

# **Untersuchung zur Auswirkung von Energiespeichern im Karlsruher Nahverkehrsnetz**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN**  
**(Dr.-Ing.)**

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Philip Otto

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Juni 2022

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung -  
Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz  
(CC BY-NC-ND 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

## Kurzfassung

In Nahverkehrsnetzen erfolgt die Energieversorgung mit Gleichspannung. Durch die Verwendung der Traktionsmaschinen als Generatoren können Straßenbahnen energieeffizient und verschleißarm bremsen. Dabei wird die kinetische Energie in elektrische Energie umgewandelt und, wenn möglich, vom Fahrzeug in das Oberleitungsnetz eingespeist. Das Rückspeisen ist nur möglich, wenn zeitgleich im Bereich des bremsenden Fahrzeugs Bedarf an elektrischer Energie besteht. Kann die Energie nicht eingespeist werden, so wird sie von den Bremswiderständen auf den bremsenden Fahrzeugen in Wärme umgewandelt. Sie steht dann dem Straßenbahnsystem nicht mehr zur Verfügung und bleibt ungenutzt. Für eine hohe Energieeffizienz ist es für die Betreiber daher wichtig, den Anteil an ungenutzter Bremsenergie möglichst gering zu halten. Viele Untersuchungen zeigen ein großes Einsparpotential durch die Integration von Energiespeichern in die Oberleitung. Die Einflussfaktoren auf den Anteil an ungenutzter Bremsenergie sind vielfältig, weshalb ein direkter Vergleich mit der Literatur und den jeweiligen Situationen vor Ort kaum möglich ist.

In dieser Arbeit wird das Karlsruher Gleichstromnetz auf ungenutzte Bremsenergie untersucht. Dabei wird ein messtechnisch-simulativer Ansatz verwendet. Ein Stadtbahnfahrzeug, das im Fahrgastbetrieb eingesetzt wird, wird mit einem Messsystem ausgestattet, um die Bremsleistung zu erfassen. Die Messdaten werden ausgewertet und eine Karte erstellt, aus der die Bereiche im Streckennetz hervorgehen, an denen viel ungenutzte Bremsenergie auftritt. In der theoretischen Betrachtung werden der Bremsvorgang in Straßenbahnsystemen und die grundlegenden Zusammenhänge bei der Speicherpositionierung erläutert. In der simulativen Untersuchung der ein-

zelenen Streckenabschnitte werden Energiespeicher in das Oberleitungsnetz integriert und deren Auswirkungen analysiert. Für die möglichen Standorte wird die eingesparte Energie ermittelt und es werden Speicherdimensionierungen vorgeschlagen.



## Abstract

In local transport networks, power is supplied with direct voltage. By using the traction machines as generators, trams can brake energy efficiently and with low wear. During this process, the kinetic energy is converted into electrical energy and, if possible, fed back from the vehicle into the overhead line network. Regenerative braking is only possible if there is a simultaneous demand for electrical energy in the area of the braking vehicle. If the energy cannot be fed in, it is converted into heat by the braking resistors on the braking vehicles. It is then no longer available to the tramway system. To achieve high energy efficiency, it is therefore important for operators to keep the proportion of unused braking energy as low as possible. Many studies show a large savings potential by integrating energy storage systems into the overhead contact line. The factors affecting the amount of unused braking energy are versatile, therefore a direct comparison with the literature and the particular situations on site at the operator is hardly possible.

In this work, the Karlsruhe direct current network is investigated for unused braking energy. A measurement-simulative approach is used. A light rail vehicle, which is used in passenger service, is equipped with a measurement system to record the braking power.

The measurement data is analyzed and a map is created showing the areas in the track network where a lot of unused braking energy occurs. In the theoretical examination, the braking process in a tramway system and the basic dependence of the storage positioning are explained. In the simulative investigation of the individual track sections, energy storage systems are integrated into the overhead line network and their effects are analyzed. For

the possible locations, the saved energy is determined and storage dimensions are proposed.

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Für die Unterstützung in den letzten Jahren danke ich vielen Menschen.

Für das entgegengebrachte Vertrauen, die vielen Freiräume und die Betreuung meiner Arbeit möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld bedanken. Die Möglichkeit eigenen Ideen nachzugehen und diese auszuprobieren hat mir stets viel Freude bereitet.

Für die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller. Herrn Prof. Dr. Michael Hoffmann danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei den Kolleginnen und Kollegen der Bahnsystemtechnik bedanke ich mich für die schöne Zeit am Institut mit den vielen guten Gesprächen zu fachlichen und fachfremden Themen. Ganz besonders danke ich dabei Ivana Kramer für die Unterstützung in jeder Situation. Markus Tesar danke ich für die tolle Zusammenarbeit und seine Geduld mit mir im Projekt Messstraßenbahn. Weiterhin danke ich ihm und Leonie Hecke für die Durchsicht meiner Arbeit. Den Studierenden bei der Bahnsystemtechnik danke ich für die Unterstützung, ihre Betreuung hat mir stets viel Freude bereitet.

Das Projekt Messstraßenbahn wurde zusammen mit der Albtal-Verkehrsgesellschaft mbH realisiert. Ich danke Marc Feistkorn, der das Projekt von Anfang an befürwortet hat, Achim Hettel danke ich für die Unterstützung und Koordination während der Planung und besonders bei der Montage im Betriebshof.

## Danksagung

---

Abschließend danke ich noch meiner Familie für die Unterstützung während der gesamten Arbeit.

Karlsruhe, im Frühjahr 2022

*Philip Otto*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> . . . . .	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>v</b>
<b>Danksagung</b> . . . . .	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Motivation und Herausforderung . . . . .	1
1.2 Einordnung und Ziele der Arbeit . . . . .	3
1.3 Gliederung der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Energieversorgung bei Straßen- und Stadtbahnnetzen</b> . . . . .	<b>9</b>
2.1 Aufbau und Funktion von Gleichrichterunterwerken . . . . .	10
2.2 Oberleitung . . . . .	12
2.3 Energieeinspeisung . . . . .	13
2.4 Elektrischer Aufbau von Gleichstromfahrzeugen . . . . .	14
2.5 Regeneratives Bremsen . . . . .	15
2.6 Energieeinsparung durch die Optimierung der Infrastruktur . . . . .	16
2.6.1 Reduzierung der Übertragungsverluste . . . . .	17
2.6.2 Leerlaufspannung der Gleichrichterunterwerke . . . . .	17
2.6.3 Durchkupplung des Oberleitungsnetzes . . . . .	18
2.6.4 Energiespeicher . . . . .	19
<b>3 Karlsruher Messstraßenbahn</b> . . . . .	<b>23</b>
3.1 Hintergrund und Einordnung . . . . .	23

3.2	Gegebenheiten in Karlsruhe . . . . .	25
3.2.1	Schienennetz des Karlsruher Verkehrsverbunds . . . . .	25
3.2.2	Gleichstromfahrzeuge der AVG und VBK . . . . .	30
3.3	Messsystem . . . . .	31
3.3.1	Vorgehensweise . . . . .	31
3.3.2	Grundsätzliche Anforderungen und Projektziele . . . . .	35
3.3.3	Messgrößen . . . . .	36
3.3.4	Messsystem-Hardware . . . . .	38
3.3.5	Datenübertragung . . . . .	41
3.3.6	Datenspeicherung . . . . .	41
3.4	Auswertungsbeispiele . . . . .	44
3.4.1	Laufwiderstand . . . . .	44
3.4.2	Energiebedarf der Nebenverbraucher . . . . .	44
3.4.3	Instandhaltung der Infrastruktur . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Ungenutzte Bremsenergie im Karlsruher Streckennetz . . . . .</b>	<b>49</b>
4.1	Datenaufbereitung . . . . .	49
4.1.1	Positionsdaten . . . . .	49
4.1.2	Referenzstrecken . . . . .	51
4.1.3	Erstellung von Übersichtskarten . . . . .	51
4.2	Ermittlung der Leistung an den Bremswiderständen . . . . .	53
4.2.1	Berechnung . . . . .	53
4.2.2	Prüfung auf Plausibilität . . . . .	64
4.3	Datengrundlage . . . . .	67
4.4	Gefahrene Geschwindigkeit im Streckennetz . . . . .	69
4.5	Verlustenergie im Streckennetz . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Modellbildung und theoretische Betrachtung des Brems-</b>	
	<b>vorgangs . . . . .</b>	<b>77</b>
5.1	Simulation von Nahverkehrsnetzen . . . . .	77
5.2	Modellierung der Komponenten . . . . .	79

5.2.1	Gleichrichterunterwerk . . . . .	80
5.2.2	Oberleitungssystem . . . . .	80
5.2.3	Fahrzeugmodell . . . . .	85
5.2.4	Energiespeicher . . . . .	86
5.2.5	Weitere Faktoren . . . . .	87
5.3	Theoretische Betrachtung des Bremsvorgangs . . . . .	87
5.3.1	Ein Energiespeicher im Streckenabschnitt . . . . .	89
5.3.2	Zwei Energiespeicher im Speiseabschnitt . . . . .	97
5.3.3	Idealer Energiespeicherabstand . . . . .	99
<b>6 Integration von Energiespeichern in das Karlsruher Gleichstromnetz . . . . . 101</b>		
6.1	Simulationsziel und Ablauf . . . . .	101
6.2	Besonderheiten bei der Auswertung . . . . .	102
6.2.1	Definitionen . . . . .	102
6.2.2	Gewichtung der Ergebnisse . . . . .	103
6.2.3	Wirkungsgrad des Speichers . . . . .	104
6.2.4	Speicherdimensionierung . . . . .	105
6.3	Untersuchung der Abschnitte . . . . .	106
6.3.1	Abschnitt 1: S1/S11 Hochstetten . . . . .	107
6.3.2	Abschnitt 2: S1/S11 Schwarzwaldrand . . . . .	117
6.3.3	Abschnitt 3: L2 Wolfartsweier . . . . .	126
6.3.4	Abschnitt 4: L2 Siemensallee . . . . .	128
6.3.5	Abschnitt 5: S2 Spöck . . . . .	130
6.4	Vergleich der Streckenabschnitte . . . . .	132
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick . . . . . 135</b>		
7.1	Zusammenfassung . . . . .	135
7.2	Ausblick . . . . .	137
<b>A Anhang . . . . . 139</b>		

A.1 Abschätzung der gesamten Bremsleistung bei der Messung an einem Bremswiderstand . . . . .	139
A.2 Herleitung: Idealer Abstand zwischen zwei Energiespeichern	142
<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis . . . . .</b>	<b>145</b>
<b>Abbildungsverzeichnis . . . . .</b>	<b>149</b>
<b>Tabellenverzeichnis . . . . .</b>	<b>153</b>
<b>Literatur . . . . .</b>	<b>155</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Herausforderung

Durch den voll-elektrischen Betrieb und die vorhandene Infrastruktur ist es bei Straßenbahnsystemen einfach, den Betrieb mit erneuerbaren Energien zu ermöglichen. Betreiber wie die Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH oder auch der Fernverkehr der Deutschen Bahn fahren daher schon seit einigen Jahren mit Ökostrom [1], [2]. Neben der Nutzung von Ökostrom ist auch eine effiziente Nutzung der sonstigen Ressourcen wichtig. Forschungsinstitute, Betreiber und Hersteller haben dies erkannt und nutzen die zunehmende Digitalisierung, um die Effizienz von Bahnsystemen zu steigern. Um die Betriebskosten zu reduzieren, werden unterschiedliche Ansätze diskutiert. Einige Möglichkeiten sind eine prädiktive Wartung für bessere Verfügbarkeit der Fahrzeuge [3], die Optimierung der Abläufe in den Werkstätten [4] oder die effiziente Fahrzeugbereitstellung [5]. Aber auch die Steigerung der Energieeffizienz durch eine sparsame Fahrweise oder die Reduzierung der ungenutzten Bremsenergie sind viel untersuchte Themen. [6]–[8]

Durch die Verwendung der Traktionsmaschinen als Generatoren können moderne Schienenfahrzeuge regenerativ bremsen und, falls möglich, die Bremsenergie in das Oberleitungsnetz zurückspeisen. Das generatorische Bremsen ist nicht nur energieeffizient, sondern gleichzeitig verschleißarm. Die Energieversorgung bei Straßen- und Stadtbahnnetzen erfolgt mit Gleichstrom. Auf Grund der technischen Gegebenheiten ist jedoch dabei das Oberleitungsnetz nicht immer aufnahmefähig und ein Teil der Bremsenergie wird in den Bremswiderständen in Wärme umgewandelt. In der Literatur wird der Anteil an ungenutzter Bremsenergie in Straßen- und Stadtbahnsystemen mit

ca. 20 - 30 % der gesamten Energie angegeben [9]–[12].

