwicklung der Umlaufplanung sind drei Verfahrensschritte prägnant, die sich zudem in einzelne Teilaufgaben aufschlüsseln lassen und in Abbildung 7 festgehalten sind. Voraussetzung für eine manuelle Umlaufteilung ist zunächst die Analyse der Ist-Umlaufplanung. Darauf aufbauend lässt sich ein systematisches Vorgehen für die manuelle Teilung von Umläufen definieren, die sich anschließend zu tagesspezifischen Umlaufketten zusammenführen lassen.

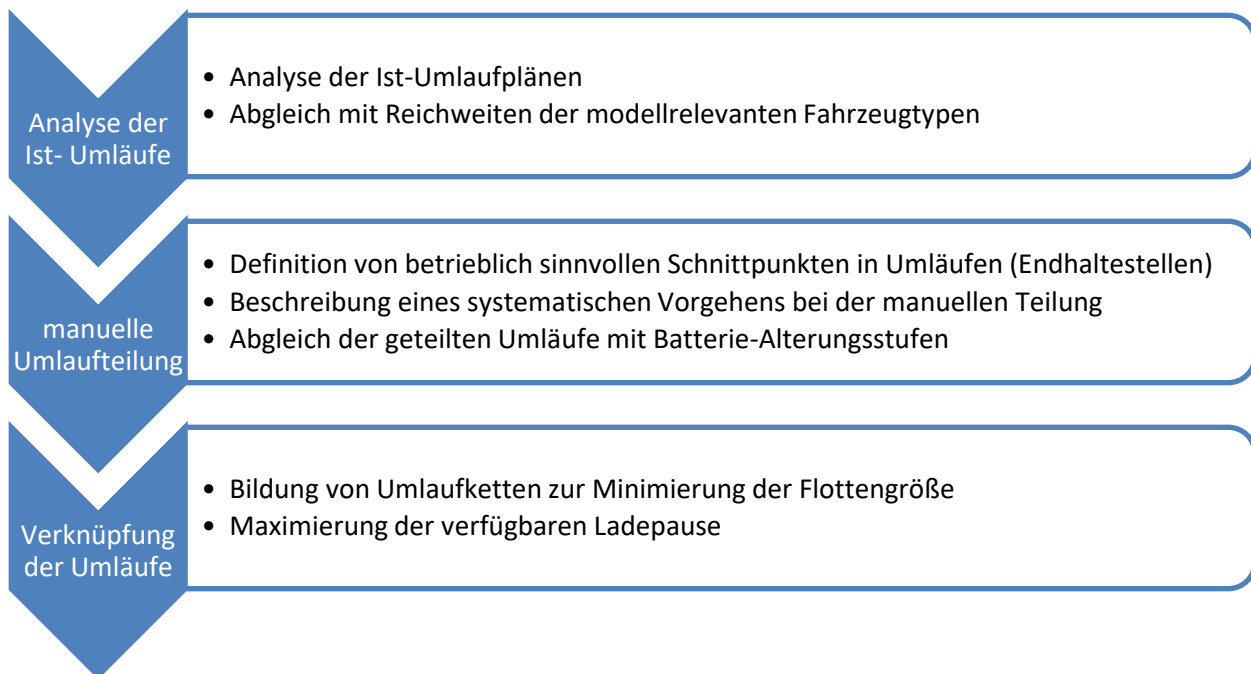


Abbildung 7: Vorgehen für automatisierte Umlauf-Neuplanung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Analyse der Ist-Umlaufplanung

Eine Voruntersuchung der bestehenden Ist-Umlaufplanung gibt Aufschluss über die Anzahl der Umläufe, die bereits ohne Anpassungen von einem Batteriebus gefahren werden können. Erkenntnisse bei der Voruntersuchung bringen folgende Bedingungen:

- Länge Ist-Umlauf < Fahrzeugreichweite → wird übernommen
- Länge Ist-Umlauf > Fahrzeugreichweite → wird zu zwei bzw. mehr Umläufen aufgeteilt

Die tägliche Fahrleistung der Umläufe kann Anhang B entnommen werden. In einer Voruntersuchung der bestehenden Umläufe an einem Freitag während dem Schulbetrieb zeigt sich, dass unter Betrachtung der Randbedingungen für die Fahrzeugkonfiguration eines Batteriebusses (Analyse anhand BEV Typ I) einige Umläufe bereits mit batterieelektrischen Fahrzeugen betrieben werden können. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen die Fahrleistung der Umläufe in Hanau graphisch für Solo- und Gelenkbusse.

Abbildung 8 ist zu entnehmen, dass 41 Umlaufpläne auch von einem batterieelektrischen Solobus gefahren werden können. Lediglich neun Umlaufpläne müssen in den Konzepten einer reinen Batterieflotte an die Reichweiten eines BEV Typ I angepasst werden.

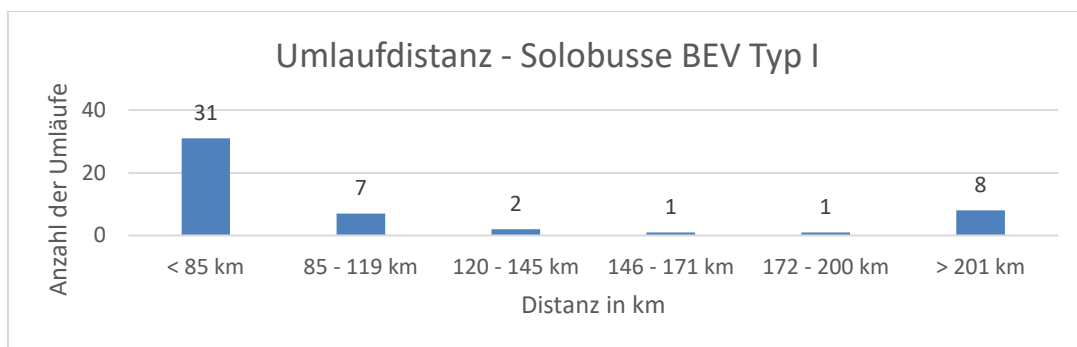


Abbildung 8: Umlauflängen des Ist-Ablaufs – Solobus BEV Typ I (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

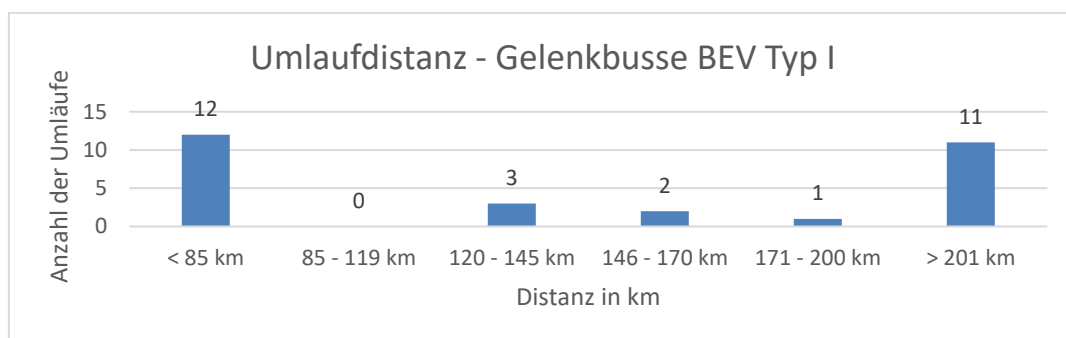


Abbildung 9: Umlauflängen des Ist-Ablaufs – Gelenkbus BEV Typ I (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

17 Umläufe lassen sich für batterieelektrisch betriebene Gelenkbusse übernehmen (vgl. Abbildung 9). Zwölf Umläufe müssen hingegen an die Reichweiten eines Batteriebusses Typ I angepasst werden.

Manuelle Umlaufteilung

Der zweite Verfahrensschritt beschreibt die eigentliche Konzeption von Umläufen. Durch die Entwicklung von Umläufen entstehen gleichzeitig wichtige Kriterien und Voraussetzungen für Verfahrensschritt 3 (z.B. die Zuordnung einer Umlauflänge zu einer des Alters entsprechenden Batterie-Alterungsstufe).

Vorgaben für die Anpassung der Umlaufpläne

Ziel der Umlaufplanung ist es Leerfahrten zu minimieren und den Fahrzeugbestand möglichst effektiv einzusetzen. Um die betrieblichen Leerkilometer möglichst gering zu halten, sind Umläufe mit zu hoher Fahrleistung an der näher zum Betriebshof gelegenen Endhaltestelle geteilt. Eine Ausnahme stellt die Linie 7 dar, da sich die näher gelegene Endhaltestelle „Hohe Landesschule“ betrieblich nicht für einen Fahrzeugwechsel eignet und daher Umläufe an der weiter entfernt liegenden Endhaltestelle „Bruchwiesenweg“ geteilt werden. Auf einzelnen Linien ist auf Grund der Länge der Ist-Umläufe keine Teilung erforderlich, sodass diese erhalten bleiben.

Tabelle 10 führt die Haltestellen auf, an denen eine betrieblich sinnvolle Umlaufteilung vorgenommen wird.

Tabelle 10: Betrieblich geeignete Endhaltestellen für Umlaufteilung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Linie	Umlaufteilung
Linie 1 und 10 (Ringlinie)	Hauptbahnhof (Linie 1)
Linie 2 und 5 (Ringlinie)	Hauptbahnhof (Linie 2 und 5)
Linie 2 (Code 201 und 202)	Keine Teilung erforderlich
Linie 4	Freiheitsplatz
Linie 6	Freiheitsplatz
Linie 7	Bruchwiesenweg
Linie 8	Keine Teilung erforderlich
Linie 9	Freiheitsplatz
Linie 11	Keine Teilung erforderlich
Linie 12	Albrecht-Dürer-Straße
Gemischte Umläufe (Verstärkerfahrten)	Keine Teilung erforderlich
Freigestellter Schülerverkehr	Keine Teilung erforderlich

An der Schnittstelle eines Ist-Umlaufs entsteht in der Soll-Konzept-Umlaufplanung eine Leerfahrt vom Linienende zum Depot bzw. eine Leerfahrt vom Depot zum Linienbeginn.

Die Personalplanung stellt ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Umlaufteilung dar. Die EU-Verordnung 561/2006 schreibt für Busfahrer/Innen tägliche Lenkzeiten von max. 9 Stunden vor. Nach max. 4,5 Stunden muss eine Pause erfolgen. Die Teilung von Umläufen führt nicht immer zu einem betrieblich guten Personaleinsatz. Zudem beinhalten Verstärkerfahrten bereits ohne Umlaufteilung sehr kurze Dienstzeiten.

Prozessschritte zur Konzeption der manuellen Soll-Umlaufplanung

Das nachfolgende Flussdiagramm stellt die wesentlichen Prozessschritte der manuellen Umlaufteilung dar.

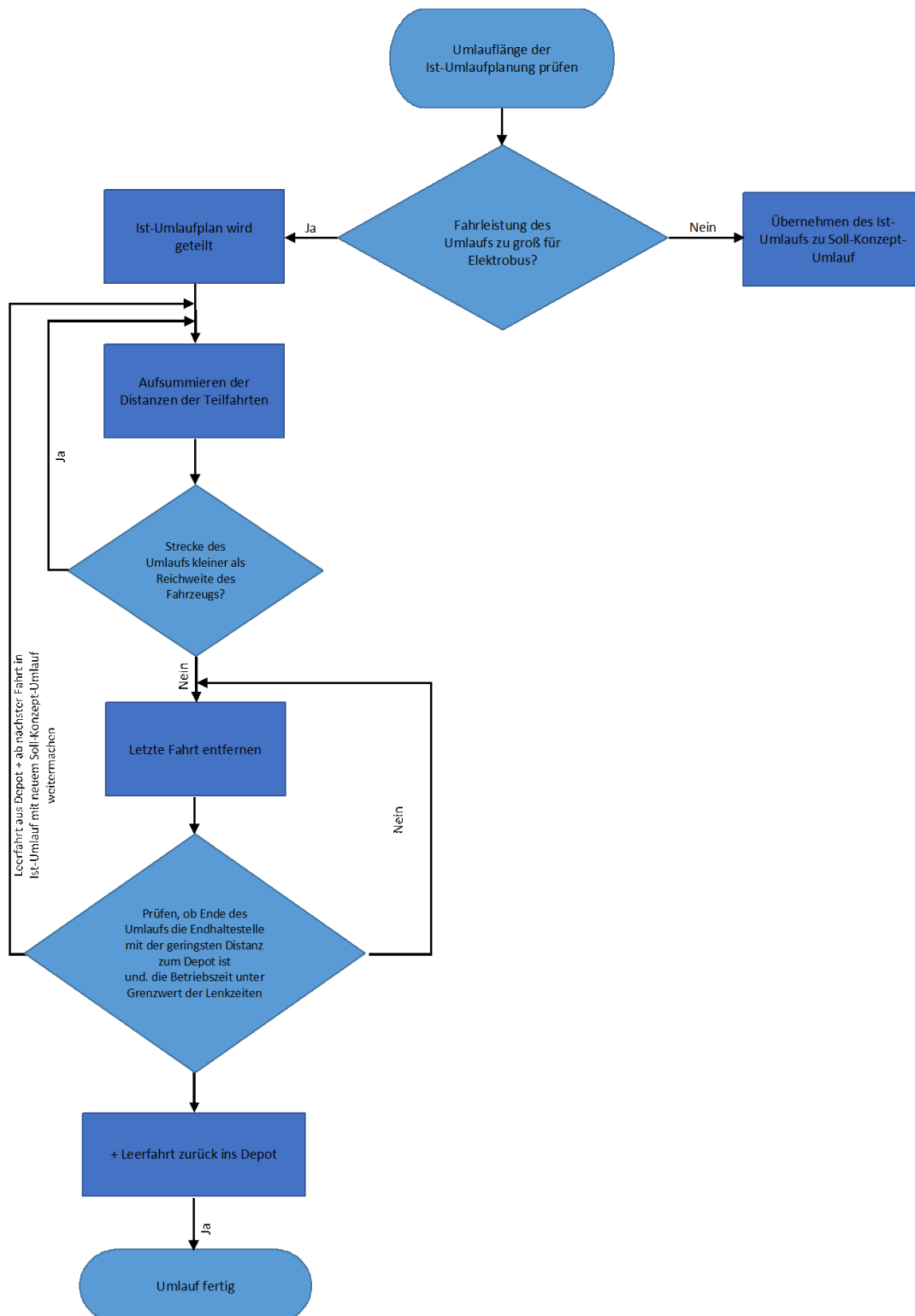


Abbildung 10: Flussdiagramm – Umlaufteilung (Quelle: eigene Darstellung RelUT)

Modifizierung der Umlaufverteilung und Batterie-Alterungsstufe

Da das Flussdiagramm (vgl. Abbildung 10) aus einem bestehenden Umlauf zunächst einen möglichst großen Umlauf bildet und dies ggf. zu einigen sehr kleinen Umläufen führt, wurde manuell nachgesteuert, um eine möglichst ausgeglichene und personalplanerisch sinnvolle Umlaufplanung zu entwickeln.

In Kapitel 3 ist die Abhängigkeit des Alterungsprozesses einer Batterie auf die Reichweite beschrieben. Diese verschiedenen Stufen der Batteriekapazität geben gleichzeitig auch eine Bedingung für die Umlaufplanung vor, da möglichst gleich viele Fahrzeuge der einzelnen Batterie-Alterungsstufen erforderlich sind, um ein Konzept nachhaltig betreiben zu können. Im Anschluss an die Umlaufeinteilung empfiehlt es sich für die Ergebnisse Qualitätssicherung zu betreiben. Die Zuordnung von Umlauflängen zu Batterie-Alterungsstufen kann bereits Hinweise liefern, ob eine Umlaufplanung ggf. nachmodifiziert werden muss.

Verknüpfung der Umläufe

Verfahrensschritt 3 beschreibt die Verknüpfung einzelner Umläufe zu einem betrieblich effizienten Fahrzeugeinsatz. Gleichzeitig gibt er Aufschluss darüber, ob die Umlaufteilung ggf. nachmodifiziert werden sollte, um ein betrieblich effizienteres Gesamtkonzept zu erhalten.

Ziel ist es einen betrieblich effizienten Fahrzeugeinsatz zu generieren. Dabei geht es zum einen darum die Größe der Fahrzeugflotte möglichst minimal zu halten. Zum anderen soll die erforderliche Leistung der Ladeinfrastruktur möglichst geringgehalten werden. Diese beiden Bedingungen stehen zumal eng in Verbindung. Verknüpfte Umläufe müssen möglichst dicht aufeinander folgen, um möglichst wenig Fahrzeuge für den Betrieb zu benötigen. Andererseits müssen die Umläufe so weit wie möglich auseinanderliegen, um längere Zeitzyklen zum Nachladen zu haben und folglich mit einer geringeren Ladestärke die Fahrzeuge laden zu können.

Abbildung 11 stellt die verknüpften Umläufe für einen Freitag während Schulbetrieb beispielhaft in einer Dispositionsansicht dar. Verknüpfte Umläufe, die von einem Fahrzeug betrieben werden, sind in einer Zeile zusammengefasst. Schwarze Balken stellen die zeitlichen Blöcke der Umläufe dar. In Rot sind zeitliche Ladeprozesse bei einer konduktiven Ladung mit 150 kW auf einen SoC von 100% abgebildet. Es zeigt sich, dass zwischen Umläufen größere Ladepausen zur Verfügung stehen und die Ladeenergie gesenkt werden kann.

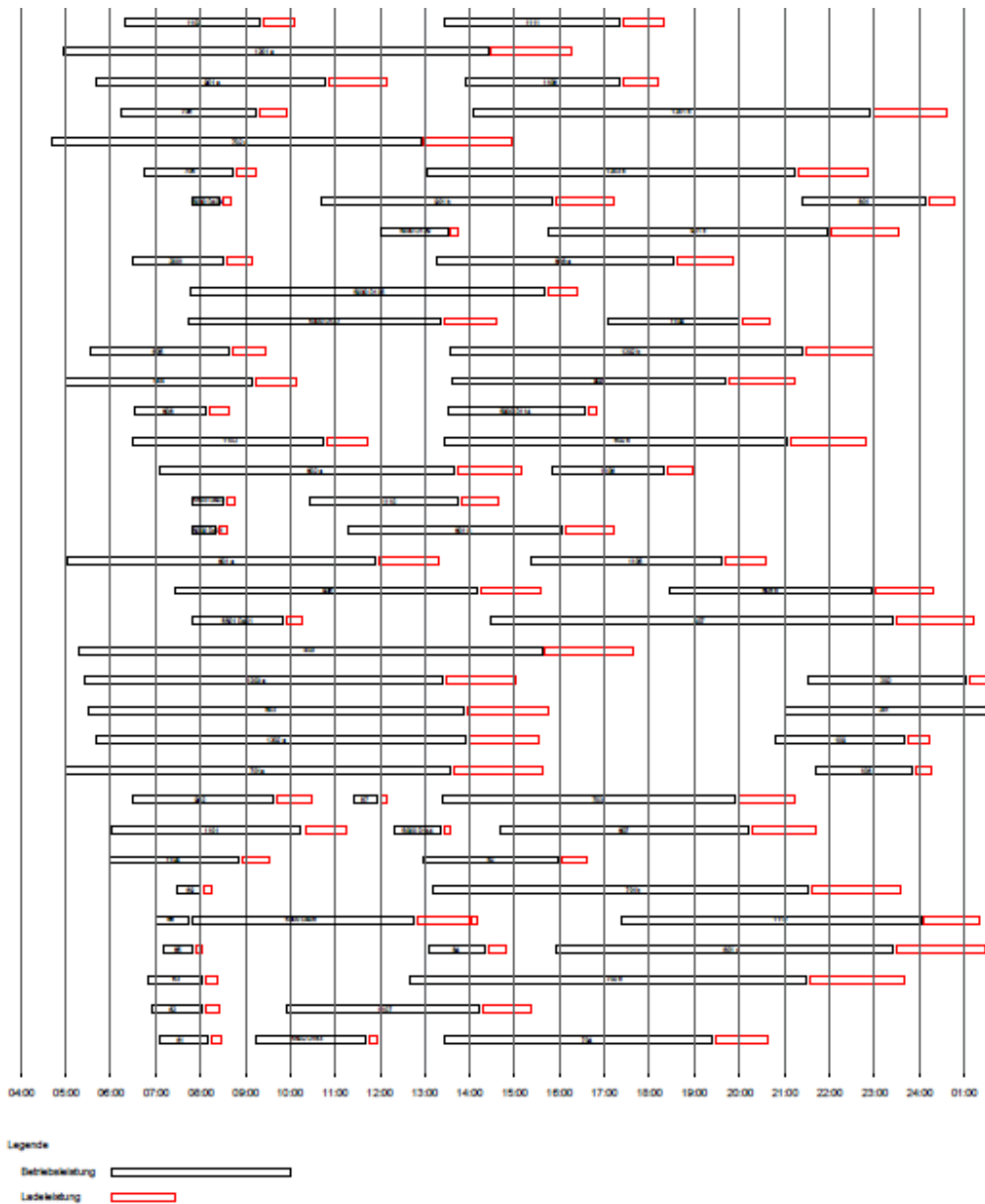


Abbildung 11: Dispositive Übersicht der verknüpften Umläufe (Quelle: eigene Darstellung, ReLUT)

Am Anschluss an die Verknüpfung aller Umläufe gilt es zu prüfen, ob ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Fahrzeuganzahl jeder Batterie-Alterungsstufe besteht oder ggf. einzelne Umläufe angepasst werden müssen. Restriktiv dürfen nicht mehr Fahrzeuge der größten Batterie-Alterungsstufe bestehen.

4.1.2 Automatisierte Umlaufplanung HSB

Tabelle 9 zeigt, dass die Neuplanung von Touren mit einem sehr hohen Aufwand verbunden ist, allerdings auch den bestmöglichen Einsatz von Ressourcen generiert. Eine manuelle Umlaufplanung hat den Nachteil, dass diese für jedes Konzept individuell neu entwickelt werden muss. Gleichzeitig kann über das Projektende hinaus mit der manuellen Umlaufplanung kein nachhaltiger Effekt für sich ändernde Fahrzeugeigenschaften (Bsp. Größere

Reichweiten) im Simulationsmodell gewährleistet werden. Aus diesem Grund wurde das Ziel angestrebt eine automatisierte Neuplanung von Umläufen zu erreichen, die abhängig von sich ändernden Eingangsparametern durch den Modellnutzer jederzeit neu berechnet werden kann.

Methodik automatisierte Umlaufplanung

Voraussetzung für eine Umlaufplanung ist die Analyse und Aufbereitung der Fahrplandaten. Darauf aufbauend lässt sich das Vorgehen formal beschreiben und eine Systematik entwickeln. Diese baut auf dem übergeordneten Vorgehen der manuellen Umlaufplanung auf. Der für eine Neuplanung von Umläufen erforderliche Prozessablauf ist in Abbildung 12 abgebildet.

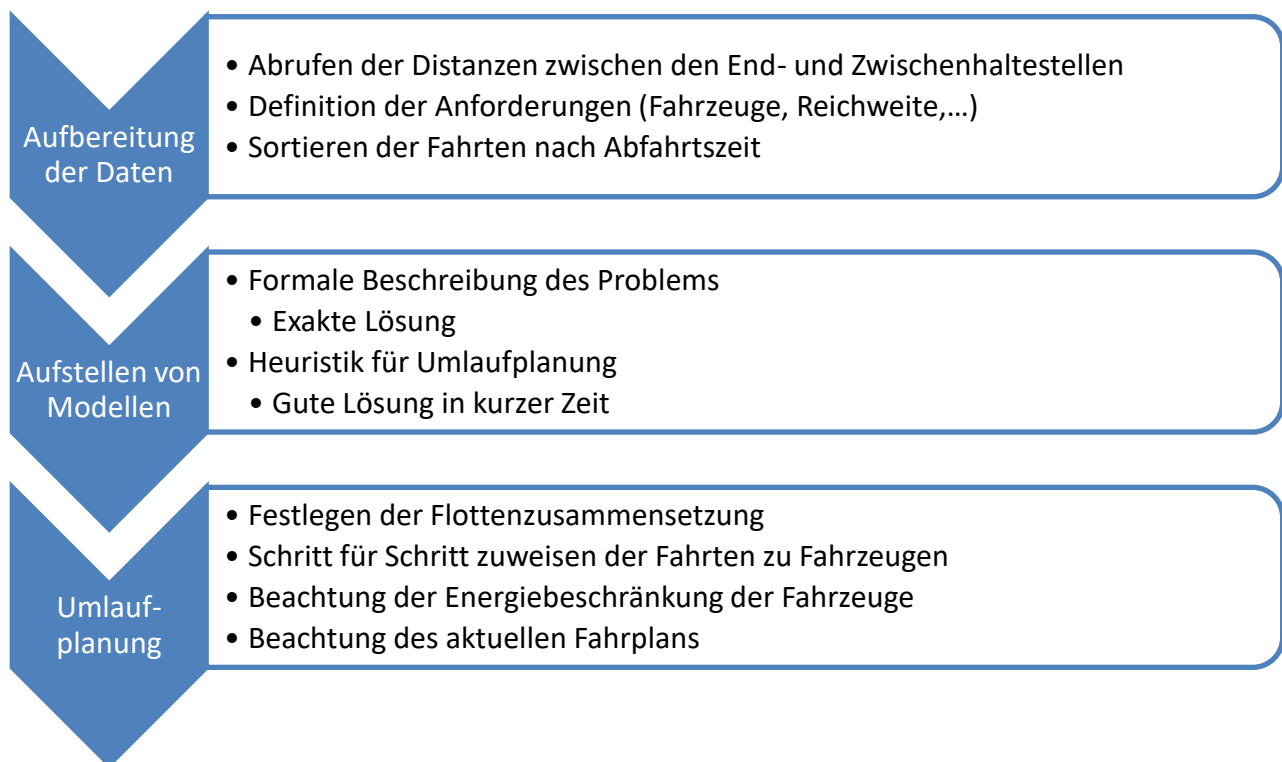


Abbildung 12: Vorgehen für automatisierte Umlauf-Neuplanung (Quelle: SimPlan AG)

Aufbereitung der Daten

Die Aufbereitung der Daten greift zunächst auf Inhalte und Ergebnisse der Ist-Analyse und Soll-Konzepte zurück. Da die Konzeption von Umläufen sich nach den Reichweiten der Fahrzeuge orientiert, sind die Distanzen zwischen den Haltestellen auf einer Linie relevant zuzüglich der jeweiligen Wendeschleifen und Leerfahrten zum Depot. Entsprechend der manuellen Umlaufplanung werden Umläufe nur an Endhaltestellen beendet, da ein Fahrzeugwechsel im Linienverlauf aus Fahrgastperspektive unattraktiv ist. Aus diesem Grund sind nur die Distanzen zwischen den Endhaltestellen zu berücksichtigen. Die einzelnen Fahrten aus dem Fahrplanbuch werden nach der Abfahrtszeit sortiert, um neue Umläufe in Abhängigkeit des Fahrtbeginns zu bilden.

Die für die Umlaufplanung beeinflussenden Eingangsparameter zu den technischen Fahrzeugdetails sind in Kapitel 3 definiert. Ein weiteres wichtiges Kriterium – die Fahrzeugkonstellation – wird bei Simulationsstart vom Modellnutzer vorgegeben. Vergleichbar zur manuellen Umlaufplanung lässt sich für jede Veränderung der Fahrzeuganzahl von BEV eine neue Umlaufplanung konzipieren, da sich hieraus Unterschiede in der Verfügbarkeit der verschiedenen Batterie-Alterungsstufen ergeben können.

Aufstellen von Modellen

Die Problematik und der Umfang einer Umlaufplanung wurden in Prozessschritt 2 zunächst formal beschrieben. Dies ermöglichte den Aufwand der zu beachtenden Kriterien einer Umlaufplanung im Detail aufzuzeigen und die Relation der Kriterien miteinander zu bewerten. Darauf aufbauend konnte eine Heuristik entwickelt werden, die im Rahmen der Projektlaufzeit zügig eine gute Lösung liefert. Die Heuristik baut auf dem Vorgehen der manuellen Umlaufplanung auf. Allerdings werden die Umläufe zudem im Abgleich mit den aktuell verfügbaren Fahrzeugreichweiten sowie des Ladestands der einzelnen Fahrzeuge konzipiert. Umlaufzeiten sowie Umlaufketten zu betrieblich optimalen Dienstlängen und Personaleinsatz in der Heuristik zu integrieren, konnte im Rahmen des Projektes nicht umgesetzt werden. Das Ergebnis liefert dennoch eine sehr gute Grundlage, um die Auswirkungen einer alternativ angetriebenen Fahrzeugflotte im Betriebsablauf der HSB zu bewerten.

Umlaufplanung

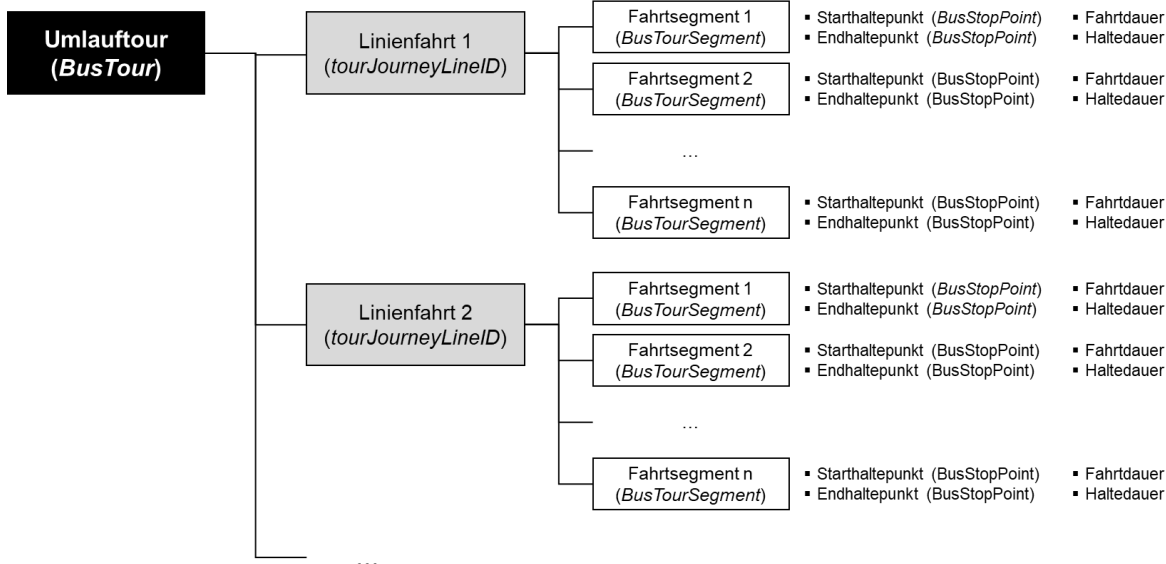


Abbildung 13: Umlauf tour, Linienfahrt und Fahrtsegment (Quelle: SimPlan AG)

Bei der Umlaufplanung wird die zur Konzeption vorliegende Voraussetzung der Flottenkonstellation vom Modellnutzer definiert. Dieser Eingabe stellt gleichzeitig die Konstellation an verfügbaren Fahrzeugen in den unterschiedlichen Batterie-Alterungsstufen fest. Anhand dieser verfügbaren Fahrzeuganzahl erfolgt eine schrittweise Zuweisung der Fahrten zu Fahrzeugen, die zu neuen Umläufen in Abhängigkeit der

Fahrzeugreichweiten, des Fahrplans und des Fahrzeugtyps (Solobus und Gelenkbus) zusammengefasst werden. Zur Reduzierung der Leerkilometer wird ein Umlauf aus Fahrten derselben Linie gebildet, bzw. als Umlaufbildung zu einer Ringlinie.

