



UNIVERSITÄT ZU LÜBECK
INSTITUT FÜR SOFTWARETECHNIK
UND PROGRAMMIERSPRACHEN

Design und Entwicklung einer Softwarearchitektur zur Optimierung der Ladestrategien elektrisch betriebener Busse

Designing and Developing a Software Architecture for Optimizing the Charging Policies of Electric Buses

Masterarbeit

im Rahmen des Studiengangs
Informatik
der Universität zu Lübeck

vorgelegt von
Simon Thiessen

ausgegeben und betreut von
Professor Dr. Martin Leucker

Lübeck, den 29. August 2019

Kurzfassung

Der im Zuge der Strategien gegen den Klimawandel erfolgte Ausbau erneuerbarer Energien hat insbesondere in Schleswig-Holstein deren Anteil am Strommix signifikant erhöht. Aufgrund des stockenden Netzausbaus kann ein relevanter Anteil derer bisher jedoch nicht sinnvoll genutzt werden. Gleichzeitig planen viele Busunternehmen im Kontext der Verkehrswende einen Umstieg auf den Einsatz elektrisch betriebener Fahrzeuge. Im Vergleich zum Betrieb von Dieselnissen stellt dies Busunternehmen wie auch Netzbetreiber regionaler Stromnetze vor verschiedene Herausforderungen, die sich als Optimierungsprobleme formulieren lassen. Hierfür erfolgt im Zuge dieser Arbeit eine umfangreiche Analyse der Problemzone zur Ermittlung von Systemanforderungen, Rahmenbedingungen und Optimierungsparametern. Die dabei gewonnen Erkenntnisse gehen in das Konzept einer Softwarearchitektur zur Optimierung der Ladestrategien elektrisch betriebener Busse ein.

Abstract

Climate change mitigation strategies have led to an expansion of renewable energy. Especially in Schleswig-Holstein this significantly boosted its share in the overall electricity mix. However, because of the delayed grid expansion, a relevant amount of the so generated energy remains unused. Meanwhile, various bus companies plan to switch their operational business towards the use of electrically powered buses. Compared to running diesel buses this raises several challenges for bus companies and operators of regional grids. These challenges can be formulated as optimization problems. Therefore, this thesis includes an extensive analysis of the problem domain to determine system requirements, general constraints and optimization parameters. The insights gained in the process are incorporated into the concept of a software architecture for optimizing the charging policies of electric buses.

Erklärung

Ich versichere an Eides statt, die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Benutzung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt zu haben.

Lübeck, 29. August 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung	2
1.2	Aufbau der Arbeit	2
1.3	Stand der Technik	3
2	Domäne Elektromobilität im ÖPNV	5
2.1	Busunternehmen	5
2.1.1	Fuhrpark	6
2.1.2	Personal	14
2.1.3	Infrastruktur	15
2.1.4	Betriebsplanung	18
2.1.5	Energiebeschaffung	24
2.2	Netzbetreiber	27
2.3	Umwelt	29
2.4	Geeignete Geschäftsmodelle	32
2.4.1	Unternehmerische Ausgangssituation	32
2.4.2	Erlösmodelle	35
3	Architekturdokumentation	39
3.1	Einführung und Ziele	39
3.1.1	Aufgabenstellung	40
3.1.2	Qualitätsziele	40
3.1.3	Stakeholder	41
3.2	Randbedingungen	42
3.3	Kontextabgrenzung	42

Inhaltsverzeichnis

3.4	Lösungsstrategie	45
3.5	Bausteinsicht	45
3.5.1	Data Warehouse	46
3.5.2	Message Broker	48
3.5.3	Importmodule	49
3.5.4	Optimierungsverfahren	52
3.5.5	Reporting-Tools und Data Marts	53
3.6	Entwurfsentscheidungen	53
3.6.1	Data Lake und Data Warehouse	54
3.6.2	Kafka und klassische Message Broker	55
3.7	Qualitätsszenarien	56
4	Zusammenfassung	59
4.1	Fazit	59
4.2	Offene Punkte	60
4.3	Ausblick	60
A	Anhang	63
A.1	Beiliegende DVD-ROM	63
	Glossar	65
	Akronyme	67
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	69
	Literaturverzeichnis	71

1 Einleitung

Die sich zuspitzende Klimakrise, begründet vor allem durch die seit Beginn des Industriezeitalters stark ansteigenden Emissionen, ist der treibende Faktor in der Energiewende. Insbesondere in Schleswig-Holstein ist daher in der Vergangenheit eine Vielzahl an nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geförderten Anlagen ans Netz gegangen, sodass der durch diese erzeugte Strom den Bruttostromverbrauch des Landes im Jahr 2017 bereits zu 156% deckte (Schleswig-Holstein, 2019b). Gleichzeitig erfolgt der Ausbau der Netze zum Transport des Stroms in Regionen mit entsprechendem Strombedarf nur schleppend. Im gleichen Jahr wurden daher mit knapp 3000 Gigawattstunden etwa 13% des erzeugten Stroms abgeregelt, also die Leistung von energieerzeugenden Anlagen gedrosselt (Schleswig-Holstein, 2019a). Weiterhin wächst auch das gesellschaftliche Interesse an einer Verkehrswende hin zur Elektromobilität. Damit einher geht auch das Bestreben von Unternehmen des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV), auf den Einsatz elektrisch betriebener Busse umzustellen. Der Stadtverkehr Lübeck (SL) plant beispielsweise, 70% des aktuell etwa 200 Fahrzeuge umfassenden Fuhrparks bis zum Jahr 2030 zu elektrifizieren. Diese Umstellung sowie die Integration der Fahrzeuge in den Betrieb ist, aufgrund der benötigten Ladezeiten und der im Vergleich zu Bussen mit Verbrennungsmotoren geringeren Reichweiten, anspruchsvoll: Der Projektleiter Elektromobilität beim SL betrachtet die damit einhergehende Umstellung der bestehenden Systeme und Prozesse als bis dato größte Revolution im ÖPNV (J. Lottmann, persönliche Kommunikation, 25. Juni 2019). Darüber hinaus stellt das gleichzeitige Aufladen einer größeren Anzahl an Fahrzeugen auch für die Stromnetzbetreiber und ihre Infrastruktur eine Herausforderung dar. Die Fragestellung des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojektes ist folglich, wie der Einsatz der Fahrzeuge im Busbetrieb bei gleichzeitiger Ausnutzung des Grünstroms und Minimierung der Belastungen für das Stromnetz optimiert werden kann (Forschungs- und Entwicklungszentrum der Fachhochschule Kiel, 2018). Daraus ergibt

1 Einleitung

sich die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit, die in Abschnitt 1.1 konkretisiert wird. Die Vorgehensweise zur Erreichung dieser wird in Abschnitt 1.2 vorgestellt. Für die Integration von Elektrobussen in das Depotmanagement sowie zu deren Wechselwirkung mit dem Stromnetz und Netzanbietern und dem Einsatz einer Fahrzeugflotte zur Netzstabilisierung bestehen bereits Konzepte und Ansätze, über die in Abschnitt 1.3 ein Überblick gegeben wird.

1.1 Zielsetzung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind getreu des Titels das Design und die Entwicklung einer Softwarearchitektur zur Optimierung der Ladestrategien elektrisch betriebener Busse. Dies umfasst die Konzipierung der für die Optimierungsverfahren und ihre Entwicklung benötigten Infrastruktur, nicht jedoch das Algorithmen-Design selbst. Dennoch schließt die Analyse von Anforderungen und Rahmenbedingungen für die Architektur eine Ermittlung der kurz- und langfristig interessanten Optimierungsparameter mit ein. Da es sich zudem um die erste Arbeit im Rahmen des genannten Forschungsprojektes handelt, bildet das grundlegende Verständnis des Themenkomplexes einen elementaren Bestandteil. Die Aufbereitung der gewonnenen Erkenntnisse dient daher auch als Grundlage für sich anschließende Arbeiten.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in vier Abschnitte unterteilt. Auf die Einleitung folgt die für das Verständnis des Themenkomplexes nötige Analyse der Problemdomäne Elektromobilität im ÖPNV. Diese dient der Ermittlung relevanter Optimierungsparameter und weiterer Anforderungen an die Softwarelösung. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis der Architekturdokumentation im anschließenden Kapitel. Nach dem Schema einer etablierten Vorlage werden dort die entwickelte Architektur sowie dazu getroffene Entscheidungen strukturiert vorgestellt und als Ausgangsbasis für weitere Entwicklungen angeboten. Ein abschließender Überblick einschließlich eines Fazits, der Benennung noch offener Punkte und eines Ausblicks wird im Kapitel Zusammenfassung gegeben.

1.3 Stand der Technik

Die sich verschärfende Klimakrise und der zunehmende Anteil von CO²-Äquivalenten, die vor allem in dem Verkehrs- und Energiesektor freigesetzt werden, generieren ein reges Forschungsinteresse, sowohl von Seiten der Wissenschaft, als auch zunehmend von Seiten der Wirtschaft. Das Forschungsprojekt Minimale Belastung elektrischer Netze durch Ladevorgänge von Elektrobussen (MENDEL) zielt darauf ab, das intelligente Stromnetz mit einem intelligenten Verkehrssystem zu verknüpfen, dadurch Energie einzusparen und optimierte Ladestrategien abzuleiten (DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, 2016). Für die bedarfsorientierte Rückspeisung von in Elektrobussen gespeicherter Energie in das Stromnetz modellieren Raab, Lauth, Strunz und Göhlich (2019) die Fahrzeugflotte als virtuelles Kraftwerk. Die Maximierung der Reichweite von Elektrobussen und das Aufstellen entsprechender Lade- und Umlaufpläne wurde von Paul und Yamada (2014) unter Verwendung eines *k*-Greedy Algorithmus untersucht. Für die Modellierung des Energieverbrauchs von Elektrobussen existieren ebenfalls viele Veröffentlichungen, darunter die von Vepsäläinen, Ritari, Lajunen, Kivekäs und Tammi (2018) und Kunith (2017). Im Kontext des am Institut für Softwaretechnik und Programmiersprachen entwickelten Navigationssystems *GreenNav* wurden ebenfalls Modelle für die Ermittlung des Energieverbrauchs entwickelt. Mit Optibus existiert zudem eine Software zur Betriebsplanung im öffentlichen Nahverkehr, die das Laden von Elektrobussen in der Umlaufplanung mit berücksichtigt und die Simulation in verschiedenen Szenarios ermöglicht (Krupsky, 2018). Auf seiner Website wirbt das gleichnamige Unternehmen zudem mit Methoden des Machine Learning, hoher Skalierbarkeit und einer cloudbasierten Software as a Service Architektur (Optibus Ltd, 2019). Eine Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit dem Stromnetz geht daraus jedoch nicht hervor.

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

Die Lösung des Optimierungsproblems erfordert eine geeignete Systemarchitektur. Zur passgenauen Modellierung dieser ist die Kenntnis des zugrundeliegenden Problemkomplexes in allen Facetten und Details unabdingbar. In diesem Kapitel werden daher alle relevanten Problemkomponenten umfangreich betrachtet. Diese unterteilen sich zunächst in die in den Abschnitten 2.1 und 2.2 behandelten Komplexe Busunternehmen und Netzbetreiber. Daneben werden im Abschnitt 2.3 von außen auf die Systeme wirkende Umweltfaktoren wie Wetter und Klima betrachtet und in Abschnitt 2.4 geeignete domänenspezifische Geschäftsmodelle.

2.1 Busunternehmen

Zusammen mit den Netzbetreibern bilden die Busunternehmen als Betreiber des öffentlichen Personennahverkehrs die höchste Hierarchieebene des betrachteten Problemkomplexes. Ein Busunternehmen verfügt dabei über eine Reihe von betrachtenswerten Ressourcen, dies sind in erster Linie der *Fuhrpark*, die *Infrastruktur* einschließlich der IT für den Busbetrieb sowie das *Personal*. Diese Ressourcen werden zur Erfüllung von Aufgaben und Pflichten gegenüber den öffentlichen oder privatwirtschaftlichen Eignern und Auftraggebern eingesetzt, wobei es sich hierbei vor allem um die Produktion von Personenkilometern handelt (Kunith, 2017, S. 69). Um dies in möglichst effizienter Weise zu erreichen, gibt es zudem eine umfassende *Betriebsplanung*. Von Bedeutung ist besonders im Kontext der Elektromobilität auch die *Energiebeschaffung*. Die zentralen Fragestellungen des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojektes (Forschungs- und Entwicklungszentrum der Fachhochschule Kiel, 2018) lauten dabei:

- Wie lassen sich die Aufgaben des Busbetreibers mit den Anforderungen des Stromnetzbetreibers vereinbaren unter der Prämisse, bei geringen Investitionskosten

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

durch smartes Management die Grünstromnutzung deutlich zu steigern?

- Wie lässt sich eine Steigerung des Passagieraufkommens bei gleichzeitiger Reduktion der CO₂-Emissionen ohne Kostenanstieg realisieren?
- Ist ein Flottenbetrieb mit fluktuierendem Grünstrom als Energiequelle überhaupt realisierbar? Wie könnte ein optimaler Flottenbetrieb realisiert werden?
- Wie lässt sich eine Busflotte optimal laden in Bezug auf Verfügbarkeit und Kosten (Lademanagement)?

2.1.1 Fuhrpark

Der Fuhrpark eines Busunternehmens besteht neben einzelnen Sonderfahrzeugen wie Werkstattwagen hauptsächlich aus Omnibussen verschiedener Antriebsarten, Größenordnungen und Ausstattungsmerkmale. In Deutschland sind dabei die Bauformen der in der Regel 12 bzw. 18 Meter langen niederflurigen Standard- und Gelenkbusse verbreitet. Von insgesamt 23.133 Bussen der im Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) zusammengeschlossenen Unternehmen waren dabei bis Ende 2017 nur 133 Fahrzeuge mit rein elektrischen Antrieben ausgestattet. Abgesehen davon existiert eine etwas größere Zahl an Fahrzeugen mit anderen alternativen Antriebsformen, etwa auf Basis von Erdgas oder hybriden Konzepten. Diesen wird jedoch eine schwindende Bedeutung beigemessen. Der Großteil der Fahrzeuge wird weiterhin mit klassischen Diesel-Verbrennungsmotoren angetrieben (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V., 2013). Dennoch sind für die vorliegende Arbeit vor allem die Elektrobusse von Interesse, die daher im Folgenden vorgestellt und insbesondere in ihren Betriebsanforderungen mit denen konventioneller Dieselbusse verglichen werden. Daran anschließend erfolgen detailliertere Betrachtungen der Akkumulatoren, der Antriebstechnik sowie der Nebenverbraucher.

Elektrobusse

Unter dem Begriff Elektrobuss werden alle Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsmotor vereint. Darunter laufen neben den rein batteriebetriebenen Bussen auch Fahrzeuge mit

Brennstoffzelle und Oberleitungsbusse sowie Hybride aus den zuvor genannten. Die Batteriebusse lassen sich dabei hinsichtlich ihrer Nachladestrategien in *Volllader* und *Teillader* klassifizieren.

Die teils auch als Nachtlader oder Depotlader bezeichneten Volllader sind darauf ausgelegt, die Anforderungen des täglichen Betriebes mit einer einzigen Akkuladung zu bewältigen. Diese Betriebsweise erfordert einen großen und entsprechend schweren Akku, um die hierfür nötige Energie bereitzustellen. Typisch ist hier die Verwendung von sogenannten High-Energy-Batterien, die gegenüber den High-Power-Batterien über eine höhere Energiedichte verfügen, demgegenüber aber im Verhältnis geringere Lade- und Entladeströme zulassen. Mit diesen können unter Idealbedingungen bereits heute Reichweiten von über 300 Kilometern erzielt werden, wobei für die Heizung aufgrund der sonst zu großen Reichweiteneinbußen teils noch fossile Energie verwandt wird (Stadtverkehr Lübeck, 2017). Das Nachladen erfolgt dabei in erster Linie nachts im Depot via steckerbasierter Ladesysteme. Damit eignen sich die Fahrzeuge bereits für die tägliche Bedienung eines Teils der Umlaufpläne. Für einen umfassenderen Einsatz, ohne im Vergleich zu Dieselnissen angepassten Betrieb, sind jedoch höhere Reichweiten nötig (Knote, Haufe & Saroch, 2017, S. 29 f.).

Der Betrieb von Teilladern unterscheidet sich zu dem von Vollladern dadurch, dass sie auch im Verlaufe des Tages an einzelnen Punkten entlang der Strecken gelegentlich nachgeladen werden (daher auch *Gelegenheitslader*). Das setzt voraus, dass sich die Ladeinfrastruktur nicht nur auf den Betriebshof konzentriert, sondern an strategisch sinnvollen Punkten im gesamten Netz installiert wird. Im Gegenzug können die mitgeführten Batterien kleiner ausfallen, womit dank des reduzierten Gewichts auch eine Effizienzsteigerung einhergeht. Dabei sind zwischen einer größeren Batterie und wenigen Ladegelegenheiten sowie einer kleinen Batterie und sehr vielen Ladegelegenheiten verschiedenste Abstufungen denkbar. Aufgrund der begrenzten zeitlichen Ressourcen sind hierfür die schneller ladbaren High-Energy-Batterien von Vorteil, um etwa in den Pausen an Endstationen schnell eine größtmögliche Menge an Energie nachzuladen. Durch das Bereitstellen der Ladestationen sind der für den ÖPNV in der Praxis relevanten Reichweite theoretisch keine Grenzen gesetzt. Dies wird jedoch mit höheren Infrastrukturkosten und der Ab-

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

hängigkeit von der Verfügbarkeit und Erreichbarkeit der Lademöglichkeiten unterwegs erkaufte. Hinzu kommt dass die Wendezeiten für das Nachladen benötigt werden und nicht mehr in vollem Maße zum Ausgleich von Verspätungen eingesetzt werden können. Das automatisierte Nachladen kann mittels unterschiedlicher Technologien stationär erfolgen (Knote et al., 2017, S. 19). Eine Möglichkeit ist die des konduktiven Ladens über einen an den Bussen oder an den Stationen montierten Stromabnehmer, eine weitere die des induktiven Ladens über im Bus eingebaute sowie im Untergrund versenkte Ladespulen. Neben der physikalischen Schnittstelle unterscheiden sich Ladesysteme zudem in den verwendeten Kommunikationsprotokollen, der Ladesteuerung und dem Spannungsniveau sowie der Ladeleistung. Daraus ergeben sich diverse Inkompatibilitäten zwischen verschiedenen Bussen und Ladestationen, es gibt jedoch Bestrebungen zur Standardisierung der Systeme (Knote et al., 2017, S.23).

Bei den sogenannten Wasserstoffbussen wird in einer mitgeführten Brennstoffzelle aus der chemischen Reaktion von Wasserstoff aus dem Tank sowie Sauerstoff aus der Umgebung elektrische Energie gewonnen. Eine auf diese Weise kontinuierlich geladene kleine Hochvoltbatterie stellt dann den Strom für die Elektromotoren bereit. Auf diese Weise können Reichweiten von über 400km erzielt werden bis erneut Wasserstoff nachgetankt werden muss (Kudella & Wolf, 2017, S. 12f.). Schwieriger ist jedoch die Gewinnung des Wasserstoffes. Fällt dieser nicht bei örtlich ansässiger Chemieindustrie als Abfallprodukt an, muss er unter Inkaufnahme eines im Vergleich zum reinen Batteriebus schlechteren Wirkungsgrades künstlich erzeugt werden. Die darüber hinaus höheren Anschaffungskosten und nötigen Vorkehrungen für die sichere Lagerung und Verwendung des Wasserstoffes und die fehlende Serienreife stehen einer weiteren Verbreitung damit derzeit noch im Wege (Pluta, 2019).

Der Einsatz von Oberleitungsbusse im öffentlichen Personennahverkehr erfolgt dagegen bereits seit über 100 Jahren. Die Fahrzeuge samt Oberleitungen gehörten auch in vielen deutschen Städten zum Stadtbild, ehe die meisten Verkehrsunternehmen auf die damals kostengünstigeren Dieselsebusse umschwenkten. Das Prinzip des Oberleitungsbusses ist die Versorgung des Fahrzeuges mit elektrischer Energie via die Oberleitung, analog zur Straßenbahn. Im Gegensatz zur Straßenbahn müssen Oberleitung und Stromabnehmer

aufgrund der fehlenden Erdungsmöglichkeit über die Schiene jedoch zweiadrig ausgeführt werden. Wie auch bei Batteriebusen kann dabei durch Rekuperation Bremsenergie zurückgewonnen und darüber hinaus in das Netz rückgespeist werden. Die Ausstattung von Straßen mit Fahrdrabt wird jedoch mit etwa einer Million Euro pro Kilometer beziffert und bedingt damit eine große Investition in die Infrastruktur. Zudem bedeutet die Abhängigkeit von entsprechenden Strecken Einbußen in der betrieblichen Flexibilität, insbesondere bei Sperrungen einzelner Abschnitte. Dieses Risiko ist beim Einsatz von Hybrid-Oberleitungsbussen, die zusätzlich eine ebenfalls über die Oberleitung ladbare Batterie mitführen, nicht in gleichem Maße gegeben. Zudem ermöglicht der Einsatz derartiger Fahrzeuge auch die Erschließung von nicht elektrifizierten Randlagen ohne den Einsatz von Verbrennungsmotoren, wie in Solingen beabsichtigt (Krummheuer, 2018) (Kudella & Wolf, 2017, S. 12).