Schon seit Jahren experimentieren viele Betreiber deshalb mit Energiespeichern, die durch Zwischenspeicherung den Anteil an ungenutzter Bremsenergie reduzieren sollen. Die individuellen örtlichen Gegebenheiten erschweren die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, weshalb es eine große Anzahl an durchgeführten Projekten gibt. Die Unterschiede bei den Betreibern reichen dabei von der Ausstattung der Fahrzeuge und den Linienverläufen bis zur individuellen Infrastruktur und den Betriebsabläufen. Eine direkte Übertragung der Ergebnisse zwischen den Betreibern ist daher nicht zielführend und kann lediglich Anhaltspunkte für das zu betrachtende Netz liefern.

In den begleitenden Forschungsarbeiten werden häufig nur einzelne Streckenabschnitte ohne Verzweigungen betrachtet. Dabei werden meist einfache Simulationsumgebungen verwendet, bei denen das Fahrzeugmodell auf den Fahrwiderständen und Kennfeldern basiert. Die Programme sind so aufgebaut, dass sie die Berechnungen optimal für die zu untersuchende Fragestellung durchführen. Werden Messungen durchgeführt, handelt es sich meist um einzelne Messfahrten, die die Funktion und die Wirksamkeit der Speicher demonstrieren.

Die simulative Untersuchung von Streckenabschnitten in Straßen- und Stadtbahnssystemen hat den Vorteil, dass sich viele Situationen und Systemparameter untersuchen und vergleichen lassen. Dem steht jedoch die große Komplexität der Systeme gegenüber, die bei der Modellierung berücksichtigt werden muss.

Durch die Nutzung einer (teilweise) gemeinsamen Infrastruktur, bei der die Gleise in der durchgehenden Asphaltdecke integriert sind, kommt es zur Interaktion mit dem motorisierten und nicht-motorisierten Individualverkehr. Die meist kurzen Haltestellenabstände bedingen häufige Fahrgastwechsel, deren Abläufe nicht nur tageszeit-, sondern auch witterungsabhängig sind. Hinzu kommt, dass durch Änderungen der Linienführung, bei Baustellen

oder Unfällen, der Betrieb beeinträchtigt werden kann. Die Einflussfaktoren bei einem Straßen- oder Stadtbahnssystem sind folglich sehr vielfältig. Für allgemeingültige Aussagen müssen daher in Simulationen viele Parameter bestimmt oder abgeschätzt werden, wozu umfangreiche Parameterstudien notwendig sind.

Bei Messungen werden die tatsächlichen Gegebenheiten im Netz berücksichtigt. Für allgemeingültige Aussagen reicht es aber nicht aus, dass nur einzelne Messfahrten durchgeführt werden. Vielmehr müssen die Fahrten bei unterschiedlichen Randbedingungen – wie Umgebungstemperatur, verschiedene Fahrer oder Uhrzeiten – durchgeführt werden, die einen Einfluss auf die gemessenen Größen haben. Zwar sind die Ergebnisse bei Messungen realitätsnäher, mit den Daten ist es aber häufig nicht direkt möglich, die Auswirkungen bestimmter Maßnahmen im Netz zu untersuchen.

## **1.2 Einordnung und Ziele der Arbeit**

Der Einsatz von Energiespeichern in Nahverkehrsnetzen wird schon seit vielen Jahren untersucht und ist Thema zahlreicher Forschungsprojekte. Gegenstand der Forschungen sind dabei elektrische Aspekte wie der Anteil an ungenutzter Bremsenergie in dem Streckenabschnitt und die Auswirkungen von Energiespeichern [13]–[15], optimale Speicherstandorte [16] und die optimale Speichergröße [14], [16], [17], Regelungsstrategien von Energiespeichern [18]–[20] aber auch betriebliche Aspekte wie Fahrplan- [6] und Fahrtrajektorienoptimierung [21]–[23].

In den Arbeiten werden in der Regel nur einzelne Linien eines Streckennetzes betrachtet, in die ein einzelner Energiespeicher integriert wird. Die Untersuchungen erfolgen größtenteils rein simulativ. Bei experimentellen Projekten werden überwiegend nur einige wenige Messfahrten durchgeführt, die die Funktion und Wirksamkeit der Speicher demonstrieren.

R. Barrero *et al.* untersuchen in [24] simulativ auch die Integration von mehreren Speichern entlang einer Linie. Die Speicher werden dabei in verschie-

denen Rastern entlang der Strecke angeordnet und es wird die dadurch eingesparte Energie für verschiedene Speichergrößen verglichen.

Bei Untersuchungen, die sich auf das gesamte Streckennetz beziehen, sind Energiespeicher häufig nur ein Randthema. In der simulativen Arbeit von Ch. Kühn [25] wird der Energiefluss im Regelbetrieb für das Karlsruher Streckennetz analysiert. In der Dissertation von G. Dürrschmidt [26] werden die Ergebnisse der Langzeit-Messungen der Dresdener Messstraßenbahn vorgestellt und diskutiert. In der Arbeit liegt der Fokus auf der Längsdynamik und der komponentenweisen Untersuchung des Fahrwiderstandes. Zwar werden auch verschiedene Themen zur elektrischen Energie untersucht, die ortsfesten Speicher werden dabei aber nur kurz betrachtet.

In dieser Arbeit steht die Steigerung der Energieeffizienz durch eine Reduzierung der ungenutzten Bremsenergie im Mittelpunkt. Die Betrachtungen erfolgen unabhängig von der Speichertechnologie für stationäre Speicher unter den folgenden Aspekten:

### **Messtechnische Erfassung der ungenutzten Bremsenergie**

Um potentielle Strecken zu identifizieren, die sich für Speicher eignen, wird das Streckennetz messtechnisch untersucht. Zur Datenerfassung wird ein Stadtbahnfahrzeug mit einem Messsystem ausgestattet, das im täglichen Fahrgastbetrieb im gesamten Streckennetz über einen langen Zeitraum Daten erfasst. Neben der Verlustleistung an den Bremswiderständen werden auch weitere Parameter aufgenommen. Der Einsatz des Fahrzeugs im täglichen Fahrgastbetrieb ermöglicht die Berücksichtigung der vielen Einflussfaktoren, die für eine Simulation aufwändig bestimmt werden müssen.

### **Auswertung der ungenutzten Bremsenergie im Streckennetz**

Die Messdaten werden ausgewertet und die ungenutzte Bremsenergie im Streckennetz bestimmt. Durch den Einsatz des Fahrzeugs im gesamten Streckennetz können für alle Abschnitte Aussagen gemacht werden. Die Ergebnisse sind ein Maß für die Energieeffizienz des Streckennetzes und zeigen Bereiche, in denen Energiespeicher sinnvoll sein können.

### **Idealer Abstand zwischen zwei Energiespeichern**

In den bisherigen Forschungsprojekten wird meistens ein Energiespeicher in das Streckennetz integriert. Nur selten ist eine Begründung für die Wahl der Speicherposition angegeben. Es handelt sich dann um Standorte, die dem Betreiber für einen Prototypen als geeignet scheinen, da es die örtlichen Gegebenheiten zulassen. Bei Simulationsstudien wird die optimale Speicherposition genau ermittelt, bauliche Aspekte werden dabei vernachlässigt.

Sollen mehrere Energiespeicher in das Oberleitungsnetz integriert werden, stellt sich die Frage nach dem geeigneten Abstand zwischen den Speichern. Werden die Speicher zu nah beieinander positioniert, überschneiden sich ihre Wirkbereiche. Bei zu großem Abstand wird die ungenutzte Bremsenergie nicht vollständig von den Speichern aufgenommen. In dieser Arbeit erfolgt eine theoretische Betrachtung des Bremsvorgangs und es wird der ideale Abstand zwischen zwei Energiespeichern hergeleitet. Daraus ergibt sich für Betreiber ein hilfreiches Werkzeug, mit dem abgeschätzt werden kann, ob sich ein Streckenabschnitt für mehrere Energiespeicher eignet und von welchen Parametern dies beeinflusst wird.

### **Aufbau eines Simulationsmodells zur Untersuchung der Auswirkungen von Energiespeichern Streckennetz auf Basis der Messdaten**

Die Messdaten werden als Eingangsparameter für die simulative Untersuchung von verschiedenen potentiellen Speicherstandorten verwendet. Dabei werden die einzelnen Streckenabschnitte auf Eignung für Speicher und deren Auswirkung auf den Anteil an ungenutzter Bremsenergie untersucht. Die Erkenntnisse aus der theoretischen Betrachtung werden dabei genutzt, um die Anzahl der Speicherpositionen und damit die Simulationsfälle zu reduzieren.

### 1.3 Gliederung der Arbeit

In Abbildung 1.1 ist der Aufbau der Arbeit dargestellt. Das folgende Kapitel 2 gibt einen Überblick über die Infrastruktur des Karlsruher Nahverkehrsnetzes. Die Betrachtungen beziehen sich dabei nur auf das Gleichstromnetz. Es wird der allgemeine Aufbau der Energieversorgung diskutiert und es gibt einen kurzen Überblick über die elektrische Fahrzeugtechnik und Energiespeicher in Nahverkehrsanwendungen.

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten stammen aus dem Projekt Messstraßenbahn. Die Hintergründe zu dem Projekt, der Aufbau des Messsystems und einige Auswertungsbeispiele werden im Kapitel 3 beschrieben.

Das Kapitel 4 erläutert zunächst die Datenaufbereitung und die Berechnung der Bremsenergie. Danach werden die erfassten Messdaten im Karlsruher Streckennetze ausgewertet und eine Karte mit der ungenutzten Bremsenergie für das gesamte Netz erstellt.

Der simulative Ansatz wird in Kapitel 5 erläutert. Für die elektrische Modellierung werden Ersatzschaltbilder der verschiedenen Komponenten im Straßenbahnsystem erstellt. Anschließend folgt eine analytische Betrachtung des Bremsvorgangs.

Die Bereiche im Netz, die eine hohe ungenutzten Bremsenergie aufweisen, werden in Kapitel 6 einzeln untersucht. Dazu werden die Modelle und Daten aus den vorherigen Kapiteln in einer Simulationsumgebung zusammengeführt und analysiert.

Abschließend erfolgen in Kapitel 7 die Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Ausblick auf mögliche weiterführende Themen.

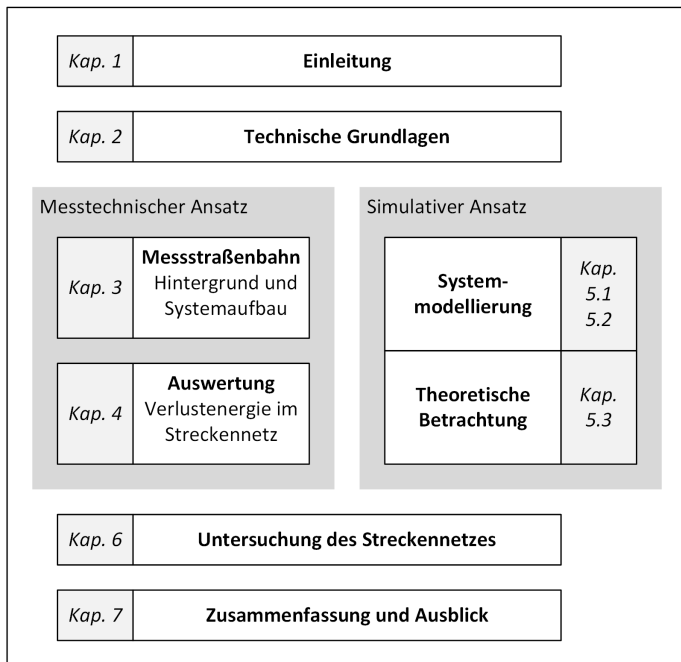


Abbildung 1.1: Struktureller Aufbau der Arbeit





## 2 Energieversorgung bei Straßen- und Stadtbahnnetzen

Straßen- oder Stadtbahnnetze werden in mittelgroßen Städten für den innerstädtischen Schienenpersonennahverkehr verwendet. Durch den Einsatz im dicht besiedelten Raum zeichnen sich die Systeme durch kurze Haltestellenabstände von 400 m bis 800 m aus. Die Achslasten der Fahrzeuge liegen im Bereich von 8 t bis 10 t und das Fahrzeuggewicht, je nach Bauart des Fahrzeugs, im Bereich 40 t bis 60 t. [27] Die Energieversorgung kann daher mit einer geringen Gleichspannung erfolgen, bei der die Nennspannung gemäß der Norm DIN EN 50163 [28] 600 V, 750 V oder 1500 V beträgt. Neben der Nennspannung definiert die Norm auch die jeweils zulässigen Spannungsbereiche.

Die Verluste bei der Energieübertragung ergeben sich aus dem Strom in der Oberleitung und deren Widerstand. Im Betrieb führt eine höhere Spannung bei gleicher Leistung zu geringeren Strömen und folglich zu geringeren Verlusten in der Oberleitung. Bestehende Netze mit einer Spannung von 600 V wurden daher in den letzten Jahren zunehmend auf 750 V umgestellt. Beispiele sind unter anderem Mainz [29], Mannheim [30], [31] oder Basel [32]. Eine Übersicht der eingesetzten Spannungssysteme in Nahverkehrsnetzen in Deutschland ist in [25] angegeben.