Die Agentenklasse *BusTour* repräsentiert die Umlauf Touren (vgl. Abbildung 13). Eine Tour besteht aus einer Folge von Linienfahrten, die wiederum aus einer Folge von Fahrtsegmenten bestehen. Der Zusammenhang zwischen Umlauf Touren, Linienfahrten und Fahrtsegmenten wird in Abbildung 13 veranschaulicht.

4.2 Tourenplanung HIS

Ab Spätsommer 2021 führt die HIS einen neuen Abfallkalender mit neuen Touren ein. Diese Touren wurden parallel zur Projektlaufzeit des Forschungsprojektes SimCityNet von einem Dienstleister erstellt. Innerhalb der Projektlaufzeit war es allerdings nicht möglich diese Neutouren im Simulationsmodell zu implementieren, sodass auf die bestehenden Touren zurückgegriffen wurde.

Der Datenbestand der bestehenden Tourenplanung der HIS umfasst bereits zu Touren geclusterte Behälterdatenbanken, für die allerdings keine Route des Fahrzeugs festgelegt ist und eine Sammelfolge der Behälter auch nicht reproduziert werden kann. Es erfolgte keine Neuplanung von Touren, sondern für die einzelnen Touren wurde eine Sammelfolge der zugehörigen Behälter errechnet, um diese im Simulationsmodell abbilden zu können und Tourenlängen berechnen zu können.

Ausgangssituation nach Ist-Analyse

Die für die Tourenplanung der HIS bestehende Ausgangssituation ist in Abbildung 14 dargestellt.

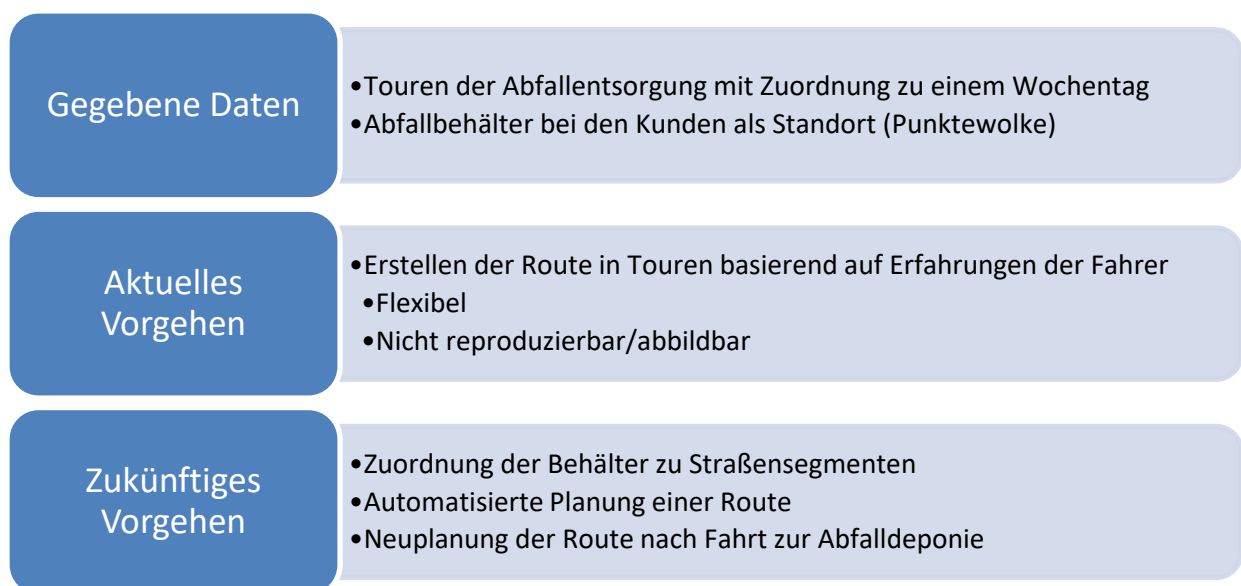


Abbildung 14: Ausgangssituation für die Tourenplanung (Quelle: SimPlan AG)

Gegebene Daten

Aktuelle Touren sind für die jeweiligen Wochentage im Abfallsammelzyklus der HIS definiert. Entsprechend dem Abfallkalender ist festgelegt, welche Fraktion und Behälter an welchem Tag eingesammelt werden. Die Behälterdaten sind als Adresse der Kunden definiert, aus denen sich Standortkoordinaten errechnen lassen und somit eine Punktwolke ermittelt werden kann.

Aktuelles Vorgehen

Aus der Punktwolke lassen sich allerdings keine Behälterreihenfolgen reproduzieren, da jeder Fahrer in der Realität die Touren individuell nach seinen eigenen Erfahrungen fährt. Dies führt dazu, dass sich die Touren nicht ohne weiteres abbilden lassen und im Rahmen des Projektes für jede Tour eine Behälterreihenfolge errechnet wurde.

Zukünftiges Vorgehen

Um zu einem eindeutigen Ergebnis zu kommen und betrieblich flexibel zu sein, wurde die Methodik für eine statische und dynamische Tourenplanung konzipiert. Die statische Tourenplanung ist charakterisiert durch eine automatisierte Berechnung der Touren im Modell vor dem täglichen Betriebsbeginn. Sobald ein Abfallsammelfahrzeug vollgeladen ist, fährt dieses zur Abfallsammelstelle, lädt ab und fährt anschließend zum letzten Straßensegment zurück und sammelt von dort an weiter. Die dynamische Tourenplanung erweitert die statische Tourenplanung, indem nach dem Abladeprozess an der Abfallsammelstelle von diesem Standort eine neue Berechnung der restlichen Tour beginnt und so Leerkilometer eingespart werden.

Methodik Tourenplanung

Sowohl für die statische als auch dynamische Tourenplanung hat sich das Vorgehen nach Abbildung 15 bewährt. Aufbauend auf eine umfassende Datenaufbereitung wurde eine Heuristik entwickelt, die im Rahmen der Projektlaufzeit ein gutes Ergebnis für die aktuellen Touren der HIS liefert.

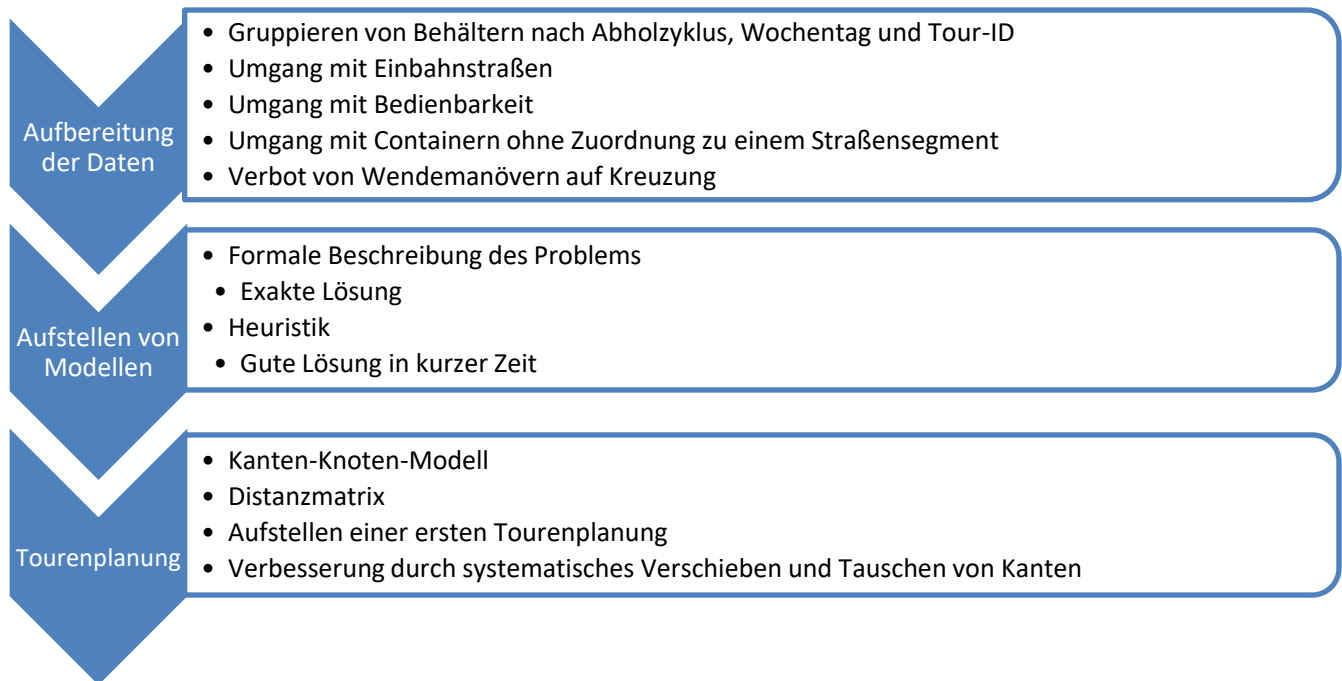


Abbildung 15: Vorgehen für Tourenplanung (Quelle: SimPlan AG)

Aufbereitung der Daten

Die Aufbereitung der Daten baut auf der Ist-Analyse (vgl. Kapitel 2) auf und clustert die Behälterdatenbank abhängig der Fraktion, dem Abholzyklus, Wochentag und Tour-ID in einzelne Touren. Für jeden Behälter ist eine Adresse hinterlegt, die mittels einer Koordinate einem Straßensegment zugeordnet wird. Grundlage für diese Zuordnung stellt ein auf GIS-Daten beruhendes Kanten-Knoten-Modell des Stadtgebiets dar (siehe Abbildung 16). Die in Abbildung 16 visualisierten blauen Punkte stellen die Knoten dar, zwischen denen beispielhaft für einen Knoten (Node-ID 4053009) in Rot gestrichelten Linien Kanten mit zugehöriger ID definiert sind. Die Koordinaten der Behälter-Adressen sind mit der nächstgelegenen Kante verschnitten, sodass für jeden Behälter eine eindeutige Standortkoordinate definiert ist. Neben der Identifizierung eindeutiger Behälterstandorte stellt das Kanten-Knoten-Modell die Voraussetzung, um Fahrtrouten der Fahrzeuge zu berechnen und im Mapping-Modus des Simulationsmodells visuell abzubilden.

Vereinzelt konnten Behälter mit keiner Kante verschnitten werden, da kurvige Straßenverläufe oder Sackgassen in Wohngebieten o.ä. nicht entlang der realen Straßenführung verlaufen, sondern die kürzeste Punkt-zu-Punkt-Verbindung ermittelt wird, sodass manuell nachgesteuert und zusätzliche Knoten integriert wurden, um eine kurvige Straße realer abzubilden (vgl. Nordstraße in Abbildung 16).

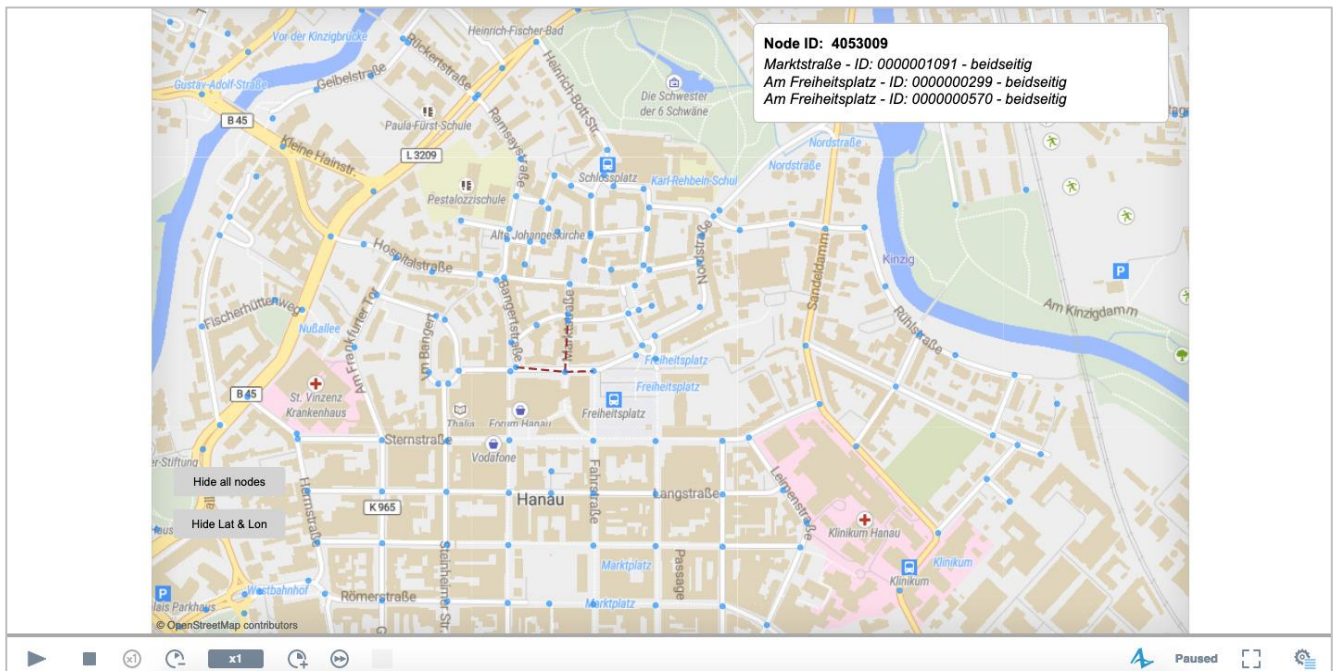


Abbildung 16: Ausschnitt des Kanten-Knoten-Modells von Hanau (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Die Berechnung von Fahrtrouten unterliegt dabei zunächst weiteren Restriktionen. Hierzu ist definiert, wie sich das Abfallsammelfahrzeug bei unterschiedlichen Ereignissen im Sammelprozess verhalten soll. Für jede Straße ist daher definiert, ob das Sammelteam beim einmaligen Durchfahren einer Straße die Behälter beidseitig einsammeln kann oder die Straßenführung dies verhindert und die Straße folglich aus beiden Fahrrichtungen befahren werden muss. Die Restriktion für Einbahnstraßen ist bereits in den OpenStreetMap-Daten definiert, die die Kartengrundlage im Simulationsmodell liefert.

Ein 180-Grad-Wendemanöver an einem Knoten wurde dem Modell verboten, da dies der Wendekreis eines typischen Abfallsammelfahrzeugs im Regelfall nicht ermöglicht.

Aufstellen von Modellen

Vergleichbar zur Umlaufplanung erfolgte für die Tourenplanung eine formale Beschreibung der Problematik. Die Beschreibung der Problematik sowie die bei der Datenaufbereitung definierten Kriterien liefern die Voraussetzung, um anschließend eine Heuristik zu entwickeln, die im Rahmen der Projektlaufzeit und unter Anbetracht, dass die Touren nicht dauerhaft in Hanau betrieben werden zu einer schnellen Lösung führt.

Tourenplanung

Für die Tourenplanung wurden mittels einer Distanzmatrix die Distanzen zwischen den Behälterstandorten ermittelt. Mittels TSP-Algorithmus (Traveling Salesman Problem) wird immer der nächstgelegene Behälterstandort berechnet, um so eine Behälterreihenfolge zu definieren.

Die Distanzmatrix ist Voraussetzung für die Tourenplanung. Auf Grund der großen Datensätze ist die Erstellung der Distanzmatrix allerdings nicht ohne weiteres möglich, sodass die Möglichkeiten der Routenabfragen reduziert wurde. Mittels zwei Annahmen lässt sich die Routenabfrage reduzieren, um für den Modellnutzer ein angemessenes Ergebnis zu liefern. Diese Annahmen beinhalten einerseits, dass die Distanz A zu B auch der Distanz von B zu A entspricht und andererseits eine Straße immer komplett bis zum Schluss gesammelt wird. Demnach zeigt das Kanten-Knoten-Modell dem Algorithmus, welche Möglichkeiten das Fahrzeug hat am Ende einer Straße weiterzufahren.

5 Modellaufbau

Der digitale Zwilling ist mit der Multi-Methoden-Simulationssoftware AnyLogic erstellt. AnyLogic verbindet verschiedene Simulationsmethoden (System dynamics, agent-based und discrete event), die sich in einem Modell beliebig kombinieren lassen. Gleichzeitig bietet AnyLogic industriespezifische Bibliotheken an, die die Modellierung vereinfachen. Neben der Road Traffic Library, mit der sich speziell Fahrzeug- Busbewegungen in Straßen modellieren lassen, bietet AnyLogic folgende branchenspezifischen Bibliotheken an – Process Modeling Library, Fluid Library, Rail Library, Pedestrian Library und Material Handling Library (The AnyLogic Company, 2021). Neben dem Modell-Ergebnis in der Entwicklungsoberfläche wird das Modell als eine ausführbare Standalone Java-Applikation aufbereitet, die keine Softwarelizenz für die Nutzung erfordert und den Projektpartnern eine Möglichkeit der Nutzung des Modells über die Projektlaufzeit hinaus bietet.

Szenarienparameter

Tabelle 11: Szenarienparameter Simulationsmodelle (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Szenarienparameter	
Ladeinfrastruktur BEV	<ul style="list-style-type: none"> • Standort • Anzahl Ladepunkte • Max. Ladeleistung pro Ladepunkt • Max. Gesamtnetzlast auf Betriebshof
Ladeinfrastruktur FCEV	<ul style="list-style-type: none"> • Standort • Anzahl Tankstationen
Fahrzeugflotte	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl Fahrzeuge nach Energieart und Fahrzeugtyp • Max. Reichweite pro Fahrzeug • Für BEV: Max. Batteriekapazität • Für FCEV: Max. Tankinhalt • Energieverbrauch Fahrt • Energieverbrauch Nebenverbraucher • Für BEV: Ladekurve • Für FCEV: Verlauf des Tankvorgangs • Schwellenwerte für Laden/Tanken (Ladestrategie)
Temperatureinfluss	<ul style="list-style-type: none"> • Zusätzlicher Energieverbrauch in Abhängigkeit der Außentemperatur
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionskosten Fahrzeuge • Investitionskosten Lade-/Tankinfrastruktur • Betriebskosten Energieträger • Betriebskosten Wartung
Umweltauswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Lokale Emissionen • Life-Cycle-Assessment

Die in Kapitel 3 definierten Kriterien für die Soll-Konzepte müssen im Modell parametrisierbar sein und sind in Tabelle 11 aufgelistet. Diese werden in einer Excel-Datei hinterlegt, die mit der internen AnyLogic-Datenbank verknüpft ist. Bei jedem Modellstart wird diese Excel-Datei neu eingelesen, sodass weitere Fahrzeugmodelle bei Bedarf ergänzt werden können. Zusätzlich kann der Modellnutzer im Eingabefenster der Simulation die Szenarienparameter manuell modifizieren (vgl. Abbildung 17).

Betriebsdaten

Die Betriebsdaten bilden die Simulationsgrundlage zur Durchführung der verschiedenen Soll-Szenarien. Sie beinhalten die Datenbank der aktuell genutzten Dispositionssoftware. Für die HSB werden dabei folgende Daten aus der init MOBILE PLAN Datenbank erhoben, die zur Verknüpfung mit der AnyLogic-Datenbank ebenfalls in Excel-Dateien aufbereitet sind:

- Haltepunkte (inkl. Koordinaten und Haltedauer)
- Fahrplan (inkl. Reihenfolge und Abfahrtszeiten der abzufahrenden Haltepunkte der einzelnen Linien; Distanz zwischen Haltepunkten)
- Umlaufplanung (inkl. Start- und Endzeit; Gesamtdistanz; Anforderung an Fahrzeugtyp, Wochentag)

Für die HIS sind folgende Betriebsdaten mit dem Simulationsmodell verknüpft.

- Fraktion und Abhol-Zyklus für die einzelnen Touren
- Anzahl, Volumen und Standort der zu leerenden Behälter in einer Tour

Implementierung der Datenstruktur

Der Daten-Workflow im Simulationsmodell ist beispielhaft für die HIS in Abbildung 17 dargestellt. Sowohl die Szenarienparameter als auch Betriebsdaten liefern die Grundlage für die Parametrisierung der Simulation. Bei der Eingabe der Szenarienparameter müssen in der Excel-Konfigurationsdatei zunächst die relevanten Auswahlmöglichkeiten für die Simulation definiert werden. Formuliert werden spezielle Fahrzeugmodelle, Antriebstechnologien, Ladeinfrastrukturen, Ladeverhalten sowie Wirtschaftlichkeits- und Umweltfaktoren nach den Kriterien aus Tabelle 11. Die für ein Szenario definierte Parametrisierung der Szenarienparameter (Bsp. Anzahl der formulierten Fahrzeugmodelle im Szenario etc.) erfolgt anschließend durch den Nutzer in der Simulations-Eingabemaske (GUI).

Die in der Ist-Analyse erhobenen Betriebsdaten für die Behälterdatenbank wurden in einer gemeinsamen Excel-Datei zusammengefasst und liefern nach erforderlicher Datenaufbereitung (Ermittlung der Behälterstandortkoordinaten) die Grundlage für die Tourenplanung (vgl. Kapitel 4.2) zu Simulationsbeginn.

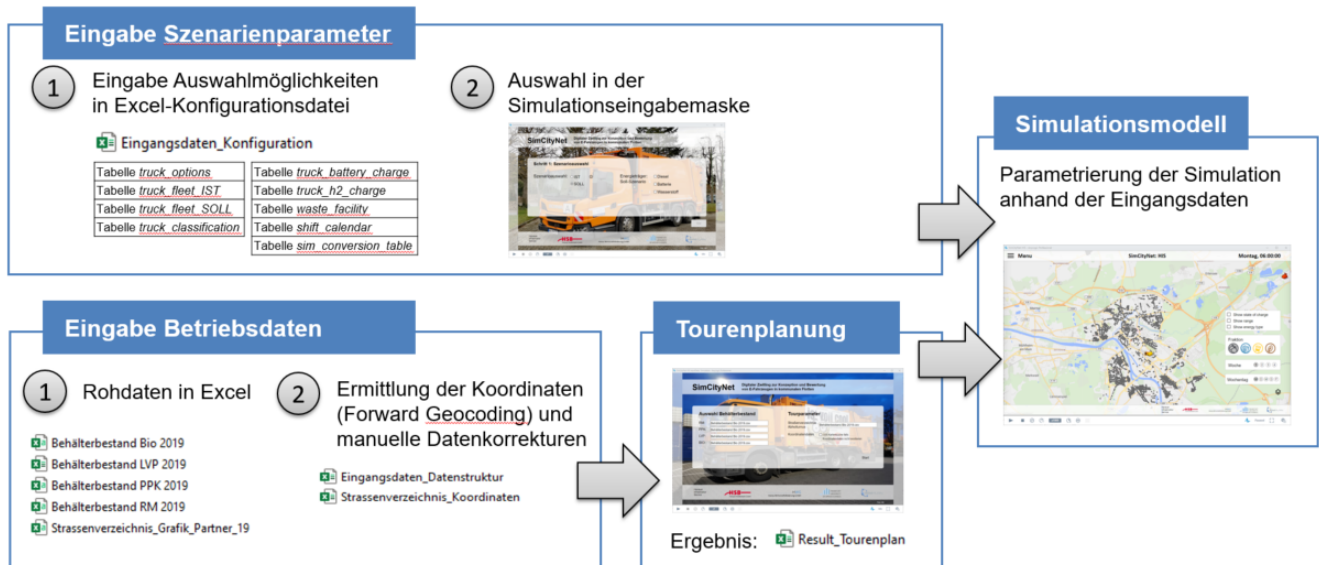


Abbildung 17: Workflow Dateneingabe HIS (Quelle: SimPlan AG)

Zur Darstellung des Workflows im Simulationsmodell der HSB kann ebenfalls Abbildung 17 herangezogen werden. Statt Behälterdaten werden die Betriebsdaten aus der init-Software eingelesen und im Zwischenschritt erfolgt bei Simulationsstart statt einer Tourenplanung die (teil-) automatisierte Umlaufplanung.

Simulationseingabemaske

Über die Simulationsmaske kann der Modellnutzer die definierten Kriterien parametrisieren und so Szenarien zusammenstellen. Diese öffnet sich zu Simulationsstart und führt den Nutzer durch die Szenariodefinition. Zunächst muss der Nutzer festlegen, ob der Ist-Ablauf mit konventionellen Antrieben simuliert werden soll (vgl. Abbildung 18) oder ein zukünftiges Szenario der Soll-Konzepte mit verschiedenen Antriebstechnologien abgebildet werden soll.

Anschließend muss der Modell-Nutzer eingegeben mit welcher Fahrzeuganzahl pro Antriebstechnologie (für die HSB zusätzlich welcher Fahrzeugtyp – Solo-/Gelenkbus) simuliert wird und für die HIS zusätzlich für welche Abfallfraktionen diese Fahrzeuge eingesetzt werden.

Im nächsten Schritt wird die Größe der Lade- und Tankinfrastruktur definiert durch Anzahl der Ladepunkte, max. Ladeleistung pro Ladepunkt, Gesamt-Netzlast auf dem Betriebshof und Grenzwerte für eine eingeschränkte Ladestrategie.

Speziell für die HIS lassen sich zudem noch sonstige Parameter definieren, wie Prozesszeiten bei der Behältersammlung, Verhältnis von Sammelbetrieb zu normalen Fahrten in Touren, aber auch die Methode der Tourenplanung (statistisch/dynamisch). Letzteres Auswahlkriterium gilt auch für die HSB in Form der Auswahl über Ist-Umlaufplanung, manuelle Umlaufplanung und (teil-)automatisierte Umlaufplanung.

Im letzten Schritt vor Simulationsstart kann der Nutzer auswählen, ob anhand vordefinierter Temperaturbereiche ein zusätzlicher Verbrauch für die Fahrzeugbeheizung mitberechnet wird und in welcher Form die Ergebnisse exportiert und gespeichert (Datenbank/Excel-Dateivorlage) werden.



Abbildung 18: Simulationseingabemaske (Quelle: eigene Aufnahme ReLUT)

Modellierung

Visualisierung in interaktiver Karte

Mit Start der Simulationsdurchführung im Anschluss an die Parametrisierung der Eingangsparameter durch den Modellnutzer erfolgt die Visualisierung mittels einer interaktiven Karte, welche OpenStreetMap-Kartenmaterial als Datengrundlage beinhaltet (vgl. Abbildung 19). In dieser werden die Bewegungen der Fahrzeuge und Haltestellen für die HSB bzw. Behälterstandorte für die HIS dargestellt. Diese Visualisierungsansicht ermöglicht dem Modellnutzer eine intuitive Beobachtung und Bewertung der betrieblichen Prozesse einzelner Fahrzeuge. Die Übersicht bietet dem Nutzer zudem Einsicht in den betrieblichen Status einzelner Fahrzeuge (Antriebstechnologie, Ladestand/Tankstand sowie Reichweite des Fahrzeugs). Die in der Eingabemaske definierte Flotte kann in der Visualisierungsebene anhand der Antriebstechnologie farblich dargestellt werden. Die Zuordnung eines Fahrzeugs zu einem Umlauf erfolgt entsprechend des Lade-/Tankstands des Fahrzeugs (visualisiert in Form eines Ladebalkens neben dem Fahrzeug incl. noch ausstehender Reichweite) sowie der Streckenlänge des Umlaufs/der Sammeltour. Die Fahrzeuge lassen sich interaktiv auswählen und geben Auskunft über die eingesetzte Linie (vgl. Abbildung 19).