Von den vorgestellten Varianten verfügen die Voll-lader über das größte Marktpotenzial. Die Wasserstoffbusse scheiden dabei vor allem aufgrund der mangelnden Serienreife aus, während beim Einsatz von Oberleitungsbussen die hohen Investitionskosten in die Infrastruktur eine starke Hürde darstellen. Doch auch den Gelegenheitsladern wird aufgrund der geringeren betrieblichen Flexibilität weniger Potenzial bescheinigt (Knote et al., 2017, S. 37f.).

Akkumulatoren

Für die meisten Elektrobus-Varianten bedarf es des Mitführens kleinerer oder größerer Akkumulatoren. Gegenwärtig werden dafür nahezu ausschließlich verschiedene Typen von Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Li-Ion) verwendet. Das sind vor allem Lithium-Eisenphosphat- (LFP) und Lithium-Mangan-Oxid-Spinell-Akkumulatoren (LMO). Auf LFP-Akkus entfielen im Jahr 2018 88% der verkauften Einheiten, auf LMO-Akkus 11%. Die bei Elektroautos bereits deutlich weiter verbreiteten Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Akkumulatoren (NMC) kommen dagegen erst in etwa einem Prozent der Elektrobusse zum Einsatz. Diesen wird jedoch aufgrund der deutlich höheren Energiedichte für die Zukunft eine stark wachsende Bedeutung zugunsten der Absätze der LFP- und LMO-Akkus vorausgesagt (Atak & Grande, 2018). Insbesondere die Verwendung von LFP-Akkus be-

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

gründet sich derzeit darin, dass diese im Gegensatz zu den verschiedenen Kobaltoxid enthaltenden Akkus selbst bei mechanischen Beschädigungen nicht zum thermischen Durchgehen neigen (Wikipedia, 2019). Daneben zeichnen sie sich durch eine hohe Leistungsdichte, die Möglichkeit hoher Ladeströme, einer hohen Zyklfestigkeit über viele Ladezyklen hinweg und einer niedrigen Selbstentladung aus. Die vielen positiven Eigenschaften insbesondere hinsichtlich der Sicherheit machen sie vor allem für den Einsatz in Bussen interessant, zumal das höhere Batteriegewicht hier vernachlässigbar ist (Ding, Cano, Yu, Lu & Chen, 2019). Die längerfristige Verschiebung hin zu NMC-Akkus resultiert aus wachsenden Anforderungen an die Reichweite der Fahrzeuge und der zunehmende Sicherheit dieses Akkutyps durch fortschrittlichere Batteriemanagementsysteme. Den verschiedenen Li-Ion-Akkumulatoren ist gemein, dass sie bei niedrigeren Temperaturen nur einen Teil der gespeicherten Energie abgeben können. Eine neuere Entwicklung stellen die Feststoffbatterien dar, die signifikant höhere Energiedichten aufweisen und ab 2020 in den eCitaros von Mercedes Benz verbaut werden sollen (Schmid, 2018; Sustainable Bus, 2019). In jedem Fall stellt die Ermittlung des genauen Ladezustands (auch State of Charge (SoC)) der Akkus eine nichttriviale Aufgabe dar. Eine klassische Methode erfolgt über die Messung der Klemmenspannung, aus der zusammen mit der je nach Bauweise variierenden und charakteristischen Entladekurve der gegenwärtige Ladezustand approximiert werden kann. Eine höhere Genauigkeit wird dabei erreicht, wenn zusätzlich auch die Akkutemperatur sowie der (Ent-)Ladestrom hinzugenommen werden. Eine Übersicht über die verschiedenen Berechnungsmodelle bietet die Arbeit von Piller, Perrin und Jossen (2001).

Leistungselektronik

Zur Leistungselektronik, zu der teilweise auch die Akkumulatoren gezählt werden, gehören vor allem Inverter, Gleichspannungswandler, Bremswiderstand sowie die zugehörige Steuerung und die Fahrmotoren. An die Elektromotoren gibt es für den Einsatz in Fahrzeugen eine Reihe von Anforderungen. So müssen diese ein ausreichendes Drehmoment in einem weiten Drehzahlbereich liefern und darüber hinaus einen hohen Wirkungsgrad sowie eine feinfühligere Drehzahl- und Drehmomentsteuerung bei gleichzeitig möglichst

geringem Gewicht, Volumen und gutem Preis-Leistungs-Verhältnis. Auf dem Markt existieren eine Reihe verschiedener Motortypen, die hinsichtlich der vorgenannten Faktoren jeweils Stärken und Schwächen haben. Der Gleichstrommotor kommt aufgrund geringeren Wirkungsgrades und ungünstiger Wärmeentwicklung trotz seiner Robustheit, guter Kosten sowie seiner Einfachheit nicht in Fahrzeugen zum Einsatz. Daneben gibt es den Drehstrommotor, der seinerseits wieder in verschiedenen Bauformen existiert. Zum einen gibt es ihn als Synchronmotor mit einem sich synchron zum Magnetfeld des Stators rotierenden Rotor, bei dem das Magnetfeld des Rotors auf zwei verschiedene Weisen erzeugt wird: Entweder unter der Verwendung teurer Permanentmagnete aus seltenen Erden (darunter Neodym) mit sehr hohem Wirkungsgrad, aber unverhinderbarer Reku- peration im Leerlauf, oder mittels durch Strom erregte Spulen, wobei wegen der nötigen Schleifkontakte zur Stromübertragung dann aber ein höherer Wartungsaufwand besteht. Bei der anderen Bauform, dem Asynchronmotor, schleppt das schneller drehende Ma- gnetfeld des Stators das langsamere Magnetfeld des Rotors und damit auch den Rotor selbst, sie drehen sich entsprechend asynchron zueinander. Die Motoren dieser Bauart sind günstiger und robuster, aber schwerer und ineffizienter als Synchronmotoren (Karle, 2015, 58). In heutigen Elektroautos sind alle vorgenannten Bauformen zu finden, in Bussen dagegen nahezu ausschließlich Asynchronmotoren (Kompetenzzentrum ElektroMobilität NRW, 2017, S. 22).

Um die Drehzahl und das Drehmoment des Motors zu steuern, muss der Drehstrom für den Motor in Frequenz und Leistung mittels des Inverters moduliert werden. Der Inver- ter wandelt Gleichstrom vom Akku in 3-Phasen-Drehstrom, die Drehzahlsteuerung er- folgt dabei durch eine elektronische Regelung. Ein Gleichspannungswandler kann für die Versorgung des Niederspannungs-Bordnetzes aus dem Hochvoltnetz eingesetzt werden. Daneben gibt es noch ein Ladegerät, welches je nach Ladeart ggf. die zugeführte Wech- selspannung in Gleichspannung umwandeln muss und die Ladesteuerung übernimmt. Durch die hohen Ströme und Spannungen in der Leistungselektronik wird diese übli- cherweise durch eine Wasserkühlung vor Überhitzung geschützt (Karle, 2015, S. 86f.). Um die Komponenten vor einer Belastung durch Überspannung zu schützen wird zu- dem ein Bremswiderstand verbaut, der überschüssige Energie in Form von Wärme abgibt,

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

Tabelle 2.1: Features Fuhrpark

Nr.	Feature	Beschreibung
F1	Fahrzeugstammdaten	Das System erfasst die Fahrzeugstammdaten zu Fahrzeugeneinsatz, Fahrzeugausstattung und Datenherkunft gemäß des Minimaldatensets (Harendt et al., 2017, S. 29f.)
F2	Weitere Fahrzeugparameter	Das System erfasst zusätzlich die Parameter Leergewicht, Frontfläche und Strömungswiderstandskoeffizient (CW-Wert).
F3	Fahrzeugbetriebsdaten	Das System erfasst die Fahrzeugbetriebsdaten gemäß des Minimaldatensets (Harendt et al., 2017, S. 30ff.)
F4	Parameter Akkumulatoren	Das System erfasst zusätzlich die Akkuparameter Klemmenspannung, (Ent-)Ladestrom, Entladekurve (Spannungsprofil), Ladezyklen, Ladeschlussspannung, Entladetiefe, Zyklenfestigkeit und Wirkungsgrad.
F5	State of Charge-Ermittlung	Das System ermöglicht die Verwendung verschiedener Berechnungsmodelle für die Ermittlung des State of Charge.
F6	State of Health-Ermittlung	Das System ermöglicht die Verwendung verschiedener Berechnungsmodelle für die Ermittlung des State of Health.
F7	Parameter Leistungselektronik	Das System erfasst die Parameter Wirkungsgrad und Leistung des Elektromotors sowie den Wirkungsgrad der Traktionselektronik.
F8	Parameter Nebenverbraucher	Das System ermöglicht die Erfassung errechneter Parameter z.B. zur Ermittlung des Energieverbrauchs in Abhängigkeit von der Außentemperatur
F9	Erweiterbarkeit Nebenverbraucher	Das System erlaubt die gesonderte Erfassung des Energiebedarfs weiterer Nebenverbraucher

sofern diese bei der Rekuperation nicht in der Batterie gespeichert oder in den Nebenverbrauchern verwendet werden kann (Knote et al., 2017). Die Auswirkungen des Wirkungsgrades der Traktionselektronik auf die Reichweite elektrischer Fahrzeuge wurden von Sarrafan, Sutanto, Muttaqi und Town (2017) untersucht.

Nebenverbraucher

Neben den Verbrauchern des Antriebsstrangs sind im gewöhnlichen Bus auch eine Reihe weiterer Nebenverbraucher integriert. Dazu gehören vor allem Luftkompressoren, Lenkhilfpumpen, Lüftung, Klimaanlage sowie eine Heizung, aber auch Scheibenwischer, Türen und weitere Bordelektronik wie beispielsweise Bildschirme. Der größte Verbraucher insbesondere in kälteren Regionen ist dabei die Heizung. Da anders als beim Verbrennungsmotor weniger nutzbare Abwärme anfällt, muss die Energie für die Heizung direkt aus der Batterie bezogen werden, was eine Reduzierung der Reichweite um die Hälfte bedeuten kann. Aus diesem Grund werden hierfür auch teilweise noch Dieselheizungen verbaut (Knote et al., 2017). Neuere Wärmepumpenanlagen sollen hier zukünftig Abhilfe verschaffen, sodass die Einbuße an Reichweite beim Heizen über die Batterie weniger gravierend ausfällt (Sileo GmbH, 2017). Der Betrieb einer Klimaanlage bei hohen Außentemperaturen schlägt sich dagegen in lediglich 10 bis 15% Reichweitenverlust nieder (Knote et al., 2017, S.9). Die Leistungsbedarfe der übrigen Nebenverbraucher sind von vergleichsweise geringer Bedeutung.

Datenlogging

Die Entwicklung geeigneter Optimierungsalgorithmen erfordert eine Vielzahl an fixen und variablen Parametern aus den Fahrzeugen. Ein Großteil davon ist Bestandteil der durch Harendt et al. (2017) definierten Minimaldatensets zu Erhebung von Forschungsdaten in der Elektromobilität. Der von EvoBus vertriebene eCitaro ist bereits in der Lage, diese über ein GSM-Modul zu übermitteln. Die Förderfähigkeit von Elektrobussen wird mittlerweile an die Bereitstellung der Minimaldatensets gekoppelt, sodass von der Verfügbarkeit dieser ausgegangen wird (J. Lottmann, persönliche Kommunikation, 25. Juni 2019). Zudem verfügt die Fachhochschule Kiel als Projektpartner des zugrundeliegenden

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

Forschungsprojektes über Erfahrungen bei der Datenaufzeichnung in Elektrobussen, sodass davon auszugehen ist, dass bei Bedarf auch weitere Parameter erhoben werden können (Forschungs- und Entwicklungszentrum der Fachhochschule Kiel, 2018).

2.1.2 Personal

Das für die Erbringung der Verkehrsleistungen benötigte Personal lässt sich grob in drei Bereiche unterteilen: *Fahrdienst*, *Technischer Dienst* und *Verwaltung*. Der weitaus größte Teil des Personals arbeitet dabei im Fahrdienst, sodass die entsprechenden Personalkosten 55-65% der Gesamtkosten im Linienbusbetrieb ausmachen. Entsprechend werden die Unternehmen dahingehend optimiert, diesen größten Kostenfaktor zu minimieren, was sich insbesondere in der Gestaltung der Umlaufpläne niederschlägt (Knote et al., 2017, S.25). Dagegen werden die zusätzlichen Personalkosten durch, aufgrund von geringeren Reichweiten, häufigeres Ein- und Aussetzen der Fahrzeuge als vernachlässigbar erwartet (Kunith, 2017, S.168). Wie den Ausführungen zur Personaleinsatzplanung in Abschnitt 2.1.4 entnommen werden kann, arbeitet das Fahrpersonal nach Dienstplänen, wobei die einzelnen Mitarbeiter den Fahrzeugen zugewiesen werden und detaillierte Fahraufgaben erhalten. Diese umfassen Vor- und Nachbereitung des Dienstes sowie sämtliche in den Umlaufplänen vorgesehenen Fahrzeugbewegungen und Pausenzeiten. Diese werden sämtlich mittels einer Fahrerkarte für die gesetzlich vorgeschriebenen und in den Bussen installierten digitalen Fahrtenschreiber erfasst. Darauf sind Lenk- und Ruhezeiten der Fahrzeugführenden für mindestens 28 Tage gespeichert. Diese werden regelmäßig vom Busunternehmen ausgelesen und ermöglichen eine Beurteilung der Fahrweise des Fahrers, etwa anhand von Höchstgeschwindigkeiten, der Lenk- und Ruhezeiten und vorzeitiger Haltestellenabfahrten (Reinhardt, 2018, S. 511). Interessant dürfte dies insbesondere beim Einsatz von Elektrobussen sein: Zwar ist der Energieverbrauch von Elektrobussen deutlich unempfindlicher gegenüber aggressiven Fahrweisen als der von Dieselfahrzeugen, begründet durch eine geringere Gesamtreichweite gewinnt eine energiesparende Fahrweise dennoch an Bedeutung. Dies umso mehr, da sie, nach der Anzahl an Halten je Kilometer und noch vor Durchschnittsgeschwindigkeit und Passagierzuladung, die größten Auswirkungen auf den Energieverbrauch hat (Kivekäs, Lajunen, Vepsäläinen &

Tammi, 2018). Beim Stadtverkehr Lübeck existiert bereits ein System für Verbrauchsmessung entsprechend der Flotten-Management-Schnittstelle (FMS) 4.0, über das die entsprechenden Daten ausgelesen werden können. Dieses wird bereits im Rahmen des Projektes "Nutzerzentriertes Reichweitenmanagement Elektrobusse (NuR.E)" des Institut für Multimediale und Interaktive Systeme der Universität zu Lübeck genutzt und eine entsprechende Kooperation empfohlen (J. Lottmann, persönliche Kommunikation, 25. Juni 2019). Neben dem Fahrdienst kommt dem technischen Dienst mit der Instandhaltung von Flotte und Infrastruktur eine wichtige Rolle im Unternehmen zu. Eine aufwändige und entsprechend kostenintensive Tätigkeit ist dabei die Wartung der Dieselmotoren. Eine Umstellung auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge mit wartungsärmeren Motoren ermöglicht entsprechend 10-50% an Kosteneinsparungen für die Instandhaltung der Fahrzeuge (Kunith, 2017, S. 147). Neben den mechanischen Komponenten bedürfen auch die elektrischen und elektronischen an Wartung, dies umso mehr beim Einsatz von Elektrobussen. Eine Herausforderung ist dabei, dass die Verfügbarkeit von Personal und Fahrzeugen derart aufeinander abgestimmt werden muss, dass die Wartung erfolgen kann (Schnieder, 2015, S. 146ff.). Für eine Analyse, welche Standzeiten der Fahrzeuge dabei zum Laden genutzt werden können, siehe Raab et al. (2019). Zuletzt erfolgen im Unternehmen eine Vielzahl kaufmännischer und verwalterischer Tätigkeiten wodurch ein Bedarf an entsprechendem Personal besteht. Dazu zählen Verkehrsmeister, Betriebshofleiter, Verkehrsplaner, Marketing, Vertrieb, Organisation, Personalmanagement, Controlling, Rechnungswesen, Materialwirtschaft und IT-Dienste.

2.1.3 Infrastruktur

Der Betriebshof, beziehungsweise je nach Unternehmensgröße auch mehrere Betriebshöfe, bildet das Herzstück eines Busunternehmens. Von hier aus erfolgen die Ein- und Aussetzfahrten, der Großteil der Fahrzeuge wird dort abgestellt, und es erfolgen Routinetätigkeiten. Dazu gehört die Reinigung und das Betanken oder Laden, außerdem erfolgen in der auf dem Betriebshof verorteten Werkstatt die bereits im vorherigen Abschnitt umrissenen Wartungs- und Reparaturarbeiten. Daneben befindet sich ebenfalls die Ladeinfrastruktur bei der hier betrachteten Ladestrategie mit Nachtladern auf den Betriebshöfen.

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

Diese sind im Regelfall steckerbasiert, wobei trotz bereits teilweise standardisierter Systeme Inkompatibilitäten zwischen den verschiedenen Herstellern bestehen und die Ladegeräte entsprechend auf spezielle Busse zugeschnitten sind (Knote et al., 2017, S. 18f.). Relevante Standards für die Kommunikation zwischen Ladestation und Fahrzeug sind die ISO 15118 sowie das Open Charge Point Protocol (OCPP) in den Versionen 1.6 und 2.0. Bei einer großen Flotte ist der hohe Spitzenstromverbrauch beim gleichzeitigen Laden vieler Fahrzeuge zu beachten. Dietmannsberger, Schumann, Meyer und Schulz (2017) beziffern den entsprechenden Stromverbrauch je nach Betriebshofgröße von 50 bis 220 Fahrzeugen auf 8 bis 28 Gigawattstunden pro Jahr. Verbrauchsspitzen sind dabei in den Nächten unter der Woche und aufgrund des als *pre-conditioning* bezeichneten Aufheizens der Fahrzeuge vor Fahrtantritt bei niedrigen Außentemperaturen zu erwarten. Entgegen der Erwartungen führt das Laden der Fahrzeuge mit voller Ladeleistung ab Eintreffen auf dem Betriebshof im Vergleich mit geringerer aber konstanter Ladeleistung zu höheren Lastspitzen. Als optimierte Lösung wird eine Kombination aus beiden Strategien in Erwägung gezogen. Für eine ausreichende Versorgung ist dabei ein Anschluss an das Mittel- (10kV) oder gar das Hochspannungsnetz (100kV) erforderlich.

Informationstechnik

Busunternehmen verfügen mittlerweile üblicherweise über eine Vielzahl verschiedener IT-Systeme zur Unterstützung des Betriebs. Neben dem Betriebsleitsystem sind das Systeme für das Betriebshofmanagement, das Werkstattmanagement, das Tankmanagement, zur Personaldisposition und zur Umlauf- und Dienstplanung.

Das *rechnergestützte Betriebsleitsystem (RBL)*, heute auch *Intermodal Transport Control System (ITCS)* (Reinhardt, 2018, S. 520) unterstützt das Unternehmen bei der Betriebssteuerung. Auf einem zentralen Server werden dabei die dafür notwendigen Daten vorgehalten. Dies sind auf der einen Seite die fixen Fahrplandaten, auf der anderen die anhand von Fahrzeugstandorten ermittelten Abweichungen vom Fahrplan. Daneben ermöglicht das System die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Leitstelle und die Steuerung des Fahrbetriebs, außerdem dient es der Aktualisierung von Fahrgastinformationen. Auch kann die Überwachung der Einhaltung von Pausen- und Lenkzeiten hierüber erfolgen. Über

neuere Bordrechner lassen sich zudem auch weitere Daten wie etwa die Geschwindigkeit, Türzustände oder aktuelle Fahrgastzahlen an die Leitstelle übermitteln (Reinhardt, 2018). Für einen Ausblick auf künftige Entwicklungen und Trends leittechnischer Systeme, siehe auch die Ausführungen von Schnieder (2014, S. 43ff.).