Um ein möglichst energieeffizientes System zu erhalten, ist es notwendig, eine gezielte Optimierung der Infrastruktur vorzunehmen. Verschiedene Parameter der einzelnen Systemkomponenten haben einen Einfluss auf die Energieeffizienz des gesamten Straßen- beziehungsweise Stadtbahnnetzes.

Für energetische Betrachtungen lassen sich die Systeme auf wenige we-

sentliche Komponenten reduzieren: die Gleichrichterunterwerke (GUW) zur Einspeisung der Energie in die Oberleitung, das Oberleitungssystem zur Energieübertragung und die Fahrzeuge, welche die Energie für die Traktion und die Nebenverbraucher benötigen und, sofern möglich, Bremsenergie in die Oberleitung zurückspeisen. Zur Zwischenspeicherung von Bremsenergie können Energiespeicher in die Infrastruktur integriert sein. Abhängig vom Ziel der Untersuchungen muss auch der Betrieb berücksichtigt werden. In diesem Kapitel werden zunächst die Komponenten kurz beschrieben. Anschließend wird auf die wesentlichen Parameter, die einen Einfluss auf die Energieeffizienz haben, eingegangen. Der Bremsvorgang der Fahrzeuge wird in diesem Kapitel nur verkürzt beschrieben. Die ausführliche theoretische Betrachtung erfolgt im Abschnitt 5.3. Da sich die Betrachtungen in dieser Arbeit auf das Straßenbahnnetz in Karlsruhe beziehen, werden nur die für Karlsruhe relevanten Aspekte diskutiert. Für eine umfassende Einführung in die Thematik wird auf die Literatur von H. Biesenack [33] und F. Kiessling [34] verwiesen.

### **2.1 Aufbau und Funktion von Gleichrichterunterwerken**

Eingangsseitig sind die Unterwerke an dem 3-phasigen Mittelspannungsnetz, ausgangsseitig an der Oberleitung und der Schiene angeschlossen. Für den Aufbau von Gleichrichterunterwerken wird im Allgemeinen die VDV-Schrift 505 angewendet [35]. Der darin vorgeschlagene Aufbau ist in Abbildung 2.1 skizziert.

Ein Gleichrichterunterwerk besteht aus den folgenden Komponenten: Eine Mittelspannungsschaltanlage, um das Unterwerk vom Versorgungsnetz zu trennen; ein Transformator zur Spannungsanpassung; ein Gleichrichter zur Umwandlung von Wechselspannung in Gleichspannung; eine Sammelschiene mit den Abgängen in die Speiseabschnitte; eine Sicherheitsüberwachung und Trennschalter in den Streckenabgängen und Speiseleitungen zum Anschluss an die Oberleitung und Schiene. Im Allgemeinen werden pas-

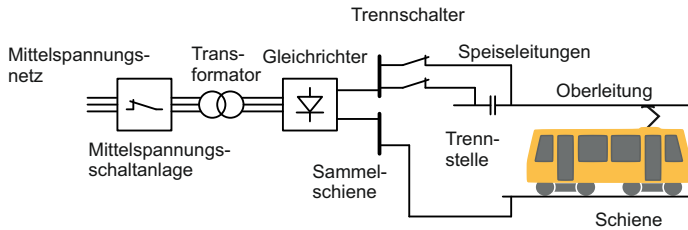


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Gleichrichterunterwerks (nach [35])

sive Gleichrichterunterwerke verwendet. Der Gleichrichter kann dabei als 6-pulsige oder bevorzugt (für eine geringere Restwelligkeit am Ausgang) als 12-pulsige Diodengleichrichter-Schaltung ausgeführt werden. Die möglichen Verschaltungen werden in der Norm DIN EN 50328 [36] beschrieben. Bei einer 12-pulsigen Ausführung werden ein Transformator mit zwei Sekundärwicklungen oder zwei einzelne Transformatoren verwendet. Die sekundärseitigen Trafowicklungen sind als Stern und Dreieck verschaltet. Die beiden 6-Puls-Gleichrichter sind ausgangsseitig typischerweise parallel geschaltet. [33]

Der Diodengleichrichter verhindert, dass Energie in das Versorgungsnetz zurückgespeist werden kann. Um das Rückspeisen zu ermöglichen, kann statt der Dioden ein Stromrichter verwendet werden, der den bidirektionalen Stromfluss erlaubt. Alternativ kann auch ein Wechselrichter antiparallel zum Diodengleichrichter geschaltet werden [37]–[39]. Zusätzlich zum Rückspeisen in das Versorgungsnetz kann bei Systemen mit Stromrichtern auch die Oberleitungsspannung variabel eingestellt werden. Diese aktiven Unterwerke werden derzeit nur vereinzelt eingesetzt. Die Systeme gibt es von ALSTOM [40], [41] oder auch von ABB [42].

Der Abstand zwischen den Unterwerken im Streckennetz hängt vom Betrieb, der Topographie und den eingesetzten Fahrzeugtypen auf den Abschnitten ab. Typischerweise liegt er im Bereich von 2 bis 6 km, in Innenstadtbereichen mit hohem Fahrzeugaufkommen auch darunter. [27]

## 2.2 Oberleitung

Über Speiseleitungen erfolgt die elektrische Verbindung vom Unterwerk zur Oberleitung und zur Fahrschiene, die als Rückleiter des Bahnstroms verwendet wird. Abhängig von den örtlichen Gegebenheiten kann der Aufbau der Oberleitung unterschiedlich erfolgen. Die in Karlsruhe verwendeten Möglichkeiten sind in Abbildung 2.2 dargestellt. In der Innenstadt ist das Oberleitungssystem hauptsächlich als Einfachoberleitung und in den Randbereichen als Hochkettenoberleitung ausgeführt.

Bei der Einfachoberleitung ist die Oberleitung an den Stützpunkten über quer gespannte Tragseile an die Masten montiert. Die elektrische Isolierung kann dabei in den Tragseilen oder in den Stützpunkten erfolgen.

Bei der Hochkettenoberleitung ist die Oberleitung mit Hängern an einem Tragseil montiert. Über elektrische Verbinder wird die Oberleitung mit dem Tragseil gekoppelt. Dadurch erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit des Oberleitungssystems. Durch das Tragseil ist ein größerer Abstand zwischen den Stützpunkten möglich.

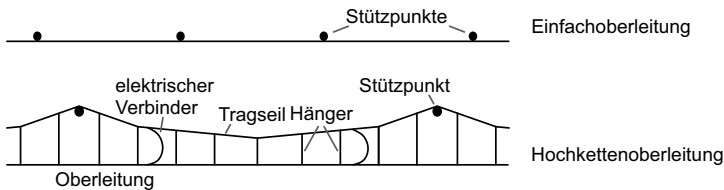


Abbildung 2.2: Realisierungsmöglichkeiten für Oberleitungen (nach [27])

Die verschiedenen Arten von Oberleitungen unterscheiden sich nicht nur im Aufbau, sondern auch im Material und im Leiterquerschnitt. Beide Parameter beeinflussen den elektrischen Widerstand der Oberleitung  $R_{OL}$  und es gilt:

$$R_{OL} = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

Mit zunehmender Leitungslänge  $l$  und mit abnehmendem Leiterquerschnitt  $A$  steigt der elektrische Widerstand.

Als Material für die Oberleitungen werden im Allgemeinen Elektrolytkupfer oder Kupferlegierungen verwendet, da sie bessere thermische und/oder mechanische Eigenschaften und, im Vergleich zu Aluminium, ein leitendes Oxid besitzen. [33]

In Karlsruhe wird für die Oberleitung unter anderem Kupfer mit einer Querschnittsfläche von  $100 \text{ mm}^2$  (Ri 100) verwendet. Für die Tragseile aus Kupfer wird eine Querschnittsfläche von  $70 \text{ mm}^2$  und für die Verstärkungsleitungen aus Kupfer wird eine Querschnittsfläche von  $95 \text{ mm}^2$  verwendet.

Der elektrische Widerstand für eine Hochkettenoberleitung mit einem Fahrdrat Ri100 und  $70 \text{ mm}^2$  Tragseil beträgt bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ungefähr  $108 \text{ m}\Omega/\text{km}$ . [34]

## 2.3 Energieeinspeisung

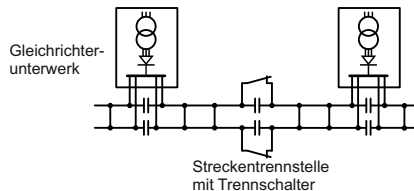


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der zweiseitigen Einspeisung mit Querkupplung und Streckentrennstelle

Die meisten Speiseabschnitte sind mit Unterwerken an beiden Enden ausgestattet, die Leistung in die Abschnitte einspeisen. Dadurch teilt sich der Stromfluss auf die beiden speisenden Unterwerke auf und die Verlustleistung an der Oberleitung reduziert sich. In Abbildung 2.3 ist schematisch die zweiseitige Einspeisung skizziert. Zur besseren Übersicht sind die Trennschalter in den Speiseleitungen aus Abbildung 2.1 nicht dargestellt. In den

Randbereichen des Streckennetzes gibt es häufig Abschnitte, die nur einseitig gespeist werden, da sich an den Endhaltestellen keine Gleichrichterunterwerke befinden.

Über die Sammelschiene in den Unterwerken sind die Speiseabschnitte miteinander elektrisch verbunden (Längskupplung). Mit Streckentrennern zwischen den Abschnitten und Trennschaltern in den Zuleitungen können die Speiseabschnitte im Störfall oder bei Instandsetzungsarbeiten unterteilt werden. Die Trennstellen befinden sich häufig, aber nicht ausschließlich, in den Bereichen der Unterwerke. Meistens befinden sich Trennschalter parallel zu den Streckentrennern, die im Regelbetrieb geschlossen sind und dadurch die Speiseabschnitte elektrisch verbinden.

Zusätzlich zur zweiseitigen Speisung kann bei zweigleisigen Strecken durch die Querkupplung der Oberleitungen beider Gleise der wirksame elektrische Widerstand weiter reduziert werden. Beim Abschalten eines Streckenabschnitts wird jedoch für beide Gleise die Energieversorgung unterbrochen, was dazu führt, dass der elektrische Betrieb auf beiden Gleisen ausgesetzt wird.

### 2.4 Elektrischer Aufbau von Gleichstromfahrzeugen

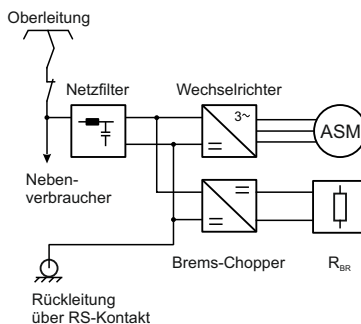


Abbildung 2.4: Vereinfachter Hauptschaltplan eines Gleichstromfahrzeugs

Grundsätzlich ist der elektrische Hauptschaltplan zwischen den verschiedenen Gleichstromfahrzeugtypen sehr ähnlich und lässt sich auf den in Abbildung 2.4 gezeigten vereinfachten Aufbau reduzieren. Der Stromabnehmer ist als Schleifkontakt die elektrische Verbindung zur Oberleitung. Um das Fahrzeug spannungsfrei zu schalten, bei der Wartung oder bei Störungen oder beim Abstellen, wird der Hauptschalter verwendet. Das Netzfilter dient der Störungsunterdrückung. Der Brems-Chopper steuert den Bremswiderstand. Dieser ist zur Aufnahme der Bremsleistung für den Fall vorhanden, dass das Oberleitungsnetz nicht aufnahmefähig ist. Über den Wechselrichter wird die Traktionsmaschine gespeist. Meistens werden Asynchronmaschinen verwendet (ASM), da sie robust, wartungsarm und kostengünstig sind. Die Rückleitung des Bahnstroms erfolgt über den Rad-Schiene-Kontakt (RS-Kontakt). Um den Stromfluss über die Lager und damit Lager Schäden zu vermeiden, sind niederohmige Schleifringe an den Radachsen vorgesehen. Hinter dem Hauptschalter befindet sich der Abgang für die Nebenverbraucher. Dazu gehören die Heizwiderstände, die Wechselrichter für das 400V/3~-Bordnetz (für die Klimaanlage) oder auch der DC/DC-Wandler für das 24V-Bordnetz. [27]

Je nach Fahrzeug und Aufbau der Fahrzeugelektronik variiert der Hauptschaltplan geringfügig. Zwar ist es möglich, mehrere Asynchronmaschinen parallel an einem Wechselrichter zu betreiben, es kann jedoch vorteilhaft sein, für jede angetriebene Achse einen eigenständigen Wechselrichter zu verwenden. Beim Ausfall eines Wechselrichters oder einer Traktionsmaschine kann dann das Fahrzeug eigenständig den Streckenabschnitt räumen.

## 2.5 Regeneratives Bremsen

Durch den geringen Verschleiß und den energetischen Vorteil wird bei Straßenbahnen die Verzögerung möglichst vollständig generatorisch durchgeführt. Die Traktionsmaschinen werden dabei als Generator betrieben, wodurch die kinetische Energie des Fahrzeugs in elektrische Energie umge-

wandelt wird. Reicht die Bremsleistung der Maschinen nicht aus, werden weitere Bremssysteme, wie Scheibenbremsen oder notfalls die Magnetschienenbremse, zugeschaltet.