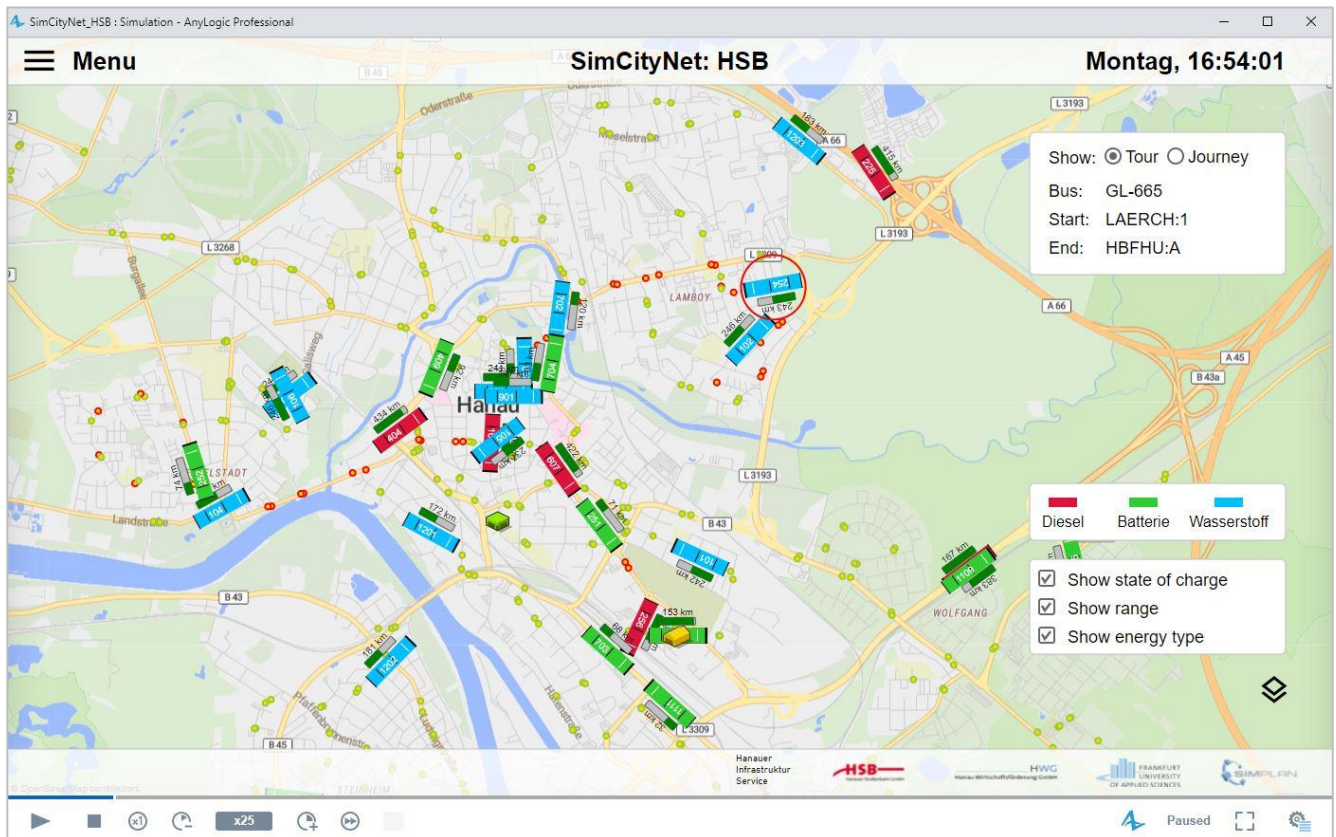


Abbildung 19: Visualisierung in interaktiver Karte (Quelle: eigene Aufnahme ReLUT)

Visualisierung Auslastung der Fahrzeugflotte

Neben der Visualisierungsebene über Kartenmaterial lassen sich zusätzlich Betriebsprozesse zur Ladeinfrastruktur und Fahrzeugflotte im zeitlichen Verlauf überwachen. Abbildung 20 gibt einen Überblick über die Auslastung der Fahrzeugflotte. Es wird dargestellt, welches Fahrzeuge welchen Umlauf/Tour aktuell bedient. Gleichzeitig wird der Fahrzeugeinsatz visuell dargestellt. In Abhängigkeit der Flottengröße lässt sich der Anteil an Fahrzeugen ablesen, die zur gegenwärtigen Zeit während des Simulationsdurchlaufs sich im Fahrbetrieb befinden, im Depot für den Einsatz bereitstehen, aktuell im Ladeprozess befinden und ggf. bei zu geringer Anzahl an Ladestationen im Vergleich zur Anzahl BEV auf einen freien Ladepunkt warten.

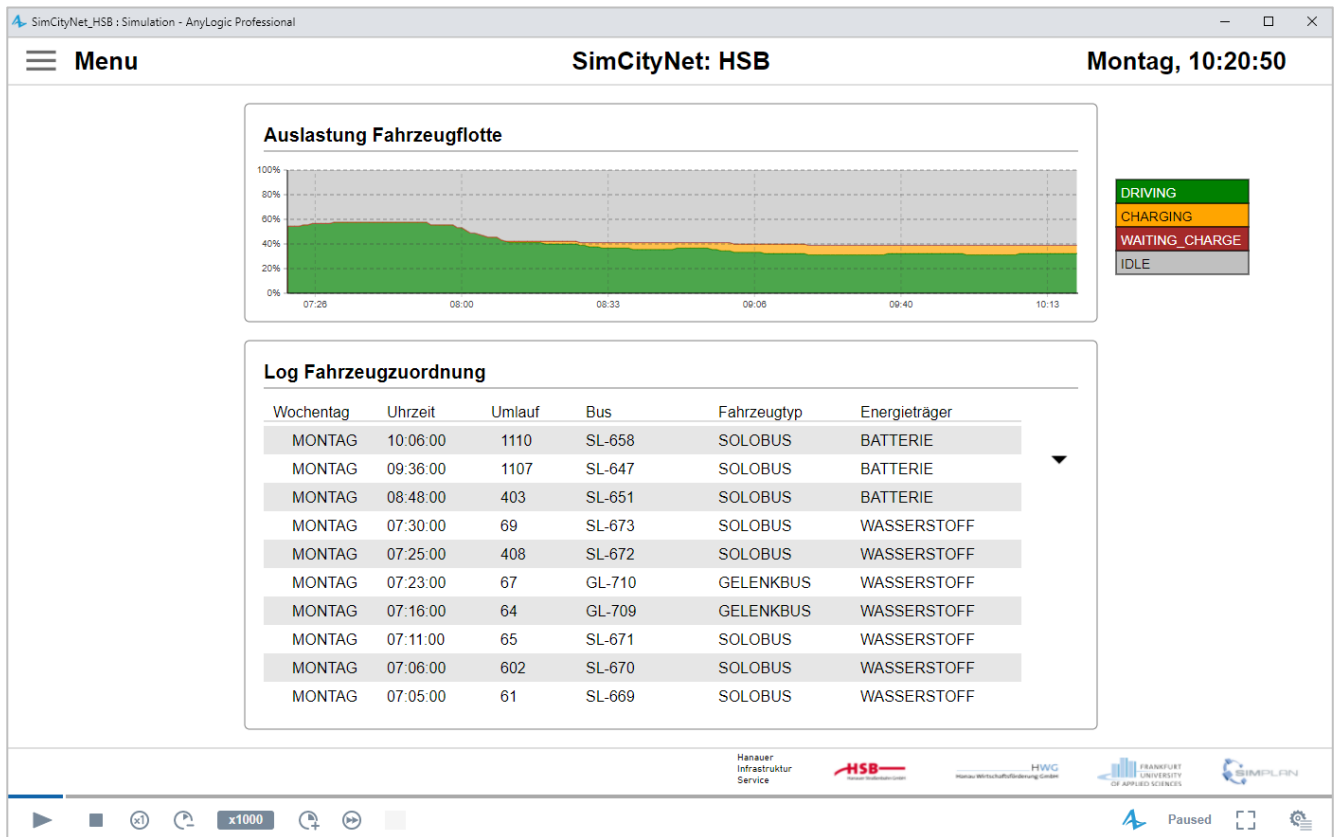


Abbildung 20: Visualisierung Auslastung Fahrzeugflotte (Quelle: eigene Aufnahme ReLUT)

Visualisierung Fahrzeugeinsatz

Der vorangehend beschriebene Prozess zur Visualisierung der gesamten Flotte, lässt sich individuell auch für die einzelnen Fahrzeuge überwachen (vgl. Abbildung 21). Aufgeteilt nach Fahrzeugtyp (Solo-/Gelenkbus) ist der tägliche Betriebsstand der einzelnen Fahrzeuge im zeitlichen Verlauf dargestellt. Für einzelne Fahrzeuge lassen sich somit Fahrzeugverfügbarkeiten ermitteln, sowie vor allem auch die zeitliche Inanspruchnahme im Anschluss an die Betriebsfahrt für den Ladeprozess der Batterie. Sofern die Anzahl von Ladepunkten im Depot signifikant kleiner als die Flottengröße von BEV ist, lässt sich in Abbildung 21 zudem auch die Überlastung der Ladeinfrastruktur erkennen (Fahrzeugbetriebsstand „rot“). Überschüssige, zu ladende Fahrzeuge würden auf „hold“ gestellt und müssten warten bis ein belegter Ladepunkt frei wird.

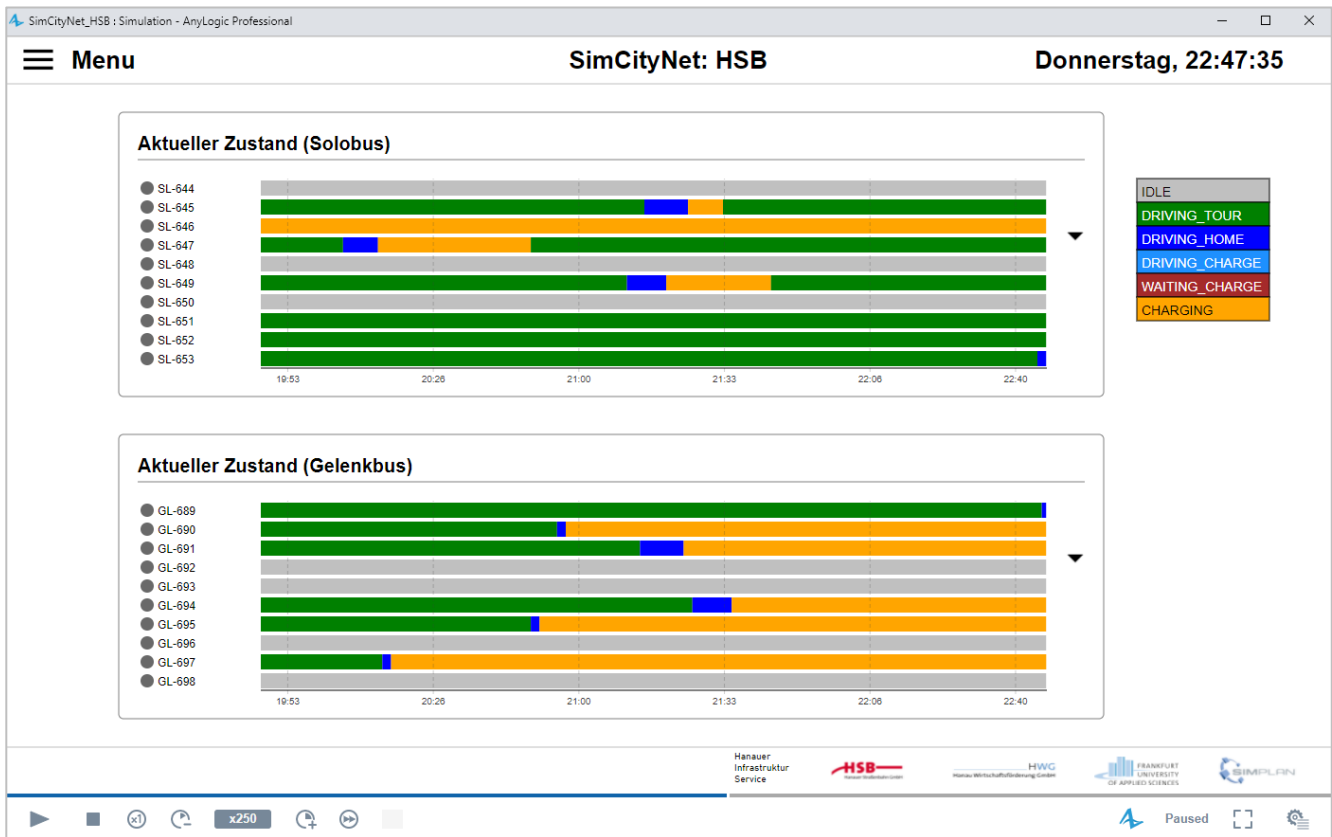


Abbildung 21: Visualisierung Fahrzeugeinsatz (Quelle: eigene Aufnahme ReLUT)

Visualisierung Energiemenge pro Tank-/Ladevorgang

Mittels Abbildung 22 kann die tägliche Lademenge/Tankmenge ermittelt werden. Dargestellt wird wie viele Kilowattstunden Strom, Liter Diesel oder Kilogramm Wasserstoff in den einzelnen Lade- bzw. Tankprozessen bezogen werden. Demnach lässt sich gleichermaßen die Gesamtenergiemenge am Tag ablesen. Zusätzlich bietet die Visualisierung die Möglichkeit zu analysieren, welche Lade-/Tankmenge am häufigsten bezogen wird und schlüsselt somit auch nochmal das Verhältnis von kürzeren zu längeren Umläufen auf.

Der tägliche Vergleich lässt sich, allerdings nur analysieren, wenn die Ladestrategie vorgibt, dass alle Fahrzeuge am Ende des Umlaufes/der Tour wieder vollgeladen werden. Bei abweichender Strategie, bei der Fahrzeuge nur geladen werden, wenn der SoC am Ende eines Umlaufs/ einer Tour bspw. unter 50% liegt, verschieben sich diese Ladezyklen im wöchentlichen Verlauf und bieten somit nur eine Vergleichbarkeit über längere zeitliche Perioden.

Die Ladestrategie stellt demnach auch die Voraussetzung für den Lade-/Tankbedarf. Umso niedriger der untere Schwellenwert für das erforderliche Laden/Tanken ist, umso größer wird der Bedarf an zu beziehender Energiemenge. Der Algorithmus greift bei der Disposition von Fahrzeugen zu Umläufen zunächst auf den verfügbaren Fahrzeugbestand alternativ angetriebener Fahrzeuge zurück, sodass Abbildung 22 trotz eines Mix

aus Diesel, BEV und FCEV bei hoher Anzahl an alternativ angetriebenen Fahrzeugen kein Bedarf an Diesel besteht (vgl. Abbildung 22).

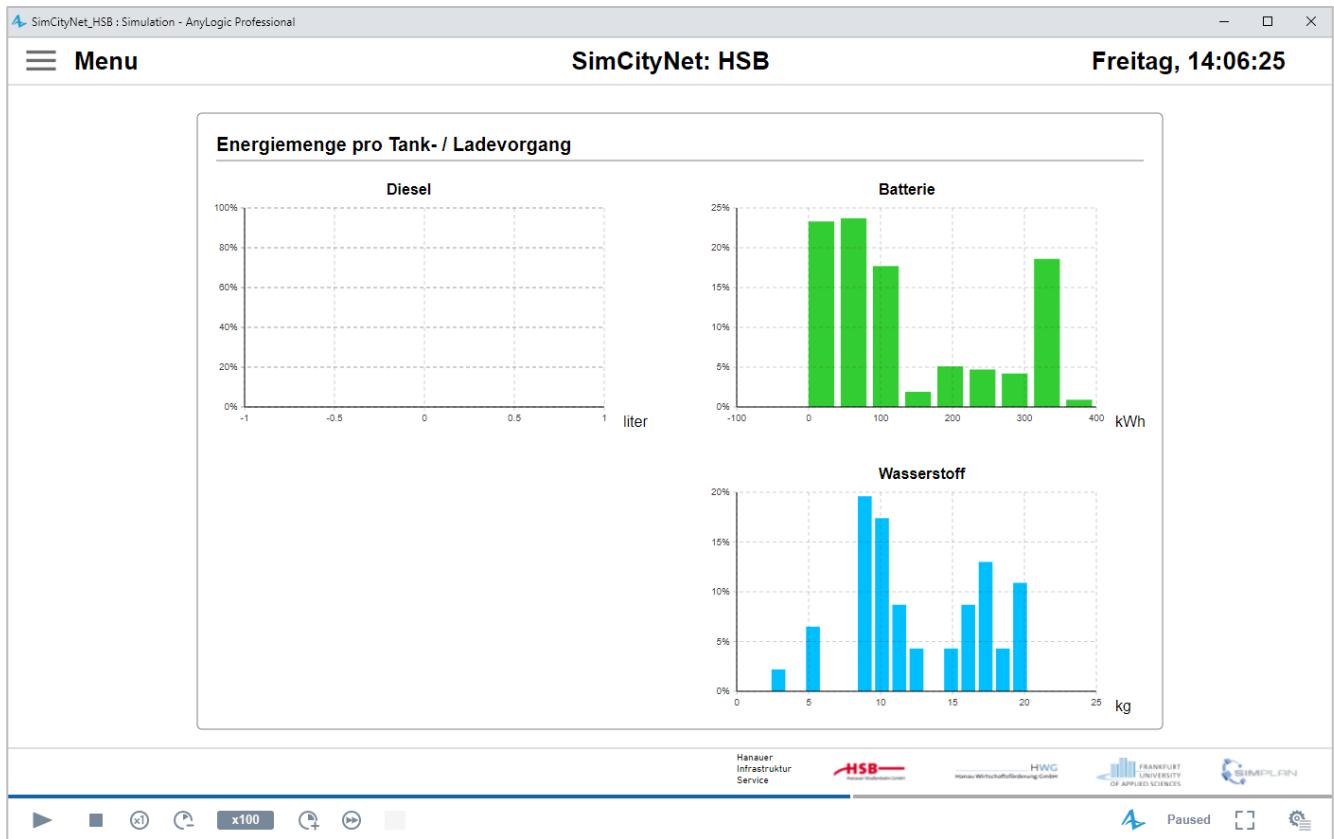


Abbildung 22: Visualisierung Energiemenge pro Tank-/Ladevorgang (Quelle: eigene Aufnahme ReLUT)

Ausgangsdaten

Der Simulationszeitraum legt den Rahmen der Analyse fest, um eine Aussage hinsichtlich der Betriebstauglichkeit verschiedener Szenarien geben zu können. Bei der HSB muss daher der Betrieb einer gesamten Woche simuliert werden, damit eine Durchführbarkeit der Umlaufplanung bewertet werden kann. Die Simulation der betrieblichen Tagesspitzenleistung könnte trotz fehlerfreien Simulationsdurchlaufs an einem anderen Tag auf Grund weniger, aber längeren Umläufen zu einem Simulationsfehler führen. Die Betriebswoche der HSB bildet dabei einen Simulationszeitraum während dem Schulbetrieb ab.

Für die HIS wird entsprechend dem Abfallkalender in Hanau ein 4-Wochen-Zyklus simuliert. Der Abfallkalender gibt eine Übersicht an welchen Tagen im Monat die verschiedenen Abfall-Fraktionen in den einzelnen Stadtbezirken eingesammelt werden. Jede Adresse ist einem jeweiligen Stadtbezirk zugeordnet. Die Abfallsammelbehälter der vier Fraktionen (Restmüll, Papier/Pappe/Kartonage-Müll, Bioabfall und Leichtverpackungen) werden unterschiedlich im wöchentlichen sowie 2- bzw. 4-Wochen-Zyklus gesammelt,

sodass als Simulationszeitraum vier Wochen abgebildet werden müssen, um den gesamten Betriebsablauf der HIS bewerten zu können (Stadt Hanau , 2021).

Die im Modell visualisierten Statistiken werden protokolliert, können als Datensätze exportiert werden und dienen der anschließenden Auswertung. Im Detail lassen sich verschiedene Kenngrößen im System protokollieren, die folgende Daten zur Analyse beinhalten:

- Auslastung der Ladeinfrastruktur (pro Ladestation/Gesamt)
- Auslastung der Fahrzeugflotte
- Ladezustand der Fahrzeugflotte
- Gesamtenergiebedarf pro Energieträger (pro Fahrzeug/Gesamtflotte)
- Gesamtenergieverbrauch pro Energieträger (pro Fahrzeug/Gesamtflotte)
- Zusätzliche Fahrstrecke zur Ladestation

Die Daten werden nach Simulationsdurchlauf in eine Excel-Datei bzw. in eine externe SQL-Datenbankdatei exportiert. Der Modellnutzer muss in der Simulationseingabe-Maske bereits festlegen, wie die Daten im Anschluss exportiert werden sollen (vgl. Abbildung 23). Für die weitere graphische Auswertung der Daten wurde die von der SimPlan AG entwickelte Software SimAssist genutzt.

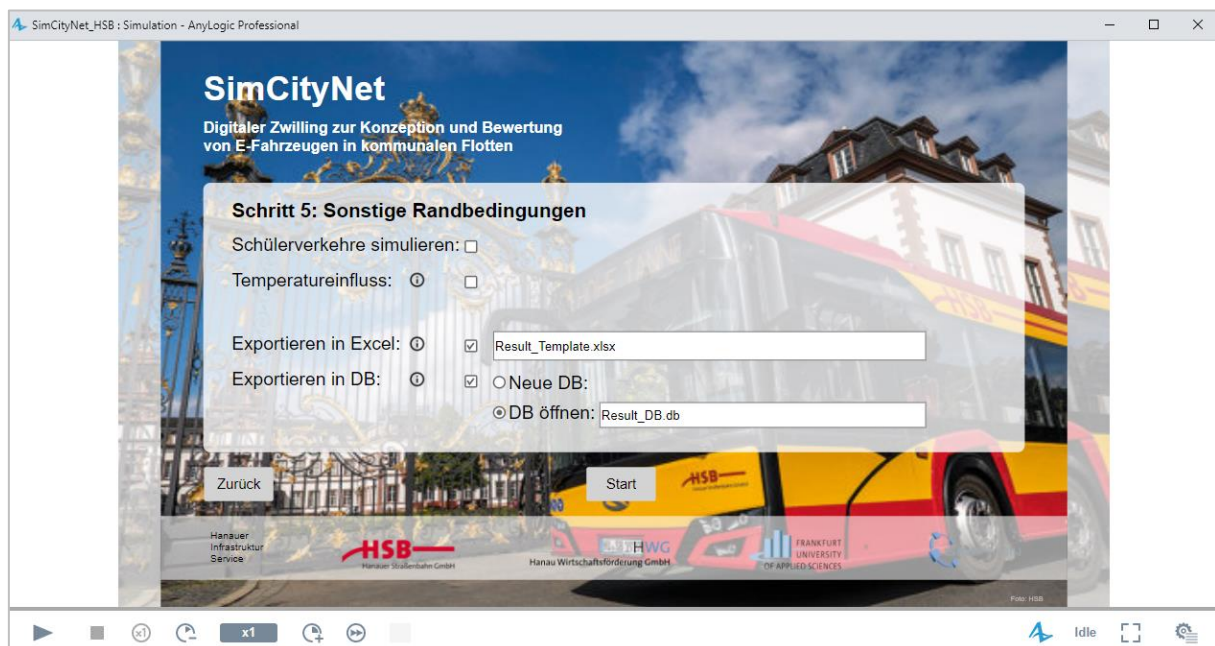


Abbildung 23: Exportieren der Daten (Quelle: eigene Aufnahme ReLUT)

6 Ergebnisse

Die Durchführung relevanter Simulationsszenarien wurde mit der HSB und HIS in Workshops abgestimmt. Die sich ableitenden Ergebnisse wurden anschließend in weiteren Workshops mit den Praxispartnern diskutiert und ausgewählte Folgeszenarien definiert.

Aus diesem iterativen Prozess leiteten sich verschiedene Experimentmatrizen ab. In einer Experimentmatrix sind die einzelnen Simulationsdurchläufe gelistet, mit der gewählten Parametrisierung der Eingangsdaten durch den Nutzer und der letztlich durch die Simulation ausgegebenen Betriebstauglichkeit des Experiments.

Zur weiteren graphischen Auswertung der Simulationsergebnisse wurde die Software SimAssist der SimPlan AG gewählt, die folgende Analyse-Funktionen anbietet:

- Anbindung der auszuwertenden Daten über eine Datenbank
- Einsehen, Verändern, Aufbereiten, Verwalten der Daten
- Auswertung der Daten mit unterschiedlichsten Funktionen
- Aufbereitung der Ergebnisse der Auswertung
- Dokumentation der gesamten Auswertung und der verwendeten Daten (SimPlan AG, 2021).

6.1 Ergebnisse HSB

6.1.1 Flotte bestehend aus einer Antriebstechnologie

Die HSB setzt in Ihrer Strategie für den Flottenausbau mit alternativ angetriebenen Fahrzeugen auf BEV und FCEV. Es werden dabei sowohl der Ausbau einer reinen Flotte mit nur einer Antriebstechnologie simuliert, als auch die Umstellung auf einen Mix beider Antriebstechnologien. In Tabelle 12 ist die Umstellung auf eine gesamte Flotte aus BEV bzw. FCEV dargestellt.

Aufbau Experimentmatrix

Jede Zeile in Tabelle 12 stellt einen eigenständigen Simulationsdurchlauf dar, der sich durch mindestens ein Parameter von den anderen Zeilen unterscheidet. Farblich grün hinterlegte Zeilen bilden dabei ein Experiment ab, welches den Betrieb vollständig simulieren konnte und demnach als betriebstauglich eingestuft werden kann (Status = OK). Farblich gelb hinterlegte Zeilen haben bei der Simulation zu einem Fehler geführt und die Simulation vorzeitig abgebrochen (Status = Fehler). Gründe können hierbei verschiedenste Ursachen haben, wie z.B. zu geringe Reichweite der Fahrzeuge, zu geringe Anzahl an Fahrzeugen, zu geringer Ladestand auf Grund der gewählten Ladestrategie oder weiteres.

Die Spalten zu den Antriebstechnologien (Diesel, Batterie, Wasserstoff) geben an mit wie vielen Fahrzeugen des jeweiligen Energieträgers simuliert wurde. Der Prozentwert zeigt den Anteil der Fahrzeuge mit der zugehörigen Antriebstechnologie im Verhältnis zur Gesamtanzahl der Fahrzeugflotte.

Experimentgruppen

Die Tabelle lässt sich in verschiedene Experimentgruppen gliedern, die ein ähnliches Simulationsszenario zeigen und detailliert innerhalb der Gruppe analysiert werden muss. Experiment-Group A (=Exp. ID 0-3) bildet Experimente einer reinen Flotte mit Brennstoffzellenfahrzeugen ab. Exp-Group B stellt dieser den Ist-Zustand mit einer reinen Diesel-Fahrzeug-Flotte gegenüber. Exp-Group C-F zeigen Szenarien mit batterieelektrischen Fahrzeugen, die sich zum einen durch die Fahrzeugmodelle BEV Typ I (Exp-Group C und D) und BEV Typ II (Exp-Group E und F) unterscheiden und zum anderen durch die Simulation von Experimenten eines Frühlingsmonats mit Normalverbrauch (Exp-Group C und E) und der Simulation eines Wintermonats mit einem Zusatzverbrauch für die Beheizung des Fahrgastinnenraums (Exp-Group D und F).

Ist-Szenario

Die Exp-Group B stellt das Ist-Szenario dar und sorgt für die Vergleichbarkeit des Betriebsablaufs zwischen dem Status Quo und zukünftigen potenziellen Betriebskonzepten.

Tabelle 12: Experimentmatrix mit reiner Flotte aus einer Antriebstechnologie HSB (Quelle: SimPlan AG)

Exp Group	Exp ID	Szenario	Anzahl Gesamt	Diesel			Batterie			Wasserstoff			Umlaufplanung	Batterie	Ladeparameter Batterie						Ladeparameter Wasserstoff			Schülerverkehr	Zusatzverbrauch Temperatur	Status					
				%	Gesamt	SL	GL	%	Gesamt	SL	GL	%			Gesamt	SL	GL	Fzg-Modell	Anzahl [%]	Anzahl	Leistung	Gesamt	Muss-Laden				Laden-bis	Anzahl	Muss-Laden	Laden-bis	
A	0	SOLL	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100%	64	38	26	Bestehende	-	-	-	-	-	-	-	1	0,5	1	ohne	keine	OK	
	1	SOLL	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100%	64	38	26	Bestehende	-	-	-	-	-	-	-	1	0,5	1	mit	keine	OK	
	2	SOLL	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100%	64	38	26	Neu	-	-	-	-	-	-	-	1	0,5	1	ohne	keine	OK	
	3	SOLL	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100%	64	38	26	Neu	-	-	-	-	-	-	-	1	0,5	1	mit	keine	OK	
B	4	IST	64	100%	64	38	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bestehende	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ohne	keine	OK
	5	IST	64	100%	64	38	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bestehende	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	mit	keine	OK
C		SOLL	64	-	-	-	-	100%	64	38	26	-	-	-	Neu	BEV Typ I	100%	64	150	7000	1	1	-	-	-	ohne	keine	Fehler			
		SOLL	67	-	-	-	-	100%	67	41	26	-	-	-	Neu	BEV Typ I	100%	67	150	7000	1	1	-	-	-	ohne	keine	Fehler			
	6	SOLL	69	-	-	-	-	100%	69	43	26	-	-	-	Neu	BEV Typ I	100%	69	150	7000	1	1	-	-	-	ohne	keine	OK			
		SOLL	73	-	-	-	-	100%	73	47	26	-	-	-	Neu	BEV Typ I	100%	73	150	7000	1	1	-	-	-	mit	keine	Fehler			
7	SOLL	76	-	-	-	-	100%	76	50	26	-	-	-	Neu	BEV Typ I	100%	76	150	7000	1	1	-	-	-	mit	keine	OK				
D		SOLL	70	-	-	-	-	100%	70	44	26	-	-	-	Neu	BEV Typ I	100%	70	150	7000	1	1	-	-	-	ohne	0,8 kWh/km	Fehler			
		SOLL	80	-	-	-	-	100%	80	50	30	-	-	-	Neu	BEV Typ I	100%	80	150	7000	1	1	-	-	-	ohne	0,8 kWh/km	Fehler			
		SOLL	90	-	-	-	-	100%	90	55	35	-	-	-	Neu	BEV Typ I	100%	90	150	7000	1	1	-	-	-	ohne	0,8 kWh/km	Fehler			
	8	SOLL	93	-	-	-	-	100%	93	57	36	-	-	-	Neu	BEV Typ I	100%	93	150	7000	1	1	-	-	-	ohne	0,8 kWh/km	OK			
		SOLL	96	-	-	-	-	100%	96	60	36	-	-	-	Neu	BEV Typ I	100%	96	150	7000	1	1	-	-	-	mit	0,8 kWh/km	Fehler			
	9	SOLL	99	-	-	-	-	100%	99	63	36	-	-	-	Neu	BEV Typ I	100%	99	150	7000	1	1	-	-	-	mit	0,8 kWh/km	OK			
E	10	SOLL	64	-	-	-	-	100%	64	38	26	-	-	-	Bestehende	BEV Typ II	100%	64	150	7000	1	1	-	-	-	ohne	keine	OK			
	11	SOLL	64	-	-	-	-	100%	64	38	26	-	-	-	Bestehende	BEV Typ II	100%	64	150	7000	1	1	-	-	-	mit	keine	OK			
	12	SOLL	64	-	-	-	-	100%	64	38	26	-	-	-	Neu	BEV Typ II	100%	64	150	7000	1	1	-	-	-	ohne	keine	OK			
	13	SOLL	64	-	-	-	-	100%	64	38	26	-	-	-	Neu	BEV Typ II	100%	64	150	7000	1	1	-	-	-	mit	keine	OK			
F		SOLL	64	-	-	-	-	100%	64	38	26	-	-	-	Neu	BEV TYP II	100%	64	150	7000	1	1	-	-	-	ohne	0,8 kWh/km	Fehler			
	14	SOLL	68	-	-	-	-	100%	68	42	26	-	-	-	Neu	BEV Typ II	100%	68	150	7000	1	1	-	-	-	ohne	0,8 kWh/km	OK			
		SOLL	70	-	-	-	-	100%	70	44	26	-	-	-	Neu	BEV TYP II	100%	70	150	7000	1	1	-	-	-	mit	0,8 kWh/km	Fehler			
		SOLL	74	-	-	-	-	100%	74	48	26	-	-	-	Neu	BEV TYP II	100%	74	150	7000	1	1	-	-	-	mit	0,8 kWh/km	Fehler			
	15	SOLL	78	-	-	-	-	100%	78	52	26	-	-	-	Neu	BEV Typ II	100%	78	150	7000	1	1	-	-	-	mit	0,8 kWh/km	OK			

Endausbau 100% Brennstoffzellen-Flotte

Flottengröße

In Exp-Group A sind Experimente mit einer reinen Brennstoffzellen-Flotte abgebildet. In allen Experimenten wurde mit der heutigen Fahrzeuganzahl von 64 Fahrzeugen simuliert. Auffällig ist, dass alle Experimenten mit einer vollständigen Flotte aus FCEV erfolgreich simuliert werden konnten. Es zeigt sich, dass die aktuell bestehende Umlaufplanung der HSB weiterhin auch mit FCEV betrieben werden kann und eine Neu-Umlaufplanung nicht zwingend erforderlich ist.