Die beiden relevanten Betriebshofmanagementsysteme (BMS) sind *PSITraffic* und *COSware*. Letzteres wird beim Stadtverkehr Lübeck eingesetzt. Zu den Aufgaben der Systeme gehören die Verwaltung des Fahrzeugzustands, einschließlich Parkraummanagement, Ortung von Fahrzeugen auf dem Betriebshof und vieler weiterer Regeln. Trotz Entwicklungen in Richtung Elektromobilität liegt deren Schwerpunkt weiterhin auf Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (J. Lottmann, persönliche Kommunikation, 25. Juni 2019).

Das Werkstattmanagementsystem erfasst unter anderem die Werkstatttermine der Fahrzeuge und unterstützt die damit zusammenhängenden Prozesse. Der SL bezieht dies ebenfalls von COS. Weiters gibt es auch eine eigene Software für das Tankmanagement, mittels dessen sich auch die Verbrauchsdaten der einzelnen Fahrzeuge auslesen und analysieren lassen. Für die Optimierung des Einsatzes von Mitarbeitern und Fahrzeugen ist ein Personaldispositionssystem zuständig, das wie die anderen Systeme über Schnittstellen nach dem ÖPNV-Datenmodell des VDV verfügt und so mit diesen Daten austauschen kann. Ein Beispiel für ein solches System ist *PERDIS*¹. Für die Umlauf- und Dienstplanung existieren weitere Systeme. Beim SL erfolgt diese mittels *IVU.Plan*.

Bezüglich der Schnittstellen gibt es mit der europäischen Norm Network Timetable Exchange (NeTEx) eine neuere, umfangreiche Schnittstelle, die zum Datenmodell des VDV kompatibel ist, siehe dazu Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (2017a). Für die Übertragung von Echtzeitdaten, der sogenannten Ist-Daten in Abgrenzung zu den Soll-Daten, existiert die ebenfalls europäische Norm Service Interface for Real Time Information (SIRI), die in Deutschland ausgeprägte Schnittstelle wird in den VDV-Schriften 453/454 beschrieben und entspricht einer Teilmenge von SIRI.²

¹<https://www.initperdis.de>

²<https://www.vdv.de/i-d-s-downloads.aspx>

Tabelle 2.2: Features Personal und Infrastruktur

Nr.	Feature	Beschreibung
F10	Parameter Fahrweise	Das System ermittelt und erfasst den Energieverbrauch der Fahrweise je Fahrer.
F11	Stamm- und Betriebsdaten Ladeinfrastruktur	Das System erfasst die Stamm- und Betriebsdaten der Ladeinfrastruktur gemäß des Minimaldatensets (Harendt et al., 2017, S.33 ff.).
F12	Einbindung Echtzeitdaten	Das System erfasst die Fahrplandaten, Fahrzeugstandorte und ermittelt die Fahrplanabweichung.
F13	Weitere Parameter ITCS	Das System ermöglicht die Einbindung der Daten zu Geschwindigkeiten und aktuellen Fahrgastzahlen aus dem ITCS.

2.1.4 Betriebsplanung

Ein Busunternehmen übernimmt neben der reinen Erbringung der Verkehrsleistung eine Reihe an Planungsaufgaben. Neben der operativen Planung in Reaktion auf den aktuellen Zustand sind das die langfristige taktische und strategische Planung, die oft auch gemeinsam mit dem Aufgabenträger, etwa der Kommune, erfolgt. Die Komplexität erfordert die Zerlegung des gesamten Planungsprozesses in Teilprobleme, die nacheinander gelöst werden. Im Einzelnen sind dies Netzplanung, Kapazitätsplanung, Fahrlagenplanung, Fahrzeugeinsatzplanung, Personaleinsatzplanung, Disposition und Controlling. Diese werden im Folgenden zusammen mit den dafür eingeführten abstrakteren Konstrukten für das interne Management vorgestellt.

Netzplanung

Die Netzplanung umfasst die Haltestellenplanung, die Linienbildung und die Netzbildung. Die Planungsziele sind unter anderem die ausreichende Erschließung des Bedienungsgebietes, Minimierung der Summe der Reisezeiten und Reisen mit Umsteigevorgängen bei gleichzeitiger Minimierung von Wagenkilometern und Dienstplanstunden (Schnieder, 2015, S. 21ff.). Allerdings bedeuten Veränderungen am bestehenden Netz

einen hohen Aufwand und können große Auswirkungen auf die Akzeptanz des Angebots durch die Fahrgäste haben. Es ist anzunehmen, dass Verkehrsunternehmen für die Umstellung auf Elektrobusse daher keine Änderungen am bestehenden Netz vornehmen wollen. Daher werden die bestehenden Netze hier als gegeben angenommen und die Netzplanung in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Die durch die Linienbildung geschaffene Struktur des Netzes ist dagegen aufgrund der Bedeutung der Linienprofile für den Verbrauch von Elektrobussen und auch zur adäquaten Modellierung der Linien selbst weiter von Interesse. Grundsätzlich verknüpfen Linien Haltestellen und haben dabei definierte Start- und Zielorte sowie Unterwegshalte. Linien mit ähnlichen Verläufen werden dabei häufig in Linienvarianten gebündelt und als eine Linie mit wechselnden Endstationen und Linienwegen behandelt. Übliche Varianten sind dabei vor allem Verlängerungen und Verkürzungen, Abzweige, Gabelungen und Stichfahrten. Die definierten Linien können anhand verschiedener Kriterien unterschieden werden. So gibt es Regellinien und Expresslinien, Tag- und Nachtlinien, je nach Regelmäßigkeit Grundlinien, Verstärkungslinien, Ergänzungslinien und Sonderlinien und je nach Bedeutung Hauptlinien und Nebenlinien. Anhand der räumlichen Ausdehnung wird zwischen Quartierbussen, Ortslinien, Nachbarortslinien, Überlandlinien und Fernbuslinien unterschieden und anhand der geometrischen Anordnung zwischen Ringlinien, Halbmesserlinien, Durchmesserlinien und Tangentiallinien.

Die im Ergebnis der Planung entwickelten Linien können dabei sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, die sich auch auf die Reichweite von Elektrobussen auswirken. Wie die oben beschriebenen Klassifizierungen bereits nahelegen, bestehen diese unter anderem in den Haltestellenentfernungen, Reisegeschwindigkeiten und den durchquerten Verkehrszonen samt Verkehrsaufkommen. Von Bedeutung ist auch die Topografie, also die zu überwindenden Höhenunterschiede im Verlauf der Linie samt der aufzubringenden und rekuperierbaren Energie (Kunith, 2017, S. 223).

Kapazitätsplanung

Bei der Kapazitätsplanung soll sichergestellt werden, dass das Platzangebot der Nachfrage entspricht. Dies erfolgt durch Festlegung der Art der einzusetzenden Fahrzeuge

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

und der Häufigkeit der Fahrten. Dabei sollen Fahrgastkomfort und Sicherheit maximiert werden, der Einsatz der Betriebsmittel, also Größe und Zahl der eingesetzten Fahrzeuge sowie das Betriebspersonal, hingegen minimiert. Kenngrößen sind hierfür vor allem die Strecken-, Linien- und Haltestellenbelastung durch die Zahl der Fahrgäste, aber auch Mindestanforderungen an Fahrtenabstände (Schnieder, 2015, S. 45ff.). Die Gefäßgrößen der für die Bedienung der Nachfrage auszuwählenden Fahrzeuge sind von der Antriebsart unabhängig. Der bei Elektrobussen geringere Einfluss des Gewichtes auf die Energieeffizienz sowie die auch allgemein geringeren kilometerabhängigen Kosten im Vergleich mit Dieseln können eine Optimierung zugunsten größerer Fahrzeuge und geringerem Personaleinsatz ermöglichen. Auswirkungen auf den Energiebedarf hat insbesondere das Fahrgastaufkommen und die Fahrzeuganzahl, auf die sich diese verteilen.

Fahrlagenplanung

Im Rahmen der Fahrlagenplanung erfolgt die für die Betreiber gesetzlich vorgeschriebene Erstellung von Fahrplänen. Diese müssen die Linien mit Start- und Endpunkten, bediente Haltestellen sowie Fahrzeiten enthalten und durch die entsprechende Genehmigungsbehörde genehmigt werden. Ziele der Fahrplangestaltung sind erneut die Minimierung von Reisezeiten, hier durch Optimierung von Umsteigebeziehungen, und der für die Bedienung notwendigen Fahrzeuganzahl. Dazu kommen die Maximierung der Fahrplanstabilität und der Kapazität in Bezug auf Ausnutzung der verfügbaren Infrastruktur. Die insbesondere beim Einsatz von Elektrobussen bedeutsame Optimierung des Energiemanagements erfolgt durch die Wahl energetisch optimierter Fahrprofile, ein hohes Maß an Pünktlichkeit ermöglicht zudem eine energiesparendere Fahrweise. Für die Erstellung von Fahrplänen sind dabei eine Vielzahl verschiedener Zeitanteile von Relevanz. Neben der sogenannten *unproduktiven Zeit* bei Werkstattaufenthalten oder in der Abstellung ist dies vor vor allem die *Fahrzeugumlaufzeit*, die sich aus Beförderungszeiten, Wendezeiten und Leerfahrtzeiten zusammensetzt. Die *Beförderungszeit* bezeichnet die gesamte Zeit auf Linie und umfasst *Fahrzeit* und *Standzeit*. Die *Fahrzeit*, besteht dabei aus der im Normalfall notwendigen Fahrzeit sowie aus durch die Verkehrsbelastung bedingte zusätzliche Verlustzeiten. Zur *Standzeit* gehört die *Haltestellenstandzeit* samt Fahrgastwechselzeit,

Anschlussicherungszeit, Pufferzeit an Unterwegshalten und Wartezeiten zum Einfahren und Verlassen der Haltestelle. Daneben gibt es weitere Standzeiten, etwa an Lichtsignalanlagen oder auf der Strecke.

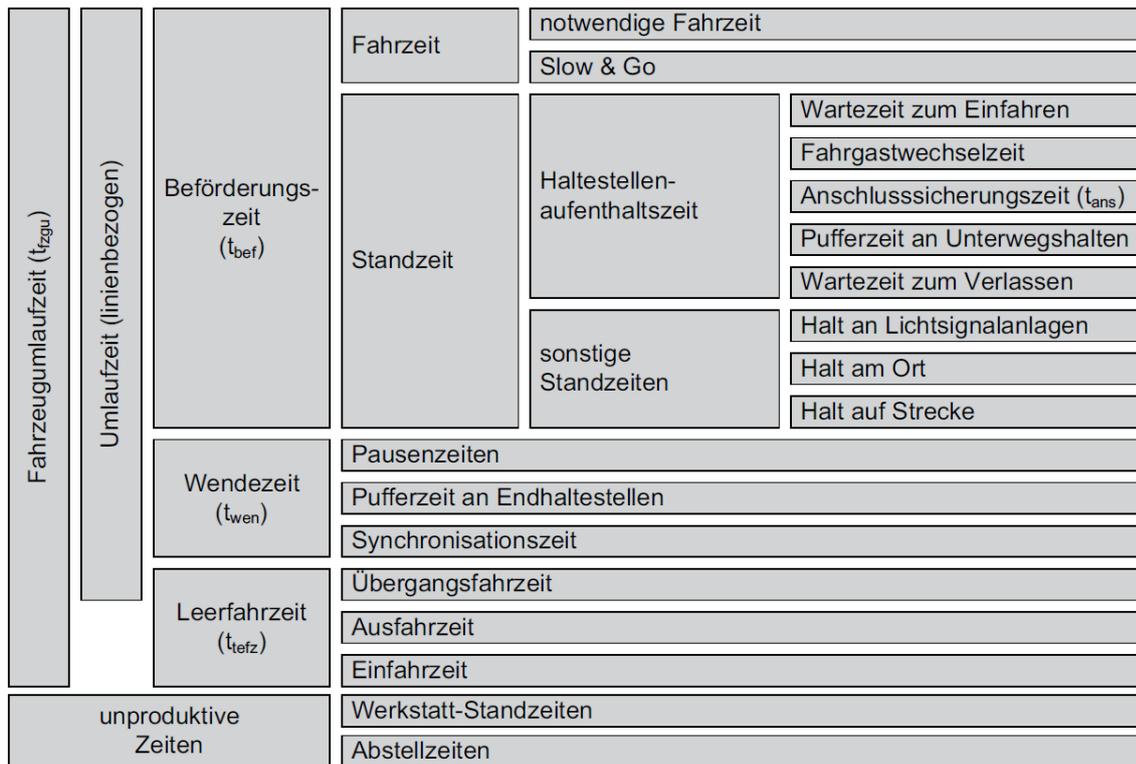


Abbildung 2.1: Zeitanteile im Fahrplan³

Als *Wendezeit* gilt der Zeitraum, den ein Fahrzeug an einer Endhaltestelle verbringt. Sie unterteilt sich in Pausenzeiten, Pufferzeit und Synchronisationszeit. *Leerfahrzeiten* umfassen Fahrzeiten ohne die Beförderung von Fahrgästen, darunter Übergangsfahrzeiten für Linienwechselfahrten und Ein- und Ausfahrzeiten von und zu Abstellanlagen wie dem Betriebshof. Die Fahrzeitermittlung erfolgt anhand von Probefahrten und Fahrzeitmessungen im Regelbetrieb. Unterscheidungen für verschiedene Tage (Wochentage, Samstage und Sonn- und Feiertage) und Tageszeiten (Hauptverkehrszeit, Normalverkehrszeit, Schwachverkehrszeit) sind dabei sinnvoll (Schnieder, 2015, S. 75ff.).

³Quelle: Schnieder (2015, S. 83)

Fahrzeugeinsatzplanung

Bei der Fahrzeugeinsatzplanung werden die im vorherigen Schritt in Fahrplänen definierten einzelnen Fahrten dergestalt aneinandergereiht, dass sie als Umläufe von Fahrzeugen bedient werden können. Es ergeben sich entsprechende *Umlaufpläne*. Kernziele des Planungsschrittes sind die wirtschaftliche Optimierung und eine hohe Stabilität der Betriebsführung. Ersteres wird dabei maßgeblich durch die Minimierung der insgesamt einzusetzenden Fahrzeuge, die Maximierung ihrer Laufzeiten und der Minimierung von Leerfahrten erreicht. Einer stabilen Betriebsführung sind dagegen die Gleichmäßigkeit der betrieblichen Abläufe und eine geringe Störanfälligkeit etwa dank größerer Reserven dienlich. Daneben gibt es eine Reihe von für die Planung ebenfalls relevanten Randbedingungen. Dies sind etwa für die Erbringung von Fahrten erforderliche Kapazitäten und entsprechende Gefäßgrößen, maximale Umlauflängen die insbesondere durch die begrenzte Reichweite beim Einsatz von Elektrobussen an Relevanz gewinnen, sowie Abstell- und entsprechend auch Ladekapazitäten der Infrastrukturen (Schnieder, 2015, S. 105ff.).

Personaleinsatzplanung

Die Personaleinsatzplanung beschäftigt sich mit der Aufstellung von Dienstplänen zur Einteilung des Personals. Die Verplanung des mobilen Personals, also insbesondere der Fahrerinnen und Fahrer, stellt hierbei die deutlich komplexere Aufgabe dar. Zu den übergeordneten Zielen gehört dabei ein effizienter Personaleinsatz, vor allem durch einen geringen Arbeitnehmerbedarf, aber auch durch Minimierung von Arbeitskosten etwa durch anfallende Überstunden sowie eine Flexibilisierung der zulässigen Arbeitszeiten. Daneben gilt es die «Störungsempfindlichkeit des Betriebsablaufs durch Linien- Und Fahrzeugwechsel der Fahrer» zu minimieren (Schnieder, 2015, S. 127) und die Zuordnung geeigneten Personals zu Transportvorgängen zu gewährleisten. Weiterhin gibt es einzuhaltende gesetzliche Rahmenbedingungen für den Personaleinsatz und darüber hinaus ist ein verantwortungsvoller Umgang mit den Mitarbeitern und ihrer Gesundheit relevant. Auch deshalb erfordert die Dienstplanung die Abstimmung mit dem Betriebsrat. Da zudem die Kosten für das Fahrpersonal mit 60-70% den größten Ausgabenbereich der Verkehrsun-

Tabelle 2.3: Features Betriebsplanung

Nr.	Feature	Beschreibung
F14	Eingabe Linien	Das System ermöglicht die Eingabe der aus der Betriebsplanung resultierenden Linien
F15	Erfassung Linienprofile	Das System erfasst je Linie tages- und tageszeitabhängige und -unabhängige Einflussfaktoren auf den Energiebedarf, darunter Haltestellenentfernungen, Reisegeschwindigkeiten, Verkehrsaufkommen, Topografie, Fahrgastaufkommen, Fahrzeuganzahl, (Fahrgastwechselaufkommen), Verkehrszeiten (Haupt-, Normal- und Schwachverkehrszeit) und Taktungen
F16	Erfassung Zeitanteile	Das System ermöglicht die Erfassung der einzelnen Zeitannteile der Fahrzeuge in den Umlaufplänen, darunter Halte- und Wendezeiten, unproduktive Zeit und Fahrzeugumlaufzeiten (Umlauflängen).
F17	Reservekapazitäten	Das System ermöglicht die Festlegung und Einplanung von Fahrzeug- und Personalreserven.
F18	Personalkosten	Das System ermöglicht die Berücksichtigung der Personalkosten bei der Optimierung.
F19	Ermittlung Restreichweiten	Das System ermöglicht die Ermittlung der Fahrzeugreichweiten und den Abgleich dieser mit den vorgesehenen Fahrleistungen.
F20	Datenauswertung	Das System ermöglicht die Ausgabe und Auswertung der gesammelten und ermittelten Daten mit dem Ziel, diese zur Unterstützung von Disposition und Controlling zu verwenden.

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

ternehmen ausmachen (siehe auch Abschnitt 2.1.2), werden bestehende Betriebsabläufe insbesondere hinsichtlich eines geringen Personaleinsatzes optimiert sein, sodass hier im Sinne der Wirtschaftlichkeit auch beim Einsatz von Elektrobussen nicht viel Handlungsspielraum besteht (Knote et al., 2017, S.25). Trotzdem kann es sinnvoll sein, die den Personaleinsatz und die damit verbundenen Personalkosten mitzumodellieren um auch hierzu Empfehlungen abgeben zu können. Als nächstkleinere Personalressource gilt das Personal für die Instandhaltung. Die Planung des entsprechenden Personaleinsatzes erfolgt auf Grundlage von Aufwandsabschätzungen mit dem Ziel der Gewährleistung einer hohen Verfügbarkeit der Fahrzeugflotte (Schnieder, 2015, S. 125ff.).

Disposition und Controlling

Als Disposition werden alle Maßnahmen zur operativen Steuerung des Betriebsablaufs bezeichnet. Sie verfolgt das Ziel den Betrieb auch in Störungsfällen aufrechtzuerhalten. Die Planung erfolgt ab hier anhand von konkreten Mitarbeitern und Fahrzeugen. Mit dem Einsatz von Elektrobussen erlangt hierbei insbesondere die Erfassung und Analyse der Restreichweiten eine größere Bedeutung, um eine angemessene Grundlage für zu fällende Entscheidungen in der operativen Planung sicherzustellen (Schnieder, 2015, S. 151ff.).

Das Controlling umfasst die strategische Steuerung des Unternehmens. Ziel dessen ist, dass die Leistungserbringung dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit genügt und gleichzeitig die Qualität der Dienstleistung gewährleistet werden kann. Dazu unterstützt es Entscheidungsträger durch Bereitstellung der relevanten Informationen, analysiert und erklärt gesammelte Daten und übernimmt eine koordinierende Rolle (Schnieder, 2015, S. 172ff.).