Aus der generatorischen Bremsleistung werden die Nebenverbraucher des bremsenden Fahrzeugs gespeist. Überschreitet die Bremsleistung deren Bedarf, wird zunächst versucht, die Bremsleistung in die Oberleitung einzuspeisen. Damit ein Strom fließt, hebt der Stromrichter des Fahrzeugs die Spannung am Stromabnehmer an. Der passive Aufbau der Unterwerke verhindert jedoch, dass die Leistung in das Versorgungsnetz fließen kann. Eine Rückspeisung in die Oberleitung ist daher nur möglich, wenn ein anderer Verbraucher die Leistung aufnimmt. Damit möglichst die gesamte Bremsleistung in die Oberleitung eingespeist wird, ist es vorteilhaft, wenn sich die Brems- und die Beschleunigungsvorgänge der Fahrzeuge zeitlich überschneiden. Andernfalls wird nur von den Nebenverbrauchern der beiden Fahrzeuge die Bremsleistung aufgenommen, was für die vollständige Aufnahme nicht unbedingt ausreicht.

Ist es nicht möglich, dass die Bremsleistung vollständig von anderen Verbrauchern aufgenommen wird, wirkt der Stromrichter wie eine Stromquelle und die Spannung am Stromabnehmer steigt an. Um das Überschreiten der maximal zulässigen Spannung zu vermeiden, werden die Bremswiderstände getaktet und die überschüssige Bremsleistung in Wärme umgewandelt. Weil dadurch die Energie dem System verloren geht, soll dieser Zustand verhindert werden. Das kann durch eine gezielte Optimierung der Infrastruktur erreicht werden.

### **2.6 Energieeinsparung durch die Optimierung der Infrastruktur**

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Energieeffizienz in einem Streckennetz zu erhöhen, die sich aus dem Verständnis der Komponenten ergeben und auch in [27] beschrieben werden. In [32] untersuchen Y. Flückiger *et al.* für die Basler Verkehrs-Betriebe die Auswirkungen der folgenden Maßnahmen.



### 2.6.1 Reduzierung der Übertragungsverluste

Die elektrischen Verluste bei der Energieübertragung in der Oberleitung sowohl bei der Einspeisung von dem Unterwerk zum Fahrzeug als auch bei der Übertragung der Bremsenergie zwischen den Fahrzeugen sind abhängig von dem ohmschen Widerstand der Oberleitung. Um die Übertragungsverluste zu reduzieren gilt es also, den Widerstand unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Randbedingungen möglichst zu minimieren. Die Zusammenhänge ergeben sich aus Gleichung 2.1. Da die Länge durch den Streckenverlauf vorgegeben ist, kann mit der Erhöhung der Querschnittsfläche  $A$  oder mit der Reduzierung des spezifischen Widerstands  $\rho$  der Oberleitungswiderstand reduziert werden.

Durch die Verwendung von Legierungen als Leitermaterial kann der spezifische Widerstand reduziert werden. Allerdings beeinflussen die verwendeten Materialien auch die mechanischen Eigenschaften der Oberleitung. Im Betrieb wird die Kontaktfläche zwischen dem Stromabnehmer und der Oberleitung mechanisch beansprucht. Es muss daher eine geeignete Legierung gefunden werden, die eine hohe Festigkeit und eine gute Leitfähigkeit besitzt. [43]

Die Querschnittsfläche kann durch die Verwendung von Verstärkerleitungen, die parallel zur Oberleitung verlaufen und die in regelmäßigen Abständen an die Oberleitung angeschlossen sind, erhöht werden. Wie schon beschrieben, kann auch durch die Querkupplung der Oberleitungen der einzelnen Fahrtrichtungen bei zweigleisigen Strecken die wirksame Querschnittsfläche der Oberleitung erhöht und dadurch der elektrische Widerstand reduziert werden.

### 2.6.2 Leerlaufspannung der Gleichrichterunterwerke

Die Grenzwerte der Leerlaufspannung von Gleichrichterunterwerken sind durch die Norm DIN EN 50163 [28] vorgegeben. Die Leerlaufspannung

kann innerhalb der vorgegebenen Grenzen eingestellt werden. Die Leitungsverluste bei der Energieübertragung berechnen sich mit

$$p_{OL,V} = i^2 \cdot r \quad (2.2)$$

Bei gleicher Leistung reduziert sich mit steigender Spannung der in der Oberleitung fließende Strom  $i$ . Wird die Leerlaufspannung möglichst groß gewählt, stellt sich durch den gleichbleibenden Widerstand  $r$  der kleinste Strom ein. Die Oberleitungsverluste beim Einspeisen werden folglich minimiert. Dem steht jedoch der Energieaustausch zwischen den Fahrzeugen beim Bremsen gegenüber. Die Differenz zwischen der maximal zulässigen Oberleitungsspannung zur Leerlaufspannung der Gleichrichterunterwerke bestimmt, wie groß der Abstand zwischen einem bremsenden und einem beschleunigenden Fahrzeug sein kann, damit die Bremsleistung vollständig in die Oberleitung eingespeist werden kann. Je größer die Spannungsdifferenz ist, umso weiter kann die Bremsleistung im Netz übertragen werden. Dieser Zusammenhang wird noch ausführlicher im Abschnitt 5.3 diskutiert.

### 2.6.3 Durchkupplung des Oberleitungsnetzes

Wie bereits in Abschnitt 2.3 diskutiert wurde, ist es sinnvoll, die benachbarten Speiseabschnitte miteinander längs zu kuppeln. Die Bremsleistung kann dann auch über die Speiseabschnitte hinaus übertragen werden. Dadurch wird es wahrscheinlicher, dass sich die Brems- und Beschleunigungsvorgänge der Fahrzeuge überschneiden, da sich potentiell mehr Fahrzeuge in der Nähe befinden, die die Bremsleistung aufnehmen können. Die Durchkupplung des Netzes bewirkt folglich, dass die Bremsleistung besser zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden kann. Wie in Abbildung 2.1 und Abbildung 2.3 dargestellt fließt der Strom dabei über die Sammelschiene in den Unterwerken.

### 2.6.4 Energiespeicher

Bei Energiespeichern in Nahverkehrssystemen wird zwischen stationären Energiespeichern, die sich entlang der Strecke befinden, und mobilen Energiespeichern auf den Fahrzeugen unterschieden. Vorrangig werden sie in das System integriert, um den Anteil an ungenutzter Bremsenergie zu reduzieren. Dabei werden sie nur bei Gleichstromnetzen mit passiven Gleichrichterunterwerken benötigt. Sie erhöhen die Aufnahmefähigkeit des Netzes, in dem sie für die Fahrzeuge eine Leistungssenke darstellen, die die Bremsleistung aufnehmen kann.

Mobile Energiespeicher wirken im gesamten Streckennetz und werden, wie in [11], nur bei Neufahrzeugen verbaut. Bei der Rhein-Neckar-Verkehr GmbH (rnv) in Mannheim sind mobile Speicher (Stand 2021) auch für zukünftige Fahrzeuge geplant [44]. Neben der Zwischenspeicherung der Bremsenergie können sie auch dafür verwendet werden, um oberleitungsfreie Streckenabschnitte zu durchfahren. Eine Nachrüstung ist nicht möglich, da bei der Konstruktion des Fahrzeugs die Achslasten weitgehend ausgenutzt sind und das zusätzliche Gewicht der Speicher zur Überschreitung der zulässigen Grenzwerte führen würde. Befindet sich ein Energiespeicher auf dem Fahrzeug, ist parallel zum Brems-Chopper ein bidirektionaler DC/DC-Wandler integriert, mit dem der Speicher geladen wird. Der Aufbau ist in Abbildung 2.5 gezeigt.

Stationäre Energiespeicher können bei neuen Strecken und auch in die bestehende Infrastruktur integriert werden. Neben der Aufnahme der ungenutzten Bremsleistung sind auch noch weitere Betriebsstrategien für die Speicher möglich, die unter anderem in [45] beschrieben werden: Spannungshaltung bei hohen Lasten oder schlechter Energieversorgung; als Notfallversorgung beim Ausfall des Versorgungsnetzes, um Streckenabschnitte räumen zu können; zur Reduzierung von Lastspitzen durch die Bereitstellung von kurzzeitiger Leistung (Lastglättung); als Lastverschiebung, bei der die Energiekosten reduziert werden, indem der Energiebedarf in Zeitfenster

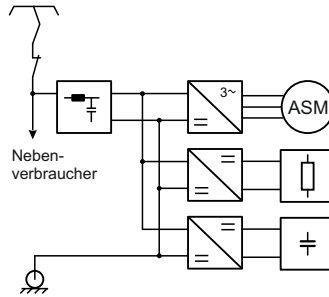


Abbildung 2.5: Vereinfachter Hauptschaltplan eines Gleichstromfahrzeugs mit Energiespeicher

verschoben wird, in denen die Energie günstiger ist; oder zur Frequenzregelung, um das Versorgungsnetzes durch Lastabwurf und der damit verbundenen Anpassung der Netzfrequenz zu stabilisieren. Beispiele für die verschiedenen Betriebskonzepte sind unter anderem in [46]–[51] zu finden. Die stationären Speicher wirken für alle Fahrzeuge und eine Änderung an der Bestandsflotte ist bei der Integration von Speichern in das Oberleitungsnetz nicht notwendig. Im Gegensatz zu den mobilen Speichern ist die Wirkweite allerdings räumlich begrenzt.

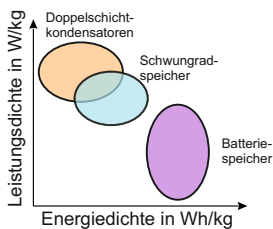


Abbildung 2.6: Prinzipielles Ragone-Diagramm für verschiedene Speichertechnologien (nach [52], [53])

Als Speichertechnologie können Batteriespeicher, Doppelschichtkondensatoren (DSK, auch als SuperCap oder UltraCap bezeichnet) oder Schwung-

radspeicher verwendet werden. Grundsätzlich können geeignete Speichersysteme mit jeder Technologie aufgebaut werden. Die Speichertypen unterscheiden sich in Leistungs- und Energiedichte, die das vereinfachte Ragone-Diagramm in Abbildung 2.6 darstellt. Doppelschichtkondensatoren zeichnen sich durch eine hohe Leistungs- und geringe Energiedichte aus, dem gegenüber stehen die Batteriespeichertechnologien mit einer hohen Energie- und einer geringen Leistungsdichte. Mechanische Schwungradspeicher liegen im Bereich der Kondensatorspeicher. Auf eine ausführliche Einführung in die Thematik wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Literatur wie [54] verwiesen. Eine gute Übersicht über die Kosten der Technologien gibt [55].

Es wurden bereits Projekte zur Speicherung der Bremsenergie mit allen Speichertechnologien durchgeführt. Einige Veröffentlichungen zu verschiedenen Anwendungen sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

Fertige Speichersysteme für Bahnanwendungen werden von verschiedenen Herstellern angeboten. Exemplarisch sind hier nur einige Systeme wie das MiTrac von Bombardier/Alstom [10], Enville von ABB [42] oder Sitras SES von Siemens [56] genannt.

Tabelle 2.1: Übersicht über einige relevante Forschungsprojekte zu Energiespeichern in Nahverkehrsanwendungen.

<b>Positionierung</b>	<b>Technologie</b>	<b>Autoren</b>	<b>Referenzen</b>
stationär	Batterie	Gillespie <i>et. al.</i> ; Ogura <i>et. al.</i>	[57], [58]
	Schwungrad	Kähler <i>et. al.</i> ; Garcia-Tabares <i>et. al.</i> ; Richardson; Flösch	[9], [59]–[61]
	Doppelschichtkondensator	Godbersen <i>et. al.</i> ; Rufer <i>et. al.</i> ; Morita <i>et. al.</i>	[46], [62], [63]
mobil	Batterie	Meinert	[64]
	Schwungrad	Henning <i>et. al.</i>	[65]
	Doppelschichtkondensator	Steiner <i>et. al.</i> ; Klohr <i>et. al.</i> ; Steiner <i>et. al.</i> ; Moskowitz <i>et. al.</i>	[10], [11], [66], [67]

## 3 Karlsruher Messstraßenbahn

### 3.1 Hintergrund und Einordnung

Um die Attraktivität und Wirtschaftlichkeit des öffentlichen Nahverkehrs zu steigern, arbeiten Hersteller, Betreiber und Forschungseinrichtungen seit Jahren an der Erfassung und Nutzung verschiedener Daten in Nahverkehrssystemen. Für eine gewinnbringende Verwendung sind ein umfassendes Systemverständnis und auch Expertise im Bereich der Datenverarbeitung notwendig.