Da Tankzeiten von FCEV im zeitlichen Prozess vergleichbar sind zum Tankvorgang eines Diesel-Busses (NOW GmbH, 2018) sowie die Reichweite von Brennstoffzellenfahrzeugen für alle Umläufe in Hanau ausreichend sind, führt der betriebliche Ablauf einer kompletten Flotte aus Brennstoffzellen-Fahrzeugen zu keinem signifikanten Unterschied gegenüber dem Ist-Ablauf. Die Flottengröße muss ebenfalls nicht angepasst werden, sondern kann mit der heutigen Fahrzeuganzahl bewältigt werden.

Voraussetzung für die Betriebstauglichkeit bei selber Flottengröße ist die Bedingung, dass Fahrzeuge mit einem Tankfüllstand von weniger als 50% am Ende des Umlaufs auf 100% betankt werden, sodass immer genug Fahrzeuge mit großer Reichweite zu Umlaufbeginn verfügbar sind.

Wasserstoffbedarf

Die Implementierung einer reinen Brennstoffzellen-Flotte in Hanau bedingt den Ausbau einer umfangreichen Wasserstoff-Infrastruktur. Große Herausforderung kommt der Dimensionierung technischer Komponenten (Verdichter, Speicher, Trailer etc.) zu (NOW GmbH, 2018). Abbildung 24 stellt als Entscheidungshilfe den Bedarf an Wasserstoff für eine Woche dar. Auf Grund der in der Simulation vorgegebenen Tankstrategie, bei der Fahrzeuge nur betankt werden sofern sie am Ende eines Umlaufs einen SoC unter 50% aufweisen, ist der Bedarf am Montag nicht vergleichbar hoch, wie an den folgenden Wochentagen, obwohl die Betriebsleistung nahezu vergleichbar ist.

Der hohe Bedarf an Wasserstoff bei einer reinen Brennstoffzellen-Flotte wirft die Frage auf, woher eine solche Menge an Wasserstoff ausreichend und verlässlich angeliefert werden kann, da die eigene Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse für die HSB nicht geplant ist. Die geringe Dichte von gasförmigen Wasserstoff stellt eine zusätzliche Herausforderung an die Anlieferung bei der moderne Tank-LKW lediglich 500-1000 kg Wasserstoff transportieren können (Drenowatz, 2019).

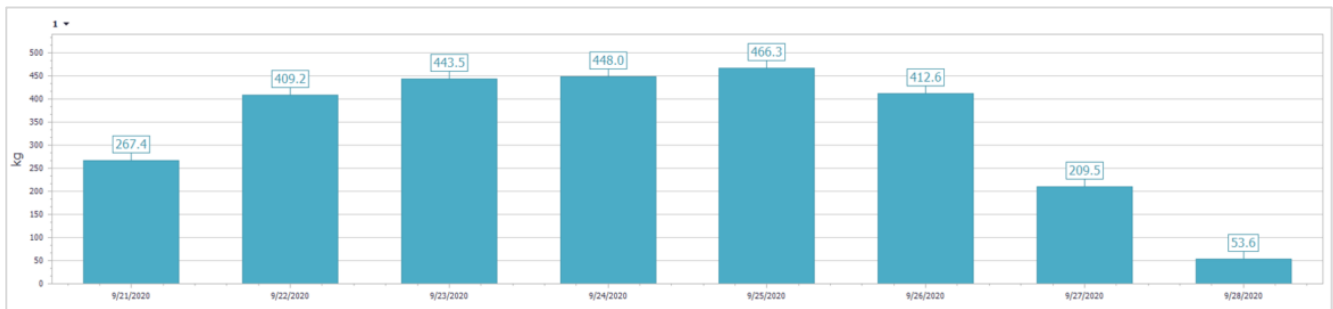


Abbildung 24: Wasserstoffbedarf 100% Brennstoffzellenflotte (Quelle: SimPlan AG)

Erkenntnisse

- Für eine reine Brennstoffzellenbusflotte ergibt sich kein Mehrbedarf an Fahrzeugen gegenüber der Flottengröße heute. Die Reichweiten der Fahrzeuge sind ausreichend, um alle Umläufe in Hanau zu betreiben. Die bestehende Umlaufplanung kann demnach beibehalten werden, sodass eine Neu-Umlaufplanung nicht erforderlich ist.
- Die Prozesszeiten für den Tankvorgang eines FCEV sind zudem vergleichbar zu dem eines Diesel-Fahrzeugs, wodurch auch für die sonstigen Betriebsabläufe keine zeitlichen Veränderungen oder Restriktionen entstehen.
- Die hohe Anzahl an Brennstoffzellenfahrzeugen stellt eine große Herausforderung an die Planung bezüglich einer ausreichenden Anlieferung von Wasserstoff sowie die Dimensionierung einer geeigneten Infrastruktur.

Endausbau 100% Batterieelektrische Flotte

Exp-Group C – 100% Batterieelektrische Flotte Typ I

Diese Experimente bilden den Betrieb in einer lauwarmen Frühlingswoche mit Normalverbrauch (20°C) für eine batterieelektrische Flotte des in Kapitel 3.1.1 definierten Modells Typ I ab. In den simulierten Experimenten ist für jedes Fahrzeug ein eigener Ladepunkt mit einer Ladeleistung von 150 kW vorgesehen. Die Gesamtleistung auf dem Betriebshof beläuft sich auf 7 MW (EEBC - European Electrical Bus Company GmbH, 2021). Als Ladestrategie wurde vorgegeben, dass Fahrzeuge nach Ankunft auf dem Betriebshof am Ende eines Umlaufplans geladen werden. Um die maximale Reichweite der Fahrzeuge auszunutzen, werden die Fahrzeuge auf 100% geladen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Erfolg der Simulation bereits ohne die Betriebsleistung von Fahrten für den freigestellten Schülerverkehr (nicht im Fahrplan integrierte Fahrten, wie z.B. Beförderung der Schüler von der Schule zum Schwimmbad) mit fünf zusätzlichen Fahrzeugen verbunden ist. Die Umstellung der Flotte mit selber Fahrzeuganzahl bzw. einem Mehrbedarf von drei Fahrzeugen führt zu einem fehlerhaften

Simulationsdurchlauf. Bei Berücksichtigung dieser Betriebsleistung sind zudem zusätzlich weitere Fahrzeuge erforderlich.

Exp-Group D – 100% Batterieelektrische Flotte Typ I

Diese Experimentgruppe stellt wie bereits die Exp-Group C ein batterieelektrisches Konzept mit dem Fahrzeugmodell Typ I dar. Einschlägiger Unterschied liegt im Zusatzverbrauch für die Beheizung des Fahrgastinnenraumes, der in diesen Experimenten mitberechnet wird. Die Experimentgruppe simuliert im Vergleich zu Exp-Group C das Worst-Case-Szenario für das Fahrzeugmodell Typ I im Winter (0 bis -5°C). Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass der Betrieb einer rein batterieelektrischen Flotte mit dem Fahrzeugmodell Typ I zu einem signifikanten Anstieg der Fahrzeuganzahl führt.

Exp-Group E – 100% Batterieelektrische Flotte Typ II

Eine batterieelektrische Flotte des Fahrzeugmodells Typ II mit einer Reichweite von 350 km für Solo- und Gelenkbusse wird in der Exp-Group E simuliert. Für jedes Fahrzeug ist ein eigener Ladepunkt mit Ladeleistung von 150 kW vorgesehen. Die Gesamtleistung auf dem Betriebshof liegt bei 7 MW. Die Experimentgruppe repräsentiert den Betrieb in einer lauwarmen Frühlingswoche bei 20°C. Auffällig ist, dass alle vier Simulationen zum Erfolg geführt haben. Die Flottengröße führt zudem zu keinem Mehrbedarf an Fahrzeugen. Die heutige Umlaufplanung ließe sich mit BEV Typ II unter Normalverbrauch umsetzen.

Exp-Group F – 100% Batterieelektrische Flotte Typ II

Analog zu Typ I zeigt Exp-Group F ergänzend zu Exp-Group E die Ergebnisse für eine Winterwoche (0 bis -5°C). Die Ergebnisse aus Tabelle 12 zeigen, dass trotz der wesentlich größeren Reichweite des Fahrzeugmodells Typ II gegenüber Typ I ein Mehrbedarf an Fahrzeugen entsteht. Dies ist auf den Zusatzverbrauch im Winter zurückzuführen sowie dem Leistungsverlust der Batterien in älteren Fahrzeugen.

Fahrzeugmehrbedarf in batterieelektrischen Szenarien

Nachfolgend sollen die vorangehend beschriebene Auswertung von Tabelle 12 nochmals übersichtlich zusammengefasst werden. Hervorgehoben wird dabei der unvermeidbare Mehrbedarf an Fahrzeugen durch den Zusatzverbrauch im Winter, der zur Einhaltung der ganzjährigen Betriebs- und Fahrplanpflicht nach §21 und §40 PBefG den Worst-Case darstellt. Die Analyse der exportierten Daten gibt nachträglich Auskunft, wie viele der für die Simulation in der Eingabemaske angegebenen Fahrzeuge tatsächlich eingesetzt wurden. Der Algorithmus bedingt, dass nicht alle Fahrzeuge eingesetzt werden, sondern bereits eingesetzte Fahrzeuge bei der Umlaufplanung vorrangig zugewiesen werden, sodass überflüssige Fahrzeuge in der späteren Analyse identifiziert werden können.

BEV Typ I

- Ohne Zusatzverbrauch durch Temperatureinfluss („Normaler Betriebstag“)

Anzahl Gesamt	76
Anzahl Solobusse	50
Anzahl Gelenkbusse	26

- Mit Zusatzverbrauch durch Temperatureinfluss

Anzahl Gesamt	99	93*
Anzahl Solobusse	63	57*
Anzahl Gelenkbusse	36	36*

* tatsächlich aktive Fahrzeuge

BEV Typ II

- Ohne Zusatzverbrauch durch Temperatureinfluss („Normaler Betriebstag“)

Anzahl Gesamt	64
Anzahl Solobusse	38
Anzahl Gelenkbusse	26

- Mit Zusatzverbrauch durch Temperatureinfluss

Anzahl Gesamt	78	75*
Anzahl Solobusse	52	49*
Anzahl Gelenkbusse	26	26*

* tatsächlich aktive Fahrzeuge

Für das Fahrzeugmodell Typ I mit einer Reichweite von 170 km bei Solobussen und 200 km bei Gelenkbussen werden gegenüber den heutigen 64 Fahrzeugen bei einer kompletten Umstellung der Flotte unter Normalverbrauch bei 20°C zwölf zusätzliche Fahrzeuge benötigt. Durch den Zusatzverbrauch im Winter steigt die Flottengröße um weitere 17 Fahrzeuge. Abbildung 25 stellt diesen Mehrbedarf nochmal vergleichend gegenüber. Der ganzjährige Betrieb mit BEV Typ I erfordert in Hanau eine Flottenerweiterung um 45%.

Durch die Umstellung auf eine batterieelektrische Flotte mit dem Fahrzeugmodelltyp II (Reichweite 350 km bei Solo- und Gelenkbus) werden im Vergleich zum Stand heute keine zusätzlichen Fahrzeuge unter Normalverbrauch benötigt. Die Simulation des Betriebs im Winter bedeutet für die HSB dennoch einen Mehrbedarf von 11 Fahrzeugen. Dies würde einen Erweiterung der Flotte um 17% bedeuten (vgl. Abbildung 25).

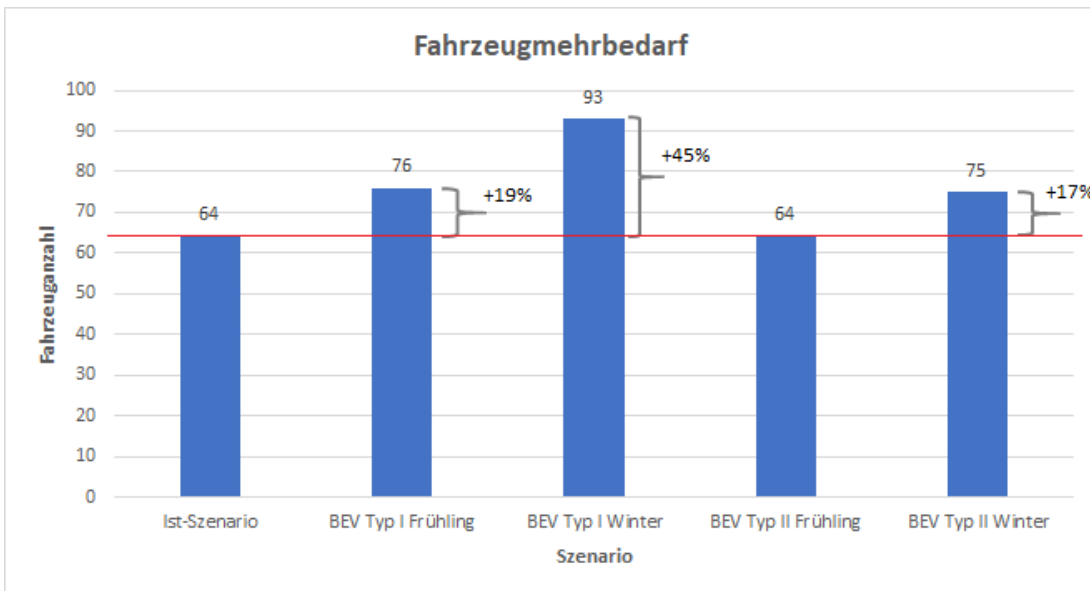


Abbildung 25: Fahrzeugmehrbedarf BEV-Szenarien (Quelle: eigene Darstellung RELUT)

Energiebedarf auf Betriebshof

Die Ladestrategie eines Ladeprozesses auf 100% SoC am Ende eines Umlaufs, sorgt für möglichst kurzweilige Ladezyklen. Gleichzeitig werden hingegen auch mehrere Fahrzeuge geladen, die ggf. noch einen weiteren Umlauf im Tagesverlauf bedienen könnten. Die Ladestrategie hat dennoch den Vorteil, dass jederzeit Fahrzeug mit möglichst maximaler Reichweite zur Verfügung stehen und das Ladevolumen nicht gebündelt in den Nachstunden anfällt, sondern bereits über den Tag verteilt wird.

Abbildung 26 visualisiert die Lademenge einer batterieelektrischen Flotte mit dem Fahrzeugmodell von Typ II im zeitlichen Verlauf von einer Woche. Die Phasen des Overnight-Chargings lassen sich trotz der Ladestrategie sehr gut ableiten. Über den Tag hinweg zeichnet sich lediglich im Anschluss an Verstärkerfahrten ein erhöhter Energiebedarf ab. Das Lade-Peak entsteht in den Nachtstunden, sobald längere Umläufe enden und viele Fahrzeuge gleichzeitig laden müssen. Verglichen wird in Abbildung 26 der anfallende Energiebedarf im Sommer gegenüber dem Winter sowie zwischen der bestehenden Umlaufplanung und Neu-Umlaufplanung. Auffällig ist, dass sich in der Neu-Umlaufplanung keine charakteristischen Umläufe für Verstärkerfahrten abzeichnen, da keine großartigen Ladeprozesse in den Morgenstunden beginnen. Diese Fahrten wurden bei der Neu-Konzeption in andere Umläufe integriert. Aus diesem Grund fällt in Summe ein höherer Energiebedarf in den Abendstunden an. Im Winter verdichtet sich der Energiebedarf zumal dem höheren Energieverbrauch der Fahrzeuge selbst.

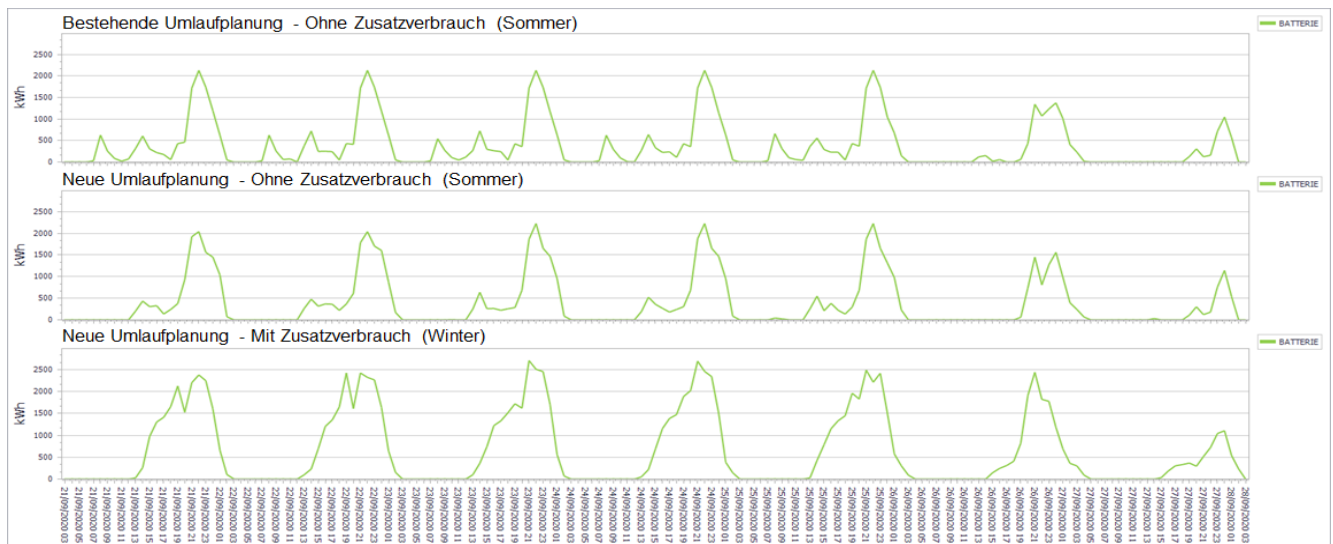


Abbildung 26: Zeitleiste Lademenge BEV Typ II (Quelle: SimPlan AG)

Der In Abbildung 27 ist der Energieverbrauch einer batterieelektrischen Flotte mit Normalverbrauch in einer Frühlingswoche und einer Woche im Winter gegenübergestellt. Die obere Statistik zeigt den Energieverbrauch in einer Woche unter Normalbetrieb. In einer Woche im Winter mit Zusatzverbrauch für das Beheizen des Fahrgastinnenraums werden ca. 40% mehr Energie verbraucht.



Abbildung 27: Energieverbrauch einer 100% BEV Typ I Flotte (Quelle: SimPlan AG)

Erkenntnisse

- Die Umstellung auf eine rein batterieelektrische Flotte führt bei der Simulation von BEV mit einer Reichweite von 170km für Solobusse und 200 km für Gelenkbusse (BEV Typ I) zu einem signifikanten Anstieg der Fahrzeugflotte. Für die Hanauer Straßenbahn GmbH entsteht ein enormer Mehrbedarf von 29 Fahrzeugen, was ein Anstieg um 45 % entspricht.
- Der Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge vom Fahrzeugmodell Typ II bedeutet für die HSB ebenfalls ein Mehrbedarf an Fahrzeugen in der Flotte. Gegenüber Typ I können auf Grund der größeren Reichweite allerdings einige Fahrzeuge eingespart werden. Die Flottenerweiterung für Typ II liegt bei 11 Fahrzeugen, was einer Erweiterung um 17 % gleichkommt.
- Im Winter verbraucht eine batterieelektrische Flotte durch das Beheizen des Fahrgastinnenraums ca. 40 % mehr Energie als in einem lauwarmen Frühlingsmonat.
- Die Implementierung einer rein batterieelektrischen Flotte in Hanau erfordert unter Randbedingungen der Fahrzeugreichweiten von BEV Typ I und Typ II immer eine Neu-Umlaufplanung. Im Winter ist die Betriebsleistung dabei ca. 1,1 % höher als im Frühling/Sommer, da kürzere Umläufe gebildet werden müssen und folglich mehr Leerfahrten entstehen.

Vergleich der Experimentgruppen

Betriebsleistung

Die Simulation von Experimenten mit und ohne freigestelltem Schülerverkehr sowie der Simulation mit bestehender Umlaufplanung und Neu-Umlaufplanung führt zu unterschiedlichen Gesamtdistanzen im wöchentlichen Betrieb. Abbildung 28 zeigt für verschiedene Experimente aus Tabelle 12 die Betriebsleistung. Der freigestellte Schülerverkehr erzeugt wöchentlich zwischen 1.700 und 2.000 zusätzlichen Betriebskilometern, was einem Zuwachs um 3% entspricht.

Der Einsatz einer Neu-Umlaufplanung führt zur Reduzierung der Gesamtkilometer (Bsp. Exp-ID 10 mit Exp-ID 12). Mit der Neu-Umlaufplanung lassen sich Leerfahrten und Betriebsleistung reduzieren. Ein optimaler Personaleinsatz ist mit den neu konzipierten Umläufen nicht gewährleistet.

Der Vergleich zwischen einer lauwarmen Frühlingswoche unter Normalverbrauch und einer Woche mit Zusatzverbrauch führt zu steigenden Gesamtkilometern, da kürzere Umläufe gebildet werden müssen und zusätzliche Leerkilometer anfallen. Die Simulation mit BEV Typ I erzeugt im Winter ein ca. 2,5 % (1369 km) höhere Betriebsleistung als unter Normalverbrauch (vgl. Exp-ID 7 mit Exp-ID 9 in Tabelle 12). Der Einsatz von BEV Typ II ermöglicht die Konzeption längerer Umläufe, wodurch insgesamt weniger Umläufe erforderlich sind und gleichzeitig die Leerkilometer reduziert werden können. Die Gegenüberstellung einer Winterwoche und einer Frühlingswoche führt unter Betrachtung von BEV Typ II zu einem Anstieg der Betriebsleistung um ca. 1,1% bzw. 506 km (vgl. Exp-ID 13 mit Exp-ID 15 in Tabelle 12).

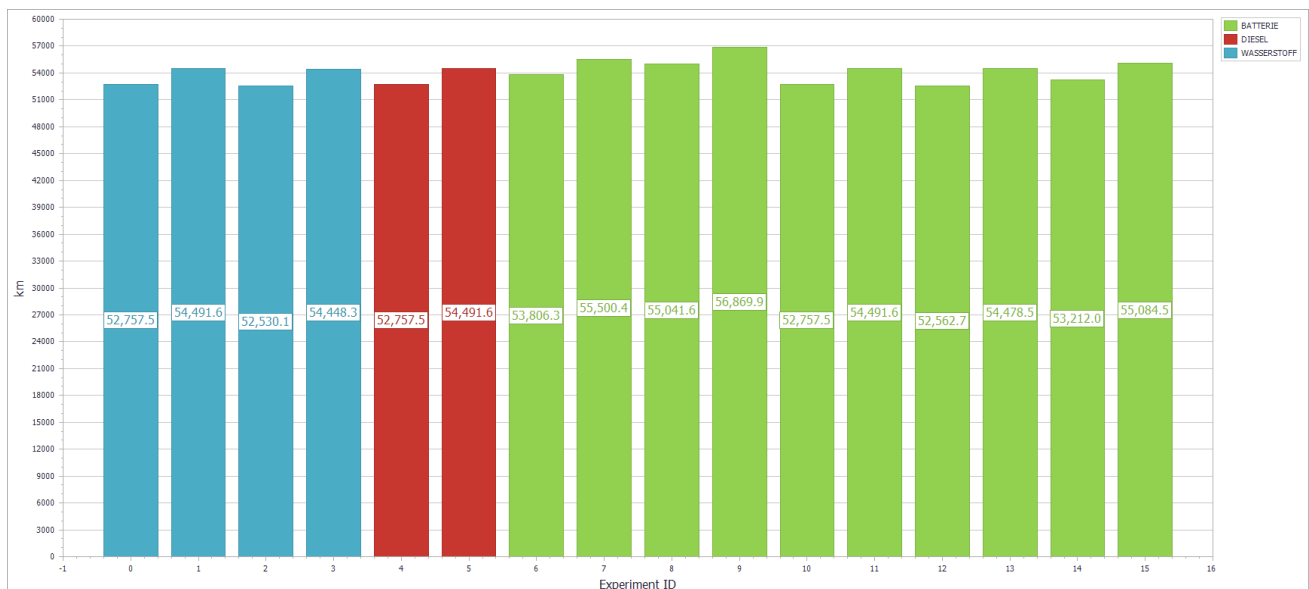


Abbildung 28: wöchentliche Betriebsleistung in den Experimenten (Quelle: SimPlan AG)

Investitionskosten Fahrzeuge

Alternativ angetriebene Busse bedeuten einen höheren Aufwand in den Fahrzeuginvestitionen. Die Investitionen für einen konventionell angetriebenen Bus liegen bei ca. 240.000 € für einen Solobus und 300.000 € für einen Gelenkbus (Hanauer Straßenbahn GmbH, 2020). Vergleichbare batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge kosten 550.000 für Solobus und 750.000 € für einen BEV-Gelenkbus (Werner, 2019). Die Preise für Brennstoffzellenbusse liegen bei 650.000 € für einen Solobus und 850.000 € für einen Gelenkbus (BMVI d, 2021). Abbildung 29 stellt diese Investitionen im Vergleich nochmal gegenüber.

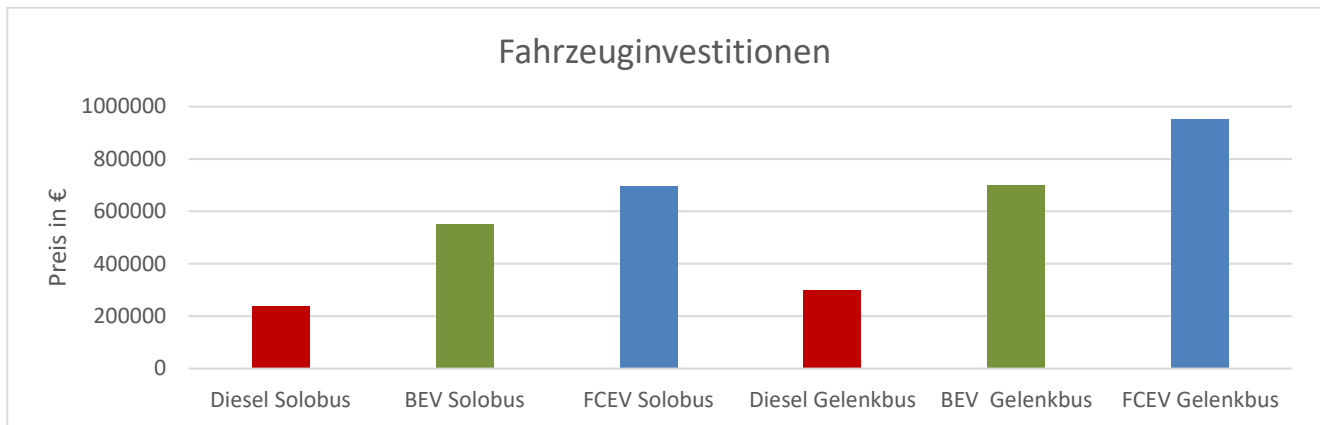


Abbildung 29: Gegenüberstellung der Fahrzeuginvestitionskosten (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Die Fahrzeuginvestitionen bei der Umstellung der gesamten Flotte würde dabei mit BEV Typ I zu 58,35 Mio. € führen. Die Umstellung mit BEV Typ II erfordert Investitionen von 46,45 Mio. € für Fahrzeuge und eine reine Brennstoffzellenbus-Flotte kostet 46,8 Mio. €.

Betriebskosten

Die Betriebskosten sind in Abbildung 30 aufgezeigt. Dargelegt sind die wöchentlichen Ausgaben für Kraftstoff/Energieträger sowie wöchentlich anteilige Wartungskosten der Fahrzeuge. Die höchsten Ausgaben verzeichnet die heutige Diesel-Flotte. Mit einer reinen Brennstoffzellen-Flotte sind die Betriebskosten geringer. Da die Kosten für Wasserstoff sehr stark abhängig davon sind, woher dieser angeliefert werden kann und dies in Hanau noch unklar ist, wurde mit einem gängigen Preis von 9,50 €/kg an CEP-Tankstellen (Stand 2021) kalkuliert (H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, 2021). Der Preis für Wasserstoff kann bei geklärter Zulieferung deutlich günstiger ausfallen. Als Abfallprodukt (kein grüner Wasserstoff) aus der Industrie kann Wasserstoff oftmals für unter 2€/kg bezogen werden (Weichenhain, et al., 2020). Bei einem Preis von 9,50 €/kg können die Betriebskosten der HSB mit einer Brennstoffzellen-Flotte um 19 % gesenkt werden. Für eine batterieelektrische Flotte sind die Betriebskosten für den Betrieb bei Normalverbrauch aufgezeigt sowie die steigenden Betriebskosten bei Frost im Winter. Bei Normalverbrauch können die Betriebskosten im Vergleich zu heute um 43 % gesenkt werden. Im Winter lassen sich gegenüber heutigen Betriebskosten 24 % einsparen.