2.1.5 Energiebeschaffung

Mit dem Wechsel von Diesel- zu Elektrobussen geht auch eine veränderte Energiebeschaffung einher. Anstelle des Einkaufs von Treibstoff muss nun in deutlich größerem Umfang als zuvor Elektrizität beschafft werden. Dies Bedarf einer vorherigen möglichst genauen Prognose des Bedarfs, im Idealfall für jede Viertelstunde des betreffenden Jahres. Die Prognose erfolgt auf der Grundlage früherer Bedarfe und sich auf den Strombedarf auswirkender Einflussfaktoren. Die historischen Verbrauchsdaten werden den Stromanbietern

Tabelle 2.4: Features Energiebeschaffung

Nr.	Feature	Beschreibung
F21	Energieverbrauch Unternehmen	Das System ermöglicht die Erfassung der unternehmensweiten viertelstündlichen Stromverbrauchsdaten.
F22	Prognose Energieverbrauch	Das System ermöglicht eine Prognose des Lastprofils für die Zukunft.
F23	Erfassung Spotmärkte	Das System ermöglicht die Erfassung der Strompreise auf den Spotmärkten (Intraday- und Day-Ahead-Market).
F24	Prognose Spotmärkte	Das System ermöglicht die Prognose der Strompreise auf den Spotmärkten für einen oder mehrere Tage im Voraus und die Erhebung der hierfür relevanten Faktoren.
F25	Preisbasierte Ladestrategien	Das System ermöglicht die Ermittlung von Ladestrategien unter Ausnutzung geringerer Strompreise.
F26	Nutzung Strompreis	Das System ermöglicht die kurzfristige Umplanung der Ladevorgänge bei über den Tag veränderlichen Strompreisen zur weiteren Kosten- und Lastreduktion (Peak Shaving).
F27	Nutzung Eigenstrom	Das System ermöglicht die Berücksichtigung des aus eigenen Anlagen aktuell verfügbaren Stroms zur Ermittlung von Ladestrategien.

dabei in Form von Lastprofilen bereitgestellt. Dabei ermöglicht eine umfangreiche Datenlage dank genauerer Prognosen günstigere Preise. Das Ausgleichsenergieisiko durch höhere Energiekosten bei Abweichung des Verbrauchs von der Prognose liegt dabei entsprechend der Ausschreibungen beim Lieferanten.

Zusätzlich zum für das Jahr im Voraus eingekauften Strom kann die Beschaffung auch Quartals-, Monats-, Wochen, Tages- und sogar nur Stundenweise im Voraus über den sogenannten Spotmarkt erfolgen. Der dortige Strompreis unterliegt einer Vielzahl von Schwankungen. Auf der Erzeugerseite unterliegt die Stromproduktion durch die erneuerbaren Energien stark den Wetterbedingungen wie Temperatur, Wind, Sonnenstunden und Niederschlag. Die Kosten für Strom aus den thermischen Kraftwerke sind dagegen abhängig von den Preisen für CO₂-Emissionszertifikate und Gas-, Öl, Kohle und Uranpreisen. Daneben können sich Ausfälle von Kraftwerken und Netzen durch Revisionen und technische Defekte auf den Strompreis auswirken. Dazu existieren auch längerfristig

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

absehbare preiswirksame Ereignisse, so wie infolge langanhaltender Trockenheit sinkende Wasserstände zum Abschalten von Kraftwerken aufgrund des Kühlwassermangels führen kann (Schiffer, 2019). Bei einer Überproduktion von Strom können die Strompreise auf den Spotmärkten hingegen auch negativ werden, was sich flexible Stromkunden zunutze machen können (Schulze, 2015, S.82 ff.). Neben der Erzeugerseite gibt es auch auf der Verbrauchsseite Faktoren, die die Strompreise beeinflussen. Das sind insbesondere die Temperatur und der damit zusammenhängende Betrieb von Klimaanlage oder Elektroheizungen, Bewölkung und der entsprechende Bedarf an Beleuchtung ebenso wie die Tageszeit, Ferien und Feiertage mit dem resultierenden Verbraucherverhalten (Schiffer, 2019, S. 395). Der reine, veränderliche Strompreis macht jedoch nur einen verhältnismäßig kleinen Teil am gesamten Strompreis aus. Hinzu kommen weitere Beträge, darunter die Umsatzsteuer, die EEG-Umlage (Schulze, 2015, S.85), Stromsteuer, Offshore-Haftungsumlage, KWK-Umlage und Netzentgelte, aufgeteilt auf einen Jahresleistungspreis und einen verbrauchsabhängigen Arbeitspreis. Für Details hierzu siehe Schulze (2015, S. 130). Daneben hängen die Stromkosten bei vielen Verträgen neben dem eigentlichen Verbrauch auch von den Spitzenlasten ab, sodass das Aufbauen einer eigenen Speicherinfrastruktur zum Abdämpfen dieser Spitzen sinnvoll sein kann.

Wie die stark veränderlichen Preise auf dem Spotmarkt im Sinne eines zeitlich und finanziell günstigen Ladens von Elektrofahrzeugen genutzt werden können, ist in Meese, Schnittmann, Schmidt, Zdrallek und Arnoneit (2018) beschrieben. Dabei wird auf der Basis des deutschen Mobilitätsverhaltens und unter Annahme einer perfekten Vorhersage des Day-Ahead-Marktes, linearem Ladeverhalten und unter Ausblendung möglicher Verluste ein Optimierungsproblem als Mixed-Integer Program (MIP) formuliert. Zur weiteren Optimierung werden dabei auch tagesaktuelle Veränderungen auf dem Intraday Market berücksichtigt und Ladezeiten entsprechend verschoben. Es wird dabei jedoch auch darauf hingewiesen, dass die Optimierung einer größeren Zahl an Fahrzeugen gegen das selbe Preissignal das lokale Verteilungsnetz überlasten kann. Eine weitere Möglichkeit der Energiebeschaffung ist die Erzeugung des Stroms etwa in eigenen Photovoltaikanlagen auf den Hallendächern. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, den Verbrauch stärker nach dem erzeugten eigenen Strom als nach dem auf dem Markt aktuellen Strompreis auszu-

richten. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass vielerorts ÖPNV und Energieversorgung durch ein gemeinsames kommunales Unternehmen erbracht werden oder diese wie in Lübeck strukturell durch eine gemeinsame Holdinggesellschaft miteinander verbunden sind und dadurch günstigere Konditionen gelten.

2.2 Netzbetreiber

Die Verteilung des Stroms im Stromnetz und der sichere und zuverlässige Betrieb dieser Netze, einschließlich Wartung, Pflege und Reparatur, obliegt den Netzbetreibern. Hierbei wird unterschieden zwischen den Übertragungsnetzbetreibern, die Strom über große Distanzen in Höchstspannungsnetzen transportieren und Verteilnetzbetreiber, welche die regionale Verteilung des Stroms via Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze übernehmen. Die Hochspannungsnetze dienen dabei der groben Verteilung der Energie aus Kraftwerken zu Industrien oder in größere Regionen. Die kleingliedrigere Verteilung erfolgt durch Mittelspannungsnetze, die lokale Transformatoren aber auch größere Einrichtungen wie Krankenhäuser speisen. Die Versorgung der Haushalte als Endverbraucher geschieht letztlich über das Niederspannungsnetz. Den Verteilnetzbetreibern obliegt als Grundversorgern eines Ortes eine Anschluss- und Versorgungspflicht. Darüber hinaus besteht eine gesetzliche Verpflichtung, anderen Stromanbietern diskriminierungsfrei die Nutzung der eigenen Netze unter Erhebung eines staatlich kontrollierten Netznutzungsentsgelts zu ermöglichen. Schließlich müssen auch dezentrale Erzeuger wie Windenergie- und Photovoltaikanlagen die Möglichkeit zur Netzeinspeisung des erzeugten Stroms erhalten. Entsprechend dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) sind diese bei Verfügbarkeit immer einzusetzen und hierfür zu vergüten. Sollte der erzeugte Strom die Menge des verbrauchten Stroms dadurch übersteigen, wird der Überschuss in das Übertragungsnetz gespeist (Paschotta, 2017). Um eine unwirtschaftliche Stromüberproduktion zu vermeiden, erfolgt der Betrieb der abschaltbaren Kraftwerke gemäß einer Kraftwerkeinsatzplanung. Übersteigt der Energiebedarf das Angebot, wird die zur Deckung der Differenz nötige zusätzliche Energie auf dem Strommarkt beschafft. Für die Stromregelung, also der bedarfsgerechten Bereitstellung des Stroms, stellt die Energiewende eine

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

große Herausforderung dar. Der Strom wird hierbei zunehmend in dezentralen Kleinanlagen statt in großen Kraftwerken erzeugt und unterliegt stärker den Wetterbedingungen. Die daraus resultierenden starken Schwankungen bei der Stromverfügbarkeit müssen durch die Netzbetreiber ausgeglichen werden, um ein sicheres und zuverlässiges Netz zu gewährleisten. Zwar gibt es bereits Ansätze, die Planbarkeit der aus Windkraft gewonnenen Energie mittels maschinellen Lernens zu verbessern, daneben bedarf es aber noch anderer Strategien zur Netzstabilisierung (Elkin & Witherspoon, 2019). Neben geeigneten Kraftwerken, die sich je nach Bedarf kurzfristig an- und abschalten lassen, lässt sich dies vor allem durch den Einsatz von Energiespeichern realisieren. Vorteilhaft sind zudem Verbraucher, die in ihrem Strombedarf zeitlich flexibler sind und einen Teil ihres Verbrauchs außerhalb der Lastspitzen legen können. Die Wechselwirkungen zwischen dem Stromnetz und einer Flotte elektrisch betriebener Busse sind Gegenstand des vorliegenden Arbeit zugrundeliegende Forschungsprojektes DOING eBus (Forschungs- und Entwicklungszentrum der Fachhochschule Kiel, 2018). Die in der zugehörigen Vorhabenbeschreibung aufgeworfenen Fragestellungen lauten:

- Wie kann die Netzstabilität auch zukünftig sichergestellt werden, wenn stationäre bzw. mobile Speicher (wie z.B. Elektrobusse) in das Stromnetz integriert werden?
- Welche Auswirkungen hat ein Flottenbetrieb von E-Nahverkehrsbussen auf stationäre Energiespeicher und das Stromnetz?
- Welche Auswirkungen haben Rückspeisungen aus dem Netz auf den Flottenbetrieb und auf die Energiespeicher?
- Wie müssen die Speicher und die Ladeinfrastruktur gestaltet/aufgebaut werden? Was wird dafür benötigt? Gibt es die benötigte Technik bereits auf dem Markt? Wie können die theoretischen Erkenntnisse in die Praxis umgesetzt werden?

Mögliche negative Auswirkungen auf das Stromnetz sind dabei Spannungseinbrüche, Überlastungen und Kapazitätsbeschränkungen. In einer stärkeren Koordinierung zwischen dem Netzbetreiber und dem Laden von elektrischen Fahrzeugen werden Vorteile sowohl für Stromerzeuger, als auch für das Stromnetz sowie für die Stromkunden ge-

Tabelle 2.5: Features Netzbetreiber

Nr.	Feature	Beschreibung
F28	Datenquelle Netzbetreiber	Das System ermöglicht eine Einbindung der Daten des Verteilnetzbetreibers zu Stromverfügbarkeit und Netzlast.
F29	Datenweitergabe Netzbetreiber	Das System ermöglicht dem Verteilnetzbetreiber, Daten zu aktuellen und künftigen Energiebedarfen und Reserven des Verkehrsunternehmens abzurufen.

sehen. Aufseiten der Stromerzeuger beinhalten diese eine besser abgestimmte Planung der Stromproduktion, die Möglichkeit des Zurückgreifens auf in Fahrzeugen gespeicherte Energie bei Engpässen und das *Peak Shaving*, also das Abdämpfen von Lastspitzen. Letzteres kommt auch dem Stromnetz zugute, ebenso wie weitere Möglichkeiten zur Stabilisierung von Spannung und Energie im Netz. Für dieses sogenannte bidirektionale Laden sind die regulatorischen Voraussetzungen durch den Gesetzgeber jedoch nicht geschaffen (J. Lottmann, persönliche Kommunikation, 25. Juni 2019). Der Endverbraucher profitiert durch geringere Kosten bei Bezug von Strom in Schwachlastzeiten und von einer zuverlässigeren Stromversorgung. Einen ausführlicheren Überblick hierüber gibt Herbert (2018).

2.3 Umwelt

Sowohl der Energieverbrauch von Elektrobussen als auch die Stromgewinnung aus erneuerbaren Energien sind abhängig von einer Vielzahl von Umweltfaktoren, die in der Analyse entsprechend berücksichtigt werden müssen. Das der Arbeit zugrundeliegende Forschungsprojekt bezieht sich geografisch auf Schleswig-Holstein, daher wird im Folgenden der Schwerpunkt auf das entsprechende regionale Klima und die daraus resultierenden Wetterbedingungen gelegt.

Klima in Schleswig-Holstein

Schleswig-Holstein liegt nahezu vollständig in der vom Deutschen Wetterdienst als *Nordwestdeutsches Tiefland* bezeichneten Modellregion, dessen Klima vor allem aus niedriger

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

Geländehöhe und der Nähe zum Meer resultiert. Abweichungen von diesem Mittel gibt es besonders mit den im Herbst deutlich höheren Niederschlägen an der Nordsee, und den im Winter, aufgrund des kontinentalem Klimas, niedrigeren Temperaturen im Südosten des Landes. Hinsichtlich der durchschnittlichen Jahrestemperatur im Zeitraum 1981 bis 2010 liegt Schleswig-Holstein exakt im bundesweiten Durchschnitt. Bei der Betrachtung der Sommertage mit Tageshöchsttemperaturen jenseits 25 Grad Celsius und der Frosttage mit unter 0 Grad Celsius Tageshöchsttemperatur spiegelt sich jedoch die Meeresnähe und der die Temperaturen mäßigende Effekt in den Zahlen. So hat Schleswig-Holstein mit 20 Sommertagen deutlich weniger als Deutschland mit 34,5 Tagen, auch steigt deren Anzahl deutschlandweit um das Anderthalbfache schneller. Trotzdem steigt auch in diesem Bundesland die Wahrscheinlichkeit für Hitzewellen. Auf der anderen Seite liegt auch die Zahl der Frosttage mit 68 deutlich unter dem bundesweiten Mittel von 85 Tagen. Die Niederschlagsmenge Schleswig-Holsteins liegt im Mittel gleichauf mit dem bundesweiten Niederschlag, ist seit 1990 aber ebenfalls gering auf 823mm angestiegen, wobei dieser Anstieg vor allem jeweils im Winter und im Herbst zu verzeichnen ist. Die insgesamt regenreichsten Jahreszeiten sind etwa gleichauf der Herbst und der Sommer mit 215-229mm, gefolgt von Winter und Frühjahr mit 180 bzw. 155mm mittlerem Niederschlag. Dabei fallen die Niederschläge in der Schleswig-Holsteinischen Geest im Mittel um bis zu 50% höher aus als entlang der Ostseeküste. Die jährlich 1603 Sonnenstunden stechen im bundesweiten Vergleich ebenfalls nicht heraus. Sie entsprechen im Durchschnitt 257 Minuten pro Tag, die naturgemäß mit den Jahreszeiten variieren. So kommt ein typischer Sommer auf 421 Sonnenminuten pro Tag, im Frühjahr sind es noch 328, in Herbst und Winter dagegen nur 190 und 93 Sonnenminuten. Die sonnenreichsten Orte liegen dabei auf Sylt und Fehmarn sowie entlang der Küsten, am wenigsten scheint die Sonne abseits der Küste im südlichen Holstein. Die Nähe zu den Meeren bringt erwartungsgemäß viel Wind mit sich. So ist es auch wenig überraschend, dass die Windgeschwindigkeiten in Küstennähe höher sind als im Binnenland. Die Anzahl an Sturmtagen pro Jahr mit mindestens 62km/h Spitzenwindgeschwindigkeiten betragen folglich 114 in List, 60 in Fehmarn und 47 km/h in Schleswig. Im Jahresmittel liegen die Windgeschwindigkeiten zwischen 3m/s in Lübeck und 7,5m/s auf Sylt (Deutscher Wetterdienst, 2017).

Tabelle 2.6: Features Umwelt

Nr.	Feature	Beschreibung
F30	Prognose Grünstrom	Das System integriert eine Prognose zur wetterabhängigen Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien.
F31	Umweltparameter	Das System ermöglicht die Erfassung der Parameter Temperatur, Niederschlag einschließlich Schnee, Sonnenstunden und Windstärke sowie Windrichtung sowohl aktuell als auch als Wettervorhersage für bevorstehende Stunden und Tage.
F32	Umweltbezogene Fahrzeugparameter	Das System erfasst die Fahrzeugparameter Reifenzustand und Reifendruck.

Auswirkungen auf Energiebedarf und Energieverfügbarkeit

Die vielfältigen Auswirkungen der verschiedenen Umweltfaktoren auf den Energiebedarf und die Energieverfügbarkeit wurden in vorherigen Abschnitten bereits angerissen. Im Folgenden werden diese nochmals gesammelt betrachtet.

Die Abhängigkeit des Energiebedarfs der Elektrobusse geht bereits aus der Analyse im entsprechenden Abschnitt 2.1.1 hervor. Die Temperatur schlägt sich dabei vor allem in einer geringeren verfügbaren Kapazität der Akkumulatoren und einem höheren Energieverbrauch durch den Betrieb von Heizung und Klimaanlage nieder. Daneben gibt es noch weitere Faktoren, die einen Einfluss auf die Reichweite elektrisch betriebener Fahrzeuge haben. So wird der Rollwiderstand der Reifen auf der Straße, neben dem Reifenzustand, -druck, dem Untergrund und der Temperatur auch von Regen und Schnee beeinflusst. Weiterhin wirkt sich auch Gegenwind negativ auf den Energieverbrauch der Fahrzeuge aus (Vepsäläinen, Otto, Lajunen & Tammi, 2019; Sarrafan et al., 2017).

Schwankungen des Stroms aus erneuerbaren Energien schlagen sich direkt in den Strompreisen auf den Spotmärkten nieder, die ursächlichen Wettereffekte müssten entsprechend nicht zwangsläufig mitmodelliert werden. Sollen jedoch im Sinne einer optimierten Planung Prognosen für die Entwicklung dieser Märkte angestellt werden, ist die Kenntnis von akkuraten Wettervorhersagen von entscheidender Bedeutung. Interessant sind hierbei besonders die Zahl der Sonnenstunden sowie die Windstärken am Ort der Energiean-

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

lagen. Daneben wird der Preis auch vom Verhalten der Verbraucher beeinflusst, die insbesondere bei besonders warmen oder kalten Temperaturen und geringerem Licht einen höheren Energiebedarf haben. Siehe hierzu auch Abschnitt 2.1.5.

2.4 Geeignete Geschäftsmodelle

Mit Blick auf die angestrebte wirtschaftliche Nutzung der Forschungsergebnisse stellt sich auch die Frage nach der Vermarktung und der Wahl eines geeigneten Geschäftsmodells. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie hat die PwC AG eine Studie zur *Verwendung von Closed- und Open-Source-Geschäftsmodellen für öffentlich finanzierte Forschungsergebnisse im Bereich der Informationstechnologie* erstellt und einen darauf aufbauenden Leitfaden herausgegeben (PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft, 2011). Dieser bildet die Grundlage für die folgenden Betrachtungen. Die unternehmerische Ausgangslage vollständig und detailliert zu erfassen, liegt jedoch nicht im Rahmen dieser Arbeit, daher wird nur in Grundzügen hierauf eingegangen. Trotzdem erfolgt anschließend eine Betrachtung und erste Einschätzung der darauf aufbauenden möglichen Erlös- und Lizenzierungsmodelle, um hieraus weitere Anforderungen an das System abzuleiten.