Die meisten Neufahrzeuge werden mittlerweile mit verschiedenen Sensoren ausgestattet. Die Fahrzeug- und Komponentenhersteller nutzen die erfassten Betriebsdaten und lassen die erlangten Erkenntnisse in zukünftige Entwicklungen einfließen. Die hohe Nutzungsdauer der Fahrzeuge von 25 bis 35 Jahren [27] führt dazu, dass es für Bestandsfahrzeuge eine sinnvolle Option sein kann – möglicherweise im Rahmen von Modernisierungsmaßnahmen – ein Messsystem mit entsprechenden Sensoren nachzurüsten. Um Zulassungsfragen zu vermeiden, ist dabei ein rein passiver Aufbau vorteilhaft. [68]

Zusammen mit der Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH (AVG) wurde im Frühjahr 2019 vom Institut für Fahrzeugsystemtechnik am Karlsruher Institut für Technologie ein Stadtbahnfahrzeug mit einem umfangreichen Messsystem ausgestattet. Neben verschiedenen Fragestellungen zum Fahrzeug, dem Betrieb und der Infrastruktur sind auch die Weiterentwicklung und Validierung bestehender institutsinterner Modelle Ziele des Forschungsprojekts. Um eine Beeinflussung der Messungen durch Sonderfahrten in Randzeiten und ein daraus resultierendes abweichendes Fahrverhalten der Fah-

rerinnen und Fahrer zu verhindern, werden die Daten über einem längeren Zeitraum im täglichen Fahrgastbetrieb erfasst, um möglichst die tatsächlichen Gegebenheiten abzubilden.

Es gibt einige Projekte, bei denen bereits Messungen auf Schienenfahrzeugen durchgeführt wurden und auch noch durchgeführt werden:

Bei dem Projekt *AeroTram* vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurden von 2009 bis 2017 Messungen zur Untersuchung der Luftqualität im Umland und in der Innenstadt von Karlsruhe durchgeführt. Dazu wurde ein Stadtbahnfahrzeug mit einem Messsystem zur Erfassung von verschiedenen Luftschadstoffen ausgestattet. [69]

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) hat im Rahmen des Projekts *HavenZuG* eine Güterlokomotive mit verschiedenen Sensoren für die Erfassung von Achslagerbeschleunigungen sowie Kamera- und Positionsdaten ausgestattet. Das Ziel des Projekts ist eine prädiktive Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur. [70], [71]

Zusammen mit der DB-Systemtechnik hat die *Schweizerische Südostbahn* ein Onboard-Monitoring-System für die Infrastruktur auf einem Fahrzeug installiert. Mit Beschleunigungssensoren an den Radsatzlagern, Drehzahlgebern und Ortung findet eine Zustandsüberwachung statt. [72]

Das Projekt *TechLOK* von DB Cargo fokussiert sich auf die prädiktive Wartung bei Güterlokomotiven. Dazu werden die Daten aus den Diagnoseschnittstellen von verschiedenen Komponenten genutzt. [73]

In der Machbarkeitsstudie zur Automatisierung und zu Assistenzsystemen der Straßenbahnen (*MAAS*) der TU Darmstadt und HEAG mobilo GmbH werden Sensoren für Assistenzsysteme und die Teleoperation mittels des Mobilfunkstandards 5G untersucht. Dazu sind verschiedene Sensoren wie Radar, Lidar, Ultraschall und Kameras zur Klassifizierung von Objekten auf einer Straßenbahn verbaut. [74], [75]

Mit dem *advanced TrainLab* besitzt die Deutsche Bahn einen ICE-TD der Baureihe 605 als Versuchszug und als Labor für verschiedene Unter-



suchungen. Es sind unter anderem dreiachsige Beschleunigungssensoren mit Temperatur- und Neigungssensoren zur Überwachung des Schienenzustands an den Radsatzlagern verbaut. Aber auch Fahrten zur Erprobung der Stabilität des 5G-Netzes oder von Sensoren zur Objekt- und Hinderniserkennung wurden bereits mit dem Fahrzeug durchgeführt. [76]

Ein weiteres Projekt, welches nicht Schienenfahrzeuge betrifft, aber doch zum Bereich ÖPNV gehört, wurde von der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg durchgeführt. Dabei wurden Messungen auf der Busflotte der Hamburger Hochbahn AG durchgeführt. Eingesetzt wurden Sensoren zur Erfassung der Fahrzeugbeschleunigung, -position und des Türzustands. Das Messsystem ist eine Eigenentwicklung, bei der ein RaspberryPi als Computer auf dem Fahrzeug eingesetzt wurde und die Datenübertragung am Ende des Messtags via GSM und VPN erfolgte. Es waren 12 Busse im Fahrgastbetrieb mit dem Messsystem ausgestattet. [77]

Die meisten Messprojekte fokussieren sich auf eine einzelne Problemstellung. Das Projekt *Messstraßenbahn der TU Dresden* sticht jedoch durch seine Vielzahl von Sensoren heraus. In diesem Projekt werden sehr umfangreiche Messungen durchgeführt, wobei der Fokus auf mechanischen Größen wie Beschleunigungen und Kräfte am Wagenkasten und diversen Sensoren im vorderen Traktionsdrehgestell zur Erfassung von mechanischen Parametern (wie Einlenk- und Neigungswinkel des Traktionsdrehgestells) liegt. Es werden auch elektrische Größen wie die Traktionsleistung oder die Verlustleistung an den Bremswiderständen und einige Umgebungsparameter erfasst. Die Speicherung der Daten erfolgt auf dem Fahrzeug. [26], [78]

## **3.2 Gegebenheiten in Karlsruhe**

### **3.2.1 Schienennetz des Karlsruher Verkehrsverbunds**

Das Streckennetz des Karlsruher Verkehrsverbunds (KVV) umfasst das Eisenbahnnetz der Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH und das Straßenbahn-

netz der Verkehrsbetriebe Karlsruhe (VBK). Die Besonderheit ist, dass beide Streckennetze miteinander verbunden sind und es durch die Verwendung von 2-System-Fahrzeugen möglich ist, dass die Fahrzeuge beide Streckennetze befahren können. Für die Fahrgäste ist es somit möglich, aus der Karlsruher Innenstadt die Randbereiche ohne Umsteigen zu erreichen. Die 2-System-Fahrzeuge sind in beiden Spannungssystemen (15 kV/ 16,7 Hz und 750 V DC) einsetzbar und nach der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) [79] und nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung, BOStrab) [80] zugelassen. Dieses als *Tram-Train* bezeichnete Konzept wurde weltweit als erstes in Karlsruhe umgesetzt und wird auch als *Karlsruher Modell* bezeichnet. [81]

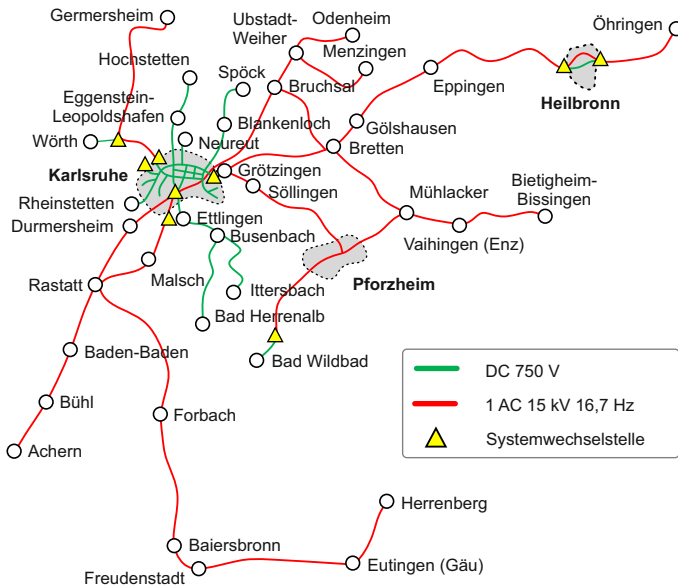


Abbildung 3.1: Das gesamte Schienennetz im Karlsruher Verkehrsverbund (nach [25])



Abbildung 3.2: Das Schienennetz im Gleichstromnetz des Karlsruher Verkehrsverbunds ohne Bad Wildbad und Heilbronn (Stand Juli 2020, nach [82])



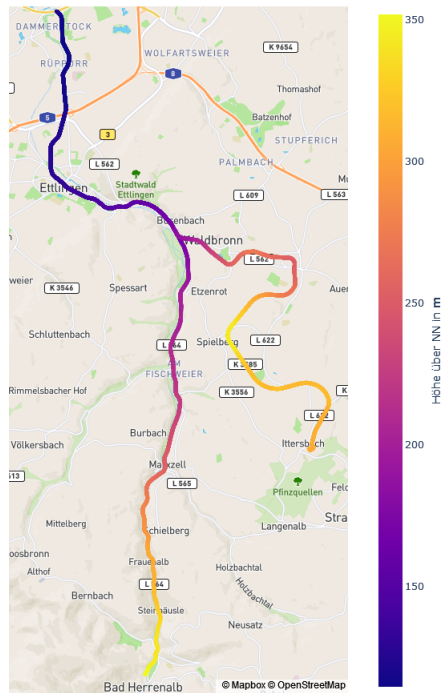


Abbildung 3.4: Höhenprofil des Schienennetzes in Karlsruhe, südlicher Teil der S1/S11 (erstellt mit ©Mapbox und ©OpenStreetMap)

Die Betrachtungen in dieser Arbeit beziehen sich auf das Gleichstromnetz in Karlsruhe. Abbildung 3.2 zeigt den vereinfachten Linienplan, Stand Juli 2020. Mit dem Fahrplanwechsel im Dezember 2021 wurde der Stadtbahntunnel in Betrieb genommen. Durch die neuen Streckenabschnitte wurde auch der Liniennetzplan im Innenstadtbereich grundlegend geändert. Es wurden Linienverläufe modifiziert und einige Linien umbenannt. Wie im Abschnitt 4.5 gezeigt werden wird, beziehen sich die Untersuchungen in dieser Arbeit auf Streckenabschnitte, die in den Außenbereichen des Netzes liegen. Für die Betrachtungen hat der Fahrplanwechsel daher hauptsächlich

einen formalen Einfluss, da sich die Fahrpläne in diesen Bereichen nicht wesentlich geändert haben.

Das Höhenprofil des Karlsruher Streckennetzes ist in zwei Abbildungen unterteilt. Abbildung 3.3 zeigt das Netz ohne den Abschnitt der S1/S11 von Rüppurr nach Bad Herrenalb bzw. Ittersbach. In der Grafik sind in orange die Brücken über die Südtangente (B10) und über die Bundesautobahn 5 zwischen Durlach und Karlsruhe erkennbar. Ansonsten verläuft das Streckennetz überwiegend flach.




Der Streckenabschnitt zwischen Karlsruhe Albtalbahnhof und Bad Herrenalb und Ittersbach ist gesondert in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Strecke führt vom Rand der Innenstadt in den Schwarzwald und weist dadurch eine deutliche mittlere Steigung auf. Von 114 m über Normalnull steigen die Strecken auf teilweise über 350 m über Normalnull. Die farbliche Skalierung der Höhe unterscheidet sich zur vorherigen Abbildung.

#### **3.2.2 Gleichstromfahrzeuge der AVG und VBK**

Die drei jüngsten Gleichstromfahrzeugtypen der AVG und VBK sind die Niederflurfahrzeuge GT6-70D/N, GT8-70D/N und NET2012. Die wesentlichen technischen Daten der Fahrzeuge aus [85]–[87] sind in der Tabelle 3.1 aufgelistet.

Bei dem NET2012 handelt es sich um den CITYLINK von Stadler, vormals Vossloh/Kiepe. Es ist die neuste Fahrzeuggeneration bei der AVG und der VBK und mit 57,5 t der schwerste Fahrzeugtyp. Es ist etwas kürzer als der GT8-70D/N. Der GT6-70D/N ist das kürzeste und leichteste Fahrzeugmodell. Im Aufbau unterscheiden sich der GT6 und der GT8 lediglich durch den beim GT8 zusätzlich vorhandenen 10 m langen Mittelwagenkasten. Dieser bedingt auch die zwei zusätzlichen Achsen beim GT8.

Tabelle 3.1: Übersicht der Niederflurfahrzeuge der AVG und VBK (Daten aus [85]–[87], Bilder vom Autor)

			
	<b>GT6-70D/N</b>	<b>GT8-70D/N</b>	<b>NET2012</b>
Baujahr	1995-2005	1999-2003	2014-2019
Länge	29,5 m	39,5 m	37,2 m
Achsen	6	8	6
Antrieb. Achsen	4	4	4
Motorisierung	4x127 kW	4x127 kW	4x125 kW
Stromversorgung	750 V	750 V	750 V
Gewicht (leer)	37,8 t	49,2 t	57,5 t
Max. Geschw.	80 km/h	80 km/h	80 km/h
Zulassung	EBO/BOStrab	EBO/BOStrab	EBO/BOStrab
Anz. der Türen	4	5	5

### 3.3 Messsystem

#### 3.3.1 Vorgehensweise

Es existieren einige Prozessmodelle, die genutzt werden können, um aus vorhandenen Datensätzen Wissen zu generieren. Beim KDD- [88] (Knowledge Discovery in Databases) und auch beim SEMMA-Prozess [89] (Sample, Explore, Modify, Model, and Assess) werden ein bestehender Datensatz vorausgesetzt und der Fokus liegt auf der Wissensgenerierung. Die Prozesse umfassen im Wesentlichen die Schritte: Auswahl des Datensatzes, Vorverarbeitung, Transformation der Daten, gezielte Datensuche und Interpretation der Ergebnisse.