Abbildung 30: Betriebskosten Kraftstoff/Energie und Wartung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Lokale Emissionen

Alternativ angetriebene Fahrzeuge können den Vorgaben zu städtischen Luftgrenzwerten Einhalt gebieten. Messungen haben gezeigt, dass gegenüber Euro-VI-Fahrzeugen das Einsparpotenzial von Emissionen durch einen alternativ angetriebenen ÖV abbildbar ist (Schmitz, 2018).

In Tabelle 13 sind die lokalen Emissionen für den wöchentlichen Betrieb der Hanauer Straßenbahn GmbH mit Diesel-Fahrzeugen dargestellt. Durch den Einsatz von grünem Strom und Wasserstoff kann die HSB einen erheblichen Beitrag für die Gesellschaft in Hanau leisten.

Tabelle 13: Lokale Emissionen pro Woche (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Schadstoffausstoß	Lokale Emissionen
Kohlenstoffdioxid [CO ₂]	68,7 kg
Kohlenmonoxid [CO]	6,2 kg
Kohlenwasserstoffe [THC]	4,5 kg
Stickoxide [NO _x]	23,1 kg
Partikel [PM]	0,1 kg

Lebenszyklusanalyse

Neben den lokalen Einsparpotenzialen ist auch die Betrachtung der Lebenszyklusanalyse eines Fahrzeugs ein wichtiger Indikator für die Umweltauswirkungen. Abbildung 31 thematisiert die Ökobilanz eines Solobusses bei einer Laufleistung von 745.200 km sowie einem Fahrzeugeinsatz von zwölf Jahren. Dargestellt ist der Vergleich als g CO₂-Äquivalente pro Fahrzeugkilometer. Für die Fahrzeugherstellung wird ersichtlich, dass die Produktion der Batterie bei einem batterieelektrischen Fahrzeug gegenüber einem Diesel-Bus zum Tragen kommt. Sofern der Strom und Wasserstoff nicht aus erneuerbaren Energien bezogen werden kann, sind Einsparpotenziale gegenüber dem Ausstoß eines Diesel-Fahrzeugs für BEV und FCEV vorhanden. Das Potenzial wird allerdings erst durch die Verwendung von grünem Strom und Wasserstoff vollends ausgeschöpft.

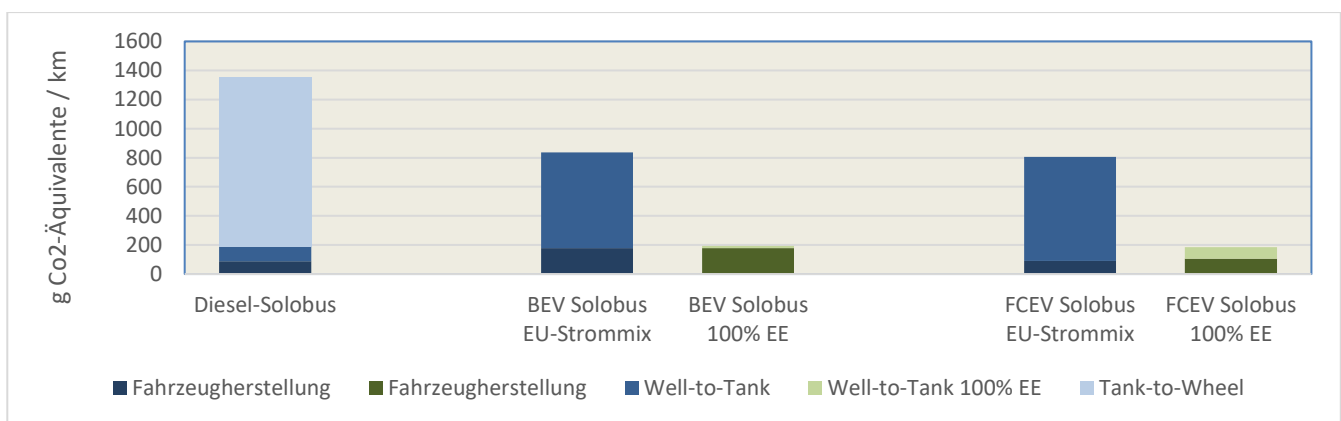


Abbildung 31: Ökobilanz von Elektrobussen (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (EMCEL GmbH, 2020) und (Daimler AG, 2019))

Erkenntnisse

- Die erforderliche Neu-Umlaufplanung für batterieelektrische Konzepte führt im Winter zu einem Anstieg der Betriebsleistung gegenüber einer Frühlingswoche, da kürzere und gleichzeitig mehr Umläufe gebildet werden und folglich zusätzliche Leerfahrten resultieren. Bei einer Flotte mit BEV Typ I steigt die Betriebsleistung um 2,5 %. Mit BEV Typ II steigt die Betriebsleistung um 1,1 %.
- Fahrzeuge mit alternativen Antrieben erzeugen Mehrkosten bei der Anschaffung. Die Investitionen für einen batterieelektrischen Bus sind mehr als doppelt so hoch, wie ein Diesel-Bus. Ein Brennstoffzellenbus ist im Vergleich zu einem Diesel-Bus fast dreifach so teuer.
- Die Betriebskosten sinken mit alternativen Antrieben. Eine Brennstoffzellen-Flotte kann bei einem heute zu beziehenden Preis von 9,50 €/kg Wasserstoff die Betriebskosten um 19 % senken. Mit einer batterieelektrischen Flotte können die Betriebskosten zwischen 43 % bei Normalverbrauch und 24 % im Winter gesenkt werden.
- Die Verwendung von grünem Strom und Wasserstoff sind ein maßgebendes Ziel für die Reduktion von Emissionen.

6.1.2 Übergangs- und Mix-Szenarien

Um diesen enormen Mehrbedarf an Fahrzeugen zu vermeiden, wurden Mix-Szenarien formuliert, die sowohl Brennstoffzellen- als auch batterieelektrische Fahrzeuge beinhalten. Tabelle 14 beinhaltet in allen Experimenten den Worst-Case bezüglich Energieverbrauch für einen Wintermonat sowie zusätzlicher Betriebsleistung für den freigestellten Schülerverkehr. Bei allen Experimenten werden die BEV nach Beendigung eines Umlaufs wieder bis auf 100 % SoC aufgeladen. FCEV werden bei einem Tankstand unter 50 % SoC betankt.

Zudem sollen in Tabelle 14 Übergangsszenarien zunächst den potenziellen Einstieg in die Elektromobilität der HSB darstellen.

Tabelle 14: Experimentmatrix Übergangs- und Mix-Szenarien HSB (Quelle: SimPlan AG)

Exp Group	Exp ID	Szenario	Anzahl Gesamt	Diesel			Batterie			Wasserstoff			Umlauf-planung	Batterie Fzg-Modell	Ladeparameter Batterie					Ladeparameter Wasserstoff			Schüler-verkehre	Zusatzverbrauch Temperatur	Status				
				%	Gesamt	SL	GL	%	Gesamt	SL	GL	%			Gesamt	SL	GL	Anzahl [%]	Anzahl	Leistung	Gesamt	Muss-Laden				Laden-bis	Anzahl	Muss-Laden	Laden-bis
A	0	SOLL	64	-	61	35	26	*	3	3	0	-	-	-	Bestehende	BEV Typ I	100%	3	150	250	1	1	-	-	-	mit	0,8 kWh/km	OK	
	1	SOLL	64	-	61	35	26	*	3	3	0	-	-	-	Bestehende	BEV Typ II	100%	3	150	250	1	1	-	-	-	mit	0,8 kWh/km	OK	
B	2	SOLL	64	-	58	33	25	*	6	5	1	-	-	-	Bestehende	BEV Typ I	100%	6	150	500	1	1	-	-	-	mit	0,8 kWh/km	OK	
	3	SOLL	64	-	58	33	25	*	6	5	1	-	-	-	Bestehende	BEV Typ II	100%	6	150	500	1	1	-	-	-	mit	0,8 kWh/km	OK	
C	4	SOLL	64	-	34	20	14	-	30	18	12	-	-	-	Bestehende	BEV Typ I	100%	30	150	2500	1	1	-	-	-	mit	0,8 kWh/km	OK	
	5	SOLL	64	-	34	20	14	-	30	18	12	-	-	-	Bestehende	BEV Typ II	100%	30	150	2500	1	1	-	-	-	mit	0,8 kWh/km	OK	
D		SOLL	64	-	-	-	-	-	46	26	20	-	18	12	6	Bestehende	BEV Typ I	100%	46	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	Fehler
		SOLL	64	-	-	-	-	-	46	26	20	-	18	12	6	Neu	BEV Typ I	100%	46	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	Fehler
		SOLL	68	-	-	-	-	-	50	28	22	-	18	12	6	Neu	BEV Typ I	100%	50	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	Fehler
		SOLL	70	-	-	-	-	-	52	30	22	-	18	12	6	Neu	BEV Typ I	100%	52	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	Fehler
		SOLL	73	-	-	-	-	-	52	30	22	-	21	14	7	Neu	BEV Typ I	100%	52	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	Fehler
	6	SOLL	77	-	-	-	-	73%	56	34	22	27%	21	14	7	Neu	BEV Typ I	100%	56	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	OK
		SOLL	79	-	-	-	-	-	59	37	22	-	20	13	7	Neu	BEV Typ I	100%	59	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	Fehler
	7	SOLL	81	-	-	-	-	75%	61	39	22	25%	20	13	7	Neu	BEV Typ I	98%	60	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	OK
E		SOLL	64	-	-	-	-	-	46	26	20	-	18	12	6	Bestehende	BEV TYP II	100%	46	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	Fehler
		SOLL	64	-	-	-	-	-	44	26	18	-	20	12	8	Bestehende	BEV TYP II	100%	44	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	Fehler
	8	SOLL	64	-	-	-	-	66%	42	26	16	34%	22	12	10	Bestehende	BEV Typ II	100%	42	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	OK
		SOLL	61	-	-	-	-	-	39	25	14	-	22	12	10	Bestehende	BEV Typ II	100%	39	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	OK
		SOLL	60	-	-	-	-	-	38	25	13	-	22	12	10	Bestehende	BEV Typ II	100%	38	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	OK
	9	SOLL	59	-	-	-	-	63%	37	25	12	37%	22	12	10	Bestehende	BEV Typ II	100%	37	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	OK
	10	SOLL	59	-	-	-	-	64%	38	26	12	36%	21	11	10	Bestehende	BEV Typ II	100%	38	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	OK
	11	SOLL	59	-	-	-	-	66%	39	27	12	34%	20	10	10	Bestehende	BEV Typ II	100%	39	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	OK
		SOLL	59	-	-	-	-	-	40	28	12	-	19	9	10	Bestehende	BEV TYP II	100%	40	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	Fehler
		SOLL	60	-	-	-	-	68%	41	29	12	32%	19	9	10	Bestehende	BEV Typ II	100%	41	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	OK
		SOLL	61	-	-	-	-	-	43	31	12	-	18	8	10	Bestehende	BEV TYP II	100%	43	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	Fehler
	SOLL	64	-	-	-	-	-	46	34	12	-	18	8	10	Bestehende	BEV TYP II	100%	46	150	4500	1	1	1	0,5	1	mit	0,8 kWh/km	Fehler	

Übergangsszenarien

Flottengröße

Exp-Group A – C (vgl. Tabelle 14) zeigen den schrittweisen Übergang einer kurz- bis mittelfristigen Umstellung der Flotte. Die Beschaffung erster Fahrzeuge in Hanau bezieht sich in der Analyse dabei auf batterieelektrische Fahrzeuge, da Brennstoffzellen-Fahrzeuge in einem potenziellen Endausbau bereits schon bewiesen haben, die heutigen Prozesse 1:1 umzusetzen. Der niederschwellige Einsatz mit zunächst drei bzw. sechs BEV lässt sich problemlos umsetzen, da bereits Abbildung 8 und Abbildung 9 gezeigt haben, dass sich sowohl mit Fahrzeugmodell Typ I und Typ II mehrere Umläufe der bestehenden Umlaufplanung betreiben lassen.

Exp-Group C stellt einen mittelfristigen Ausbau dar. Die Umstellung einer nahezu halben Flotte auf batterieelektrische Fahrzeuge führt ebenfalls mit BEV Typ I und Typ II zu einem fehlerfreien Simulationsdurchlauf. In Hanau kann somit bereits ein großer Teil der Flotte auf batterieelektrische Fahrzeuge umgestellt werden, ohne eine Vergrößerung der Flotte herbeizuführen.

Betriebsleistung

Abbildung 32 veranschaulicht die Verteilung der Betriebsleistung auf die verschiedenen Antriebstechnologien bei der Umstellung von wenigen Fahrzeugen auf alternative Antriebe. Exp-ID 0 und 1 zeigen den Anteil, den drei BEV übernehmen können. Exp-ID 2 und 3 stellen die Verteilung beim Einsatz von sechs BEV dar. Mit der Umstellung von 30 Fahrzeugen auf batterieelektrischen Antrieb wird in Exp-ID 4 und 5 der jeweilige Anteil der Betriebsleistung abgebildet.

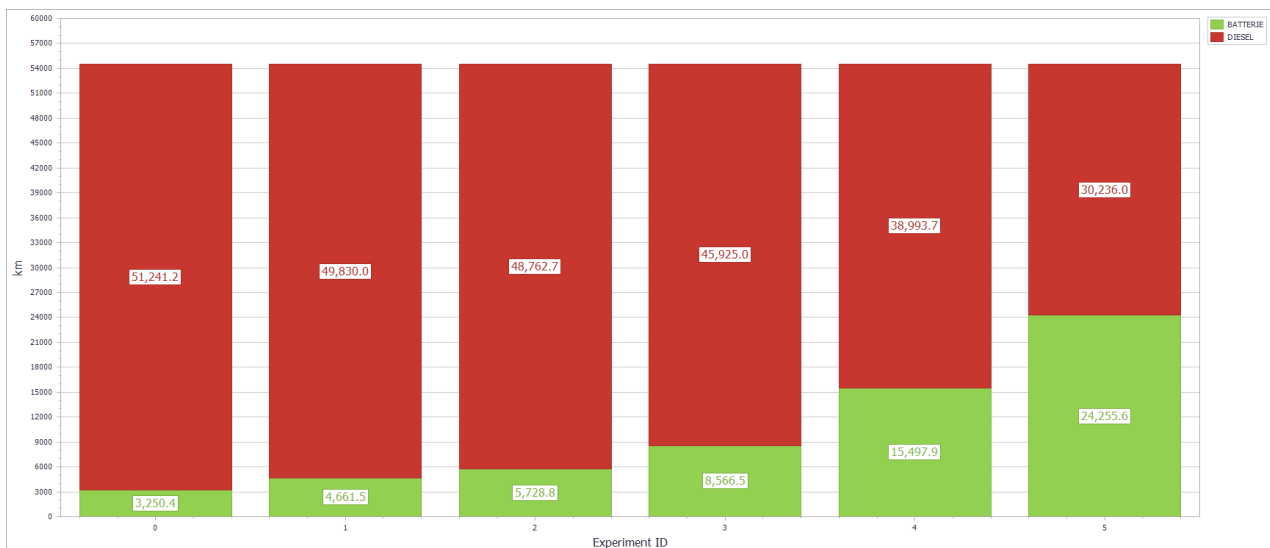


Abbildung 32: Verteilung der monatlichen Betriebsleistung in Übergangsszenarien (Quelle: SimPlan AG)

Die Simulation mit BEV Typ II (Exp-ID 1, Exp-ID 3 und Exp-ID 5) legt dar, dass auf Grund der höheren Reichweite der Fahrzeuge gegenüber BEV Typ I wesentlich mehr Betriebskilometer durch batterieelektrische Fahrzeuge gefahren werden. Mit drei BEV Typ II können wöchentlich bereits 43 % mehr Betriebskilometer bedient werden, als mit drei BEV Typ I. Mit sechs BEV Typ II sind es bereits 49 % mehr Betriebskilometer und bei 30 Fahrzeugen sogar bis zu 57 %. Dies liegt an längeren Ladezyklen für BEV Typ I, da diese bei ähnlicher Batteriekapazität deutlich weniger Reichweite aufweisen.

Tabelle 15: Anteil BEV in Flotte gegenüber Anteil an Betriebsleistung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Anzahl BEV Typ II	Anteil der Fahrzeuge von der Gesamtflotte	Anteil der Betriebsleistung
3	5,1 %	8,55 %
6	10,2 %	15,72 %
30	50,9 %	44,44 %

In Tabelle 15 ist gegenübergestellt, welchen Anteil die in den Experimenten simulierte Anzahl an BEV Typ II im Verhältnis zur Gesamtflottengröße einnimmt und welchen Anteil diese Fahrzeuge von der Gesamtbetriebsleistung übernehmen können. Es lässt sich ableiten, dass bereits die Implementierung einzelner Fahrzeuge eine beträchtliche verkehrliche Wirkung erzielen kann, indem die gefahrene Betriebsleistung der Fahrzeuge höher ist als ihr eigener Anteil an der Gesamtflotte. Mit steigender Anzahl an batterieelektrischen Fahrzeugen nimmt der Anteil der Betriebsleistung im Verhältnis zum Anteil der Fahrzeuge in der Flotte ab. Diese Erkenntnis zeigt sich zudem durch den täglichen Energieverbrauch in den verschiedenen Übergangsphasen. Auch dieser nimmt mit steigender Fahrzeuganzahl verhältnismäßig ab (vgl. Abbildung 33). Grund hierfür liegt in der infrastrukturellen Ausbaustufe des Betriebshofs, die bei der Szenariodefinition für einen mittelfristigen Ausbau lediglich eine max. Anschlussleistung von 2,5 MW ermöglicht. Daher kann in dieser Übergangsphase an den 30 Ladepunkten nicht gleichzeitig die volle Ladeleistung von 150 kW bezogen werden, was zu längeren Ladezyklen führt und demnach eine eingeschränkten Einsetzbarkeit der BEV.



Abbildung 33: Täglicher Energieverbrauch Übergangsszenarien (Quelle: SimPlan AG)

Ladezyklen

Die Ladestrategie in der Simulation sieht vor, dass die Fahrzeuge nach Beendigung eines Umlaufs immer auf 100 % SoC aufgeladen werden. In Abbildung 34 sind tägliche Ladezeiten für die einzelnen Fahrzeuge visualisiert. Die obere Statistik zeigt für den Betrieb mit drei Fahrzeugen, dass täglich wesentlich mehr als drei Ladeprozesse erfolgen. Die batterieelektrischen Fahrzeuge übernehmen demnach sobald sie aufgeladen sind am selben Tag weitere Umläufe, um eine möglichst hohe Fahrleistung zu erzielen und sie in der Gesellschaft sichtbar zu machen.

Die untere Statistik für 30 BEV Typ II bestätigt das Ladehemmnis der Fahrzeuge auf Grund des eingeschränkten infrastrukturellen Ausbaus des Betriebshofs. Indiz hierfür sind die deutlich längeren Ladeprozesse der Fahrzeuge im Vergleich zur Statistik mit drei bzw. sechs BEV.

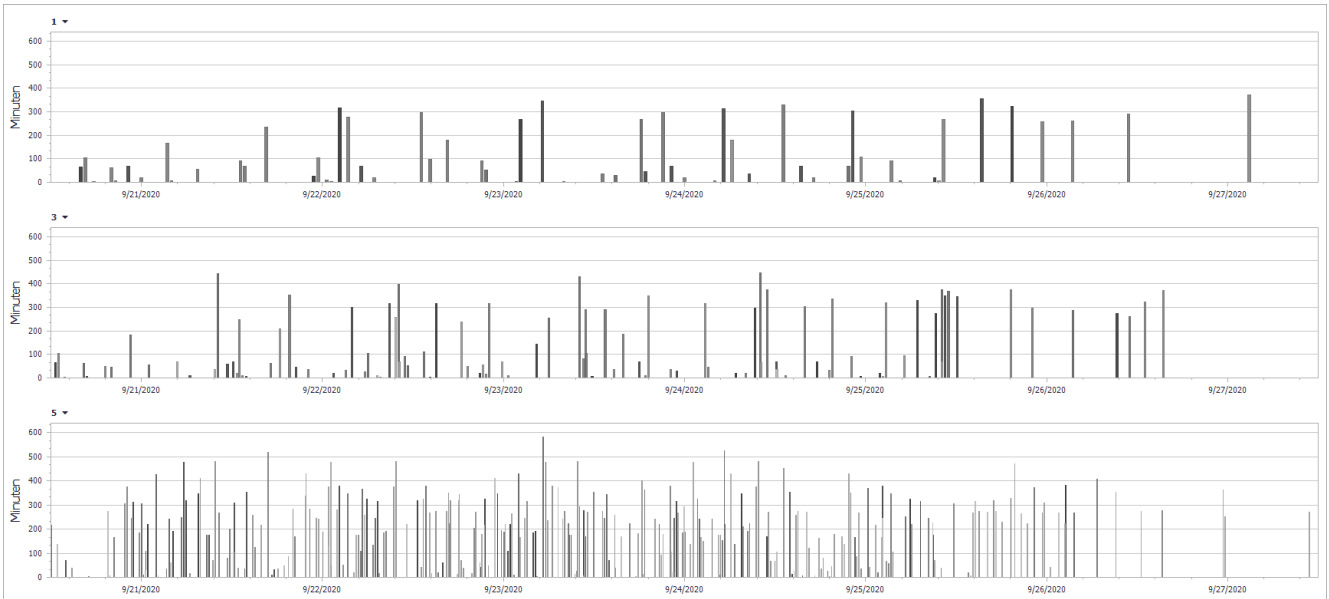


Abbildung 34: Tägliche Ladezeiten in Minuten BEV Typ II (Quelle: SimPlan AG)

Lokale CO₂-Emissionen

Unter Voraussetzung der Verwendung von grünem Strom und Wasserstoff im Betrieb sind in Abbildung 35 die wöchentlichen Einsparpotenziale für die lokalen CO₂-Emissionen der HSB visualisiert. Drei konventionell angetriebene Fahrzeuge weniger würden bereits ein lokales Einsparpotenzial von 7 % erzeugen. Die Umstellung der halben Flotte führt zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen um 44 %, wobei sich mit einem infrastrukturell weiter ausgebauten Betriebshof (max. Energiemenge auf Betriebshof) dieses Einsparpotenzial noch steigern lässt.

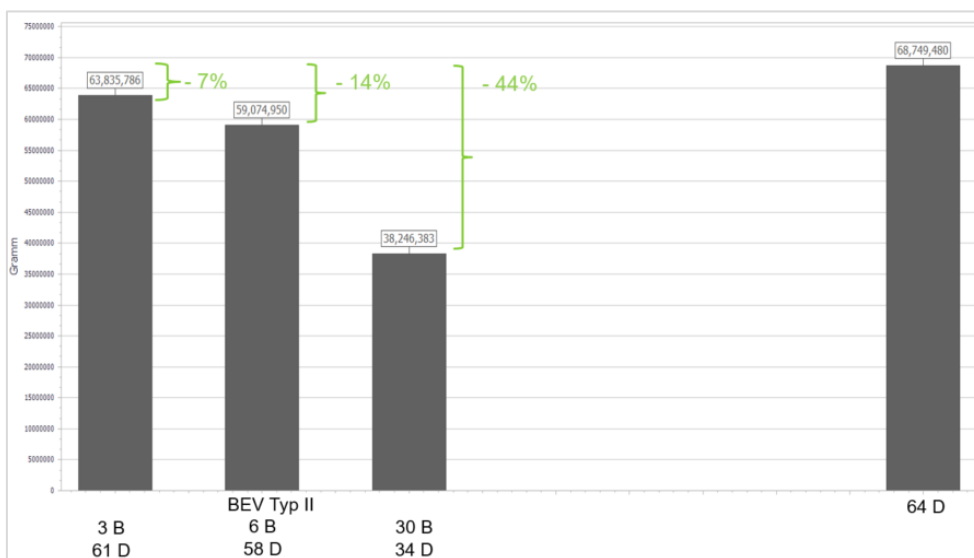


Abbildung 35: Potenzial der lokal wöchentlichen CO₂-Einsparung bei grünem Antrieb (Quelle: SimPlan AG)

Erkenntnisse

- Kurz- bis mittelfristig lassen sich bereits ein Großteil der Umläufe in Hanau auch mit dem Fahrzeugmodell Typ I sowie Typ II umstellen. Eine Umstellung der Hälfte der Flotte in Hanau auf BEV hätte für die HSB keine zusätzlichen Fahrzeuge zur Folge. Der langfristige Ausbau führt allerdings vor allem auf Grund des Zusatzverbrauchs im Winter sowie einer abnehmenden Batteriekapazität älterer Fahrzeuge in der Flotte zu einem Mehrbedarf.
- Die Implementierung einzelner batterieelektrischer Fahrzeuge kann zu Übergangsbeginn bereits eine bemerkenswerte verkehrliche Wirkung erzielen. BEV Typ II können auf Grund der höheren Reichweite bei steigender Anzahl an BEV einen wesentlich größeren Beitrag leisten als BEV Typ I.
- Unter Anbetracht einer höheren max. Anschlussleistung auf dem Betriebshof (>2,5 MW) können batterieelektrische Fahrzeuge einen deutlich größeren verkehrlichen Beitrag leisten und einen höheren Anteil der Betriebsleistung übernehmen.
- Die Implementierung von Brennstoffzellen-Bussen können zudem eine noch höhere verkehrliche Wirkung erzeugen, da sie die längsten Umläufe in Hanau betreiben können und sich durch kurze Tankzeiten zeitnah wieder in den Betrieb integrieren lassen.
- Wenige alternativ angetriebene Fahrzeuge können unter Verwendung grüner Energieträger bereits ein großes Einsparpotenzial für lokale CO₂-Emissionen in Hanau bedeuten.

Mix-Szenarien

Exp-Group D und E (vgl. Tabelle 14) zeigen einen Mix aus batterieelektrischen und Brennstoffzellen-Fahrzeugen. Exp-Group E bildet Experimente mit BEV Typ I ab. Um einen Mix mit möglichst wenig Brennstoffzellen-Fahrzeugen zu ermöglichen, ist für Typ I mit einem wesentlichen Mehrbedarf an Fahrzeugen zu rechnen. Die erfolgreichen Experimente zeigen, dass bei einem Mix von 3/4 BEV vom Typ I zu 1/4 FCEV ein Mehrbedarf an Fahrzeugen von 20 % entsteht.

Exp-Group E stellt einen Mix mit BEV Typ II dar. Bei einem Mix von 2/3 batterieelektrischen Fahrzeugen zu 1/3 Brennstoffzellenfahrzeugen ist hierbei kein Mehrbedarf an Fahrzeugen erforderlich. Gleichzeitig beweisen die Simulationsergebnisse, dass die Flotte beim genannten Mix auf 59 Fahrzeuge reduziert werden kann und der Betrieb auch ohne Reservefahrzeuge aufrechterhalten werden kann. Die Flexibilität innerhalb der Reservefahrzeuge ist auf Grund verschiedener Antriebstechnologien allerdings wesentlich eingeschränkter als heute.

Betriebsleistung

Vorteil der Mix-Szenarien liegt in der Nutzung der bestehenden Umlaufplanung. Die Umstellung der gesamten Flotte auf alternative Antriebe führt trotz unterschiedlicher Fahrzeuganzahlen je Antrieb im Mix zu ähnlichen Verteilungen der Betriebsleistung pro Energieträger (vgl. Abbildung 36). Der hohe Anteil der Betriebsleistung durch Brennstoffzellenfahrzeuge entsteht durch die hohe Reichweite und der Vorgabe im Algorithmus, der diese Fahrzeuge vorrangig für lange Umläufe einsetzt. Die Reduzierung der Fahrzeuganzahl mit Brennstoffzellenantrieb führt zu einer Steigerung der Betriebsleistung der BEV. Die geringeren Investitions- und Betriebskosten von BEV rücken dabei das Ziel einer möglichst geringen Anzahl an Brennstoffzellenflotte in den Fokus. Voraussetzung für den Betrieb ohne einen Mehrbedarf an Fahrzeugen in der Flotte liegt allerdings im Einsatz von mindestens zehn FCEV-Solobussen sowie zehn FCEV-Gelenkbussen.

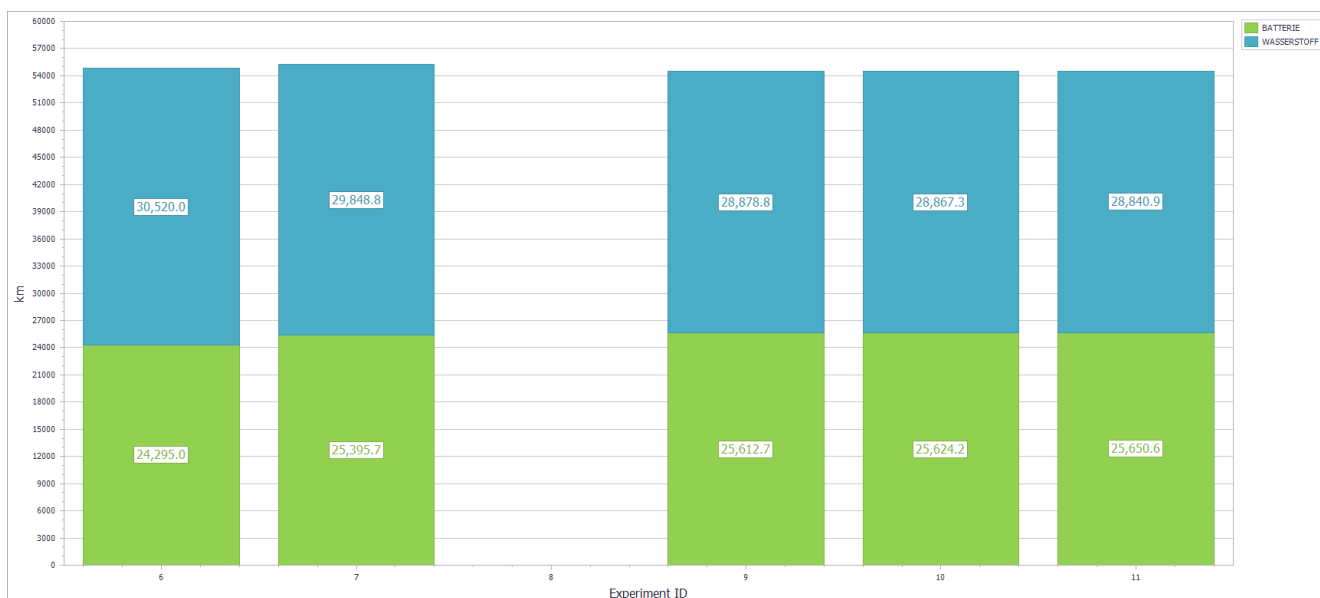


Abbildung 36: Wöchentliche Betriebsleistung (Quelle: SimPlan AG)

Täglicher Strom-/Wasserstoffbedarf

Abbildung 36 zeigt die wöchentlich sehr ähnliche Betriebsleistung verteilt auf die beiden Energieträger Strom und Wasserstoff. Dieser minimale Unterschied wird auch in Abbildung 37 und Abbildung 38 ersichtlich, indem der Verbrauch für Strom und Wasserstoff an den meisten Tagen zwischen den Exp-ID 9, 10 und 11 gleich ist. Lediglich am Freitag kommt es zu einer Änderung in der Umlaufverteilung. Abbildung 37 und Abbildung 38 visualisieren den täglichen Strom- bzw. Wasserstoffbedarf für die Mix-Experimente.