2.4.1 Unternehmerische Ausgangssituation

Die unternehmerische Ausgangssituation wird dem Leitfaden entsprechend anhand von jeweils vier externen und internen Faktoren eingeschätzt. Den ersten externen Faktor bildet dabei die *Zielgruppe* und die damit einhergehende Betrachtung der möglichen Marktsegmente. Für das zu entwickelnde System sind dies in erster Linie Busunternehmen, die zur Erbringung der Verkehrsleistung Elektrobusse einsetzen oder dies beabsichtigen. Daneben sollen auch die jeweiligen Verteilnetzbetreiber einen Mehrwert aus der Verwendung der Software erzielen können. In beiden Fällen handelt es sich um eine Business-to-Business-Beziehung (B2B). Die Kunden können dabei verschiedenste Größen haben, von Kleinstunternehmen wie beispielsweise Buchholz-Bus mit 3 Linien und 8 Mitarbeitern bei extern beschäftigtem Fahrpersonal, bis zur Berliner Verkehrsgesellschaft (BVG) mit über 12.000 Mitarbeitern (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V., 2013). Geografisch

2.4 Geeignete Geschäftsmodelle

zielt das zugrundeliegende Forschungsprojekt dabei zunächst auf Kunden in Schleswig-Holstein ab, eine Erweiterung der Zielgruppe auf Kunden in anderen Teilen Deutschlands oder der Welt kann das Erlöspotential jedoch signifikant erhöhen. Zur Zielgruppe innerhalb der Unternehmen gehören mit der Betriebsplanung und der strategischen Ausrichtung beschäftigte Personen mit Bedarf an kontextgerechten Planungstools, wobei der Kontext im Speziellen der optimierte Einsatz elektrisch betriebener Busse ist. Daneben sind auch Beschaffende der IT-Infrastruktur zu berücksichtigen. Bei der bestehenden Software fallen die Erlösmodelle überwiegend unter das klassische Lizenzgeschäft. Entwicklungen wie SaaS werden mit Interesse verfolgt, es bestehen aber Bedenken hinsichtlich der Integrität der eigenen Daten, insbesondere der Schutz dieser gegenüber potentiellen Konkurrenten (J. Lottmann, persönliche Kommunikation, 25. Juni 2019). Unter der Annahme des Ziels der vollständigen Elektrifizierung der Busflotten, der Bewältigung der damit verbundenen Herausforderungen und der entsprechenden wirtschaftlichen Auswirkungen, ist eine hohe Bedeutung der Software für die Kunden anzunehmen. Der wirtschaftliche Nutzen der Software für das Unternehmen ist entsprechend herauszustellen. Von Relevanz ist dafür auch, dass ein Großteil der Verkehrsunternehmen mehrheitlich im Besitz der Trägerkörperschaft ist, sodass diese als öffentliche Auftraggeber den entsprechenden Ausschreibungspflichten unterliegen (Prechtl, Wittmann & Hartmann, 2017). Der zweite Faktor widmet sich bestehenden Normen und Standards, sowohl technischer und rechtlicher Natur, als auch hinsichtlich informeller Konventionen und Gepflogenheiten. Dies können etwa sein: rechtliche Regulierungen, Rahmenvorgaben, Dokumentationsvorschriften, Ausschreibungsvorgaben und datenrechtliche Vorgaben. Weitere Normen und Standards lassen sich auch aus typischen Geschäftsprozessen ableiten. Für den Stadtverkehr Lübeck als potentieller Kunde und Projektpartner des zugrundeliegenden Forschungsprojektes ergibt sich aus der Mitgliedschaft im EnergieCluster Digitales Lübeck etwa, dass die in Lübeck und Umgebung generierten Daten auch für die Speicherung und Verarbeitung in der Stadt bleiben (Forschungs- und Entwicklungszentrum der Fachhochschule Kiel, 2018; EnergieCluster Digitales Lübeck, 2019). Für die Datenhaltung existiert das ÖPNV-Datenmodell (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V., 2017a). Die in diesem Schritt zu beantwortende Frage ist, wie hoch das Risiko ist, die Software an den

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

einzelnen Normen auszurichten, abhängig von deren jeweiliger Verbreitung und Akzeptanz. Von Relevanz ist auch die Einschätzung der Branchenstruktur. Dies erfordert eine Analyse der Konkurrenten, ihrer Vernetzung untereinander, die Bedrohung der eigenen Software durch neue Anbieter am Markt und die eigene Verhandlungsstärke und Abhängigkeit gegenüber Lieferanten, Lizenzgebern, relevanten Verbänden und dem Kunden. Auch mögliche Kooperationen mit anderen Unternehmen, Entwicklercommunities und aus diesen Kooperationen benötigte Ressourcen spielen dabei eine Rolle. Neben der in Kapitel 1.3 erwähnten Software Optibus sind keine direkten Konkurrenzprodukte bekannt. Den verbreiteten Planungstools fehlt noch die Berücksichtigung der besonderen Erfordernisse beim Einsatz von Ebussen (J. Lottmann, persönliche Kommunikation, 25. Juni 2019). Eventuell könnten diese Produkte jedoch als Ausgangssoftware für die Ergänzung mit einem eigenen Komplementärprodukt dienen. Der vierte externe Faktor betrifft die Finanzierung und damit den Kapitalbedarf durch Forschung, Entwicklung, Produktion und weitere Felder und Finanzquellen in Form von Eigenkapital, Krediten, Risikokapital oder öffentlichen Förderungen. Hierzu können im Rahmen dieser Arbeit keine Einschätzungen abgegeben werden.

Die internen Faktoren umfassen das Produktprofil, Marketing, Vertrieb sowie Entwicklungs- und Supportkapazitäten. Zum Produktprofil gehört die Einschätzung der qualitativen Softwareeigenschaften. Wichtig ist dabei, die Kundenbedürfnisse möglichst exakt zu befriedigen und mit der bestehenden Hard- und Softwareumgebung kompatibel zu sein. Unter das Marketing fällt die Entwicklung einer an die Erwartungen und Bedürfnisse des Kunden angepassten Strategie mit Entscheidungen hinsichtlich der Produktdifferenzierungen, der Preispolitik und der Ausbildung eines Marken- und Produktimages sowie einer zielgruppenadäquaten Kommunikations- und Werbestrategie. Beim Vertrieb stellt sich die Frage, auf welchem Wege die Software zum Kunden gelangen soll und ob bereits Vertriebskapazitäten und -strategien bestehen. Erfolgen kann dies auf direkter oder indirekter Weise, in Form von Fernabsatz, über Fachmessen oder Vertriebspartnerschaften. Für die dauerhafte Kundenpflege wird zu dediziertem Customer-Relationship-Management geraten. Die Moteg GmbH als potentieller Verwertungspartner verfügt dabei bereits über Kontakte und Kundenbeziehungen, die für den Vertrieb des Produktes förderlich sein

2.4 Geeignete Geschäftsmodelle

könnten (Forschungs- und Entwicklungszentrum der Fachhochschule Kiel, 2018). Die Entwicklungs- und Supportkapazitäten schließlich müssen im Verhältnis zu den erwarteten Absatzmöglichkeiten stehen. Auch ist sicherzustellen, dass für das Produktprofil ausreichende Ressourcen vorhanden sind. Dies können unternehmensinterne Ressourcen und einlizenzierte Produkte sein. Für die selbst zu entwickelnden Komponenten ist zu beachten, welche technischen Kapazitäten und entsprechende Personalqualifikationen gebraucht werden und verfügbar sind.

Für eine abschließend Einschätzung ist eine Gewichtung der Faktoren und die Identifizierung der eigenen Stärken und Schwächen von Relevanz. Die externen Faktoren sind dabei eher als fix zu betrachten als die internen. Die Wahl der Erlösmodelle sollte sich anschließend an den identifizierten unternehmerischen Stärken orientieren, eine Hilfestellung dazu wird in PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft (2011, S.28) gegeben. Aufgrund der nur oberflächlichen Einschätzung der unternehmerischen Ausgangssituation können einige Faktoren hier keine Berücksichtigung finden. Trotz dessen werden die verschiedenen Erlösmodelle im Folgenden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung eingeschätzt, um mögliche Anforderungen für die Architektur zu identifizieren und in späteren Entscheidungen zu berücksichtigen.

2.4.2 Erlösmodelle

Unter das Erlösmodell Distribution und Bundling fällt das Bundling frei verfügbarer Software und die Distribution und der Verkauf dieses Bundles. Um erfolgreich zu sein muss das Produktprofil die Wünsche der Zielgruppe optimal erfüllen. Derartige Produkte sind ohne großen Entwicklungsaufwand realisierbar, durch Konkurrenten aber leicht imitierbar und besondere Leistungsmerkmale lassen sich schwer herausstellen. Aufgrund der erforderlichen Eigenentwicklung ist dieses Erlösmodell ungeeignet.

Beim klassischen Lizenzgeschäft werden Nutzungs- und Verwertungsrechte gegen Entgelt erteilt. Das Modell erfordert die Sicherung der Software über Urheberrecht, Markenrecht, Patente oder Geheimhaltung, da ansonsten die Alleinstellungsmerkmale leicht durch Konkurrenten nachahmbar sind. Die entsprechend hohen Kosten für Entwicklung und Schutz des geistigen Eigentums sind nur über eine hohe Nachfrage bei Kunden be-

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

dienbar. Dafür ist eine hohe Skalierbarkeit gegeben und die mittelfristige Konkurrenzsituation gut kalkulierbar. Da dieses Erlösmodell im angestrebten Markt bisher üblich ist, dürfte es die größte Akzeptanz erfahren und sollte auch deshalb nicht ausgeschlossen werden.

Die neuere Entwicklung hin zu Software-as-a-Service-Produkten umfasst das eigenständige Betreiben der Software, bei dem den Kunden der Zugang zu dieser über den Webbrowser oder Webservices ermöglicht wird. Die Zahlung erfolgt dabei entsprechend der bereitgestellten Leistung anstatt für die Anschaffung. Ressourcen- und Kompetenzengpässe sind hierbei unbedingt zu vermeiden. Weitere besonders wichtige Themen sind Datensicherheit und Compliance. Software nach diesem Prinzip ist schnell einführbar, generiert stabile Einnahmen und ermöglicht eine Differenzierung im Wettbewerb auch bei Einsatz von Open Source-Software. Demgegenüber stehen ein hohes Investitionsrisiko und das Tragen der Letztverantwortung. Für die Wahl dieses Modells spricht die gute Skalierung mit der Unternehmensgröße, insbesondere für den Einsatz auch durch kleinere Verkehrsunternehmen, die nur entsprechend der verhältnismäßig geringen Nutzung zahlen und einen geringeren Aufwand für die Einrichtung des Systems stemmen müssen.

Das Komplementärgütergeschäft bezeichnet das Anbieten von kostenpflichtigen Applikationen, die an bestehende Software anknüpfen. Hierfür ist eine weit verbreitete Ausgangssoftware notwendig. Ein hoher Verbreitungsgrad dieser bei gleichzeitig klarem Erweiterungsbedarf birgt viel Potenzial, insbesondere bei separaten Herstellern für Ausgangs- und Komplementärsoftware birgt die sich daraus ergebende Abhängigkeit jedoch ein schwer kalkulierbares Risiko. Der klare Erweiterungsbedarf ist in diesem Fall gegeben, zudem existieren, mit dem über verschiedene Anwendungen hinweg genutzten ÖPNV-Datenmodell, standardisierte Schnittstellen, die das Risiko der Abhängigkeit reduzieren. Eine Integration in die bestehende IT-Infrastruktur der Busunternehmen ist unabhängig von der Wahl des Erlösmodells sinnvoll, sodass die Vermarktung der Software als Komplementärprodukt eine naheliegende Option darstellt.

Beim Komplementärdienstleistungsgeschäft wird der Erlös nicht durch das Produkt selbst, sondern durch Services zur Ausgangssoftware generiert. Dies kann Support und Wartung, Anpassung und Integration, Administration und Hosting sowie Training und

2.4 Geeignete Geschäftsmodelle

Schulung umfassen. Wichtig hierbei ist, dass die Services dauerhaft und verlässlich angeboten werden können und Know-How zur Absetzung von Konkurrenten existiert. Auch ist ein Bedarf der Zielgruppe an einem komplementärem Service zur Ausgangssoftware unabdingbar. Vorteilhaft an dem Erlösmodell ist, dass ein Großteil an Geschäftskunden auf Komplementärdienstleistungen angewiesen ist. Dem gegenüber stehen eine nur geringe Skalierbarkeit sowie erneut die Abhängigkeit von der Ausgangssoftware. Laut Vorhabenbeschreibung des Forschungsprojektes existiert mit der MOTEG GmbH bereits ein potentieller Verwertungspartner, der die notwendigen Kompetenzen und Kontakte aufweist. Die Generierung von Erlösen durch komplementäre Dienstleistungen zur zu entwickelnden Software ist deshalb bei der Architektur mit zu berücksichtigen. Eine weitere denkbare Option ist zudem die Bereitstellung von Cloud-Speicher oder -Rechenleistung, insbesondere im Falle der Entwicklung als SaaS-Produkt.

Für das Türöffner-Modell, auch Freemium genannt, wird die Software kostenlos angeboten mit dem Ziel, weitere Erlösmodelle darauf aufzubauen, freiwillige Spenden zu generieren oder andere Fördermöglichkeiten zu erschließen. Essentiell ist dabei der Tradeoff, Anreize für die kostenpflichtigen Features schaffen, aber die kostenlose Variante attraktiv genug zu halten, um die Kunden zu binden. Relevant ist auch das Verhältnis von der Gesamtzahl der Nutzer zu zahlenden Nutzern. Das Modell ermöglicht eine schnelle Softwareverbreitung, birgt aber das Risiko unsicherer bzw. unsteter Erlöse. Im Business-to-Business-Segment (B2B) ist dies unüblich und wird hier daher nicht weiter betrachtet.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass gegenwärtig nur die Erlösmodelle Distribution und Bundling sowie das Türöffner-Modell als ungeeignet betrachtet und daher nicht weiter verfolgt werden. Das klassische Lizenzgeschäft, SaaS-Modelle, Komplementärgütergeschäft und Komplementärdienstleistungsgeschäft sowie Kombinationen dieser werden für die Erlösgenerierung grundsätzlich als geeignet betrachtet und sind daher im weiteren Entwicklungsprozess zu berücksichtigen. Im Zuge dessen ist auch eine Mandantenfähigkeit des Systems zu erwägen, um die Daten der einzelnen Kunden sauber zu trennen und gegebenenfalls durch Querschnittsanalysen über alle gesammelten Daten hinweg Optimierungspotentiale zum Nutzen aller Mandanten zu ermitteln. Eine offene Frage ist die nach der Lizenzierung des Quellcodes als Closed-Source, Open-Source oder eine hybride

2 Domäne Elektromobilität im ÖPNV

Lizenzierungsform. Die Entscheidung darüber ist im Zusammenhang mit der Entscheidung über die Erlösmodelle und der verwendeten Technologien zu fällen, Unterstützend sei dazu wiederum auf die Veröffentlichung der PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft (2011, S. 30ff.) verwiesen.

3 Architekturdokumentation

Auf die umfangreiche Analyse der Problemdomäne im vergangenen Kapitel aufbauend folgt die Architekturbeschreibung der zu entwickelnden Systemlandschaft. Die Dokumentation richtet sich dabei nach dem arc42-Template in der Version 7.0⁴. Im Rahmen dessen erfolgt eine kurze Einführung samt Beschreibung der Ziele in Abschnitt 3.1, gefolgt von Randbedingungen und einer Kontextabgrenzung in den Abschnitten 3.2 und 3.3. Die Präsentation der Lösungsstrategie erfolgt in Abschnitt 3.4, wohingegen die Zerteilung des Systems samt Beschreibungen der Module in der Bausteinsicht in Abschnitt 3.5 thematisiert wird. In Abschnitt 3.6 werden Hintergründe für im Verlaufe des Entwurfs getroffene Entscheidungen geliefert und Abschnitt 3.7 schließlich bietet einen Überblick über die aufgestellten Qualitätsszenarien.

3.1 Einführung und Ziele

Die vorgestellte Architektur bildet die Ausgangsbasis für die Entwicklung des Gesamtsystems zum DOING eBus-Projekt. Das arc42-Template dient dabei als Leitfaden und Orientierungshilfe für die strukturelle Dokumentation der architekturelevanten Aspekte. Dabei ist der Prozess der Architekturentwicklung nicht als abgeschlossen zu betrachten, sondern vielmehr ein dauerhafter Bestandteil des Entwicklungsprozesses. Entsprechend ist auch die Architekturdokumentation laufend zu aktualisieren, um diesbezüglich alle Beteiligten auf dem gleichen Kenntnisstand zu halten. Zu diesem Zwecke sind auch die zur Erzeugung des Dokuments geschriebenen .tex-Dateien sowie anpassbare Versionen der Grafiken dem Anhang beigefügt. Die folgenden Abschnitte geben dabei zunächst Aufschluss über die der Architektur zugrundeliegende Aufgabenstellung, die dabei zentralen Qualitätsziele sowie relevante Stakeholder.

⁴<https://arc42.de/template>

Tabelle 3.1: Qualitätsziele

Qualitätsmerkmal	Motivation und Erklärung
Flexible Plattform (Änderbarkeit)	Austauschbare Optimierungsverfahren, Änderungen oder Erweiterungen an Subsystemen entkoppelt möglich.
Eignung für Big-Data-Kontext (Effizienz)	Effiziente Speicherung und Verarbeitung der Daten unterschiedlichster Art aus einer Vielzahl an Datenquellen.
Hochverfügbarkeit (Zuverlässigkeit)	Ermöglicht auch den Einsatz in für den Busbetrieb kritischen Kontexten.
Kompatibel zu bestehenden Systemen (Interoperabilität)	Nutzung der Vielzahl an bestehenden Schnittstellen im Kontext der ÖPNV-IT.

3.1.1 Aufgabenstellung

Gemäß der Vorhabenbeschreibung des DOING eBus-Projektes lautet die Aufgabenstellung wie folgt: «Entwicklung des Konzeptes für eine Softwarelösung, mit der Busbetreiber angebots- und bedarfsorientierte Ladestrategien für ihre Elektrobusflotte erstellen können» (Forschungs- und Entwicklungszentrum der Fachhochschule Kiel, 2018). Dies umfasst die Modellierung einer grundlegenden Softwarearchitektur, die ein entsprechendes Entscheidungsunterstützungssystem integriert. Die zwei zentralen Optimierungsprobleme sind dabei einerseits die ressourceneffektive Zuweisung von Elektrobussen zu betrieblichen Fahrzeugumläufen und andererseits die Ermittlung der günstigsten Ladestrategien zur Versorgung der Fahrzeuge mit der für die Umläufe benötigten Energie. Ziel dessen ist die Kostenminimierung über verschiedene Ressourcen hinweg und eine Unterstützung der Busunternehmen sowie entsprechender Dienstleister bei Planung und Disposition des Betriebs.

3.1.2 Qualitätsziele

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die maßgeblichen Qualitätsziele, deren Erfüllung den Stakeholdern besonders wichtig ist. Diese ergeben sich zum Großteil auch aus den in Kapitel 2 ermittelten nötigen Features, die vor allem die Einbindung vieler verschiedener Datenquellen mit unterschiedlichen Arten und Aktualisierungsraten von

Tabelle 3.2: Stakeholder

Rolle	Ziel	Erwartungshaltung und Erklärung
Busunternehmen	Kostenoptimierung beim Einsatz von Elektrobussen	Ergebnisse der Optimierung, Unterstützung des Betriebsalltags.
Netzbetreiber	Gewährleistung eines stabilen Netzes, Lastverteilung	Ergebnisse der Optimierung samt Strombedarfe.
Dienstleister	Generierung von Erlösen aus dem Angebot softwaregestützter Lösungen	Software, die zusammen mit dem eigenen Domänenwissen für eine große Zahl an Kunden gute Lösungen bietet.
Softwareentwickler	Effiziente Modifizierung und Erweiterung der Software	System mit leicht änderbarer und erweiterbarer Architektur.

Daten betreffen. Die Qualitätsmerkmale können, zusammen mit einer Erklärung und der dahinterliegenden Motivation, Tabelle 3.1 entnommen werden. In Klammern steht dabei jeweils das übergeordnete Qualitätsmerkmal nach DIN/ISO 9126. Eine Konkretisierung und Ergänzung dieser Qualitätsziele erfolgt durch die Beschreibung der Qualitätsszenarien in Abschnitt 3.7.

3.1.3 Stakeholder

Die Stakeholder des Systems sind alle Personen und Organisationen, die am Projekt beteiligt oder von ihm betroffen sind und daher die Architektur kennen sollten, um mit ihr arbeiten und fundierte Entscheidungen treffen zu können. Für DOING eBus sind dies vor allem die Busunternehmen, Netzbetreiber und die Dienstleistungsunternehmen, die ihren Kunden gestützt durch die Software und ihr eigenes Domänenwissen geeignete Lösungen anbieten wollen. Aber auch die einzelnen Softwareentwickler, die das Projekt fortführen und mit der Architektur arbeiten werden, zählen zur Gruppe der Stakeholder. Eine Übersicht dieser mitsamt ihrer Ziele und Erwartungshaltungen bietet Tabelle 3.2.

3.2 Randbedingungen

Jedes Projekt unterliegt bestimmten Randbedingungen, die sich auf den Entwicklungsprozess auswirken und entsprechend berücksichtigt werden müssen. Die bereits ermittelten organisatorischen Randbedingungen können Tabelle 3.3 entnommen werden. Daneben gibt es üblicherweise auch eine Reihe technischer Randbedingungen, etwa Vorgaben zu Programmiersprachen und Frameworks, Analyse und Entwurfsmethoden oder durch die Software- und Hardwareinfrastruktur. Da das System von Grund auf entwickelt wird, entfallen viele dieser Randbedingungen bzw. sie stellen im Laufe des Entwicklungsprozesses zu fällende Entscheidungen dar. Andere Randbedingungen sind nicht allgemein für das Gesamtsystem formulierbar, da beispielsweise das Betriebssystem je nach angegliederter Clientsoftware variieren kann. Diese sind dann als Randbedingungen bei der Entwicklung der in Abschnitt 3.5.3 beschriebenen Subsysteme zu identifizieren. Allgemein ist festzuhalten, dass über die Schnittstellen zur Ein- und Ausgabe eine sehr heterogene Systemlandschaft zu verknüpfen ist und das System potentiell im 24/7-Betrieb lauffähig sein muss. Von der Verfügbarkeit großer Rechenzentren auf Seiten der Kunden kann zudem nicht allgemein ausgegangen werden, ebenso verhält es sich mit dedizierten IT-Abteilungen.