Der CRISP-DM [90] (Cross Industry Standard Process for Data Mining) erweitert den KDD- und den SEMMA-Prozess um das Geschäftsverständnis. Es wird die Ist-Situation untersucht, die als Grundlage für die folgenden Prozessschritte dient. Die drei Prozesse unterscheiden sich insgesamt nur geringfügig voneinander [91].

Six-Sigma ist ein Modell zur Prozessverbesserung und kann auch für die Wissensgenerierung aus Daten verwendet werden [92]. Der Prozess besteht aus vier Schritten: Ziel definieren, Parameter messen, Analysieren und Kontrollieren / Verbessern.

In der VDI/VDE-Richtlinie 3714 [93] für die Implementierung von Big-Data-Anwendungen wird der Six-Sigma-Prozess erweitert. Das in der Richtlinie beschriebene Vorgehen ist sehr detailliert. Begonnen wird mit der *Definitionsphase*, in der die Projektziele und Kenngrößen für die objektive Bewertung festgelegt werden. In der *Sondierung der Datenlage* werden die vorhandenen Daten strukturiert und beschrieben. Zusätzlich wird überprüft, welche zusätzlichen Daten benötigt werden. Der folgende *ETL*-Prozess besteht aus drei Schritten: Heterogene Daten aus unterschiedlichen Quellen werden bei der *Extraktion* zusammengeführt. Die *Transformation* überführt die Daten in ein geeignetes Format, das die Weiterverarbeitung erleichtert. Dabei können auch schon einzelne Messfehler in den Daten bereinigt werden oder auch unterschiedliche Abstraten angepasst werden. Falls notwendig, werden beim abschließenden *Laden* die Daten für die folgende Auswertung in die passende Struktur überführt. Bei der *Modellierung* werden zunächst einfache Auswertungen gemacht, um einen Überblick über die Inhalte der Daten zu erhalten. Die Auswahl der geeigneten Modelle folgt in Abhängigkeit vom Vorwissen über das gesuchte Modellverhalten und ist ein iterativer Prozess. Anschließend erfolgt die *Validierung der Modelle*. Die *Bewertung* der Datenanalyse bezieht sich auf die anfangs definierten Projektziele. Dafür ist Domänenwissen notwendig. Um die Bewertung zu vereinfachen eignet sich die Visualisierung der Daten, die in Abhängigkeit von der Zielgruppe erfolgt. Bei einer positiven Bewertung der Erkenntnisse



aus den Analysen kann die *Umsetzung und Implementierung* durchgeführt werden. Mit der abschließenden *Dokumentation* wird ein nachhaltiger Projekterfolg sichergestellt. [93]

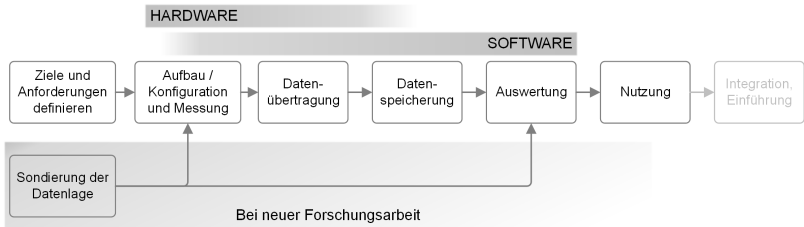


Abbildung 3.5: Vorgehensweise im Projekt Messstraßenbahn

Brunn *et al.* beschreiben in [94] ein Vorgehen für die prädiktive Instandhaltung von Schienenfahrzeugen auf Basis von Messdaten in den sechs Schritten: Ausrüstungsstrategie (Collect), Datenübertragung (Connect), Datenintegration und Aufbereitung (Store), Datenanalyse (Control), Nutzungspotentiale (Use) und Einbindung in Hintergrunddienste (Integrate).

Das Vorgehen im Projekt Messstraßenbahn ist in Abbildung 3.5 gezeigt und erweitert den Ansatz von Brunn *et al.* um einige Aspekte aus der VDI/VDE-Richtlinie 3714.

Bevor mit den Messungen begonnen werden kann, müssen alle *Ziele und Anforderungen definiert* werden. Der Aufbau des Messsystems und die Durchführung der Datenerfassung erfolgen im Schritt *Aufbau/ Konfiguration und Messung*.

Da die Messungen im Fahrgastbetrieb und somit mobil erfolgen, ist eine *Datenübertragung* notwendig. Abhängig von der Menge an Daten und der möglichen Übertragungsrates müssen die Daten auf dem Fahrzeug vorverarbeitet werden. Die Kriterien für die Auslegung hängen auch von der späteren Anwendung und damit von der maximal zulässigen Verzögerung bei der Übertragung ab. Eine aufwändige Vorverarbeitung, aber auch die Art

der Übertragung (kontinuierlich oder blockweise), kann zu Verzögerungen führen, die unter Umständen nicht tolerierbar sind.

Mit zunehmender Datenmenge rückt auch die *Datenspeicherung* in den Fokus. Während es bei einzelnen Messfahrten noch möglich ist, die Datensätze in einzelnen Dateien zu speichern und zu verwalten, sind bei Langzeitmessungen Datenbanksysteme für eine effiziente Nutzung unabdingbar.

Für die *Auswertung* der Daten wird der ETL-Prozess aus der VDE/VDI-Richtlinie 3714 angewendet.

Die Ergebnisse aus der Auswertung fließen in die *Nutzung* ein. Abhängig von der Fragestellung und den Ergebnissen können nun konkrete Handlungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die *Integration* oder *Einführung* in den Betrieb erfolgt, wenn zum Beispiel ein prädiktives Wartungssystem implementiert werden soll. Dieser Schritt ist für die vorliegende Arbeit nicht relevant. Sollen aber zukünftig aus den Messdaten im Betrieb Wartungsempfehlungen generiert werden, wird damit die Nutzung der Daten aus dem vorherigen Schritt erweitert.

Wegen der langen Laufzeit des Projekts Messstraßenbahn ist für weitere Forschungsarbeiten der Schritt *Sondierung der Datenlage* aus der VDE/VDI-Richtlinie 3714 eingefügt. Bei Untersuchungen, die auf dieser Arbeit aufbauen, kann es möglich sein, dass noch weitere Parameter erfasst werden müssen oder die bisher verwendeten Sensoren ungeeignet sind. In diesem Fall wäre eine Erweiterung oder ein Umbau des Messsystems notwendig. Das kann dazu führen, dass die Datenübertragung und die Datenspeicherung angepasst werden müssen. Sind keine Änderungen am Schritt *Aufbau/ Konfiguration und Messung* notwendig, kann direkt mit der *Auswertung* begonnen werden.

Neben den Prozessschritten ist in Abbildung 3.5 gezeigt, bei welchen Schritten Arbeiten an der Hardware und an der Software notwendig sind. Bei den Schritten von *Aufbau/ Konfiguration und Messung* bis zur *Datenspeicherung* sind Entscheidungen zur Hardware zu treffen. Die entsprechenden Systemkomponenten sind dabei Teile des Messdatenerfassungssystems,

die Schnittstelle zur Datenübertragung und möglicherweise die Server-Hardware. Der Software-Anteil nimmt mit den Prozessschritten bis zur *Auswertung* zu.

### **3.3.2 Grundsätzliche Anforderungen und Projektziele**

Neben der Erfassung von Messdaten muss das Messsystem noch einige weitere grundlegende Anforderungen erfüllen, die zum Projektbeginn aufgestellt wurden.

#### **(Daten-) Sicherheit**

Das System muss zuverlässig funktionieren und darf die Sicherheit der Fahrgäste und der Fahrerinnen und Fahrer im Betrieb nicht gefährden. Zur Beibehaltung der Zulassung des Fahrzeugs muss das Messsystem rückwirkungsfrei sein. Die ausgewerteten Daten dürfen keine Rückschlüsse auf das Fahrpersonal zulassen.

#### **Autark und unsichtbar**

Es darf keine aktive Bedienung durch das Fahrpersonal oder das Personal in den Werkstätten und Betriebshöfen für das Messsystem notwendig sein. Von der Fahrzeugdisposition wird das Fahrzeug wie jedes reguläre Fahrzeug eingesetzt. Das Fahrpersonal und die Fahrgäste bemerken die Umbauten durch das Messsystem nicht. Für sie ist die Messstraßenbahn ein herkömmliches Fahrzeug.

#### **Komfortabel**

Es muss ein Remote-Zugriff zur Überprüfung des Messsystems vorhanden sein, über welchen die regelmäßige Wartung und Überprüfung des Systems im Fahrgastbetrieb möglich ist. Die Messdatenübertragung erfolgt automatisiert.

Das Ziel des Projekts Messstraßenbahn ist der Aufbau einer Forschungsplattform, mit der verschiedene Fragestellungen untersucht werden können. Ein zentrales Forschungsthema im Projekt ist die Energieeffizienz. Die

Messdaten sollen als Grundlage für die Optimierung der Oberleitungsinfrastruktur aber auch von Fahrzeugkomponenten wie bei Untersuchungen zu intelligenten Klimatisierungskonzepten dienen. Es sollen daher nicht nur der Energiefluss auf dem Fahrzeug, sondern auch Umgebungsparameter aufgezeichnet werden. Das ermöglicht, dass die unterschiedlichen Abhängigkeiten, wie Witterungseinflüsse, in den Analysen berücksichtigt oder untersucht werden können. Auch die Realisierung von Fahrassistenzsystemen für eine pünktliche und energieeffiziente Fahrweise soll möglich sein. In Untersuchungen zur Steigerung des Fahrgastkomforts und der Streckenzustandsanalysen sollen Empfehlungen für die Instandhaltung der Schieneninfrastruktur oder gar die Entwicklung von Alterungsmodellen möglich sein. Wegen der Vielzahl an Möglichkeiten einer Messstraßenbahn soll das Messsystem modular aufgebaut sein, was Erweiterungen mit zusätzlichen Sensoren leicht ermöglicht.

### 3.3.3 Messgrößen

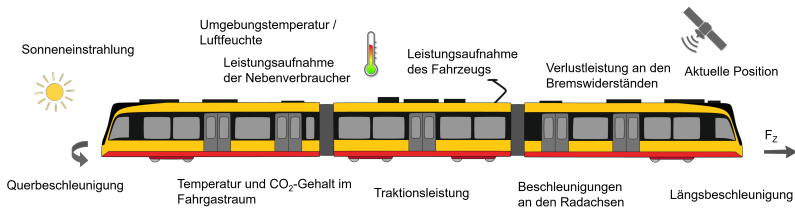


Abbildung 3.6: Parameter, die von der Messstraßenbahn erfasst werden.

Die in Abbildung 3.6 gezeigten Parameter kommen aus unterschiedlichen Bereichen und sind auf dem gesamten Fahrzeug verteilt. Sie lassen sich in die vier Gruppen elektrische und mechanische Parameter sowie Umgebungs- und Komfortparameter unterteilen.

Tabelle 3.2: Übersicht zu einigen Messgrößen der Messstraßenbahn

<b>Gruppe</b>	<b>Parameter</b>
Elektrische Parameter	Traktionsströme Oberleitungsspannung Bremswiderstandsverluste Nebenverbraucherstrom
Mechanische Parameter	Beschleunigungen am Wagenkasten und an den Radsatzlagern (vorne und hinten)
Umgebungsparameter	Fahrzeugposition Sonneneinstrahlung Außentemperatur Relative Luftfeuchte
Fahrzeug	Türzustand Fehlermeldungen verschiedener Komponenten Fahrzeugsandung Aktuell befahrene Linie

In der Tabelle 3.2 sind die Gruppen und jeweils einige Beispielparameter aufgelistet. Für einen Teil der Parameter sind Sensoren wie Strom- oder Spannungswandler verbaut, der andere Teil wird über den Fahrzeug- und Komfort-CAN-Bus erfasst. Insgesamt sind 25 zusätzliche Sensoren mit 48 Datenkanälen zusätzlich auf dem Fahrzeug integriert. Durch die Aufzeichnung der CAN-Busse werden 223 weitere Parameter aufgezeichnet. Enthalten sind dabei auch verschiedene Zustandsgrößen wie die Beleuchtung im Innenraum, die Türzustände, die Fehlerzustände verschiedener Komponenten und auch Daten der Klimaanlage (Ansaug- und Ausblastemperatur).