Verglichen mit einer reinen Flotte aus Brennstoffzellenfahrzeugen kann im Mix mit 1/3 der Flotte aus Brennstoffzellenantrieb der wöchentliche Wasserstoffbedarf um fast 47 % gesenkt werden. Der wöchentliche Bedarf an Wasserstoff liegt bei 1443,7 kg.



Abbildung 37: Täglicher Strombedarf Exp-ID 9 bis 11 (Quelle: SimPlan AG)



Abbildung 38: Täglicher Wasserstoffbedarf Exp-ID 9 bis 11 (Quelle: SimPlan AG)

Ladezyklen

Die Netzauslastung in einem Mix-Szenario zeigt sich für BEV Typ II aus Exp-ID 9 über den Wochenverlauf betrachtet als äquivalent für die einzelnen Wochentage (vgl. Abbildung 39). Die Hauptverkehrszeiten lassen sich anhand der Spitzenlasten im Tagesverlauf sehr gut identifizieren. Die Ladepeaks belaufen sich im Anschluss an die HVZ in den Morgenstunden sowie im Anschluss an die HVZ mittags. Hoher Energiebedarf besteht in den Abendstunden, sobald die längeren Umläufe enden. Die Lücke in den Nachtstunden weist dennoch auf, dass die Ladeinfrastruktur noch Potenzial aufweist die Ladeprozesse zeitlich zu verlängern und mit geringerer Energie zu laden.

Samstags und sonntags wird auf Grund der geringeren Betriebsleistung und dem niedrigen Energieverbrauch aus Abbildung 37 auch kein hohes Ladepeak erreicht und das Netz nicht beträchtlich belastet.

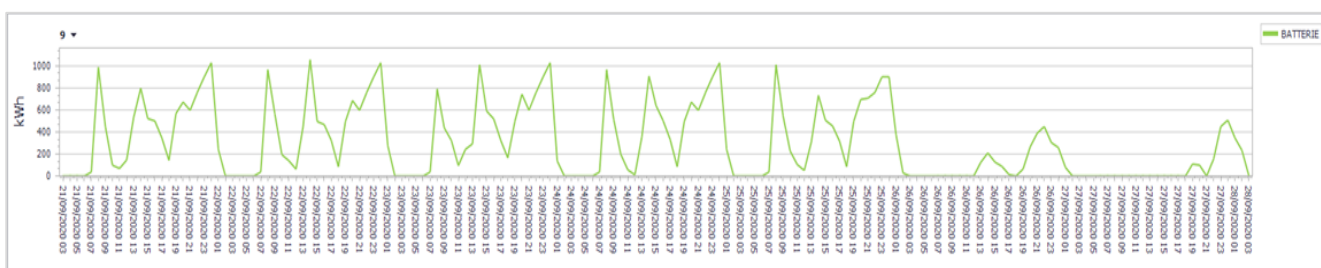


Abbildung 39: Ladeverlauf der BEV im Mix am Bsp. Exp-ID 9 (Quelle: SimPlan AG)

Investitionskosten Fahrzeuge

Die Implementierung von Brennstoffzellenbussen in ein Mix-Konzept senkt die Investitionskosten für Fahrzeuge, da der Fahrzeugmehrbedarf gesenkt wird. Bei einem Flottenverhältnis von 3/4 BEV Typ I und 1/4 FCEV können die Investitionskosten gegenüber einer reinen batterieelektrischen Flotte um 8 Mio. € gesenkt werden.

Im Vergleich zu einer reinen Brennstoffzellen-Flotte sowie einer reinen BEV Typ II – Flotte, die beide ca. 46 Mio. € Investitionsvolumen für Fahrzeuge umfassen, kann der Mix beider Antriebstechnologien (im Verhältnis 2/3 BEV Typ II und 1/3 FCEV) die Investitionskosten auf ca. 40 Mio. € reduzieren.

Demgegenüber stehen höhere Investitionen für beide Lade- und Tank-Infrastrukturen.

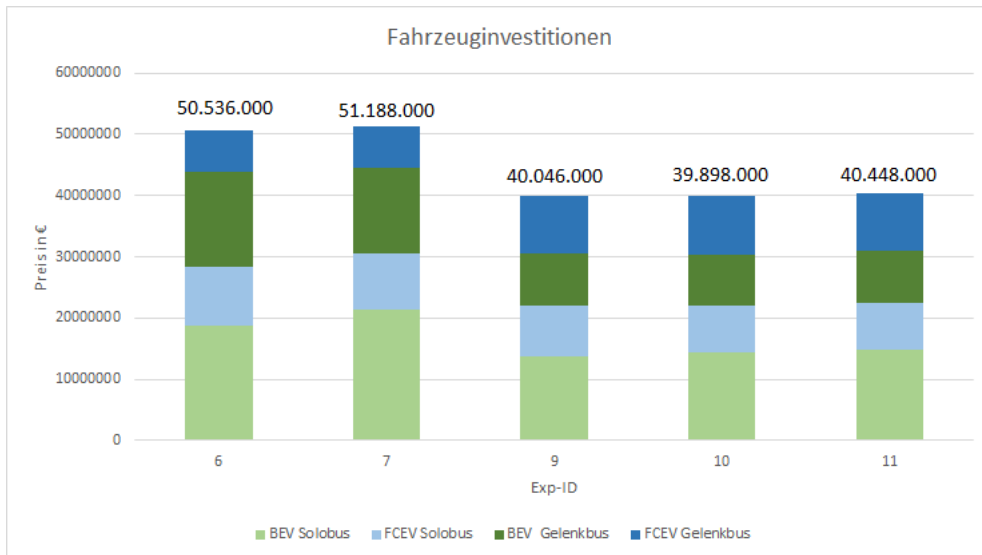


Abbildung 40: Investitionskosten Mix-Experimente (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Betriebskosten

In Abbildung 30 sind die wöchentlichen Betriebskosten für Flotten aus einer Antriebstechnologie dargestellt. Abbildung 41 stellt demgegenüber die Betriebskosten für einen Mix aus Brennstoffzellen- und batterieelektrischen Bussen. Die Ergebnisse zeigen für die verschiedenen Flottenkonzepte ähnliche wöchentliche Betriebskosten (Betriebskosten in allen Konzepten allerdings günstiger als aktueller Betrieb), sodass sich auf Grund der Betriebskosten kein Konzept mit alternativen Antrieben in den Fokus rückt. Im Vergleich zu heute lassen sich mit einer Mix-Flotte 22 % der Betriebskosten senken.

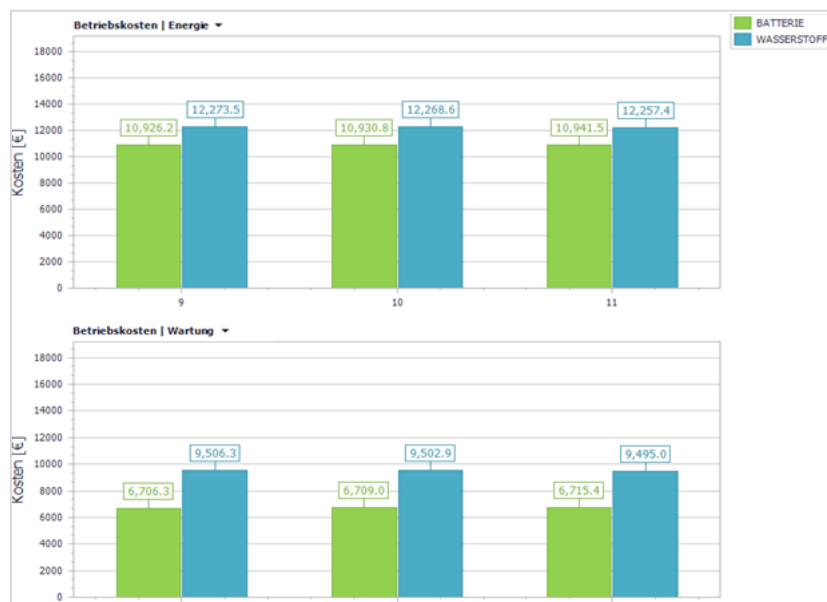


Abbildung 41: Betriebskosten Mix (Quelle: SimPlan AG)

Erkenntnisse

- Der Mix aus batterieelektrischen Fahrzeugen Typ I mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen führt zu einem Mehrbedarf an Fahrzeugen von ca. 20 % (Flottenverhältnis 75% BEV Typ I und 25% FCEV).
- Mit BEV Typ II kann eine Mix-Flotte generiert werden, die keine zusätzlichen Fahrzeuge in der Flotte erfordert. Die Voraussetzung für ein erfolgreiches Mix-Szenario ohne Mehrbedarf liegt in einer umfassenden Infrastruktur, die für jedes BEV einen eigenen Ladepunkt vorsieht. Die Umstellung der Flotte ohne Mehrbedarf an Fahrzeugen erfordert im Mix die Implementierung von mindestens zehn FCEV-Solobussen sowie zehn FCEV-Gelenkbussen.
- Durch den Mix sind keine extremen Lade-Peaks zu verzeichnen. Gleichzeitig setzt dies den Ausbau beider Ladeinfrastrukturen voraus, sowie einer ausreichenden Belieferung von Wasserstoff.
- Die Fahrzeuginvestitionen reduzieren sich gegenüber einer reinen Flotte, da ein erheblicher Fahrzeugmehrbedarf vermieden wird und eine hohe Anzahl an teureren Brennstoffzellenfahrzeugen vermieden wird. Demgegenüber stehen allerdings erhöhte Investitionen für sowohl Lade-, als auch Tank-Infrastruktur.
- Die Betriebskosten sind vergleichbar mit den Betriebskosten einer reinen Flotte bestehend aus nur BEV oder FCEV. Im Vergleich zu heute können im Mix 22 % Betriebskosten eingespart werden.

6.2 Ergebnisse HIS

Die Hanau Infrastruktur Service setzt täglich zehn Fahrzeuge für den Sammelbetrieb gemäß dem Abfallkalender ein. Ein Mehrbedarf an Fahrzeugen ist für die HIS ausgeschlossen, da die Touren nicht geteilt werden dürfen. Es bedarf daher einer Analyse, welche Sammeltouren mit welcher Antriebstechnologie betrieben werden können. Die maßgebenden fahrzeugrelevanten Reichweiten für Abfallsammelfahrzeuge sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tourenlängen

Abbildung 42 veranschaulicht die Gesamtdistanz der einzelnen Touren in Hanau. Da Behälter in Hanau zum Teil im 2-Wochen- und 4-Wochen-Zyklus gesammelt werden, wird als Simulationszeitraum ein gesamter Monat betrachtet. Die einzelnen Wochen sind in Abbildung 42 als Block zusammengefasst, die sich für die einzelnen Touren am Tag zusätzlich aufgliedern. Farblich sind die verschiedenen Abfallfraktionen visualisiert. Grün stellt die Touren für Bio-Abfall dar, gelb – Leichtverpackung, blau – Papier/Pappe/Kartonage und schwarz/grau die einzelnen Restmüll-Touren. Für Restmüll sind täglich allein fünf Abfallsammelfahrzeuge im Einsatz. Die weiteren fünf Fahrzeugen stellen sich täglich individuell für die anderen drei Abfallarten auf.

Papier/Pappe/Kartonage-Touren sowie vereinzelt Restmüll-Touren bilden die größten Touren in Hanau, da die Abfallsammelstelle verhältnismäßig weit von Hanau entfernt ist. Leichtverpackungs-Touren sind im Vergleich sehr kurz, da die Abfallsammelstelle innerhalb von Hanau auf dem Betriebshof der HIS lokalisiert ist. Bio-Touren clustern sich um täglich ähnliche Tourenlängen von ca. 100 km.

Die Distanzen der einzelnen Touren zeigen bereits, dass Brennstoffzellen-Fahrzeuge (Reichweite 500 km) die einzelnen Touren problemlos bedienen können. Batterieelektrische Fahrzeuge (Reichweite - bei Normalverbrauch und Mix zwischen Sammelvorgang und normalen Fahrten in Hanau - ca. 250 km) kommen hingegen im Winter mit einem Zusatzverbrauch zu Reichweitenproblematiken. Es stellt sich demnach die Frage, wie der optimale Flottenmix aussieht, um einerseits alle Touren ganzjährig betreiben zu können und andererseits die Fahrzeuginvestitionen sowie den Wasserstoffbedarf durch eine geringere Anzahl an FCEV zu reduzieren.

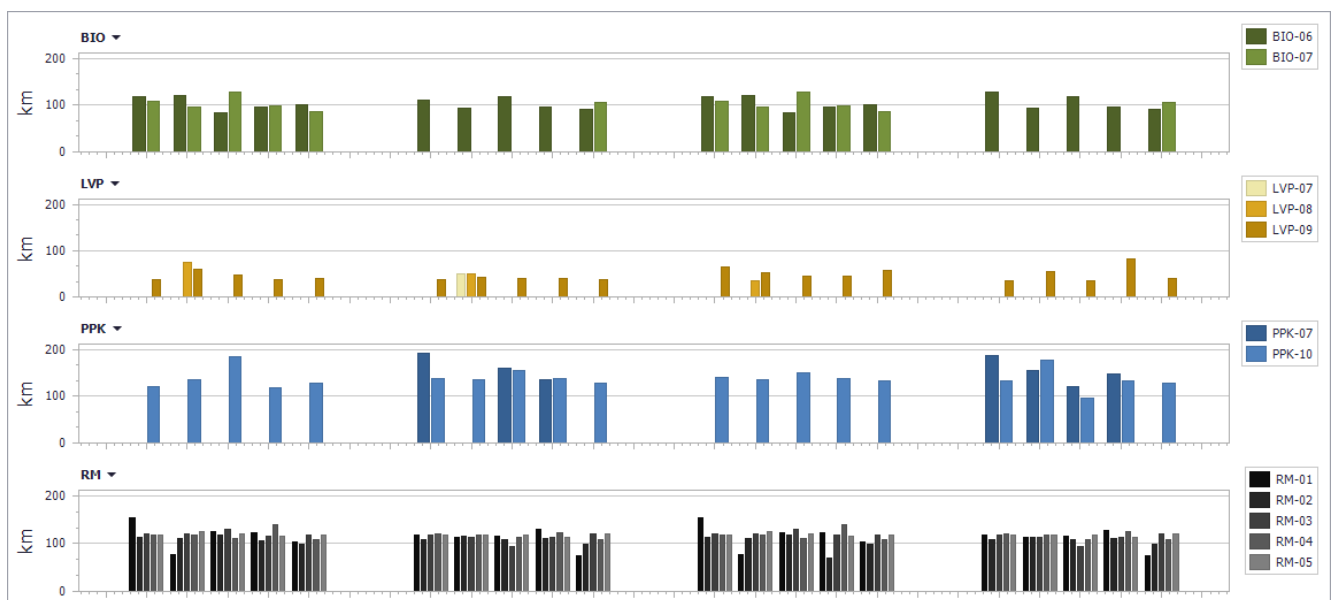


Abbildung 42: Gesamtdistanz pro Tour (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Abfallmenge

Maßgebliche Voraussetzung für den Erhalt der bestehenden Touren ist ein ausreichendes Füllvolumen sowie Nutzlast von alternativ angetriebenen Abfallsammelfahrzeugen. Die Nutzlast eines batterieelektrischen sowie Brennstoffzellen-Müll-Fahrzeugs liegt bei 10 Tonnen (Schimanski, 2019) (FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG, 2021).

Die HIS hat pro Tour täglich zwei Sammelvorgänge zwischen denen das Fahrzeug an der Abfallsammelstelle ablädt sowie erneut am Ende der Tour. Die Fahrzeugbesatzung kann eigens entscheiden, wann die Entleerung zwischen den beiden Sammelvorgängen erfolgen soll.

Abbildung 43 zeigt die Abfallmenge pro Tour. Da alle Touren eine geringere Abfallmenge als 20 Tonnen aufweisen, lassen sich alle Touren in zwei Sammelvorgängen betreiben. Touren der Abfallfraktion Leichtverpackung lassen sich widersprüchlich zu Statistik nicht mit einem Sammelvorgang bewältigen, da für diese Abfallfraktion nicht das Gewicht maßgebend ist, sondern das Volumen. Bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen besteht kein Unterschied im Füllvolumen zu herkömmlichen konventionellen Fahrzeugen, sodass alle LVP-Touren in zwei Sammelvorgängen geleert werden.

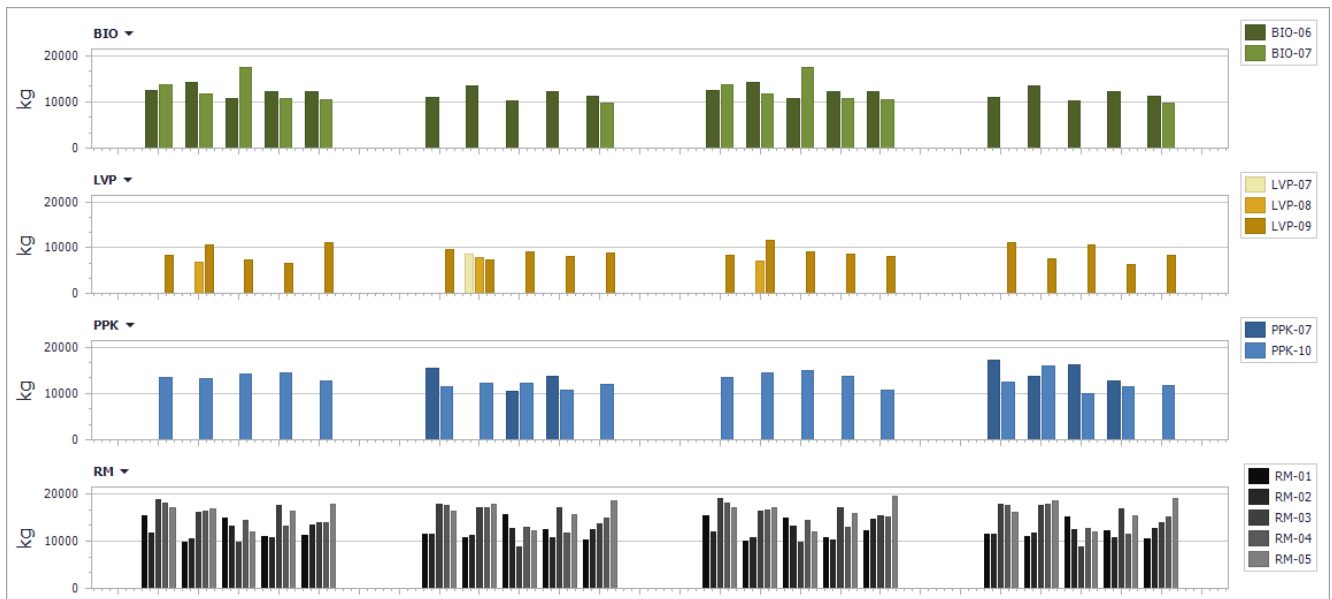


Abbildung 43: Abfallmenge pro Tour (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Erkenntnisse

- PPK-Touren sind die längsten Touren der HIS. LVP- Touren hingegen weisen großes Potenzial auf durch batterieelektrische Abfallsammelfahrzeuge betrieben zu werden.
- Brennstoffzellen-Fahrzeuge können alle Touren in Hanau betreiben. Batterieelektrische Fahrzeuge müssen auf Grund ihrer geringeren Reichweite gezielt Touren zugewiesen werden.
- Alle Touren der HIS können auch mit alternativ angetriebenen Fahrzeugen in zwei Sammelvorgängen geleert werden.

Übergangsszenarien

Brennstoffzellen-Fahrzeuge können auf Grund ihrer Reichweite sowie zeitlich vergleichbaren Tankzeiten den Ist-Betrieb übernehmen. Batterieelektrische Fahrzeuge kommen unter Berücksichtigung von Verlusten in der Batteriekapazität über die Jahre an Probleme bei einzelnen Touren. Im Folgenden wird analysiert, welche Anzahl an BEV in der Flotte integriert sein können um den Betrieb der HIS aufrecht zu erhalten.

Tabelle 16 greift diese Analyse in Übergangsszenarien auf. Diesel-Fahrzeuge können im Betrieb 1:1 mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen umgestellt werden, sodass die Obergrenze an BEV ausschlaggebend ist. In den Simulationsexperimenten wird nacheinander jeweils ein weiteres Diesel-Fahrzeug durch ein BEV ersetzt.

Abgebildet sind in Tabelle 16 meist zwei auf einander folgende Zeilen, die nahezu dasselbe Experiment untersuchen mit dem Unterschied, dass die erste einen Monat mit Normalverbrauch abbildet und anschließend selbe Parameter für einen Wintermonat mit Zusatzverbrauch simuliert werden.

Ladestrategie

Die Ladestrategie beinhaltet, dass jedes batterieelektrische Fahrzeug der HIS einen eigenen Ladepunkt hat. Die BEV werden täglich am Ende der Tour mit einer max. Leistung von 50 kW auf 100 % SoC geladen. Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden betankt, sobald der SoC der Fahrzeuge einen Tankstand von unter 30 % am Ende einer Tour aufweist. Die FCEV werden ebenfalls auf 100 % aufgetankt.

Tourenplanung

Mittels Algorithmus wird eine Reihenfolge für die Behältersammlung innerhalb der Tour definiert. Die Tourenplanung in allen durchgeführten Experimenten erfolgt statisch. Dies bedeutet, dass zu Beginn der Tour eine Reihenfolge berechnet wird und nach der Entleerung des Fahrzeugs im Anschluss an Sammelvorgang 1 fährt das Fahrzeug wieder zum letzten Standort zurück und setzt die Tour fort. Die Simulationseingabemaske ermöglicht auch die Auswahl einer dynamischen Tourenplanung, bei der im Anschluss an den Abladevorgang eine erneute Berechnung der noch ausstehenden Behälter erfolgt. Dies entspricht allerdings nicht dem Betriebsablauf der HIS, sodass lediglich die statische Tourenplanung simuliert ist.

Tabelle 16: Experimentmatrix Übergangsszenarien HIS (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Exp ID	Szenario	Anzahl Gesamt	Diesel			Batterie			Wasserstoff			Tourenplanung	Ladeparameter Batterie					Ladeparameter Wasserstoff			Pausenzeit [Min.]	Prozesszeit [s]		Zusatzverbrauch Temperatur einfluss	Status
			%	Anzahl	Fraktion	%	Anzahl	Fraktion	%	Anzahl	Fraktion		Anzahl [%]	Anzahl	Leistung	Gesamt	Laden-bis	Anzahl	Muss-Laden	Laden-bis		Sammeln	Leeren		
0	SOLL	10	70%	7	RM ; LVP ; BIO	-	-	-	30%	3	PPK ; RM	Statisch	-	-	-	-	-	1	0,3	1	30	4	900	keine	OK
1	SOLL	10	70%	7	RM ; LVP ; BIO	10%	1	LVP	20%	2	PPK ; RM	Statisch	100%	1	50	50	1	1	0,3	1	30	4	900	keine	OK
2	SOLL	10	70%	7	RM ; LVP ; BIO	10%	1	LVP	20%	2	PPK ; RM	Statisch	100%	1	50	50	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	OK
3	SOLL	10	60%	6	RM ; PPK ; BIO	30%	3	LVP ; BIO	10%	1	PPK	Statisch	100%	3	50	150	1	1	0,3	1	30	4	900	keine	OK
4	SOLL	10	60%	6	RM ; PPK ; BIO	30%	3	LVP ; BIO	10%	1	PPK	Statisch	100%	3	50	150	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	OK
5	SOLL	10	50%	5	RM ; PPK	40%	4	RM ; LVP ; BIO	10%	1	PPK	Statisch	100%	4	50	200	1	1	0,3	1	30	4	900	keine	OK
11	SOLL	10	50%	5	RM ; PPK	40%	4	RM ; LVP ; BIO	10%	1	PPK	Statisch	100%	4	50	200	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	OK
12	SOLL	10	40%	4	RM ; PPK	50%	5	RM ; LVP ; BIO	10%	1	PPK	Statisch	100%	5	50	250	1	1	0,3	1	30	4	900	keine	OK
12	SOLL	10	40%	4	RM ; PPK	50%	5	RM ; LVP ; BIO	10%	1	PPK	Statisch	100%	5	50	250	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	OK
14	SOLL	10	30%	3	RM ; PPK	60%	6	RM ; LVP ; BIO	10%	1	PPK	Statisch	100%	6	50	300	1	1	0,3	1	30	4	900	keine	OK
13	SOLL	10	30%	3	RM ; PPK	60%	6	RM ; LVP ; BIO	10%	1	PPK	Statisch	100%	6	50	300	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	Fehler
7	SOLL	10	50%	5	RM ; LVP ; BIO	-	-	-	50%	5	PPK ; RM	Statisch	-	-	-	-	-	1	0,3	1	30	4	900	keine	OK
8	SOLL	10	50%	5	RM ; PPK	50%	5	RM ; LVP ; BIO	-	-	-	Statisch	100%	5	50	250	1	-	-	-	30	4	900	keine	OK
9	SOLL	10	50%	5	RM ; PPK	50%	5	RM ; LVP ; BIO	-	-	-	Statisch	100%	5	50	250	1	-	-	-	30	4	900	0,56 kWh/km	OK
10	SOLL	10	100%	10	alle	-	-	-	-	-	-	Statisch	-	-	-	-	-	-	-	-	30	4	900	keine	OK

Implementierung 1 BEV

Exp-ID 1 und 2 zeigen die Implementierung eines ersten BEV in der Flotte. Abbildung 42 hat gezeigt, dass die Gesamtdistanzen der Fraktionen sehr unterschiedlich sind. Aus diesem Grund ist eine Zuweisung der Antriebstechnologien zu Fraktionen bei der Simulation Voraussetzung. Da LVP die kürzesten Touren sind, wird das erste BEV der Fraktion LVP zugewiesen. Da an einzelnen Tagen im Monat mehr als eine LVP-Tour betrieben wird, ist die Fraktion zudem auch noch dem Diesel-Antrieb zugeordnet.

Implementierung 3 BEV

In Exp-ID 3 und 4 ist mit zwei zusätzlichen BEV simuliert. Neben Leichtverpackung bilden auch Bio-Abfall durchschnittlich kürzere Touren, sodass diese Fraktion ebenfalls vorrangig BEV zugeordnet wird. LVP wird zudem ausschließlich von BEV gesammelt, da die Fahrzeuganzahl ausreicht, um täglich alle Touren mit BEV zu übernehmen. Die längeren Touren für Papier/Pappe/Kartonage sowie Restmüll werden durch Diesel- und Brennstoffzellen-Müllfahrzeuge gesammelt.

Implementierung 4 BEV

Mit vier BEV müssen erste kleinere Restmüll-Touren durch batterieelektrische Fahrzeuge übernommen werden. Der Betrieb von Leichtverpackung und Bio-Abfall erfolgt ausschließlich durch die vier BEV. Die Simulation ist für einen Monat unter Normalverbrauch sowie im Wintermonat erfolgreich (vgl. Exp-ID 5 und 11).

Implementierung 5 BEV

Die Simulation ist bei gleicher Fraktionszuordnung, wie zuvor, auch mit fünf BEV erfolgreich (vgl. Exp-ID 12).

Implementierung 6 BEV

Der Einsatz von sechs BEV führt im Winter zu Problemen bei der Simulation. Bei der Tourenzuweisung müssen die BEV zum Teil etwas längere RM-Touren sammeln, die unter einem Zusatzverbrauch im Winter zu Reichweitenproblemen führen.

Energieverbrauch

Der Zusatzverbrauch im Winter ist bei einem Müllfahrzeuge nicht so beträchtlich, wie bei einem batterieelektrischen Bus, da ein geringeres Volumen im Fahrzeuginnenraum beheizt werden muss. Dennoch erfolgt ein gewisser Zusatzverbrauch bei Müllfahrzeugen. In Abbildung 44 ist der tägliche Energieverbrauch für BEV bei Normalverbrauch sowie mit Zusatzverbrauch beispielhaft an Exp-ID 5 und 11 aufgezeigt. Da an einigen Tagen in Hanau nur neun Touren vorgesehen sind, erfolgt bei einem Zusatzverbrauch eine andere Tourenzuweisung als bei Normalverbrauch. Bei Normalverbrauch werden alle vier BEV eingesetzt. An Tagen mit nur neun Touren wird allerdings vereinzelt auf Grund des Zusatzverbrauchs ein BEV zurückgehalten.