3.3 Kontextabgrenzung

Mittels der Kontextabgrenzung werden die externen Schnittstellen und damit die Kommunikationsbeziehungen zwischen dem System und Nachbarsystemen definiert. Auf fachlicher Seite besteht diese bei DOING eBus aus den Beziehungen zwischen den Datenquellen und -senken der Busunternehmen, Netzbetreiber und Optimierungsdienstleister mit dem System und der zusätzlichen Einbindung öffentlich verfügbarer Daten, wie Abbildung 3.1 zu entnehmen ist. Die technische Kontextabgrenzung beschreibt die Kanäle und Übertragungsmedien der Kommunikationsbeziehungen samt einer Abbildung der fachlichen Schnittstellen auf diese. Teil der Lösungsstrategie der DOING eBus-Architektur in Abschnitt 3.4 ist es, die Realisierung der Schnittstellen in einzelne Subsysteme auszulagern. Da nach dem Prinzip des *Last Responsible Moment* Entscheidungen in der Softwa-

Tabelle 3.3: Organisatorische Randbedingungen

Randbedingung	Erläuterung
Team	Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erfolgt die Arbeit am Projekt ausschließlich im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit. Vorgesehen ist jedoch mindestens eine feste Stelle sowie gegebenenfalls weitere Abschlussarbeiten. Die Kontinuität der beteiligten Personen ist somit aktuell noch nicht gegeben und muss jetzt, wie auch zukünftig, im Kontext weiterer Abschlussarbeiten anderweitig sichergestellt werden.
Zeitplan	Der Projektzeitraum ist auf insgesamt zwei Jahre angelegt.
Vorgehensmodell	Iterativ mit dem Ziel, dass bis zum Auslaufen der Fördermittel bereits fertig realisierte Bestandteile weiterverwendet werden können. Die Architekturdokumentation erfolgt nach dem arc42-Template.
Budget	Im Rahmen eines Forschungsprojekts, folglich fixes Budget.
Bestehende Kooperation	Der Projektpartner Stadtverkehr Lübeck kooperiert bereits im Rahmen des Projektes NuR.E mit dem Institut für Multimediale und Interaktive Systeme der Universität zu Lübeck, Synergieeffekte daraus sind denkbar und erwünscht.
Datenschutz	Die Erhebung personenbezogener Daten ist denkbar, dies betrifft insbesondere das Fahrverhalten des Fahrpersonals. Gegebenenfalls ist eine Abstimmung mit dem Betriebsrat nötig. Daneben besteht ein Interesse, die in der Region erhobenen Daten auch vor Ort zu speichern und zu verarbeiten.
Haftungsfragen	Das System hat potentiell große Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der dieses nutzenden Unternehmen, sodass für den Falle gravierender Fehler oder eines Ausfalls Haftungsfragen zu klären sind.

3 Architekturdokumentation

reentwicklung erst getroffen werden sollen, wenn dies tatsächlich notwendig ist, werden an dieser Stelle folglich noch keine Festlegungen für die technische Ausgestaltung der Schnittstellen vorgenommen. Einige naheliegende Kandidaten für eine spätere Entscheidung sollen im Folgenden dennoch kurz vorgestellt werden. So bietet sich für den Import und Export der Daten zum Busunternehmen die mit der VDV-Schnittstelle 452 kompatible, europäisch genormte NeTEx-Schnittstelle⁵ an, da der Großteil der bestehenden IT-Systeme bereits mit dem ÖPNV-Datenmodell des VDV arbeitet. Die direkt in den Bussen erhobenen Minimaldatensets werden über GSM-Module versandt und ließen sich auf diesem Wege auch direkt einbinden. Öffentlich verfügbare Daten werden dagegen in aller Regel über Web-Schnittstellen angeboten, die entsprechend seitens des importierenden Subsystems implementiert werden müssen. Die Netzinformationen einschließlich Lastkurven der Verteilnetzbetreiber müssen nach §17 StromNZV veröffentlicht werden und stehen auf den Webauftritten in maschinenlesbaren Formaten zur Verfügung⁶, können aber nur eine Ergänzung zu detaillierten Netzdaten der Betreiber bilden.

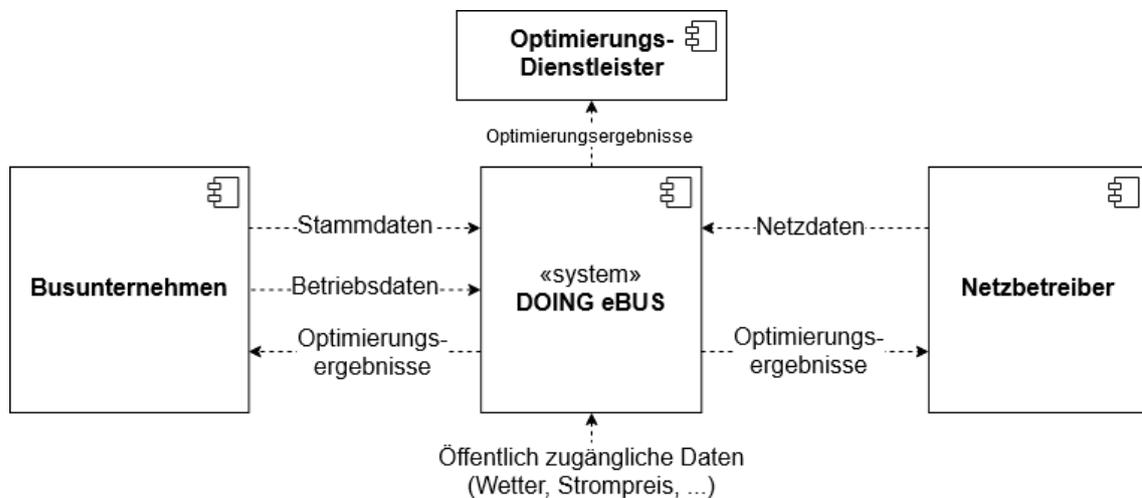


Abbildung 3.1: Fachlicher Kontext

⁵<https://www.vdv.de/netex.aspx>

⁶<https://www.netz-luebeck.de/nutzen/netzdaten/netzdaten-strom/>

3.4 Lösungsstrategie

Das Ziel, die aus verschiedensten Quellen stammenden Daten als Eingangsparameter von Optimierungsverfahren zu kombinieren, legt einen datenzentrierten Architekturstil nahe. Für die Integration, zeitorientierte und dauerhafte Speicherung sowie Aggregation heterogener Daten zur Durchführung darauf aufbauender Analysen hat sich das Konzept des *Data Warehouse* etabliert, das eine Vielzahl von Unternehmen im Kontext ihrer Business Intelligence Strategien einsetzen. Dieses bildet auch bei dieser Lösungsstrategie den zentralen logischen Dreh- und Angelpunkt des Systems. Die Realisierung der Schnittstellen zu den Datenquellen erfolgt im Sinne einer starken Kohäsion durch separate, dedizierte Module. Die in Erwartung von Änderungen vorgesehene lose Kopplung dieser Module wird durch die Verwendung eines Message Brokers zur Anbindung an das Data Warehouse erreicht. Die so dort vorgehaltenen und gegebenenfalls durch zusätzliche Module weiter aufbereiteten Daten bilden die Grundlage der wiederum in eigenen Modulen realisierten Optimierungsverfahren, deren Ergebnisse in das Data Warehouse zurückgespeist werden. Auf diese Weise lassen sich die Ergebnisse als Datenbankauszüge oder via Reporting Tools an Busunternehmen, Dienstleister und Netzbetreiber übertragen. Die den in Abschnitt 3.1.2 vorgestellten Qualitätszielen zuträglichen Architekturansätze können Tabelle 3.4 entnommen werden.

3.5 Bausteinsicht

Die Bausteinsicht bietet einen Überblick über das Gesamtsystem mitsamt der Zerteilung in Komponenten und der Datenflüsse zwischen diesen. Dabei wird durch die Architektur nur der grundsätzliche Aufbau sowie Rahmenbedingungen und Empfehlungen für die Subsysteme gegeben. Dies bildet die Grundlage für die schrittweise Implementierung der einzelnen Module hin zu einer Realisierung des Gesamtsystems. In den folgenden Abschnitten wird detaillierter auf die einzelnen Module eingegangen. Nicht gesondert vorgestellt werden dabei Module, die auf Basis der im Data Warehouse abgelegten Daten abzuleitende Werte ermitteln und wiederum über das Data Warehouse bereitstellen, darunter beispielsweise Verfahren zur Ermittlung des SoC.

Tabelle 3.4: Lösungsstrategie

Qualitätsziel	Dem zuträgliche Architekturansätze
Flexible Plattform (Änderbarkeit)	Open-Close-Prinzip und Separation of Concerns: Modularisierung von Optimierungsverfahren, externen Schnittstellenbeziehungen und der Berechnung aggregierter Daten.
Eignung für Big-Data-Kontext (Effizienz)	Die Nutzung von RabbitMQ sowie die Integration von relationaler und NoSQL-Datenbank im Data-Warehouse erlauben die effiziente Verarbeitung verschiedener Datenarten.
Hochverfügbarkeit (Zuverlässigkeit)	Struktur ermöglicht auch den Einsatz des Systems in für den Busbetrieb kritischen Kontexten unter Verwendung der entsprechenden Technologien.
Kompatibel zu bestehenden Systemen (Interoperabilität)	Flexibilität in der Schnittstellenrealisierung durch ausgelagerte feingranulare Module.

3.5.1 Data Warehouse

Zentrales Element des logischen Aufbaus ist das Data Warehouse. Ziel dessen ist es, alle relevanten Daten integriert in geeigneter Form dauerhaft bereitzustellen und so die Grundlage für die Optimierungsalgorithmen zu schaffen. Eine zeitorientierte Speicherung erlaubt dabei Analysen über zeitliche Veränderungen und Entwicklungen. Der gesamte Prozess des Data Warehousing umfasst dabei eine Vielzahl von Schritten. Den Anfang bildet der sogenannte Extract-Transform-Load-Prozess (ETL). Die Extraktion und Transformation der Daten erfolgt in den jeweiligen schnittstellennahen Modulen, das Laden in die Zieldatenbank mittels Nachrichten an den Message Broker. Das Data Warehouse selbst ist nur für die Datenhaltung zuständig. Die letzten Schritte stellen die Datenauswertung und -analyse sowie die Bereitstellung der Daten via Data Marts dar. Technisch gesehen handelt es sich beim Data Warehouse um eine Datenbank. Die Art der Umsetzung hängt dabei stark von den zu speichernden Daten und den beabsichtigten Operationen darauf ab. Die Analyse in Kapitel 2 hat ergeben, dass die Daten in diesem Projekt von sehr unterschiedlicher Gestalt sind: Auf der einen Seite vergleichsweise statische Planungsdaten, darunter Linien und Umläufe sowie Daten zu existierender Infrastruktur und Fahrzeugen. Auf der anderen Seite hochdynamische Daten, die als Events aufgefasst werden kön-

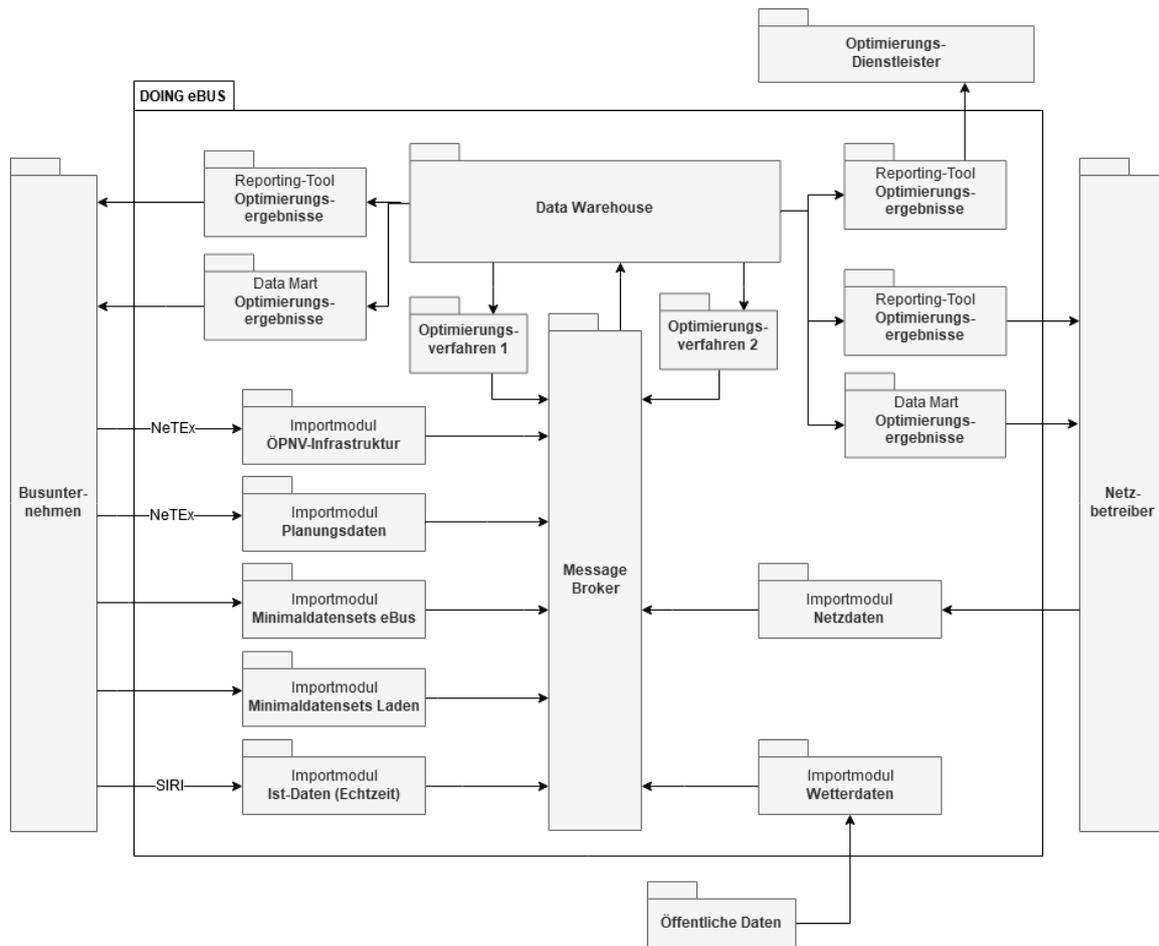


Abbildung 3.2: Whitebox Gesamtsystem

nen. Das sind vor allem die Echtzeitdaten zu den Fahrzeugen, Ladedaten, Wetterinformationen sowie Netzdaten des Verteilnetzbetreibers. Während erstere einen klassischen Anwendungsfall für den Einsatz relationaler Datenbanken darstellen, sind letztere das genaue Gegenteil davon und einer der Gründe für den Trend zu NoSQL-Datenbanken. Zwar lassen sich in diesen auch die erste Sorte Daten speichern, doch müssen dabei im Vergleich Effizienzeinbußen bei der Abfrage hingenommen werden. Das Speichern beider Datenarten in einer gemeinsamen Datenbank stellt daher keine präferierte Option da. Eine verbreitete Möglichkeit ist es, separate Datenbanken für beide Zwecke vorzuhalten, samt jeweiliger Module für die Integration und Speicherung der über den Message Broker entsprechend gerouteten Daten. Als relationale open-source Datenbank für den Unterneh-

3 Architekturdokumentation

menskontext eignet sich dabei besonders PostgreSQL, verbreitete NoSQL-Datenbanken sind MongoDB, Redis, HBase und Apache Cassandra. Für die Arbeit auf den gespeicherten Daten gibt es eine Vielzahl an Frameworks aus dem Hadoop-Kosmos, darunter Hive, Pig, Spark und Flink, wovon insbesondere die beiden letzteren für die gemeinsame Verarbeitung von Batch- und Stromdaten die Einbindung vieler Datenquellen ermöglichen, darunter auch relationale Datenbanken (Armbrust et al., 2015; Sarkar, 2019).

3.5.2 Message Broker

Ein bewährtes Design Pattern zur losen Kopplung verschiedener Teilsysteme ist der sogenannte Message Broker. Dieser fungiert als Middleware zwischen den zu verbindenden Systemen, indem er von diesen versandte Nachrichten an die Zielsysteme transportiert und routet. Eine Funktionsweise folgt dabei dem Publish/Subscribe-Schema, bei dem teilhabende, Nachrichten produzierende Systeme diese üblicherweise einem *Topic* zuweisen. Diese Topics wiederum können von anderen Systemen abonniert werden, um die entsprechenden Nachrichten zu empfangen. Die Vermittlung übernimmt dabei der Message Broker. Auf diese Weise lassen sich die Entitäten voneinander entkoppeln und eine zeitlich unabhängige, asynchrone Kommunikation realisieren. Bei der hier vorgestellten Architektur ist der Message Broker zuständig für die Übermittlung der Daten aus den Importmodulen an das Data Warehouse.

Ein etabliertes, offenes Protokoll für die Kommunikation ist das Advanced Message Queuing Protocol (AMQP), für das *RabbitMQ* als effiziente, skalierbare Implementierung eines Message Broker gilt. Eingehende Nachrichten werden dabei von sogenannten *Exchanges* empfangen und basierend auf Routingkriterien (*Bindings*), an entsprechende *Queues* weitergeleitet und dort gespeichert, bis sie mittels *Push*-Funktionalität an die Empfänger versendet werden können. Entsprechend weiß RabbitMQ, welche Nachrichten ausgeliefert wurden und welche nicht. Der Message Broker eignet sich dabei sowohl für den Umgang mit Stromdaten, als auch für die Verarbeitung von Batch Jobs. Durch den Reihenfolgeerhalt der Nachrichten wird zudem Event Sourcing ermöglicht. Die Wahl der Queues und ihrer Granularität obliegt in erster Linie den Produzern, in diesem Fall also den Modulen, die sich für den Import der Daten aus den verschiedenen Schnitt-

stellen verantwortlich zeichnen. Wichtig ist dabei zunächst nur, dass die verschiedenen Typen von Daten, die entsprechend der Ausführungen in Abschnitt 3.5.1 gegebenenfalls in verschiedenen Datenbanken landen, auch in verschiedenen Queues publiziert werden. Darüber hinaus gilt eine thematische Unterteilung als sinnvoll, besonders wenn später, aufgrund des Bedarfs geringerer Latenzen, die Verarbeitung von Stromdaten unter Umgehung des Warehouses nötig erscheinen sollte. Basierend auf der Wahl der Queues erfolgt das Routing zu den jeweiligen, für die Befüllung der Datenbanken zuständigen Services. Nebenbei unterstützt RabbitMQ bei Bedarf auch eine Mandantenfähigkeit des Systems.

3.5.3 Importmodule

Die Extraktion der Daten aus den diversen Quellen erfolgt durch dedizierte Module. Entsprechend des Prinzips der starken Kohäsion werden dabei je Schnittstelle ein Modul, beziehungsweise bei umfangreichen Schnittstellen auch mehrere Module implementiert. Auf diese Weise müssen bei Änderungen an Schnittstellen nur die entsprechenden Module angepasst werden, während der Rest uneingeschränkt in bisheriger Form weiter verwendet werden kann. Auch wird das System so in nachvollziehbarer Weise in Subsysteme zerlegt und ein großes monolithisches System vermieden. Die durch die einzelnen Module ausgelesenen Daten werden anschließend an RabbitMQ versandt, wobei die Queues in geeigneter Größe und nach thematischem Bezug zu wählen sind. Gegenwärtig wurde der Bedarf für Module zur Erhebung von Daten des Busunternehmens über die NeTEx-Schnittstelle, die SIRI-Schnittstelle sowie anhand der im Auftrag der Bundesregierung definierten Minimaldatensets zur Elektromobilität ermittelt, daneben Module zur Einbeziehung der Strom- und Netzdaten des Verteilnetzbetreibers und von Wettervorhersagen. Der zukünftige Bedarf weiterer Datensätze samt entsprechender Module ist anzunehmen. Dazu zählen Daten zum Fahrverhalten des Personals - in Bezug auf den Stadtverkehr Lübeck ist hier eine Kooperation mit dem Institut für Multimediale und Interaktive Systeme, die über ebendiese bereits verfügen, gewünscht. Gegebenenfalls können neben den Netzdaten des jeweiligen Verteilnetzbetreibers auch Daten der Strombörse EEX in Leipzig von Interesse sein, der API-Zugang ist jedoch kostenpflichtig. Schließlich sieht die im Rahmen des Forschungsprojektes bestehende Kooperation mit der Fachhoch-

3 Architekturdokumentation

schule Kiel vor, dass diese Fahrzeuge mit ergänzenden Sensoren ausstattet, deren Daten folglich ebenfalls einzubeziehen sind.