Das Messsystem erfasst die Parameter mit zwei unterschiedlichen Abtastraten. Für Werte, die sich langsam ändern, wird eine Abtastrate von 10 Hz verwendet und für Parameter mit einer höheren Dynamik wird 2,4 kHz verwendet. Wie in [93] empfohlen, befinden sich die genauen Parameter der verschiedenen Sensoren (wie Hersteller, Typ, Genauigkeit, Wertebereich usw.) in den Metadaten der Datenbank und sind somit für alle Nutzer verfügbar.

Die Erweiterung des Messsystems im August 2020 umfasst die Aufzeichnung der Daten vom Fahrzeug-CAN-Bus. Dadurch stehen zusätzlich die Drehmomente der Traktionsmaschinen und Drehzahlen der angetriebenen Achsen zur Verfügung. Der Nutzen dieser Erweiterung wird in Abschnitt 4.2 diskutiert. Bei den Auswertungen muss berücksichtigt werden, dass diese Daten nicht für den gesamten Messzeitraum vorhanden sind.

#### **3.3.4 Messsystem-Hardware**

Die Sensoren sind auf dem Fahrzeug verteilt. Um die Empfindlichkeit gegenüber Störeinstrahlung zu minimieren, sind die Signalleitungen möglichst kurz gehalten. Es wird daher ein modulares Messsystem mit mehreren Messkarten verwendet, die in der Nähe der Sensoren positioniert sind.

Abbildung 3.7 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Messsystems. Die Komponenten sind an vier Positionen im Fahrzeug verbaut. In einer zusätzlichen Dachbox befindet sich der Datenrekorder, der das Messsystem steuert und die Messkarten synchronisiert. Um eine möglichst gute Sichtverbindung zum Himmel – und damit zu den Satelliten – zu ermöglichen, ist der GNSS-Empfänger (Globales Navigationssatellitensystem) auf der Dachbox montiert. Ebenfalls dort sind das LTE-Gateway (Long-Term-Evolution) für die Datenübertragung über das Mobilfunknetz und eine Messkarte für die Umgebungs- und Traktionsparameter verbaut.

Im Fahrzeug befinden sich eine Messkarte für die Innenraumparameter (Temperatur, CO<sub>2</sub>-Sensoren usw.) und eine Messkarte zum Loggen der CAN-Busse.

Im Fahrerstand und im Hilfsfahrerstand befinden sich jeweils Messkarten für die Beschleunigungssensoren am Traktionsdrehgestell und am Wagenkasten.

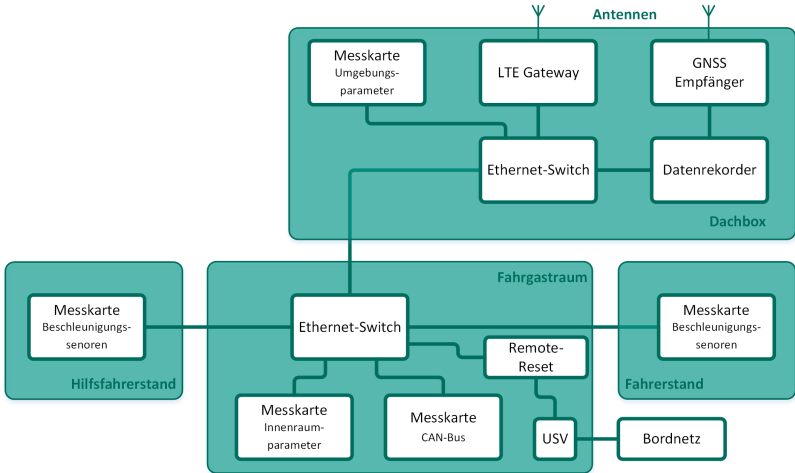


Abbildung 3.7: Schematische Anordnung des Messsystems auf dem Fahrzeug

Durch die Fahrzeuglänge von 37,5 m gibt es für die Datenübertragung zwischen den Komponenten des Messsystems nur wenige geeignete Möglichkeiten. Für eine hohe Zuverlässigkeit wird ein auf Ethernet basierendes Messsystem verwendet. Damit sind grundsätzlich Kabellängen von bis zu 100 m möglich. Für die synchrone Abtastung der Kanäle nutzt das Messsystem das Precision Time Protocol aus dem Ethernet Standard [95]. Verbaut sind Gigabit-Switches mit CAT-6A-Verkabelung.

In der Karlsruher Innenstadt ist das kostenlose Netz KA-WLAN [96] vorhanden, die Eignung zur Übertragung von Datensätzen von einer fahrenden Straßenbahn ist jedoch schwer abzuschätzen, da der WLAN-Standard nicht für „schnell“ bewegliche Objekte entwickelt wurde. Das Fahrzeug kann nach Betriebsschluss an unterschiedlichen Stellen im Streckennetz abgestellt werden. Zusätzlich kann die Übertragung der Messdaten über WLAN

nicht immer garantiert werden oder wäre nur mit erheblichen Aufwand möglich. Zwar können die Daten auf dem Fahrzeug zwischengespeichert werden, ein Zugriff auf das Messsystem im Betrieb wäre jedoch nur stark eingeschränkt möglich. Folglich wird für die Datenübertragung das LTE-Netz verwendet.

Die Software zur Datenerfassung läuft im Fahrzeug auf dem Datenrekorder und wird vom Hersteller des Messsystems bereitgestellt.

### Messpunkte im Stromlaufplan

In Abbildung 3.8 ist der Stromlaufplan der Messstraßenbahn mit den Sen-

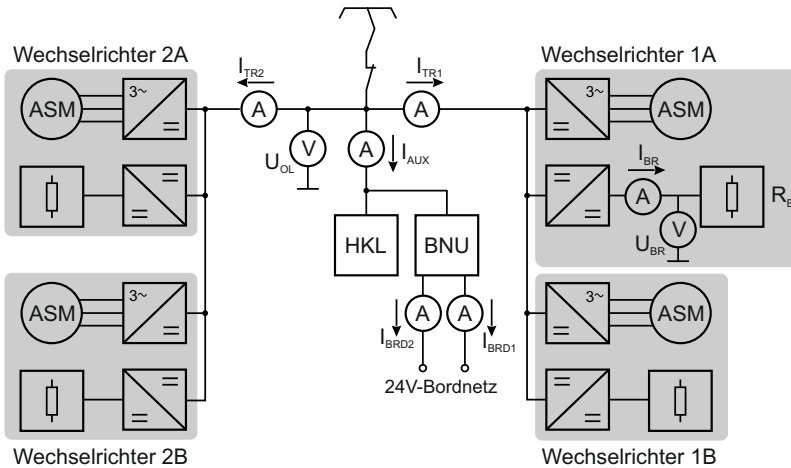


Abbildung 3.8: Übersicht über die Messpunkte im Stromlaufplan

sorpositionen des Messsystems dargestellt. Für die vorderen ( $i_{TR1}$ ) und für die hinteren ( $i_{TR2}$ ) Traktionsumrichter ist jeweils ein Stromwandler verbaut. Ein weiterer Stromwandler ist für die Nebenverbraucher ( $i_{AUX}$ ) vorhanden. Dieser misst den Strom in die Heiz- und Klimaanlage (HKL) und in den Bordnetzumrichter (BNU). Durch die Summierung der drei Stromwandler ( $i_{TR1} + i_{TR2} + i_{AUX}$ ) lässt sich der Strom im Stromabnehmer berechnen. Als



Sensoren werden Gleichstromwandler mit Stromausgang verwendet. Ein Spannungswandler misst die Spannung an der Oberleitung. Der Wandler ist über eine zusätzliche Sicherung angeschlossen. Für das 24V-Bordnetz sind separate Gleichstromwandler vorhanden, um auch die Leistung der Beleuchtung bei den Untersuchungen zu berücksichtigen zu können. An einem Bremswiderstand sind ein Gleichstrom- und ein Spannungswandler für die Messung der Verlustleistung vorgesehen.

### **3.3.5 Datenübertragung**

Zusätzlich zur Messsoftware werden auf dem Datenrekorder einige Skripte ausgeführt, die die Verbindung zum Institut herstellen und auch die Übertragung der Messdaten vornehmen. Die Messdaten werden in Blöcken übertragen, sobald das Messsystem mit dem Institutsnetz verbunden ist. Bei einem Abbruch der Datenverbindung werden die Daten auf dem Fahrzeug zwischen gespeichert. Zur effizienten Übertragung werden die Daten komprimiert. Zwar ist dadurch zusätzlicher Berechnungsaufwand auf dem Datenrekorder notwendig, es lassen sich jedoch hohe Kompressionsrate erzielen, die im Bereich von ca. 75 % liegen. Das zu übertragende Datenvolumen lässt sich dadurch stark reduzieren und die Daten sind für die Archivierung im Institut bereits komprimiert.

### **3.3.6 Datenspeicherung**

Für die Speicherung der Daten gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: extern in einer Cloud bei einem Drittanbieter oder intern in der eigenen Infrastruktur.

Cloud-Lösungen bieten einige Vorteile: Dadurch, dass sich eine spezialisierte Firma um die Infrastruktur kümmert, binden die Durchführung von Backups und auch die Wartung der Serverinfrastruktur keine internen Ressourcen. Zusätzlich ist schnell und komfortabel eine Skalierung der Server möglich. Dieser Service ist jedoch unter Umständen teurer als die Betreuung

einer eigenen Infrastruktur und es kann zu einer Abhängigkeit vom Anbieter kommen. Auch müssen die Vertrauenswürdigkeit des Anbieters und die Umsetzung des Datenschutzes gewährleistet werden.[97]

Die Daten der Karlsruher Messstraßenbahn werden in einer Datenbank auf einem Server im Institut gespeichert. Datenbanken bieten mehrere Vorteile: die Verwaltung von großen Datenmengen, die Möglichkeit der parallelen Nutzung, eine Benutzerverwaltung, mit der bestimmte Rechte für Nutzer und Gruppen vergeben können, und eine leistungsstarke Datenverarbeitung. Allerdings sind Datenbanken auch mit administrativen Aufwand verbunden und die notwendige Infrastruktur muss vorhanden sein oder beschafft und gewartet werden. Für die Nutzung ist je nach Kenntnisstand eine Einarbeitung notwendig.

Es gibt eine Vielzahl an Datenbankmanagementsystemen (DBMS), die sich teilweise gravierend unterscheiden. Die Bachelorarbeit von J. Hurlmeier [98] vergleicht verschiedene DBMS auf Eignung für die Daten der Messstraßenbahn und empfiehlt PostgreSQL [99] mit der Erweiterung TimescaleDB [100] als DBMS. Das DBMS wird seit 1996 kontinuierlich entwickelt, ist quelloffen und nach [101] (Stand Juli 2021) eines der am häufigsten verwendeten DBMS. Durch die hohe Verbreitung sind viele Erweiterungen verfügbar und es gibt gute Unterstützung der PostgreSQL-Gemeinschaft in online-Foren.

Viele Auswertungen erfolgen in Abhängigkeit von der Position des Fahrzeugs im Streckennetz. Für die Analyse von räumlichen Daten wird für PostgreSQL die Erweiterung für Geoinformationssysteme (GIS) PostGIS [102] verwendet. PostgreSQL wird dadurch um Datentypen (wie Punkte, Linien oder Polygone), zusätzliche Indizes und einer Vielzahl von Funktionen erweitert, die die Abfragen vereinfachen und beschleunigen [103].

Die Analyse der Daten erfolgt jeweils unter unterschiedlichen Aspekten. Daraus resultiert, dass für die Vorverarbeitung der Daten verschiedene Algorithmen verwendet werden. Als Beispiel sei die Korrektur der Positionsda-

ten angeführt: Werden die Beschleunigungen an den Achslagern unter dem Aspekt möglicher Gleislagefehler ausgewertet, muss die Position möglichst präzise bestimmt werden. Für die Auswertung des Energieverbrauchs ist bereits eine geringere Präzision ausreichend. Um alle Auswertungsaspekte abdecken zu können, werden die Daten in der Datenbank in einem eigenen Schema als Rohdaten abgelegt. Zwar ist für die Nutzung dadurch eine Vorverarbeitung notwendig, die Nachvollziehbarkeit von Änderungen in den Daten wird jedoch für die Nutzer transparent und es wird die Konsistenz in den eigenen Ergebnissen erleichtert.

Um vorverarbeitete Daten unter den Nutzern auszutauschen, gibt es ein öffentliches Schema. Auf dieses können alle Mitarbeiter und Studierende des Instituts zugreifen. Für die individuelle Arbeit steht den Nutzern ein eigenes Schema mit entsprechenden Rechten zur Verfügung.

Die Inhalte der Datenbank sind thematisch gruppiert und die Tabellen sind über eindeutige Schlüssel miteinander verknüpft. Für den Datenimport in die Datenbank sind die drei Schritte vom ETL-Prozess notwendig: Dekomprimierung der übertragenen Messdaten (Extraktion), Vorverarbeitung der Rohdaten entsprechend dem Datenbankschema (Transformation) und das Schreiben der Daten in die Datenbank (Laden). Der Ablauf ist sequenziell, die Bearbeitung der einzelnen Schritte erfolgt jedoch nebenläufig in einzelnen Prozessen. Für die Übergabe der Daten zwischen den Prozessen werden Queues (Warteschlangen) verwendet.