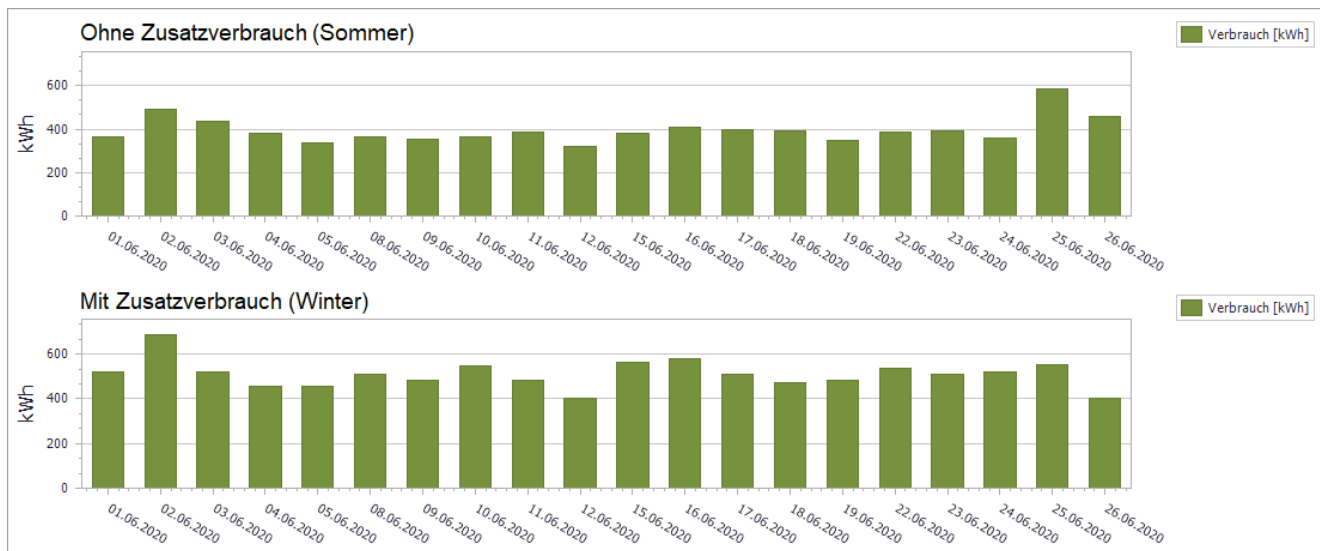


Abbildung 44: Energieverbrauch BEV Sommer/Winter (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Abbildung 45 bildet für die Übergangsszenarien die Verbrauchsentwicklung je Kraftstoff/Energieträger ab. Zu Beginn der Umstellungsphase ist der Diesel-Verbrauch noch relativ hoch, der mit zunehmender Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge abnimmt. Da die HIS bereits ein Brennstoffzellen-Fahrzeug ausgeschrieben hat, wird in allen Experimenten mit mindestens einem FCEV simuliert. Über den Verbrauch des Wasserstoffs lässt sich auf Grund der geringen Fahrzeuganzahl nur bedingt eine Aussage treffen. Im Fokus steht die Zunahme des Stromverbrauchs mit jedem weiteren BEV. Bei der Implementierung von vier bzw. fünf BEV ist der Energieverbrauch pro Fahrzeug wesentlich höher als mit einer niederschweligen Anzahl an BEV in der Flotte. Ursache ist, dass bei höherer Anzahl an BEV nicht nur kurze LVP-Touren betrieben werden, sondern auch längere RM-Touren von BEV übernommen werden müssen. Der Betrieb mit nur einem BEV zeigt, dass an den meisten Tagen das Fahrzeug gar nicht eingesetzt wird. Da das Fahrzeug nur kleine LVP Touren übernimmt, ist der Verbrauch bei ca. 85 kWh/Fzg. Mit drei BEV steigt der Verbrauch pro Fahrzeug bereits auf ca. 100 kWh/Fzg. Bei vier BEV steigt der Verbrauch auf ca. 120 kWh/Fzg. und mit fünf BEV auf 140 kWh/Fzg..

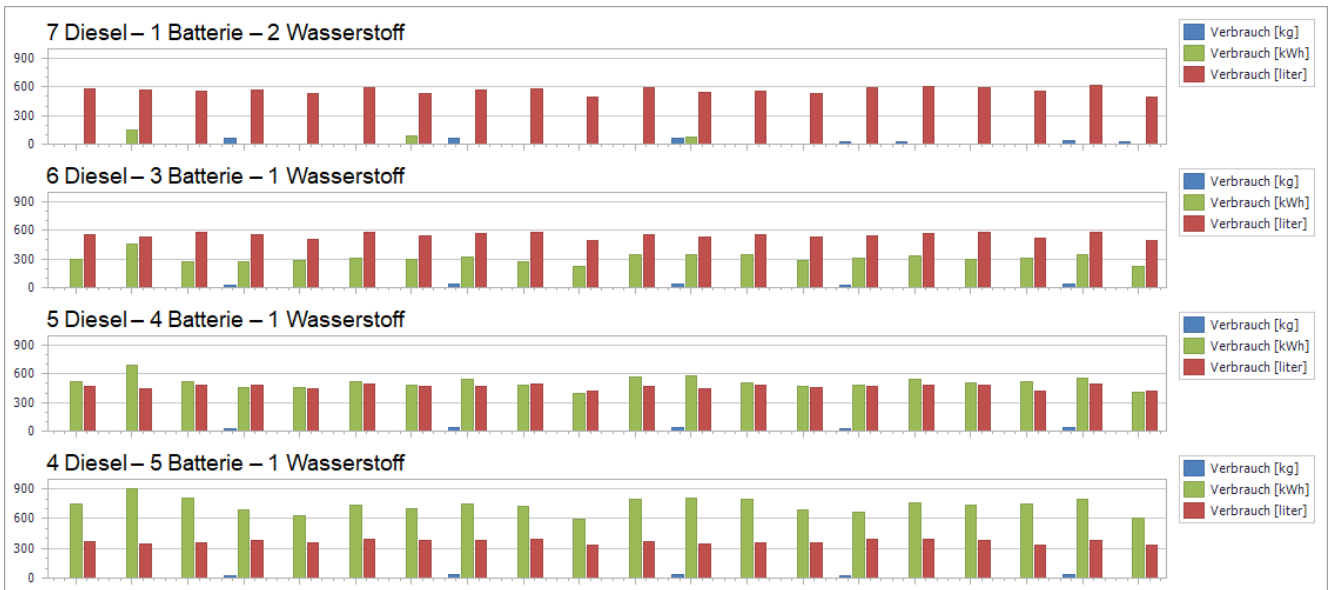


Abbildung 45: Verbrauchsentwicklung beim Übergang von einem zu fünf BEV (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Erkenntnisse

- PPK- und RM-Touren müssen vorrangig durch Diesel- bzw. Brennstoffzellen-Fahrzeuge betrieben werden.
- LVP- und Bio-Touren können von batterieelektrischen Müllfahrzeugen gesammelt werden.
- Die betriebliche Umsetzung ist nur mit max. fünf BEV in der Flotte möglich. Bei diesem Grenzwert ist auf eine Zuordnung der neueren BEV auf die täglich kürzesten RM-Touren zu achten.
- Je mehr batterieelektrische Fahrzeuge eingesetzt werden, umso mehr steigt der Energieverbrauch pro Fahrzeug, da nicht nur kurze LVP-Touren betrieben werden, sondern längere RM-Touren mitübernommen werden müssen.

Mix-Szenarien

Die Implementierung von batterieelektrischen Müllfahrzeugen im Mix mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen sind in Tabelle 17 aufgelistet. Abgebildet werden Experimente, die den Endausbau ohne weitere Diesel-Fahrzeuge abbilden. Die verschiedenen Mix-Experimente werden zudem dem Betrieb einer reinen Brennstoffzellen-Flotte sowie dem Ist-Betrieb gegenübergestellt. Der Vergleich zu einer reinen batterieelektrischen Flotte ist in diesem Zuge nicht möglich, da dieser mit einem Mehrbedarf an Fahrzeuge verbunden ist. Der Mix ist für ein Verhältnis zwischen Batterie und Brennstoffzelle von 3:7 Fahrzeugen, 4:6 Fahrzeugen und 5:5 Fahrzeugen simuliert.

Tabelle 17: Experimentmatrix Mix-Szenarien HIS (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Exp ID	Szenario	Anzahl Gesamt	Diesel			Batterie			Wasserstoff			Tourenplanung	Ladeparameter Batterie					Ladeparameter Wasserstoff			Pausenzeit [Min.]	Prozesszeit [s]		Zusatzverbrauch Temperatureinfluss	Status
			%	Anzahl	Fraktion	%	Anzahl	Fraktion	%	Anzahl	Fraktion		Anzahl [%]	Anzahl	Leistung	Gesamt	Laden-bis	Anzahl	Muss-Laden	Laden-bis		Sammeln	Leeren		
0	SOLL	10	-	-	-	-	-	-	100%	10	alle	Statisch	-	-	-	-	-	1	0,3	1	30	4	900	keine	OK
1	SOLL	10	-	-	-	30%	3	LVP ; BIO	70%	7	RM ; PPK ; BIO	Statisch	100%	3	50	150	1	1	0,3	1	30	4	900	keine	OK
2	SOLL	10	-	-	-	30%	3	LVP ; BIO	70%	7	RM ; PPK ; BIO	Statisch	100%	3	50	150	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	OK
4	SOLL	10	-	-	-	40%	4	RM ; LVP ; BIO	60%	6	RM ; PPK	Statisch	100%	4	50	200	1	1	0,3	1	30	4	900	keine	OK
3	SOLL	10	-	-	-	40%	4	RM ; LVP ; BIO	60%	6	RM ; PPK	Statisch	100%	4	50	200	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	OK
5	SOLL	10	-	-	-	50%	5	RM ; LVP ; BIO	50%	5	RM ; PPK	Statisch	100%	5	50	250	1	1	0,3	1	30	4	900	keine	OK
6	SOLL	10	-	-	-	50%	5	RM ; LVP ; BIO	50%	5	RM ; PPK	Statisch	100%	5	50	250	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	OK
7	SOLL	10	-	-	-	50%	5	RM ; LVP ; BIO	50%	5	RM ; PPK	Statisch	100%	5	150	500	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	OK
8	SOLL	10	-	-	-	50%	5	RM ; LVP ; BIO	50%	5	RM ; PPK	Statisch	100%	5	22	110	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	OK
9	SOLL	10	-	-	-	50%	5	RM ; LVP ; BIO	50%	5	RM ; PPK	Statisch	100%	5	15	75	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	OK
10	SOLL	10	-	-	-	50%	5	RM ; LVP ; BIO	50%	5	RM ; PPK	Statisch	100%	5	11	55	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	Fehler
11	SOLL	10	-	-	-	50%	5	RM ; LVP ; BIO	50%	5	RM ; PPK	Statisch	100%	5	13	65	1	1	0,3	1	30	4	900	0,56 kWh/km	Fehler
12	SOLL	10	100%	10	alle	-	-	-	-	-	-	Statisch	-	-	-	-	-	-	-	-	30	4	900	keine	OK

Lade-/Tankmenge

Abbildung 46 gibt eine Übersicht über den Kraftstoff- bzw. Energiebedarf in den verschiedenen Szenarien am Beispiel der Woche 4 im Abfallkalender. Hier bestätigt sich die Aussage über einen erhöhten Strombedarf pro Fahrzeug bei steigender Anzahl an BEV in der Flotte.

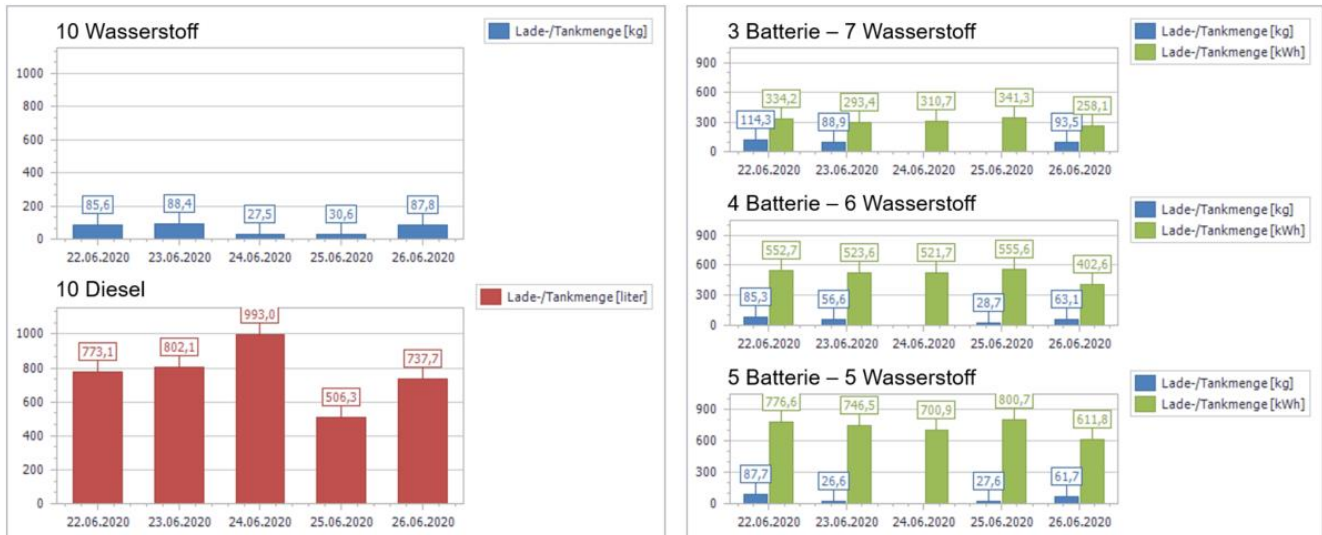


Abbildung 46: Lade-/Tankmenge pro Szenario in Woche 4 (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Der tägliche Wasserstoffbedarf ist auf Grund der Tankstrategie, bei der Fahrzeuge nur betankt werden, sobald der Tankstand bei unter 30% am Ende der Tour liegt, wenig aussagekräftig (vgl. Abbildung 46). Eine verlässlichere Aussage hinsichtlich der Dimensionierung einer Wasserstoff-Infrastruktur gibt Abbildung 47, die den Bedarf eines gesamten Monats abbildet.

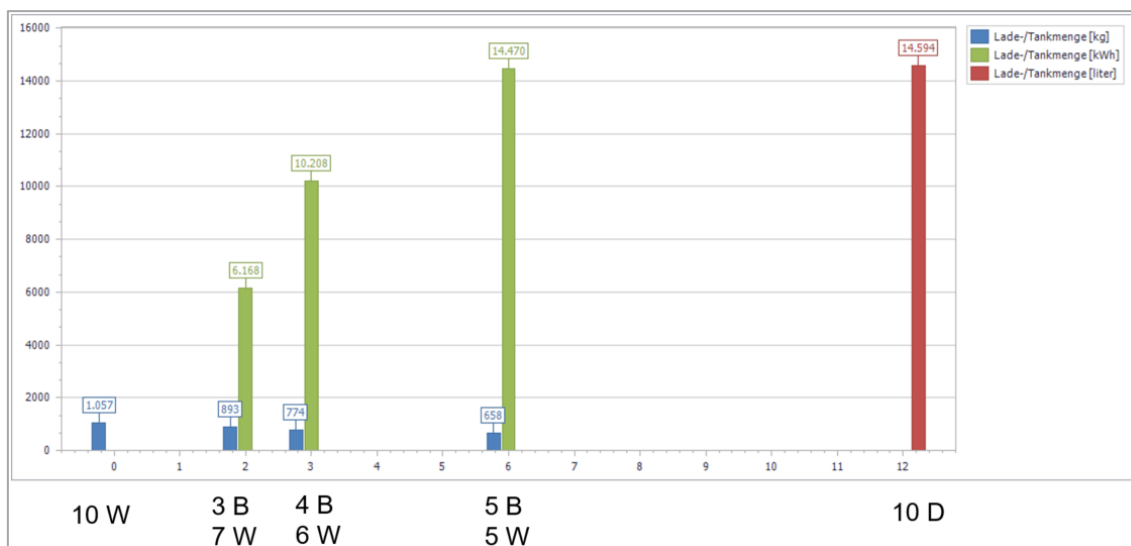


Abbildung 47: Monatliche Lade-/Tankmenge pro Szenario (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Ladestrategie

Bei einem Mix mit fünf batterieelektrischen Fahrzeugen und fünf Brennstoffzellen-Fahrzeugen wurde mit unterschiedlichen Ladestrategien simuliert (vgl. Tabelle 17), um ein möglichst optimales Ladekonzept zu identifizieren. Großer Vorteil für die Ladestrategie der HIS ist, dass Fahrzeuge bereits gegen 14:00 Uhr die Tour beenden und anschließend bis zum Ausrücken am nächsten Morgen um 06:00 Uhr ein langes verfügbares Ladefenster bereithalten. Um Aussagen bezüglich der Ladestrategie zu treffen wurde anhand eines Wintermonats in verschiedenen Experimenten die Ladestärke pro Ladepunkt zwischen 11 und 150 kW variiert. Auf Grund der geringeren Anzahl an Fahrzeugen der HIS im Vergleich zur HSB wurde unterstellt, dass die max. Energielast der HIS auf dem Betriebshof ausreichend ist, um alle Fahrzeuge gleichzeitig mit der maximalen Energie pro Ladepunkt zu laden.

Da mit fünf batterieelektrischen Fahrzeugen der Betrieb im Übergangsszenario mit 50 kW Ladeleistung zu einer erfolgreichen Simulation geführt hat, führt eine der HSB vergleichbare Ladestärke von 150 kW ebenfalls zu einem erfolgreichen Experiment.

Der verfügbare Zeitraum für den Ladeprozess der BEV bei der HIS verstärkt das Potenzial die Ladestärke pro Ladepunkt zu senken und somit extreme Lade-Peaks zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde in verschiedenen Experimenten mit Ladestärken im Wechselstrombereich von 22 kW, 15 kW, 13 kW und 11 kW simuliert. Tabelle 17 zeigt, dass mit 22 kW und 15 kW der Betrieb weiterhin aufrecht erhalten werden kann. Bei 13 kW sowie 11 kW werden die Fahrzeuge im Winter nicht rechtzeitig ausreichend aufgeladen und einzelne Touren können nicht vollständig gefahren werden.

Lade-Peak

Für einen Mix mit fünf BEV ist der Verlauf der Lademenge am Beispiel verschiedener Experimente mit unterschiedlicher Ladestärke in Abbildung 48 visualisiert. Es lässt sich sehr gut ableiten, wie eine sinkende Ladestärke zu einem abflachenden Lade-Peak führt und gleichzeitig den Ladeprozess über den langen verfügbaren Zeitraum verlängert.

Bei einer Ladestärke von 150 kW entsteht eine hohe Gesamtlast. Die Fahrzeuge sind zudem zeitnah gegen 17:00 Uhr vollständig geladen. Da hier ein deutlich längeres Zeitfenster für den Ladeprozess vorhanden ist, bietet es sich an die Ladestärke zu reduzieren. Bei 50 kW sind die Fahrzeuge gegen 20:00 Uhr vollständig geladen und die Gesamtlast nimmt bereits erheblich ab. Mit 22 kW-Ladung im Wechselstrombereich verlängert sich der Ladeprozess und nutzt die verfügbare Zeit sehr gut aus. Bei 15 kW wird die verfügbare Zeitspanne ausgereizt und die Fahrzeuge sind erst kurz vor Beginn des Ausrückens vollständig geladen.

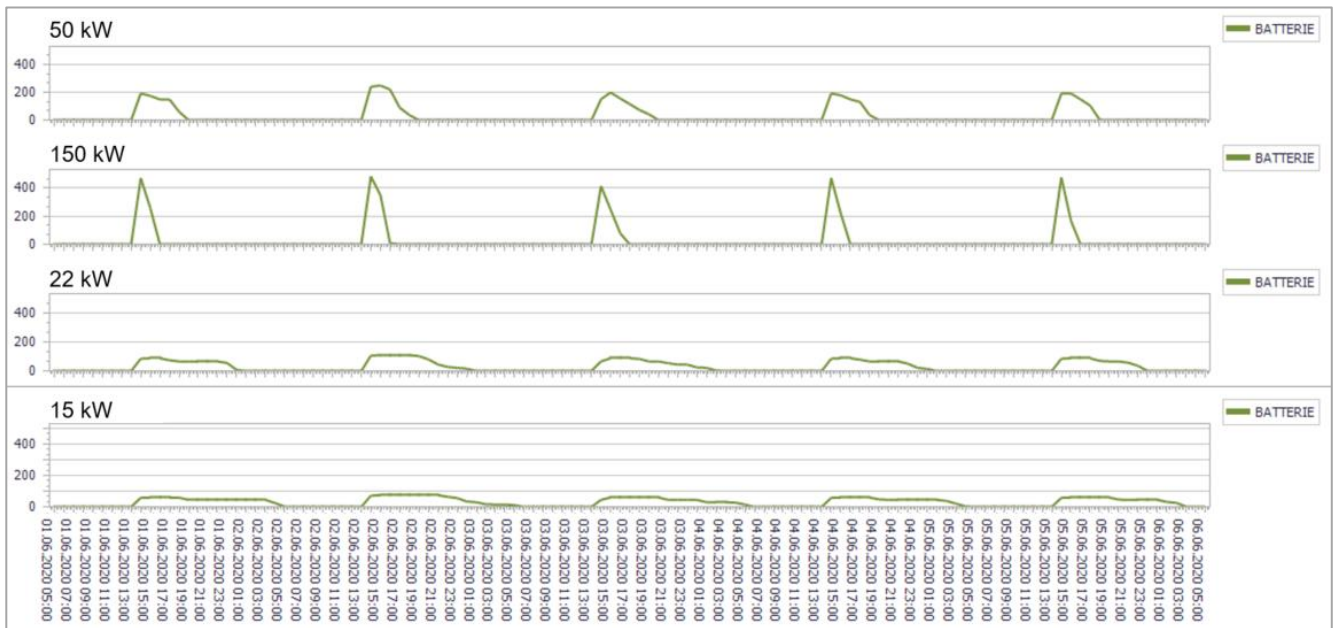


Abbildung 48: Verlauf Lademenge BEV für eine Woche (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

State of Charge der Fahrzeuge

Das Ausreizen des Ladeprozesses bei 15 kW-Ladung wird auch bei der Betrachtung des SoC der fünf BEV in Abbildung 49 deutlich. Die Grafik visualisiert den jeweiligen Ladestand der fünf BEV für eine Woche. Zu Beginn der Tour sinkt der Ladestand und wird anschließend wieder auf 100% aufgeladen. Bei 15 kW-Ladung wird ersichtlich, dass die Fahrzeuge erst kurz vor dem Ausrücken vollständig geladen sind und am Beispiel der blauen Kurve zum Teil kein 100 % SoC erreicht wird.

Anhand des SoC wird deutlich, dass die Batteriekapazität auf den meisten Touren nicht grenzwertig ausgenutzt wird und das Fahrzeug mit einer Restkapazität ins Depot zurückkehrt (meist SoC am Ende der Tour zwischen 30-60 %). Das Fahrzeug des blauen SoC sammelt eine Restmüll-Tour, die verhältnismäßig etwas länger ist und somit teilweise die Batteriekapazität nahezu vollständig beansprucht (SoC am Ende der Tour 10 %).

Der schwarze SoC bestätigt zusätzlich, dass oftmals nur neun Fahrzeuge eingesetzt werden, da der Ladestand an vier von fünf Tagen bei 100 % bleibt. In einem solchen Fall sollte eine geringere Ladestrategie gewählt werden sowie das Fahrzeug erst bei einem geringeren Ladestand vorgehalten werden und kurz vor dem Ausrücken auf 100 % geladen werden.

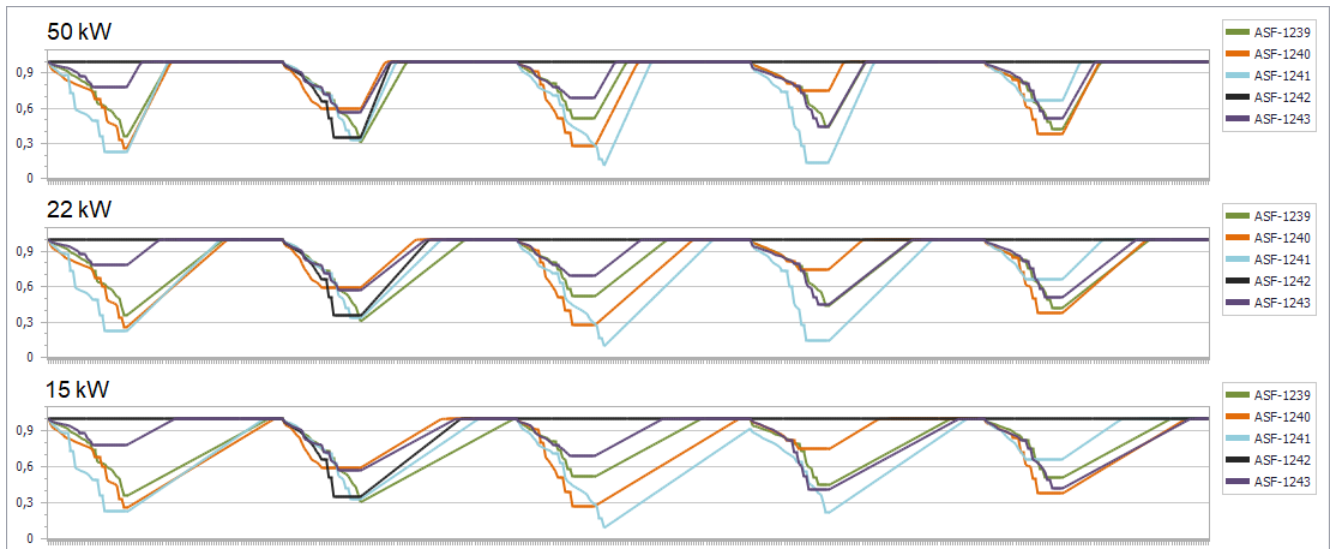


Abbildung 49: SoC der fünf BEV (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Investitionskosten Fahrzeuge

Die Umstellung der Flotte auf alternative Antriebe ist für Abfallsammelfahrzeuge mit einem großen Mehraufwand verbunden. In Abbildung 50 ist das Investitionsvolumen für verschiedene Flottenzusammenstellungen aufgezeigt. Die steigenden Kosten für alternative Antriebe werden ersichtlich durch den Wiederbeschaffungswert der aktuellen Diesel-Flotte der HIS. FCEV nehmen dabei den größten Investitionsaufwand ein. Die Implementierung einer größeren Anzahl an BEV kann demnach das Investitionsvolumen senken. Ein erhöhtes Investitionsvolumen für beide Infrastrukturen kann seitens HIS vermieden werden, da die Wasserstoff-Infrastruktur der HSB mitgenutzt wird.

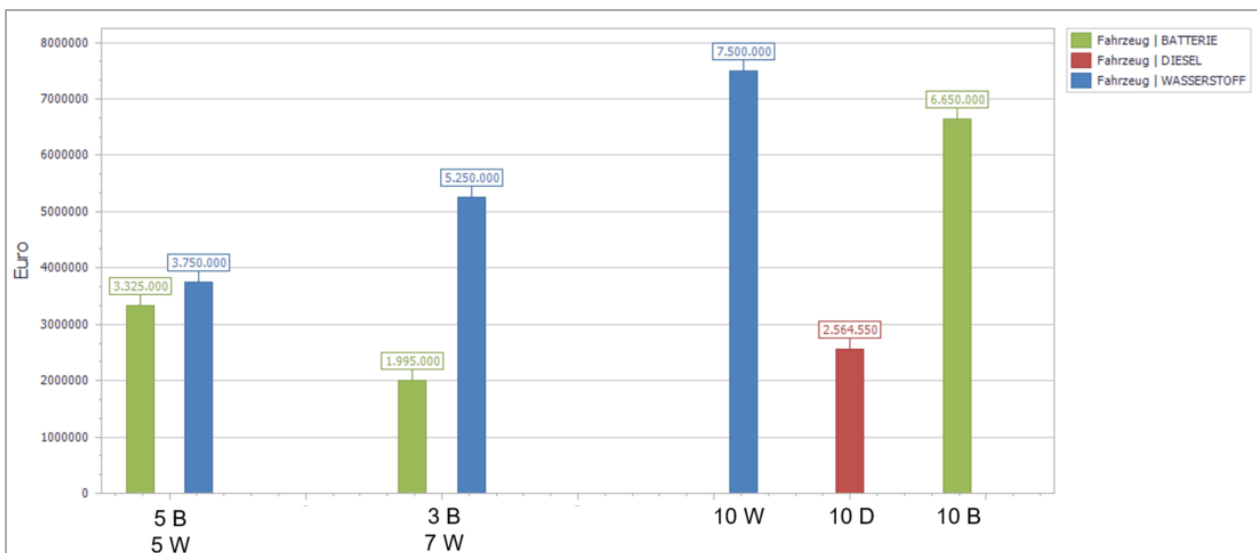


Abbildung 50: Investitionskosten Fahrzeuge (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Betriebskosten

Abbildung 51 stellt die monatlichen Betriebskosten von Ist-Betrieb über Übergangsszenarien bis Endausbau in verschiedenen Konstellationen dar. Gezeigt sind Betriebskosten für den Kraftstoff/Energieträger sowie Wartung der Fahrzeuge. Im Ist-Betrieb ist monatlich mit rund 21.200 € zu kalkulieren. Bei der Umstellung der ersten drei Fahrzeuge (2 FCEV und 1 BEV) sinken die monatlichen Betriebskosten auf ca. 19.357 €. In einer weiteren Übergangsstufe mit nur noch drei Diesel-Fahrzeugen und vier BEV sowie drei FCEV sinken die monatlichen Betriebskosten weiter auf ca. 16.392 €. Im Endausbau mit einem Mix aus fünf BEV und fünf FCEV sinken die Ausgaben auf 13.600 €. Sofern weniger BEV eingesetzt werden, steigen die Betriebskosten auf ca. 14.485 €, da Wasserstoff noch verhältnismäßig teuer ist. Selber Grund führt zu dem Ergebnis steigender Ausgaben von ca. 15.047 € bei einer reinen Brennstoffzellen-Flotte.