ÖPNV-Infrastruktur

Dieses Modul zeichnet sich für den Import der Daten zur ÖPNV-Infrastruktur gemäß des ersten Teils der NeTEx-Schnittstellenbeschreibung des VDV verantwortlich. Die unter diesem Punkt von Verkehrsunternehmen bereitgestellten Daten umfassen dabei allgemeine Grunddaten zum Verkehrsbetrieb, den Fahrzeugtypen und den Fahrzeugen, Netzpunkten wie Haltestellen, Betriebshöfen und Gebieten, darunter Verkehrs- und Betriebshofzonen, sowie Streckendaten, jedoch ohne Bezug zu konkreten Linien. Für weitere Details, siehe die Schnittstellenbeschreibung des VDV (2017a).

ÖPNV-Planungsdaten

Das zweite Modul zur NeTEx-Schnittstelle bezieht sich auf den zweiten Teil der entsprechenden Beschreibung und damit auf eine Vielzahl von Planungsdaten. Im Einzelnen sind dies Daten zum Liniennetz inklusive Linien, Linienfahrwegen und Leerfahrwegen, Fahrzeiten und Haltezeiten, die Betriebskalender mit Tagesarten und Zuordnungen dieser zu Kalendertagen sowie Fahrten und Umlaufpläne. Für weitere Informationen, siehe auch hier die entsprechende Schnittstellenbeschreibung des VDV (2017a).

Ist-Daten

Die als Ist-Daten bezeichneten Echtzeitinformationen des Busbetriebs werden durch dieses Modul extrahiert. Diese sind in umfangreicher Weise in der SIRI-, bzw. in der für den deutschen Raum etablierten und kompatiblen Schnittstelle nach der VDV-Schrift 461 definiert. Meldungen erfolgen dabei durch An- und Abmeldungen und Mutationen von Fahrzeugen, Fahrenden, Kursnummern, Umläufen samt Nummer, Start- und Endort, Sollstartzeit, Sollendzeit und den Fahrplanversatz, sowie Fahrzeugstandorte, Fahrzeugzustände und Kilometerstände. Details dazu können den Ausführungen des VDV (2009) entnommen werden.

Minimaldatensets Ebusse

Die zu Forschungszwecken erhobenen Daten entsprechend der definierten Minimaldatensets werden durch mindestens zwei Module gesammelt. Dieses betrifft die Fahrzeugdaten, wobei gegebenenfalls eine weitere Unterteilung in separate Module jeweils für Fahrzeugstamm- und Fahrzeugbetriebsdaten zu erwägen ist. Unter die Stammdaten fallen Daten zur Identifikation und Inbetriebnahme, zur Fahrzeugausstattung inklusive Modell, Gefäßgröße, Antrieb, Speicher, Ladetechnik und Datenlogging sowie Einzelheiten zu jeweiligen Messstellen. Als Betriebsdaten werden eine Vielzahl verschiedener Daten gelistet. Darunter solche zur Identifikation, zu Kilometerständen, Einsatzprofilen inklusive Fahrzeiten, Streckenmerkmalen und Geschwindigkeiten, und zu Temperaturen. Weiterhin werden umfangreiche Informationen zur Energiebilanz von HV-Generatoren, Energiespeichern, Elektromotoren, Bordnetzen, Nebenverbrauchern und Ladegeräten erhoben, sowie Daten zur Fahrzeugdisposition einschließlich Linien und Kursnummern, Werkstattaufenthalten und Betriebs- und Ausfallstunden. Weitere Einzelheiten sowie jeweilige Einheiten finden sich in der Definition durch Harendt et al. (2017).

Minimaldatensets Ladestationen

Das zweite Modul zu den Minimaldatensets widmet sich den Daten der Ladestationen. Erneut ist eine weitere Unterteilung in separate Module für Stamm- und Betriebsdaten zu erwägen. Stammdaten sind in diesem Fall wieder Daten zur Identifikation und Inbetriebnahme, zu dem Modell samt der Anzahl an Ladepunkten und der Ladetechnik, sowie für die einzelnen Ladepunkttechniken die Zahl der Steckvorrichtungen und technische Kenndaten zu Spannung, Strom und Leistung, außerdem erneut Einzelheiten zu Messstellen und -prinzipien. Ebenfalls als Stammdaten gelten Informationen zum Ort, in Form von Adressen und GPS-Koordinaten. Betriebsdaten betreffen die Identifikation, den Energiebezug, die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Ladestationen. Auch hier sei der Verweis auf weitere Einzelheiten in der Definition von Harendt et al. (2017) gegeben.

Wetterdaten

Das Modul für Wetterdaten kann sich die OpenData-Plattform des Deutschen Wetterdienstes DWD zunutze machen.⁷ Dort werden umfangreiche Wetterdaten entgeltfrei zur Verfügung gestellt. Die Daten des aktuellen Bodenwetters befinden sich dabei im Verzeichnis `/weather/weather_reports/synoptic/germany/` im BUFR-Format. Wettervorhersagen sind unter dem Verzeichnis `weather/local_forecasts/` im KML-Format abrufbar. Alle weiteren relevanten Informationen können der Übersichtsseite des DWD entnommen werden.⁸

Netzdaten

Im Kontext des Verteilnetzbetreibers gibt es eine Reihe standardisierter Schnittstellen der genutzten IT-Systeme. Daneben werden im Rahmen des Smart Grids bzw. Smart Markets dedizierte Schnittstellen für die Kommunikation zwischen Netzbetreibern und Verbrauchern entwickelt, die für die Einbeziehung in dieses Projekt sinnvoll erscheinen. Welche Schnittstelle geeignet ist, die relevanten Daten des Verteilnetzbetreibers zu erhalten, ist noch zu klären.

3.5.4 Optimierungsverfahren

Für die dem Gesamtprojekt zugrundeliegende Aufgabenstellung ist der Einsatz verschiedener Optimierungsverfahren vorgesehen. In der hier vorgestellten Architektur ist vorgesehen, dass diese über vom Data Warehouse bereitgestellte Anfragetools auf die dort hinterlegten Daten entsprechend der Erfordernisse der Algorithmen zugreifen können und die Ergebnisse über den Message Broker wieder dorthin zurückspeisen. Auf diese Weise können verschiedene Ansätze zur Lösung der Optimierungsprobleme unabhängig voneinander implementiert und gegeneinander substituiert, oder auch parallel verfolgt werden, seien sie klassisch modellgetrieben, datengetrieben oder Mischformen daraus. Die exakte Ausgestaltung der Algorithmen ist dabei Gegenstand einer separaten Arbeit, ein iteratives Vorgehen ausgehend von einer vereinfachten Aufgabenstellung mit einer

⁷<http://opendata.dwd.de/>

⁸<https://www.dwd.de/DE/leistungen/opendata/opendata.html>

schrittweisen Vergrößerung der Komplexität entspricht jedoch dem Ziel, möglichst frühzeitig eine lauffähige Gesamtsoftware zu erhalten.

3.5.5 Reporting-Tools und Data Marts

Der Rückkanal der durch die Optimierungsverfahren erzielten Ergebnisse zu Busunternehmen und Netzbetreiber sowie dem Optimierungsdienstleister erfolgt über Data Marts und Reporting-Tools. Data Marts sind auf den Verwendungszweck zugeschnittene Datenbankauszüge aus dem Data Warehouse. Für die Busunternehmen sind dies die Optimierungsergebnisse, also ein Mapping von Fahrzeugen auf Umläufe und Ladekapazitäten, die in zu den entsprechenden Schnittstellen kompatibler Form zu übermitteln sind. Naheliegender ist auch hier wieder die NeTeX-Schnittstelle. Für den Netzbetreiber ist die geeignete Form analog zum Datenimport noch zu ermitteln. Die menschenlesbare Präsentation der Optimierungsergebnisse kann via Reporting-Tools realisiert werden. Dabei sind die Eigenschaften der jeweiligen Nutzergruppen zu berücksichtigen, sodass je Unternehmen auch Bedarf für mehrere unterschiedliche Varianten existieren kann. Die durch die Werkzeuge bereitgestellten Daten werden wiederum dem Data Warehouse mittels der entsprechend angebotenen Abfragemöglichkeiten entnommen.

3.6 Entwurfsentscheidungen

Im Rahmen des Architekturentwurfs sind verschiedene Ansätze, Konzepte und Technologien gegeneinander abzuwägen, um fundierte Entscheidungen treffen zu können. Dieser Abschnitt der Architekturdokumentation dient dazu, getroffene relevante Entscheidungen und die Beweggründe dafür transparent und so für alle Beteiligten möglichst nachvollziehbar zu machen. Im Folgenden sind die Abwägung der Nutzung eines Data Lake ergänzend zum Data Warehouse sowie eine Gegenüberstellung von Kafka und RabbitMQ als Messaging-Plattformen.

3.6.1 Data Lake und Data Warehouse

Neben dem für diese Architektur ausgewählten Konzept des Data Warehouse gibt es einen wachsenden Trend zum Einsatz sogenannter Data Lakes. Der wesentliche Unterschied besteht hierbei in der Beschaffenheit der gespeicherten Daten. Während im Data Warehouse strukturierte Daten in vorher aufbereiteter Form zur Beantwortung spezifischer Fragen abgelegt werden, dient der Data Lake als Sammelort auch semistrukturierter und unstrukturierter Daten in Rohform, deren Nutzung noch nicht festgelegt ist. Damit haben Data-Analysts einen umfassenderen Zugriff auf Ressourcen abseits des ursprünglichen Verwendungszwecks, die sie zudem erst bei Abruf in ein geeignetes Schema bringen. Damit dienen beide Konzepte unterschiedlichen Einsatzzwecken und werden entsprechend in vielen Architekturen komplementär eingesetzt, indem Daten aus dem Data Lake für die Bereitstellung im Data Warehouse ausgewählt und aufbereitet werden. Die Notwendigkeit von Data Lakes wird neben den genannten Unterschieden vor allem daraus begründet, dass klassische Data Warehouses als vergleichsweise starr und behäbig gelten. Dem gegenüber verlangt ein Data Lake nach umfassender Data Governance, um die Menge an Daten auch tatsächlich nutzen zu können und nicht durch sie erdrückt zu werden. Darüber hinaus gilt der Begriff Data Lake als schwammig und viele angeschlossene Konzepte sind noch Gegenstand von Diskussionen. Data Warehouses befinden sich teilweise seit Jahrzehnten im Einsatz und die entsprechenden Konzepte sind ausgereifter. Die Entscheidung für ein Data Warehouse begründet sich im Wesentlichen aus zwei Punkten. Der erste betrifft die Einfachheit. Auch wenn ein Data Warehouse aufgrund der nötigen Strukturierung der Daten selbst komplexer einzurichten ist, als ein Data Lake, kommt die Architektur auf diese Weise dennoch mit einer geringeren Zahl an Modulen aus. Auch wäre ein Data Lake nicht alternativ, sondern ergänzend zu einem Data Warehouse einzuführen. Der zweite Punkt ist die Frage der Notwendigkeit. Zum gegenwärtigen Stand fließen in erster Linie strukturierte Daten in die Architekturbetrachtungen ein und auch die Datenmengen sind zwar potentiell groß, jedoch nicht vergleichbar mit den riesigen Mengen an Log- und Aktivitätsdaten, die etwa durch tausende Nutzer einer Website generiert werden und einen typischen Anwendungsfall für den Einsatz von Data Lakes darstellen.

Ein Data Warehouse weist eingeschränktere Möglichkeiten auf, erscheint für die zu bewältigende Problemstellung dennoch als geeignet. Mit dem Ziel einer schnellen Realisierung, insbesondere angesichts des sehr begrenzten Zeithorizontes des Forschungsprojektes, fällt die Wahl daher auf dieses Konzept. Sollte zu einem späteren Zeitpunkt die Notwendigkeit eines Data Lakes festgestellt werden, lässt sich dieser zudem nachträglich als Vorstufe des Data Warehouse in die Architektur integrieren.

3.6.2 Kafka und klassische Message Broker

Neben klassischen Message Brokern wie dem gewählten RabbitMQ hat sich in den vergangenen Jahren Apache Kafka als Middleware etabliert. Der Fokus liegt dabei auf der effizienten und ausfallsicheren Speicherung und Verarbeitung von Datenströmen in großem Umfang und wird daher durch eine Vielzahl von Unternehmen im Big-Data-Kontext eingesetzt. Besonderheiten von Kafka sind dabei der immense Durchsatz, die Möglichkeit der persistierten Speicherung und erneuten Empfangens aller Nachrichten ab einem gewählten Index und das Halten des zuletzt gesetzten Wertes zu einem Nachrichtenschlüssel. Es werden jedoch keine Transaktionen und nur eine sehr einfache Routing-Logik unterstützt, außerdem obliegt es den Consumern zu verwalten, welche Nachrichten bereits gelesen wurden. RabbitMQ auf der anderen Seite ist in diesen Punkten besser aufgestellt, erlaubt außerdem, zusätzlich zu AMQP, die Nutzung einer Reihe weiterer Protokolle, bietet verständliche Management- und Monitoring-Tools und gilt insgesamt als einfacher zu handhaben (Dobbelaere & Esmaili, 2017).

In der vorgestellten Architektur ist es nicht vorgesehen, dass Nachrichten über einen längeren Zeitraum im Message Broker verweilen oder gar dauerhaft dort gespeichert werden. Auch für die weiteren Vorteile des Topic-Konzeptes von Kafka besteht gegenwärtig kein Bedarf. Da zudem die erwarteten Datenmengen zwar sehr groß werden können, aber absehbar nicht die Leistungsfähigkeit eines RabbitMQ-Brokers übersteigen, erscheint eine Kafka-Implementierung als überdimensioniert. Grundsätzlich ist allerdings nicht auszuschließen, dass sich dies ändert, insbesondere wenn tatsächlich alle potentiell interessanten Daten erhoben und verarbeitet werden sollen. Mit dem Ziel einer schnellen Realisierung fällt die Wahl daher, analog zur Entscheidung gegen einen Data Lake, gegen Kafka

Tabelle 3.5: Qualitätsszenarien

Nr.	Szenario
1	Komponenten zum Import von zusätzlichen Daten können mit vertretbarem Aufwand entwickelt werden.
2	Der Algorithmus für die Optimierung kann gewechselt werden.
3	Neu geforderte Funktionen sind schnell an geeigneter Stelle realisierbar.
4	Erweiterungen oder Änderungen eines Subsystems sollen unabhängig von allen anderen Subsystemen möglich sein.
5	Die Software ist in der Lage, große Datenmengen zu speichern und zu verarbeiten.
6	Wenn der Import von Daten fehlschlägt, gibt das System Auskunft über den Fehler.
7	Das System ist robust gegen die Beschaffenheit der Daten.
8	Das System insgesamt ist auch bei fehlenden oder fehlerhaften Daten ausfallsicher.
9	Das System ist hochverfügbar.
10	Das System lässt sich an verschiedene Umgebungen anpassen.
11	Das System ist in der Lage, mit bestehenden Systemen zusammenzuwirken.
12	Nur autorisierte Benutzer erhalten Zugang zum System und den hinterlegten Daten.
13	Das System erfüllt die Schnittstellenstandards nach den VDV-Schriften.

und für RabbitMQ. Zwar wird die Mächtigkeit RabbitMQs hinsichtlich der gebotenen Features ebenfalls nicht ausgereizt, insbesondere die als einfacher geltende Realisierung, auch begründet durch den ausgereifteren Entwicklungsstand, bildet allerdings den ausschlaggebenden Faktor.

3.7 Qualitätsszenarien

Ergänzend zu den in Abschnitt 3.1.2 vorgestellten Qualitätszielen folgt eine Ergänzung und Konkretisierung dieser anhand von Qualitätsszenarien. Diese geben als Nutzungs- oder Änderungsszenarien vor, wie sich das System in bestimmten Situationen verhalten soll. Nutzungsszenarien betreffen dabei das Verhalten zur Laufzeit, hierunter fallen insbesondere die der Tabelle 3.5 zu entnehmenden Szenarien 5 bis 9, 12 und 13. Die anderen Szenarien lassen sich als Änderungsszenarien klassifizieren, die sich auf die Veränderung

3.7 Qualitätsszenarien

des Systems oder der Umgebung beziehen. Daneben ist auch eine Zuordnung der Szenarien zu den Qualitätsmerkmalen nach DIN/ISO 9126 möglich. Folglich entsprechen die Szenarien 1 bis 4 erneut Merkmalen der Änderbarkeit, Szenario 5 der Effizienz, die Szenarien 6 bis 9 Merkmalen von Zuverlässigkeit, Szenario 10 und 13 Merkmalen für Übertragbarkeit und Szenario 11 und 12 entsprechen Funktionalitätsmerkmalen.

4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird die bisherige Arbeit abschließend nochmals zusammengefasst. Dafür wird im Abschnitt 4.1 zunächst ein rückblickendes Fazit gezogen. In Abschnitt 4.2 werden noch offene Punkte benannt, die gegebenenfalls durch künftige Arbeiten geklärt werden können. Schließlich erfolgt in Abschnitt 4.3 ein Ausblick mit der Skizzierung der nächsten Schritte.

4.1 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Softwarearchitektur zur Optimierung der Ladestrategien elektrisch betriebener Busse entwickelt. Hierfür erfolgte eine umfangreiche Analyse der Problemdomäne mittels derer Anforderungen und Rahmenbedingungen für das zu entwickelnde System ermittelt werden konnten. Insbesondere wurden dabei auch eine Vielzahl an für die Optimierungsverfahren interessanten Parametern identifiziert. Im Verlaufe des Analyseprozesses stellte sich dieser dabei insgesamt als deutlich umfangreicher heraus als zunächst angenommen und bildet damit rückblickend betrachtet den Schwerpunkt der Arbeit. Um dessen Anteil an der Arbeit auf ein angemessenes Maß zu begrenzen, wurde der Fokus auf den ÖPNV gelegt und die Rolle der Verteilnetzbetreiber in Ansätzen beschrieben. Zudem liefert ein Teil der gesammelten Erkenntnisse vor allem für die Entwicklung der Optimierungsalgorithmen relevante Hinweise und floss nur indirekt, als Anforderung an die grundsätzliche Struktur der Architektur, in die Entwicklung selbiger ein. Ausgehend von den ermittelten Anforderungen wurden dabei, aufgrund des hohen Stellenwerts eines effizienten und einfachen Datenzugriffs, verschiedene Ansätze moderner datenzentrierter Systeme erwogen. Mit dem Ziel einer frühzeitigen, iterativen Realisierung fiel die Entscheidung zugunsten einer wenig verschachtelten Architektur nach dem bewährten Prinzip des Data Warehousing. Die gewählte Form der

4 Zusammenfassung

Modularisierung sichert dabei die Erweiterbarkeit an den relevanten Punkten. Dies betrifft die Realisierung von Schnittstellen für die Einbeziehung weiterer Datenquellen, das Offenhalten der Implementierung des Optimierungsverfahren und die Ausgestaltung der Präsentation und Weitergabe von Optimierungsergebnissen. Sollte sich in einem späteren Stadium des Entwicklungsprozesses zudem herausstellen, dass die anfallenden Datenmengen die Kapazitäten des Systems wider Erwarten überschreiten, ist eine Ergänzung der Architektur um entsprechend geeignete Technologien möglich. Insgesamt wurde mit der vorliegenden Arbeit folglich der Grundstein für die Softwarelösung zur Optimierung der Ladestrategien von Busbetreibern gelegt.

4.2 Offene Punkte

Bei der Erschließung des Themenkomplexes und der Architekturentwicklung blieben einige Aspekte ausgeklammert, die im Folgenden kurz zusammengefasst werden. So wurde, nach einführender Vorstellung der verschiedenen Ladestrategien beim Betrieb von Elektrobussen, der Fokus aufgrund der gegenwärtigen Verbreitung und Marktsituation auf die als Voll-lader konzipierten Fahrzeuge gelegt. Im Falle einer Marktveränderung zugunsten anderer Ladestrategien und der Erweiterung der Optimierungsverfahren zur Berücksichtigung dieser sollte entsprechend noch eine detailliertere Betrachtung erfolgen. Ebenso resultiert aus der im Fazit beschriebenen oberflächlichen Thematisierung der Verteilnetzbetreiber, dass eine eingehendere Analyse der interessanten Daten sowie möglicher Schnittstellen noch aussteht. Zudem wurde die detaillierte Ausgestaltung der einzelnen Subsysteme beim Architekturentwurf bewusst offen gehalten und nur die grundlegende Funktionsweise festgelegt, sodass entsprechende Technologieentscheidungen auch unter Berücksichtigung der Fähigkeiten beteiligter Personen getroffen werden können.

4.3 Ausblick

Die vorgestellte Architektur bildet den Grundstein für weitere Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojektes, sodass sich eine Vielzahl von künftigen Tätigkeitsfeldern eröffnet. Im Wesentlichen ist dies die schrittweise prototypische Realisierung der einzelnen Mo-

dule. Einen möglichen Ausgangspunkt bildet dabei die Implementierung des Data Warehouse als logisch zentrales Element. Unter Verwendung von Dummydaten ermöglicht dies bereits die Entwicklung und erste Evaluierung von Optimierungsverfahren. Bei einer weiteren Ergänzung um den Message Broker sowie die Module für den Import von Planungsdaten, Infrastrukturdaten sowie der Daten entsprechend der Minimaldatensets, sind mit den statischen betrieblichen Umläufen, den Fahrzeugen sowie den verfügbaren Ladekapazitäten bereits die elementaren Parameter für erste Optimierungen auf den Realdaten vorhanden. Je nach Priorisierung können anschließend der Grad an Komplexität durch die Einbindung zusätzlicher Datenquellen insbesondere hinsichtlich der Ist-Daten oder der Netzdaten des Verteilnetzbetreibers erhöht oder die entsprechenden Schnittstellen zur Ausgabe der Optimierungsergebnisse realisiert werden. Die Modularisierung der Architektur erlaubt dabei die Parallelisierung der einzelnen Schritte

A Anhang

A.1 Beiliegende DVD-ROM

Glossar

Aufgabenträger Eine zur Gewährleistung eines ÖPNV-Angebotes rechtlich verpflichtete Behörde. 18

Energiedichte Ein Maß für das Verhältnis von Energie zu Gewicht bei Batterien. 7, 9

Entladekurve Eine für Batterien charakteristische Funktion von Batterieklemmenspannung zu Ladestand, mittels derer sich der Ladezustand ermitteln lässt. 10, 12

Leistungsdichte Auch *spezifische Leistung*, ein Maß für das Verhältnis von abgegebener Leistung zu Gewicht bei Batterien. 10

Minimaldatenset Im Auftrag der Bundesregierung definierte Aufstellung der für die Begleitforschung zu geförderten Emobilitätsprojekten zu erhebenden Daten (Harendt et al., 2017). 12, 13, 18, 44, 51

Peak Shaving Der Prozess des Abdämpfens von Lastspitzen bei der Stromregulierung. 29

Personenkilometer Ein Maß für die erbrachte Verkehrsleistung, ermittelt aus der Anzahl der Fahrgäste multipliziert mit ihrer Reiseweite. 5

Umlaufplan Die Fahraufgaben eines Busses zwischen den Aufenthalten auf dem Betriebshof, einschließlich Aus- und Einrückefahrten, Linienfahrten, Leer- und Umsetzfahrten und Wende- und Standzeiten (Knote et al., 2017, S. 25). 7, 14, 50

Verteilnetzbetreiber Stromnetzbetreiber, die Strom in Hoch-, Mittel und Niederspannungsnetzen regional verteilen. 27, 29, 44, 47, 52, 59, 61

Wendezeit Zeit, die an den Endstationen zwischen verschiedenen Fahrten verbucht wird. 8, 20

Glossar

Zyklenfestigkeit Die Anzahl an Ladezyklen einer Batterie, ab der ihre Kapazität einen bestimmten Wert unterschreitet, also ein Maß für die Alterung. 10, 12

Übertragungsnetzbetreiber Stromnetzbetreiber, die Strom in Höchstspannungsnetzen über große Distanzen transportieren. 27

Akronyme

ÖPNV Öffentlicher Personennahverkehr. 1, 2, 7, 17, 27, 33, 36, 40, 44, 50, 59

AMQP Advanced Message Queuing Protocol. 48, 55

B2B Business-to-Business. 37

BMS Betriebshofmanagementsystem. 17

BUFR Binary Universal Form for the Representation of meteorological data. 52

DOING eBus Datenbasierte Optimierungsnetzwerke für die intelligente Nutzung elektrisch betriebener Busse. 28, 39–42

DWD Deutscher Wetterdienst. 52

EEG Erneuerbare-Energien-Gesetz. 1, 26, 27

EEX European Energy Exchange. 49

ETL Extract-Transform-Load. 46

FMS Flotten-Management-Schnittstelle. 15

GSM Global System for Mobile Communications. 13, 44

ITCS Intermodal Transport Control System. 16, 18

KML Keyhole Markup Language. 52

KWK Kraft-Wärme-Kopplung. 26

LFP Lithium-Eisenphosphat. 9

Li-Ion Lithium-Ionen-Akkumulator. 9, 10

Akronyme

LMO Lithium-Mangan-Oxid-Spinell. 9

MENDEL Minimale Belastung elektrischer Netze durch Ladevorgänge von Elektrobus-
sen. 3

MIP Mixed-Integer Program. 26

NeTEX Network Timetable Exchange. 17, 44, 49, 50, 53

NMC Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt. 9, 10

NoSQL Not only SQL. 46–48

NuR.E Nutzerzentriertes Reichweitenmanagement Elektrobusse. 15, 43

OCPP Open Charge Point Protocol. 16

RBL Rechnergestütztes Betriebsleitsystem. 16

SaaS Software-as-a-Service. 33, 37

SIRI Service Interface for Real Time Information. 17, 49, 50

SL Stadtverkehr Lübeck. 1, 15, 17, 33, 43, 49

SoC State of Charge. 10, 12, 45

SoH State of Health. 12

VDV Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V.. 6, 17, 44, 50, 56

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zeitanteile im Fahrplan	21
3.1	Fachlicher Kontext	44
3.2	Whitebox Gesamtsystem	47

Tabellenverzeichnis

2.1	Features Fuhrpark	12
2.2	Features Personal und Infrastruktur	18
2.3	Features Betriebsplanung	23
2.4	Features Energiebeschaffung	25
2.5	Features Netzbetreiber	29
2.6	Features Umwelt	31
3.1	Qualitätsziele	40
3.2	Stakeholder	41
3.3	Organisatorische Randbedingungen	43
3.4	Lösungsstrategie	46
3.5	Qualitätsszenarien	56

Literaturverzeichnis

- Armbrust, M., Xin, R. S., Lian, C., Huai, Y., Liu, D., Bradley, J. K., ... Zaharia, M. (2015). Spark SQL: Relational Data Processing in Spark. In *Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data* (S. 1383–1394). New York, NY, USA: ACM. Zugriff auf <http://doi.acm.org/10.1145/2723372.2742797>
- Atak, A. & Grande, L. (2018). *Li-ion Batteries for Electric Buses 2018-2028*. IDTechEx Ltd. Zugriff auf <https://www.idtechex.com/research/reports/li-ion-batteries-for-electric-buses-2018-2028-000595.asp> (Online, Abgerufen am 02.04.2019)
- Deutscher Wetterdienst. (2017). *Klimareport Schleswig-Holstein*. Zugriff auf https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimareport_sh/download_report_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (Online, Abgerufen am 26. Mai 2019)
- Dietmannsberger, M., Schumann, M., Meyer, M. & Schulz, D. (2017, 10). Modelling the Electrification of Bus Depots using Real Data: Consequences for the Distribution Grid and Operational Requirements. *1st E-Mobility Power System Integration Symposium*. Zugriff auf http://mobilityintegrationsymposium.org/wp-content/uploads/sites/7/2017/11/3B_1_EMob17_024_paper_Dietmannsberger_Markus.pdf
- Ding, Y., Cano, Z. P., Yu, A., Lu, J. & Chen, Z. (2019). Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. *Electrochemical Energy Reviews*, 2 (1), 1–28. Zugriff auf <https://doi.org/10.1007/s41918-018-0022-z>
- DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik. (2016). *Umweltfreundlicher ÖPNV perfekt optimiert*. Zugriff auf https://www.dlr.de/fs/desktopdefault.aspx/tabid-11264/19778_read-47384/ (Online, Abgerufen am 10.04.2019)

Literaturverzeichnis

- Dobbelaere, P. & Esmaili, K. S. (2017). Kafka Versus RabbitMQ: A Comparative Study of Two Industry Reference Publish/Subscribe Implementations: Industry Paper. In *Proceedings of the 11th ACM International Conference on Distributed and Event-based Systems* (S. 227–238). New York, NY, USA: ACM. Zugriff auf <http://doi.acm.org/10.1145/3093742.3093908>
- Elkin, C. & Witherspoon, S. (2019, 02). *Machine learning can boost the value of wind energy*. Zugriff auf <https://deepmind.com/blog/article/machine-learning-can-boost-value-wind-energy> (Online, Abgerufen am 16. Mai 2019)
- EnergieCluster Digitales Lübeck. (2019). *Vision & Ziele*. Zugriff auf <https://www.energiecluster-luebeck.de/vision-und-ziele> (Online, Abgerufen am 18. Juni 2019)
- Forschungs- und Entwicklungszentrum der Fachhochschule Kiel. (2018). *Vorhabenbeschreibung DOING eBus - Datenbasierte Optimierungsnetzwerke für die intelligente Nutzung elektrisch betriebener Busse*. (Unveröffentlicht)
- Harendt, B., Wolf, C., Braune, O., Wilhelm, S., Krug, S. & Krey, O. (2017, 02). *Minimaldatensets zu Erhebung von Forschungsdaten in der Elektromobilität*. DDI, IVV, NOW. Zugriff auf <https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/2-modellregionen-elektromobilitaet/minimaldatensets-zu-erhebung-von-forschungsdaten-in-der-elektromobilitaet.pdf> (Online; Abgerufen am 25. Juni 2019)
- Herbert, P. (2018). *Future System Services Provided from Electric Vehicles. 2nd E-Mobility Power System Integration Symposium*. Zugriff auf http://mobilityintegrationsymposium.org/wp-content/uploads/sites/10/2018/11/2C_4_Emob18_100_paper_Peter_Herbert.pdf
- Institut für Multimediale und Interaktive Systeme. (2018). *Nutzerzentriertes Reichweitenmanagement Elektrobusse (NuR.E)*. Zugriff auf <http://www.imis.uni-luebeck.de/de/forschung/nutzerzentriertes-reichweitenmanagement-elektrobusse-nure-1> (Online, Abgerufen am 27.06.2019)
- Karle, A. (2015). *Elektromobilität: Grundlagen und Praxis*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG. Zugriff auf <https://books.google.de/books?id=ITn1CAAQBAJ>

- Kivekäs, K., Lajunen, A., Vepsäläinen, J. & Tammi, K. (2018, 07). City Bus Powertrain Comparison: Driving Cycle Variation and Passenger Load Sensitivity Analysis. *Energies*, 11, 1755. Zugriff auf <https://doi.org/10.3390/en11071755>
- Knote, T., Haufe, B. & Saroch, L. (2017). *Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse*. Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI. Zugriff auf https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-04/Abschlussbericht_E-Bus-Standard.pdf (Online, Abgerufen am 21.03.2019)
- Kompetenzzentrum ElektroMobilität NRW. (2017, 07). Zugriff auf https://www.elektromobilitaet.nrw.de/fileadmin/Daten/Download_Dokumente/E-Busse_II.pdf (Online, Abgerufen am 10.04.2019)
- Krummheuer, E. (2018, November). *Draht statt Diesel*. Frankfurter Allgemeine. Zugriff auf <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/oberleitungsbusse-als-ersatz-fuer-dieselbus-linien-15872745.html> (Online, Abgerufen am 21.03.2019)
- Krupsky, L. (2018, 08). *How Electric Buses Change Scheduling – and Why Charging Changes the Game*. Zugriff auf <https://www.optibus.com/how-electric-buses-change-scheduling-and-why-charging-changes-the-game/> (Online; Abgerufen am 23. Mai 2019)
- Kudella, C. & Wolf, M. (2017). *Handlungsleitfaden für die wettbewerbliche Vergabe von ÖPNV-Leistungen mit E-Bussen in Schleswig-Holstein*. KCW GmbH. Zugriff auf <https://www.nah.sh/assets/Uploads/Handlungsleitfaden-fuer-die-wettbewerbliche-Vergabe-von-Verkehrsleistung-mit-E-Bussen-in-Schleswig-Holstein.pdf> (Online, Abgerufen am 21.03.2019)
- Kunith, A. (2017). *Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs - Technologiebewertung für den kosteneffizienten Betrieb emissionsfreier Bussysteme*. Zugriff auf <https://doi.org/10.1007/978-3-658-19347-8>
- Lajunen, A. (2014, Oct). Comparison of Different Powertrain Configurations for Electric City Bus. In *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (S. 1-5). Zugriff auf <https://doi.org/10.1109/VPPC.2014.7007032>

Literaturverzeichnis

- Meese, J., Schnittmann, E., Schmidt, R., Zdrallek, M. & Armoneit, T. (2018, 10). Optimized Charging of Electrical Vehicles Based on the Day-Ahead Auction and Continuous Intraday Market. *2nd E-Mobility Power System Integration Symposium*. Zugriff auf http://mobilityintegrationsymposium.org/wp-content/uploads/sites/10/2018/11/2C_3_Emob18_047_paper_Jan_Meese.pdf
- Muttaqi, K., Sarrafan, K., Sutanto, D. & Town, G. (2016, 05). Accurate Range Estimation for an Electric Vehicle Including Changing Environmental Conditions and Traction System Efficiency. *IET Electrical Systems in Transportation*, 7. Zugriff auf <https://doi.org/10.1049/iet-est.2015.0052>
- Optibus Ltd. (2019). *Transportation software for mass-transit planning and scheduling*. Zugriff auf <https://www.optibus.com/de/> (Online, Abgerufen am 28.08.2019)
- Paschotta, R. (2017). *Verteilungsnetzbetreiber - RP-Energie-Lexikon*. Zugriff auf <https://www.energie-lexikon.info/verteilungsnetzbetreiber.html> (Online, Abgerufen am 15. Mai 2019)
- Paul, T. & Yamada, H. (2014, Oct). Operation and charging scheduling of electric buses in a city bus route network. In *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (S. 2780-2786). doi: 10.1109/ITSC.2014.6958135
- Piller, S., Perrin, M. & Jossen, A. (2001). Methods for state-of-charge determination and their applications. *Journal of Power Sources*, 96 (1), 113 - 120. Zugriff auf [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00560-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00560-2) (Proceedings of the 22nd International Power Sources Symposium)
- Pluta, W. (2019, Februar). *Hamburg mustert Brennstoffzellenbusse aus*. golem.de. Zugriff auf <https://www.golem.de/news/elektromobilitaet-hamburg-mustert-brennstoffzellenbusse-aus-1902-139395.html> (Online, Abgerufen am 21.03.2019)
- Prechtel, S., Wittmann, M. & Hartmann, S. (2017). *Handbuch Unternehmensbewertung* (2. Aufl.). Petersen, Karl and Zwirner, Christian. Zugriff auf <https://www.bundesanzeiger-verlag.de/xaver/bilanzplus> (Online; Abgerufen am 11. Juni 2019)
- PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft. (2011). *Von der Forschung zum Erfolg: Die stra-*

- tegische Geschäftsmodellwahl bei Software*. Zugriff auf <https://www.pwc.de/de/offentliche-unternehmen/assets/von-der-forschung-zum-erfolg.pdf> (Online; Abgerufen am 18. Juni 2019)
- Raab, A. F., Lauth, E., Strunz, K. & Göhlich, D. (2019). Implementation Schemes for Electric Bus Fleets at Depots with Optimized Energy Procurements in Virtual Power Plant Operations. *World Electric Vehicle Journal*, 10 (1). Zugriff auf <https://doi.org/10.3390/wevj10010005>
- Reinhardt, W. (2018). *Öffentlicher Personennahverkehr*. Zugriff auf <https://doi.org/10.1007/978-3-658-22059-4>
- Sarkar, D. (2019, 03). *Scaling relational databases with Apache Spark SQL and DataFrames*. OpenSource.com. Zugriff auf <https://opensource.com/article/19/3/sql-scale-apache-spark-sql-and-dataframes> (Online, Abgerufen am 20.08.2019)
- Sarrafan, K., Sutanto, D., Muttaqi, K. M. & Town, G. (2017). Accurate range estimation for an electric vehicle including changing environmental conditions and traction system efficiency. *IET Electrical Systems in Transportation*, 7 (2), 117-124. Zugriff auf <https://doi.org/10.1049/iet-est.2015.0052>
- Schiffer, H.-W. (2019). Preisbildung in der Energiewirtschaft. In *Energiemarkt Deutschland: Daten und Fakten zu konventionellen und erneuerbaren Energien* (S. 327–430). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Zugriff auf https://doi.org/10.1007/978-3-658-23024-1_4
- Schleswig-Holstein. (2019a). *Einspeisemanagement*. Zugriff auf https://www.schleswig-holstein.de/DE/Schwerpunkte/Energiewende/Strom/_documents/einspeisemanagement.html (Online, Abgerufen am 25. August 2019)
- Schleswig-Holstein. (2019b). *Versorgungsbeitrag der Erneuerbaren Energien*. Zugriff auf https://www.schleswig-holstein.de/DE/Schwerpunkte/Energiewende/Daten/_documents/versorgungsbeitrag.html (Online, Abgerufen am 25. August 2019)
- Schmid, A. (2018, 12). *eCitaro: Bus fährt mit Festkörperbatterie*. Zugriff

Literaturverzeichnis

- auf <https://edison.handelsblatt.com/erleben/ecitaro-bus-faehrt-mit-festkoerperbatterie/23729670.html> (Online; Abgerufen am 25. Juni 2019)
- Schnieder, L. (2014). Öffentlicher Personennahverkehr im Jahre 2050 – Was könnte wirklich anders sein? *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis*, 23.
- Schnieder, L. (2015). *Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr - Ziele, Methoden und Konzepte*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schulze, O. (2015). Energiebeschaffung für Unternehmen. In *Energiemanagement: Für Fachkräfte, Beauftragte und Manager* (S. 77–233). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Zugriff auf https://doi.org/10.1007/978-3-658-02834-3_3
- Sileo GmbH. (2017, 09). *Sileo und Aurora stellen energieeffiziente Heizung und Klimatisierung von Elektrobussen vor*. Zugriff auf https://www.sileo-ebus.com/fileadmin/user_upload/service/presse/2017/Sileo_PM_12-10-2017.pdf (Online, Abgerufen am 11.04.2019)
- Stadtverkehr Lübeck. (2017, Juni). *Erstmals reine Elektrofahrzeuge für Stadtverkehr und LVG*. Zugriff auf <https://www.sv-luebeck.de/de/aktuelles/pressemitteilungen/845-erstmal-reine-elektrofahrzeuge-f%C3%BCr-stadtverkehr-und-lvg.html> (Online, Abgerufen am 25.03.2019)
- Starke, G. (2015). *Effektive Software-Architekturen: Ein praktischer Leitfaden* (7. Aufl.). München: Carl Hanser Verlag. doi: 10.3139/9783446444065
- Sustainable Bus. (2019, 4). *The largest order for eCitaro: 56 to be delivered in Wiesbaden. 41 with solid-state batteries*. Zugriff auf <https://www.sustainable-bus.com/news/the-largest-order-for-ecitaro-56-buses-to-be-delivered-in-wiesbaden-41-with-solid-state-batteries/> (Online; Abgerufen am 25. Juni 2019)
- Vepsäläinen, J., Otto, K., Lajunen, A. & Tammi, K. (2019). Computationally efficient model for energy demand prediction of electric city bus in varying operating conditions. *Energy*, 169, 433 - 443. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.064>
- Vepsäläinen, J., Ritari, A., Lajunen, A., Kivekäs, K. & Tammi, K. (2018, 11). Energy Uncertainty Analysis of Electric Buses. *Energies*, 11. Zugriff auf <https://doi.org/>

10.3390/en11123267

- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (2009). *Ist-Daten-Schnittstelle Leitsystem (ITCS) – Betriebshofmanagementsystem (BMS)*. Zugriff auf <https://www.vdv.de/vdv-schrift-461.pdf> (Online, Abgerufen am 20.08.2019)
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (2013). *Personalbedarf und Arbeitsmärkte der Verkehrsunternehmen 2014 bis 2020*. Zugriff auf <https://www.vdv.de/vdv-statistik-2017.pdf> (Online, Abgerufen am 14.03.2019)
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (2017a). *Standardisierter Austausch von Liniennetz- und Fahrplandaten mit der europäischen Norm CEN-TS 16441 'NeTeX' (Bd. 462)*. Zugriff auf <https://www.vdv.de/vdv-462-netex-schrift-v1.0.pdf?forced=true> (Online, Abgerufen am 12.08.2019)
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (2017b). *VDV-Statistik 2017*. Zugriff auf https://www.vdv-akademie.de/fileadmin/PDF/Publikationen/VDV-Akademie_Gutachten_Personalbedarf2014.pdf (Online, Abgerufen am 25.04.2019)
- Wikipedia. (2019). *Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. Zugriff auf <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator&oldid=183641613> (Online; Abgerufen am 4. April 2019)
- Zhou, B., Wu, Y., Zhou, B., Wang, R., Ke, W., Zhang, S. & Hao, J. (2016). Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. *Energy*, 96, 603 - 613. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.041>