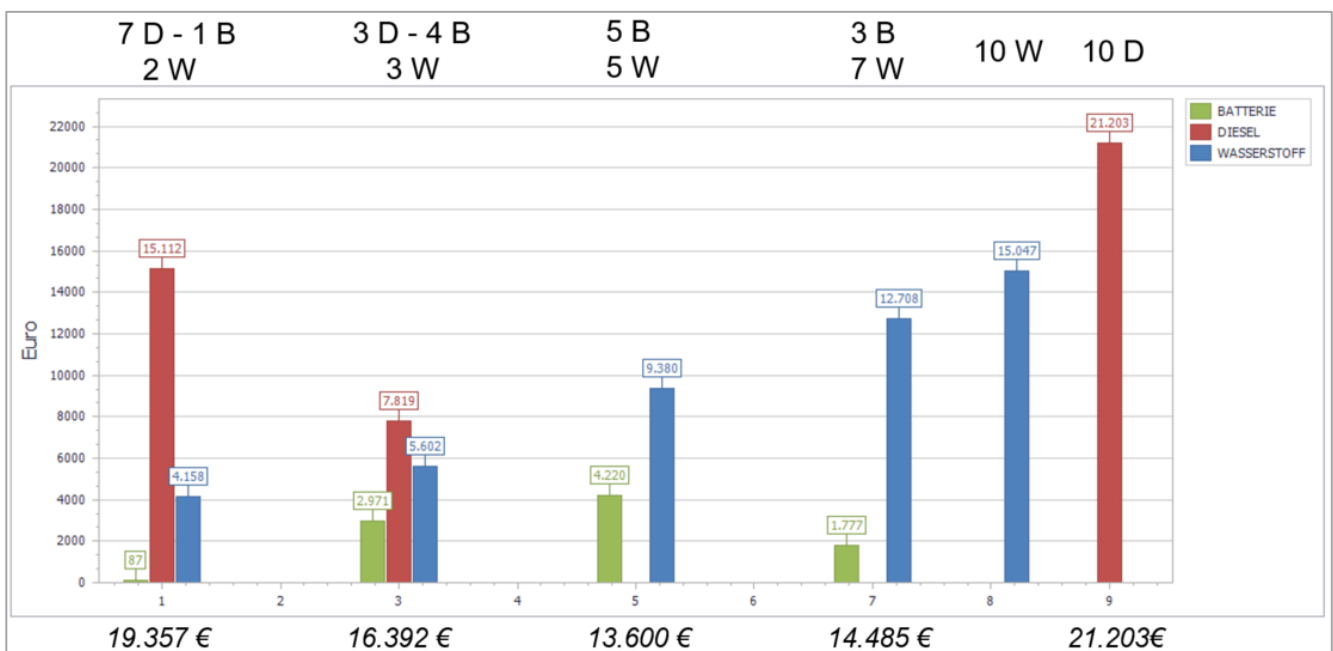


Abbildung 51: Monatliche Betriebskosten für Kraftstoff/Energieträger und Wartung (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Lokale Emissionen

Die Umstellung einzelner Fahrzeuge auf alternative Antriebe kann bereits einen erheblichen Beitrag für die Gesellschaft in Hanau erzeugen (vgl. Abbildung 52). Mit der Implementierung von drei alternativ angetriebenen Fahrzeugen können bei Verwendung von grünem Strom und Wasserstoff 26 % der lokalen Emissionen eingespart werden. Die Umstellung von sieben Diesel-Fahrzeugen erzeugen 63 % weniger CO₂-Ausstoß.

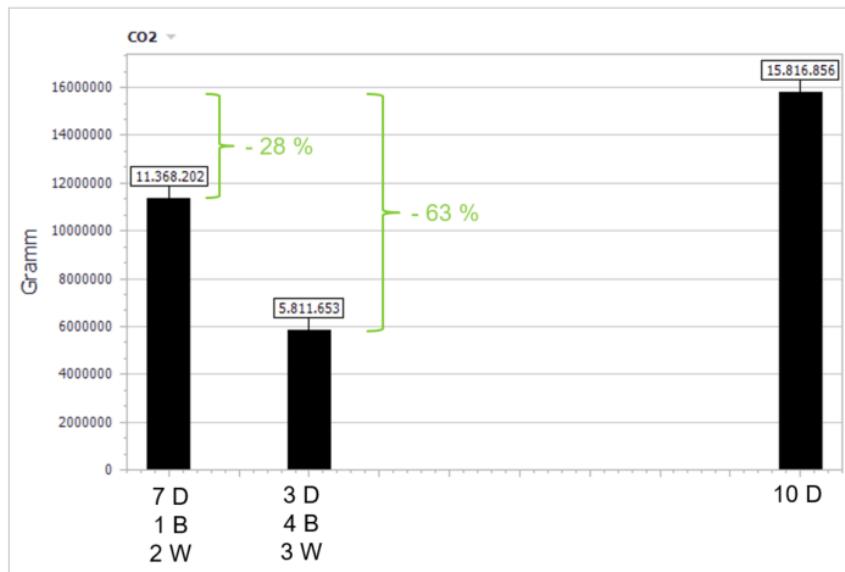


Abbildung 52: Einsparpotenzial der lokalen Emissionen durch HIS (Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Erkenntnisse

- Ein Mix aus BEV und FCEV bringt einen ausgewogenen Bedarf an Wasserstoff und Strom mit sich und reduziert eine hohe Netzlast.
- Hohe Ladestärke an Ladepunkten ist nicht erforderlich, da Fahrzeuge von 14:00 Uhr bis 06:00 Uhr über Nacht laden können. Bei einer 15 kW-Ladung kann der Betrieb gerade so aufrechterhalten werden. Eine 22 kW-Ladung senkt die Gesamtlast auf dem Betriebshof ab und nutzt die verfügbare Zeitspanne sehr gut aus.
- Der SoC der BEV ist oftmals am Ende der Tour zwischen 30 und 60 %. Bei einem Mix mit fünf BEV muss mehrfach die Woche ein Fahrzeug eine verhältnismäßig längere Restmüll-Tour sammeln, was in einem niedrigen SoC resultiert (ca. 10-15 % SoC am Ende der Tour).
- Die Implementierung von BEV in der Flotte senkt das Investitionsvolumen für Fahrzeuge bei der Umstellung auf alternative Antriebe. Ein erhöhtes Investitionsvolumen für eine Lade- und Tankinfrastruktur entsteht nicht, da die HIS die Wasserstoff-Infrastruktur der HSB mitnutzen würde.
- Die Umstellung auf alternative Antriebe senkt die monatlichen Betriebskosten immens. Bei einem Mix aus fünf BEV und fünf FCEV können die Betriebskosten gegenüber heute um 36 % gesenkt werden. Sinkende Wasserstoffpreise verstärken das Potenzial zusätzlich.
- Die Umstellung beinhaltet gleichzeitig ein beträchtliches Einsparpotenzial an lokalen Emissionen in Hanau. Drei konventionell angetriebene Fahrzeuge weniger erzeugen bei Verwendung von grünem Strom und Wasserstoff bereits eine Verringerung der CO₂ Emissionen um 28 %. Mit sieben Dieselfahrzeugen weniger können 63 % der aktuellen Emissionen eingespart werden.

6.3 Übertragbarkeit auf andere Verkehrsunternehmen und kommunale Entsorgungsbetriebe

Die erstellten Simulationsmodelle bieten der HSB und HIS die Möglichkeit umfangreiche Analysen zu Betriebsprozessen beim Einsatz alternativ angetriebener Fahrzeuge durchzuführen. Die Verkehrsmodelle in der aktuellen Fassung stellen die Analysegrundlage für die Stadt Hanau dar. Die Übertragbarkeit der Verkehrsmodelle ist mit einem gewissen Arbeitsaufwand verbunden, aber grundsätzlich möglich und erwünscht.

Aus den Erkenntnissen des Forschungsprojektes lassen sich einige Aussagen und Ergebnisse auch auf andere Verkehrsunternehmen und kommunale Entsorgungsbetriebe übertragen. Ein deutlich höherer Mehrwert, der in der Entwicklung des Simulationsmodells steckt, birgt die Implementierung eigener Daten in die Datenstruktur und der Möglichkeit eigens definierte Szenarien zu simulieren und zu analysieren. Auf diese Weise können auf den Fahr- und Umlaufplan abgestimmte, eigene strategische Entscheidungen entwickelt werden und Aussagen ein deutlich höheres Gewicht verleihen.

Übertragbarkeit Ergebnisse

Die Ergebnisse für Hanau treffen Aussagen zur Auslastung der Fahrzeugflotte und Ladeinfrastruktur, dem Ladezustand der Flotte, Energieverbrauch und –bedarf sowie Wirtschaftlichkeit und Umweltauswirkungen. Die gewonnenen Erkenntnisse können darüber hinaus auch anderen Verkehrsunternehmen und kommunalen Entsorgungsbetrieben die strategischen Planungen bei der Umstellung auf alternative Antriebe stützen.

Verkehrsunternehmen

Verkehrsunternehmen müssen bei der Umstellung auf eine rein batterieelektrische Flotte mit einem Mehrbedarf an Fahrzeugen planen sowie einer angepassten Umlaufplanung. Abhängig der Übergangsphase kann die technische Entwicklung in der Batterieforschung ggf. einem signifikanten Mehrbedarf an Fahrzeugen gegensteuern.

Die Umstellung einer reinen Brennstoffzellen-Flotte lässt sich betrieblich ideal umsetzen. Bei sehr langen Umläufen müssen diese ggf. modifiziert werden. Der Großteil der bestehenden Umläufe lässt sich allerdings auch mit FCEV betreiben. Größere Herausforderung bei der Implementierung einer gesamten Flotte aus Brennstoffzellen-Fahrzeugen stellt eine ausreichende Anlieferung sowie Lagerung des Wasserstoffs dar. Diese Ungewissheit spiegelt sich auch in einem verhältnismäßig teuren Betriebskonzept wider.

Mit einer Mix-Flotte aus batterieelektrischen und Brennstoffzellen-Fahrzeugen wird den beiden vorangehend beschriebenen Problemen entgegengewirkt. Ein Mehrbedarf an Fahrzeugen ist nicht erforderlich und gleichzeitig können hohe Kosten für zusätzliche Fahrzeuge sowie einer hohen Anzahl an teuren Brennstoffzellenbussen verringert werden. Zudem lässt sich der Wasserstoffbedarf erheblich senken.

Kommunale Entsorgungsbetriebe

Maßgebend für die Umstellung auf alternative Antriebe ist die Entfernung zu den Abfallsammelstellen. Da in Hanau drei der vier Abfallsammelstellen außerhalb des Stadtgebiets liegen, ist die Implementierung einer größeren Anzahl an batterieelektrischen Müllfahrzeugen nur bedingt möglich.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge können bei Entsorgungsbetrieben alle Sammeltouren fahren. Der Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge erfordert jeweils für das Stadtgebiet eine eigenständige Analyse. Neben der Tourenlänge im Sammelgebiet ist viel mehr die Distanz zur Abfallsammelstelle maßgebend bei der Bewertung, welche Touren sich für BEV eignen.

Hinsichtlich einer geeigneten Ladestrategie haben Entsorgungsbetriebe den großen Vorteil, dass die Fahrzeuge bereits mittags in den Betriebshof zurückkehren und erst am nächsten Morgen wieder ausrücken. Batterieelektrische Fahrzeuge müssen demnach mit keiner hohen Ladestärke geladen werden und können die Gesamtnetzlast absenken.

Die Betriebskosten können durch den Einsatz alternativ angetriebener Fahrzeuge immens gesenkt werden.

Übertragbarkeit des Verkehrsmodells auf andere Städte

Der größte Output des Forschungsprojektes liegt im entwickelten Grundgerüst des Simulationsmodells, welches auf die Gegebenheiten und Betriebsprozesse anderer Betriebe angepasst werden kann. Eine detaillierte Analyse der Prozesse anderer Verkehrsunternehmen und kommunaler Entsorgungsbetriebe erfordert zunächst die Implementierung eigener Daten. Maßgebend hierfür sind Daten zu Linienverläufen inklusive Koordinaten, Fahrplandaten sowie Umlaufplandaten. Voraussetzung für die Übertragbarkeit des Simulationsmodells ist diese Daten in die vorgegebene Datenstruktur aufzubereiten, um eine realistische kartenorientierte Visualisierung zu ermöglichen.

7 Fazit und Ausblick

Vielorts wurden bereits alternativ angetriebene Fahrzeuge getestet und erste Fahrzeuge in den Linien-/Tourenbetrieb integriert. Die Umstellung größerer Teile bzw. der gesamten Flotte sind jedoch ungewiss. Das Simulationsmodell greift diese Forschungsfrage auf und schließt diese Lücke. Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass ÖPNV- und Verkehrssimulation ein bewährtes Mittel sind um betriebliche Potenziale zu identifizieren. Die Ergebnisse können der Hanauer Straßenbahn GmbH und Hanau Infrastruktur Service als Entscheidungshilfe bei der strategischen Planung dienen. Zudem lässt sich eine Vielzahl an Erkenntnissen auch auf andere Städte und Betriebe ableiten.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge weisen auf Grund der hohen Reichweite ein großes Potenzial auf in den Betrieb kommunaler Flotten integriert zu werden. Der Einsatz von ausschließlich batterieelektrischen Fahrzeugen würde zu einem Mehrbedarf an Fahrzeugen in der Flotte führen und gleichzeitig eine Anpassung der Umlauf- und Tourenplanung bedeuten. Brennstoffzellen-Fahrzeuge können diesen Mehrbedarf entgegenwirken und eine Verteilung von BEV auf kürzere Umläufe und Touren implizieren, sowie der Zuweisung von FCEV auf längere Umläufe und Touren. Die Umstellung größerer Teile der Flotte auf FCEV führt immer einen finanziellen Mehraufwand mit sich sowie einen erhöhten Wasserstoffbedarf, der eine strategische Planung bezüglich Anlieferung und Speicherung erfordert.

Kurz- bis mittelfristig können bereits eine Vielzahl an Umläufen und Touren von BEV übernommen werden. Ein langfristiger Ausbau und gleichzeitig die Umstellung der längsten täglichen Umläufe und Touren auf batterieelektrische Fahrzeuge wird zudem maßgeblich durch den Fortschritt in der Batterieentwicklung bestimmt.

Die Clean-Vehicle-Directive unterstreicht die Relevanz des Forschungsvorhabens, indem die im Forschungsprojekt SimCityNet behandelten Forschungsfragen für alle kommunalen Flotten eine aktuelle Thematik darstellen, mit der sich jedes Verkehrsunternehmen und kommunaler Entsorgungsbetrieb auseinandersetzen muss. Hieraus lässt sich ein großer Multiplikatoreffekt für das erstellte Verkehrsmodell induzieren, indem der auf Hanau zugeschnittene digitale Zwilling auf die lokalen Gegebenheiten anderer Städte abgeändert werden kann. Die Anschlussfähigkeit bezieht sich auf Konzepte mit Overnight-Charging im Depot. Ein Opportunity-Charging-Konzept mit Zwischenladungen an Zwischen- und Endhaltestellen kann mit dem erstellten Zwilling aktuell nicht abgebildet werden. Ein solches Konzept ließe sich in das Verkehrsmodell integrieren, stellt allerdings die zukunftsweisende Relevanz eines solchen Konzeptes in Frage unter Betrachtung potenziell steigender Reichweiten in der Batterieentwicklung.

Literaturverzeichnis

- ADAC. (2021). *Alternative Antriebe*. Von Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC): <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/> abgerufen am 13.09.2021
- BMU. (06. Oktober 2020). *Der Klimaschutzplan 2050 - Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie*. Von Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: <https://www.bmu.de/themen/klimaschutz-anpassung/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050#c8418> abgerufen am 19.10.2021
- BMVI. (2020). *Europaweit einheitliches Bezahlssystem fürs Stromladen und Wasserstofftanken geplant*. Von Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2020/046-scheuer-afid.html> abgerufen am 07.10.2021
- BMVI a. (02. August 2021). *Erstmals rollen eine Million Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen*. Von Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/080-scheuer-altmaier-schulze-1-mio-elektrofahrzeuge.html> abgerufen am 23.09.2021
- BMVI b. (22. Juli 2021). *EU genehmigt neue Förderrichtlinie für Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben - Förderaufrufe folgen in Kürze*. Von Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/077-scheuer-foerderrichtlinie-nutzfahrzeuge-alternative-antriebe.html> abgerufen am 07.10.2021
- BMVI c. (20. Januar 2021). *Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge*. Von Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/clean-vehicles-directive.html> abgerufen am 21.09.2021
- BMVI d. (2021). *Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- BMWi. (2021). *Klimaschutzprogramm 2030*. Von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutzprogramm-2030.html> abgerufen am 14.09.2021
- Bünnagel, C. (April 2020). Dritter E-Bus-Vergleichstest in Bonn . *V+T Verkehr und Technik*, S. 137-142.

- Bunzel, A., Richter, S., Morawietz, L., & Prof. Dr.-Ing. Bäker, B. (April 2018). Was Busbatterien schneller altern lässt - Untersuchung von Alterungseffekten an Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen unter Elektrobustypischen Rahmenbedingungen. *DER NAHVERKEHR*, S. 13.
- Burmeister, J. (Februar 2019). E-Busse 2019: Wettbewerb um die bestgeeignete Ladetechnik. *DER NAHVERKEHR - ELEKTROBUS-SPEZIAL*, S. 12 - 18.
- Daimler AG. (2019). *Daimler Nachhaltigkeitsbericht 2018*. Stuttgart: Daimler AG.
- Designwerk Products AG. (2020). *FUTURICUM*. Von Futuricum | Elektro-LKW | Nutzfahrzeuge | E-LKW: <https://www.futuricum.com/> abgerufen am 06.05.21
- Drenowatz, R. (Februar 2019). Wasserstoffbus als Alternative zum Dieselbus - Experte fordert "Brennstoffzellen-Elon-Musk" - Erste Branchenerfahrungen. *DER NAHVERKEHR - ELEKTROBUS-SPEZIAL*, S. 42-46.
- EEBC - European Electrical Bus Company GmbH. (Mai 2021). Prognostizierte Leistungsbedarfe Elektroversorgung für die HSB + HIS. Frankfurt am Main.
- EMCEL GmbH. (16. Februar 2019). *EMCEL - Ingenieurbüro für Brennstoffzelle, Wasserstofftechnologie und Elektromobilität*. Von Ist ein Brennstoffzellenbus auch ein Elektrobus?: <https://emcel.com/de/brennstoffzellenbus-elektrobus/> abgerufen 18.08.2021
- EMCEL GmbH. (16. Mai 2020). *EMCEL - Ingenieurbüro für Brennstoffzelle, Wasserstofftechnologie und Elektromobilität*. Von Wie ist die Ökobilanz von Elektrobussen?: <https://emcel.com/de/oekobilanz-von-elektrobussen/> abgerufen am 16.02.2021
- Europäische Union. (2014). *RICHTLINIE 2014/94/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe*. k.A.: Europäische Union.
- EvoBus GmbH. (Juni 2018). *Der neue eCitaro*. Abgerufen am 04. Februar 2020 von Download Technische Broschüren: https://www.mercedes-benz-bus.com/de_DE/buy/services-online/download-technical-brochures.html#content/headline_840766654_c
- EvoBus GmbH. (August 2019). *Der Citaro Stadtbus - Technische Information*. Abgerufen am 04. Februar 2020 von Download Technische Broschüren: https://www.mercedes-benz-bus.com/de_DE/buy/services-online/download-technical-brochures.html#content/headline_840766654_c
- FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG. (2020). *BLUEPOWER - Batterie-/Wasserstoffbrennstoffzellen-Antrieb*. Von https://www.faubus.com/produkte/alternative_antriebe/bluepower/ abgerufen am 10.06.2020
- FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG. (2021). *Nutzfahrzeuge - Mit H2-Brennstoffzellen-Antrieb*. Osterholz-Scharmbeck: FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG.

- FGSV. (2016). *Querschnittsausschuss Postfossiler Verkehr: Übergänge in den postfossilen Verkehr - Notwendigkeit, Entwicklungstrends und- pfade*. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG. (2021). *H2.live*. Von H2 tanken - Wasserstoffmobilität beginnt jetzt: <https://h2.live/> abgerufen am 15.10.2021
- Hanauer Straßenbahn GmbH. (2020). *Fahrzeugliste*. Hanau: HSB GmbH.
- HanauLNO. (2019). *Stadt Hanau - Nahverkehrsplan 2019-2023*. Hanau: Hanau Lokale Nahverkehrsorganisation GmbH.
- Harendt, B., Galati, N., Körner, L., & Läßle, E. (2017). *Elektromobilität für private Nutzer*. Wiesbaden: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung.
- HERRY Consult GmbH, TU Wien, I., & VerkehrsConsulting OG. (2018). *Marktübersicht Elektrobusse - Auszug Marktübersicht Elektrobusse aus der Studie "Einsatzmöglichkeiten von E-Bussen im Linienverkehr"*. Wien: HERRY Consult GmbH.
- Käppeler, J. (Februar 2019). Elektromobilität im ÖPNV - Grundstein für erfolgreiche Integration wird in der Planung gelegt. *DER NAHVERKEHR - ELEKTROBUS-SPEZIAL*, S. 20 - 21.
- Knote, T., Haufe, B., & Saroch, L. (2017). *E-Bus-Standard - "Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse"*. Dresden: Fraunhofer - Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI.
- Limbrunner, M. (April 2018). Die Kombination macht's - Brennstoffzelle und Batterie: Nicht entweder oder, sondern sowohl als auch. *DER NAHVERKEHR*, S. 16-18.
- Müller-Hellmann, A. (März 2018). Vielfalt der Ladestrategien - Variationsmöglichkeiten von Betriebsweisen, Ladeverfahren und -strategien für den Batteriebusseinsatz im ÖPNV. *DER NAHVERKEHR - Sonderheft Elektrobusse*, S. 12.
- NOW GmbH. (2018). *Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV - Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte*. Berlin: Sprintout Digitaldruck GmbH.
- PricewaterhouseCoopers GmbH. (2020). *E-Bus-Radar - Wie elektrisch ist der öffentliche Nahverkehr? k.A.*: PricewaterhouseCoopers GmbH.
- Reichenbach, F., Schubert, G., Stein, P., Grandy, C., Herz, N., Sille, I., & Müller, F. (2019). *Emissionsfreier ÖPNV auf Basis der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie - Regionale Konzeptentwicklung zur Vorbereitung des Aufbaus einer Infrastruktur*. Konstanz: ISC Konstanz e.V. & HTWG Konstanz.

- Schimanski, A. (09. 12 2019). Futuricum Collect 26E. (P. E-Mail, Interviewer)
- Schmitz, M. (März 2018). Auf dem Weg zu einer emissionsfreien Mobilität - Zwischenbilanz aus Sicht des ÖV. *DER NAHVERKEHR - Sonderheft Elektrobusse*, S. 6.
- Schreven, S., & Rogge, M. (2020). *Elektrifizierung des Stadtbussystems INGO*. St. Ingbert: ebusplan GmbH - Solutions for Clean Transportation.
- Schwarze, J., Schroeteler, K., Hasler, P., & Anemüller, S. (Juni 2017). Köln setzt auf E-Mobilität auch im Busverkehr - Das Kölner Projekt E-Bus folgt ganzheitlichem Konzept. *DER NAHVERKEHR*, S. 39-44.
- SimPlan AG. (2021). *SimAssist - modular.individuell.wandelbar*. Von SimAssist Funktionen: <https://www.simassist.de/> abgerufen am 10.08.2021
- Stadt Hanau . (2021). *Hanau - Brüder-Grimm-Stadt*. Von Abfall und Entsorgung: <https://www.hanau.de/rathaus/lebenslagen/abfall/index.html> abgerufen am 05.08.2021
- The AnyLogic Company. (2021). *AnyLogic - industriespezifische bibliotheken*. Von AnyLogic: Softwarewerkzeuge für Simulationsmodellierung und geschäftliche Lösungen: <https://www.anylogic.de/> abgerufen am 10.08.2021
- VDV. (13. Februar 2019). *Zwischenbilanz Elektrobusse im ÖPNV*. Berlin: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. Von Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. abgerufen am 10.08.2021
- VDV a. (12. Mai 2021). *"Reichweite, Reichweite, Reichweite"*. Von VDV Das Magazin: https://www.vdv-dasmagazin.de/story_06_elekbu21.aspx abgerufen am 24.08.2021
- VDV b. (2021). *Umsetzung der Clean Vehicles Directive (CVD)*. Von VDV - Die Verkehrsunternehmen: <https://www.vdv.de/umsetzung-cvd.aspx> abgerufen 12.10.2021
- Weichenhain, U., Lange, S., Koolen, J., Benz, A., Hartmann, S., Heilert, D., . . . Kallenbach, T. (2020). *Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg*. München: ROLAND BERGER GmbH & Ministerium für Umwelt, Klima, und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg.
- Werner, A. (2019). *E-Bus-Radar-Hessen - Einsatz von Bussen mit elektrischem Antrieb im ÖPNV*. Wiesbaden: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen.

Anhang

Anhang A

Fuhrpark der HIS

Kennzeichen	Nutzlast	Reserve	RM	PPK	Bio	LVP	Sperr- müll	RM- Gewerbe	PPK- Gewerbe
HU-SH 14	9,405		x					x	
HU-SH 266	8,7		x						x
HU-SH 29	10,285		x						
HU-SH 45	10,28		x						
HU-SH 61	9,32		x						
HU-SH 62	9,95		x						
HU-SH 72	9,89		x						
HU-SH 133	10,16			x	x	x			
HU-SH 46	10,445			x					
HU-SH 39	9,57				x				
HU-SH 22	11,24					x			
HU-SH 31	9,8						x		
HU-SH 49	11,65	x	x	x		x			
HU-1038	11,39	x							
HU-SH 135	10,8	x							
HU-SH 152	10,49	x	x	x	x	x			

(Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Anhang B

Übersicht der Ist-Umläufe der HSB

Code	Betriebstage im Jahr	FahrzeugTyp (Solo-/Gelenkbus)	Fahrleistung [m]	Betriebstage in der Woche
2001	249	SL NF	47040	MDMDF__
1203	249	SL NF	242488	MDMDF__
1202	249	SL NF	239778	MDMDF__
1201	249	SL NF	272248	MDMDF__
1112	249	SL NF	98331	MDMDF__
1111	249	SL NF	72290	MDMDF__
1110	249	SL NF	65756	MDMDF__
1109	249	SL NF	50146	MDMDF__
1108	249	SL NF	59490	MDMDF__
1107	249	SL NF	85908	MDMDF__
1106	249	SL NF	44736	MDMDF__
1105	249	SL NF	75000	MDMDF__
1104	249	SL NF	49303	MDMDF__
1103	249	SL NF	53468	MDMDF__
1102	249	SL NF	71965	MDMDF__
1101	249	SL NF	73345	MDMDF__
903	249	SL NF	118542	MDMDF__
902	249	SL NF	61551	MDMDF__
901	249	SL NF	311614	MDMDF__
801	249	SL NF	45280	MDMDF__
706	249	SL NF	49311	MDMDF__
705	249	SL NF	34474	MDMDF__
704	249	SL NF	93822	MDMDF__
703	187	SL NF	100279	MDMDF__
702	249	SL NF	318899	MDMDF__
701	249	SL NF	312635	MDMDF__
608	249	SL NF	192514	MDMDF__
607	249	SL NF	113106	MDMDF__
606	249	SL NF	31511	MDMDF__
605	249	SL NF	58316	MDMDF__
604	249	SL NF	72945	MDMDF__
603	249	SL NF	145258	MDMDF__
602	187	SL NF	243652	MDMDF__
601	249	SL NF	338151	MDMDF__
409	187	GL NF	139150	MDMDF__
408	187	SL NF	105924	MDMDF__
407	249	SL NF	139150	MDMDF__

406	249	GL NF	60170	MDMDF__
405	249	GL NF	139150	MDMDF__
404	187	GL NF	127230	MDMDF__
403	187	SL NF	158195	MDMDF__
402	249	GL NF	154560	MDMDF__
401	249	GL NF	152630	MDMDF__
256	187	GL NF	173622	MDMDF__
255	249	GL NF	44172	MDMDF__
254	249	GL NF	206583	MDMDF__
253	249	GL NF	206583	MDMDF__
252	249	GL NF	215668	MDMDF__
251	249	GL NF	217338	MDMDF__
224	187	GL NF	28294	MDMDF__
223	187	GL NF	37159	MDMDF__
202Fr	50	SL NF	40046	___F__
201Fr	50	SL NF	50785	___F__
109	249	SL NF	39899	MDMDF__
108	249	SL NF	26525	MDMDF__
107	249	GL NF	243821	MDMDF__
106	249	GL NF	220397	MDMDF__
105	249	GL NF	230718	MDMDF__
104	249	GL NF	218639	MDMDF__
103	249	GL NF	220397	MDMDF__
102	249	GL NF	224763	MDMDF__
101	249	GL NF	221018	MDMDF__
87	187	SL NF	10520	MDMDF__
86	187	GL NF	18772	MDMDF__
85	187	GL NF	13388	MDMDF__
84	187	SL NF	28293	MDMDF__
83	187	GL NF	12903	MDMDF__
82	187	SL NF	45999	MDMDF__
81	187	GL NF	19752	MDMDF__
69	187	SL NF	10314	MDMDF__
68	187	GL NF	17532	MDMDF__
67	187	GL NF	9916	MDMDF__
66	187	SL NF	11158	MDMDF__
65	187	SL NF	10898	MDMDF__
64	187	GL NF	10129	MDMDF__
63	187	SL NF	23144	MDMDF__
62	187	SL NF	25688	MDMDF__
61	187	SL NF	18966	MDMDF__
60	187	GL NF	28422	MDMDF__

Code	Fahrzeug Typ (Solo-/Gelenkbus)	Fahrleistung [m]	Betriebstage der Woche
6111	SL NF	78875	S
6112	SL NF	55278	S
6113	SL NF	60869	S
6121	SL NF	238275	S
6122	SL NF	222533	S
6123	SL NF	228764	S
6151	GL NF	244262	S
6152	GL NF	216701	S
6153	GL NF	208759	S
6154	GL NF	233347	S
6155	GL NF	201182	S
6156	GL NF	229386	S
6251	GL NF	257406	S
6252	GL NF	195602	S
6253	GL NF	245505	S
6254	GL NF	246667	S
6255	GL NF	191992	S
6401	SL NF	169970	S
6402	GL NF	271370	S
6404	GL NF	137220	S
6513	GL NF	226364	S
6601	SL NF	291632	S
6602	SL NF	303714	S
6603	SL NF	264921	S
6701	SL NF	226367	S
6702	SL NF	299523	S
6901	SL NF	307832	S

Code	Fahrzeug Typ (Solo-/Gelenkbus)	Fahrleistung [m]	Betriebstage der Woche
7101	SL NF	202799	S
7102	SL NF	200218	S
7103	SL NF	202156	S
7104	SL NF	188612	S
7121	SL NF	186968	S
7201	SL NF	190392	S
7202	SL NF	183263	S
7641	SL NF	334967	S
7642	SL NF	318590	S
7643	SL NF	174039	S
7644	SL NF	114594	S
7701	SL NF	233402	S
7801	SL NF	223600	S
7901	SL NF	194370	S

(Quelle: eigene Darstellung ReLUT)

Kontakt:
Frankfurt University of Applied Sciences
Prof. Dr.-Ing. Josef Becker
Nibelungenplatz 1
60318 Frankfurt am Main
Tel. 0 69 15 33-3629
E-Mail: josef.becker@fb1.fra-uas.de
www.frankfurt-university.de/verkehr
www.ReLUT.de