### 3.4 Auswertungsbeispiele

#### 3.4.1 Laufwiderstand

In seiner Bachelorarbeit am Institut für Fahrzeugsystemtechnik hat S. Leineweber [104] mit den Daten der Messstraßenbahn die Parameter  $a_R$ ,  $b_R$  und  $c_R$  für den empirischen Laufwiderstand  $R_L$  vom NET2012

$$R_L = a_R v^2 + b_R v + c_R \quad (3.1)$$

geschätzt. Dazu wird das Streckennetz in Segmente verschiedener Gruppen (ebene Strecke G1, positive Steigung G2 und negative Steigung G3) unterteilt.

Abbildung 3.9 zeigt die Auswertung. Die Parameter für den Graphen der empirischen Formel sind institutsinterne Referenzdaten. Die ermittelten Parameter der Regressionskurve sind:

$$a_R = -0,007 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2/\text{s}^2} \quad (3.2)$$

$$b_R = 0,38 \frac{\text{kN}}{\text{m}/\text{s}} \quad (3.3)$$

$$c_R = 0,62 \text{ kN} \quad (3.4)$$

Eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse findet sich in der Bachelorarbeit.

#### 3.4.2 Energiebedarf der Nebenverbraucher

Der Energiebedarf der Nebenverbraucher wird maßgeblich durch die Umgebungstemperatur beeinflusst. In der Energiebedarfsanalyse in [105] wird der prozentuale Anteil der Nebenverbraucherenergie in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt. Abbildung 3.10 zeigt die Ergebnisse für verschiedene Linien im Streckennetz. In der Analyse werden 135 Betriebstage

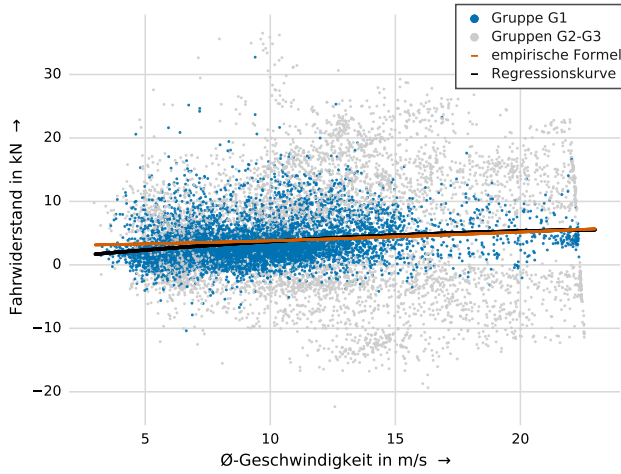


Abbildung 3.9: Laufwiderstand der Messstraßenbahn (aus [104])

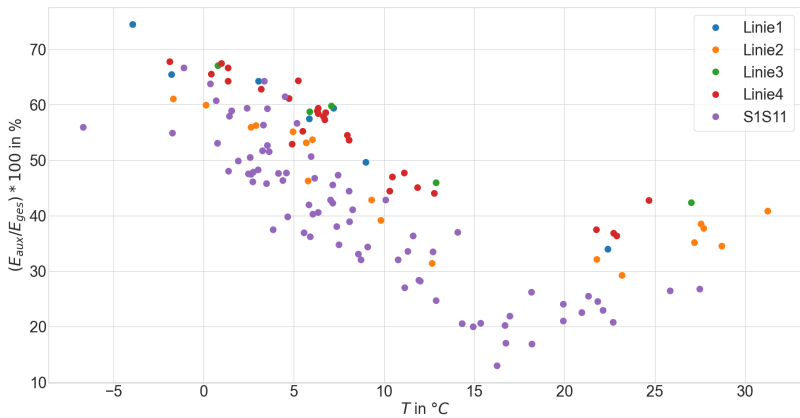


Abbildung 3.10: Prozentualer Anteil der Nebenverbraucherenergie bezogen auf den Gesamtenergiebedarf in Abhängigkeit von der Temperatur (aus [105])

ausgewertet.

Trotz der geringen Anzahl von Betriebstagen ist ein erhöhter Anteil der Nebenverbraucherenergie bei hoher und geringer Temperatur erkennbar. Besonders das Heizen des Fahrgastraums an kalten Tagen ist sehr energieintensiv.

Bei den Innenstadtlinien (L1 bis L4) liegt der Anteil der Nebenverbraucherenergie insgesamt etwas höher als bei den Linien S1/S11, bei denen ein großer Teil der Strecke außerhalb der Innenstadt liegt. Durch die höhere gefahrene Geschwindigkeit ist der Traktionsenergiebedarf in den Randbereichen des Streckennetzes insgesamt größer. Zudem führt der tendenziell größere Haltestellenabstand zu weniger Luftaustausch mit der Umgebung, so dass eine energieeffizientere Klimatisierung des Innenraums möglich ist.

#### **3.4.3 Instandhaltung der Infrastruktur**

Die folgenden Abbildungen sind Ergebnisse aus der Masterarbeit von P. Kolb [106], die am Institut geschrieben wurde. In der Arbeit werden die Daten der Beschleunigungssensoren am vorderen Drehgestell ausgewertet und es wird untersucht, wieweit aus den Daten Rückschlüsse auf den Zustand der Infrastruktur möglich sind.

In Abbildung 3.11 sind zwei Durchfahrten eines Streckenabschnitts auf der Ruppurrer Straße in Karlsruhe gezeigt. Die Messfahrten erfolgten an unterschiedlichen Tagen; vor und nach der Durchführung von Instandsetzungs- und Umbaumaßnahmen. Bei den Instandsetzungsmaßnahmen wurde der Oberbau der Gleise erneuert und zeitgleich wurde im Rahmen von Umbaumaßnahmen ein neues Infrastrukturelement in den Streckenabschnitt integriert.

Der linke Bereich der Abbildung zeigt die Messdaten mit der ursprünglichen Infrastruktur. Im rechten Bereich sind die Messdaten nach der Durchführung der Maßnahmen im Streckenabschnitt gezeigt. In den jeweils oberen Grafi-

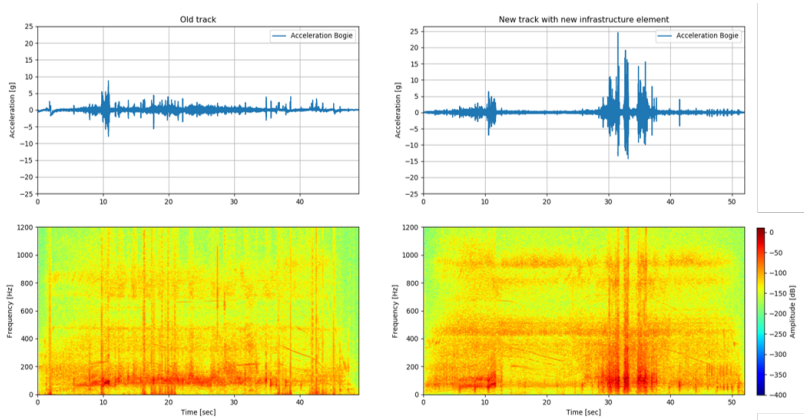


Abbildung 3.11: Kurzzeit-Spektrum der Beschleunigungssensoren am vorderen Traktionsdrehgestell für einen Streckenabschnitt vor und nach Umbaumaßnahmen (aus [106])

ken sind die zeitlichen Verläufe der Beschleunigung in vertikaler Richtung am vorderen Radsatzlager des Drehgestells dargestellt. Die unteren Grafiken zeigen das Kurzzeit-Frequenzspektrum (Frequenzanteile über die Zeit). Dabei ist die Intensität der Frequenzen farblich dargestellt.

Für den Zeitraum zwischen 12 und 25 Sekunden ist eine deutlich geringere Vibration erkennbar. In diesem Zeitabschnitt fährt das Fahrzeug über den erneuerten Oberbau. Die erhöhten Beschleunigungswerte nach dem Umbau im Zeitfenster zwischen 30 und 40 Sekunden werden von dem zusätzlichen Infrastrukturelement verursacht. Die schräg verlaufenden Linien im Kurzzeit-Frequenzspektrum sind drehzahlabhängige Einflüsse wie Motorschwingungen oder mögliche Lagerschäden.

Mit den Daten der Beschleunigungssensoren lassen sich Instandsetzungsmaßnahmen an der Infrastruktur beobachten und bewerten, aber auch Infrastrukturelemente können identifiziert werden. Die Datengrundlage liefert dazu die Messstraßenbahn.





## 4 Ungenutzte Bremsenergie im Karlsruher Streckennetz

### 4.1 Datenaufbereitung

#### 4.1.1 Positionsdaten

Das bei der Inbetriebnahme verbaute GNSS-Modul hat die Position mit einer Abtastrate von 1 Hz erfasst. Von dem Datenrekorder werden die Daten mit der Systemabtastrate von 10 Hz aus dem Modul ausgelesen. Dabei wird mehrfach der gleiche Wert ausgelesen. Bei einer maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit von 22 m/s besteht eine deutliche Abweichung zwischen der tatsächlichen Position und der erfassten Position. Abbildung 4.1 verdeutlicht die Problematik für den eindimensionalen Fall. Das zu erfassende Signal  $y(t)$  ist in schwarz dargestellt. Es wird mit einer Abtastfrequenz von 1 Hz erfasst. Die Interpolation auf die Abtastrate von 10 Hz (in blau) erfolgt durch mehrfaches Auslesen der Messwerte und entspricht einer *Sample-&Hold-Operation* (siehe [107]). Durch eine geeignetere Interpolation würde sich das ideal interpolierte Signal (in grün) ergeben.

Für die Interpolation der Positionsdaten hat sich der gleitende Mittelwert als geeignet erwiesen. Um die Gruppenlaufzeit zu korrigieren, muss beim ursprünglichen gleitenden Mittelwert das interpolierte Signal verschoben werden. Da die Interpolation in der Nachverarbeitung durchgeführt wird, kann der zentrierte gleitende Mittelwert [108] verwendet werden. Dabei wird das Interpolationsfenster über den zu berechnenden Wert zentriert, indem einige

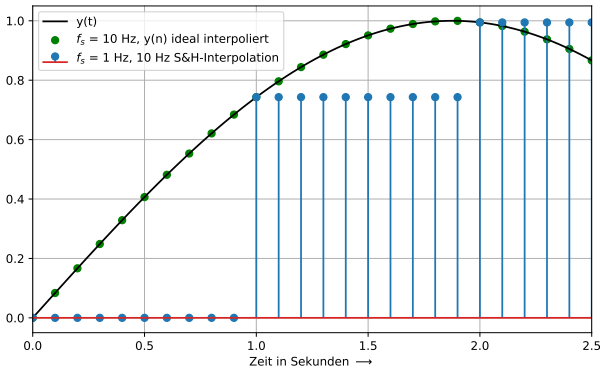


Abbildung 4.1: Interpolation von Abtastwerten

Abtastwerte vorher und einige Abtastwerte nach dem zu berechnenden Wert verwendet werden. Für ein Filter 3ter Ordnung gilt:

$$m(t) = \frac{1}{3} [x(t-1) + x(t) + x(t+1)] \quad (4.1)$$

Neben der Interpolation der Messwerte werden durch den gleitenden Mittelwert einzelne Ausreißer in den Messdaten entfernt. Längere Fehler im Signal werden nicht interpoliert, sondern durch eine Fensterung der Daten auf den Koordinatenbereich von Karlsruhe gefiltert. Das Vorgehen hat sich als tauglich erwiesen, da eine Interpolation deutlich aufwendiger ist und längere Aussetzer im Signal nur selten sind.

Abbildung 4.2 zeigt exemplarisch die Interpolation der Messwerte für einen kurzen Streckenabschnitt im Bereich Karlsruhe Rheinhafen. Bei den Rohdaten fallen jeweils 10 Abtastwerte auf eine Position. Die Nutzung des gleitenden Mittelwerts erhöht die Positionsauflösung bereits deutlich. Dabei wird ein Filter 10-ter Ordnung verwendet.

Aufgrund eines Defekts am GNSS-Empfänger wird seit Januar 2020 ein

neues Modul verwendet, welches die Positionsdaten mit 5 Hz erfasst. Dadurch wird die Positionsbestimmung genauer, die Interpolation wird zur besseren Glättung jedoch weiterhin durchgeführt.



Abbildung 4.2: Auswirkung der Positionsinterpolation: (a) Rohdaten (1 Hz) (b) Interpolierte Positionen (10 Hz) (erstellt mit ©OpenStreetMap)

### 4.1.2 Referenzstrecken

Die Streckendaten des gesamten Gleichstromstreckennetzes der VBK und der AVG liegen digitalisiert als Referenz vor. Die Daten enthalten für jede Fahrriechtung die Koordinaten, den Streckenmeter (bezogen auf den jeweiligen Anfang) und die Höhe. Die Messdaten werden auf die Referenzstrecke gemappt. Dazu werden Funktionen aus der PostgreSQL-Erweiterung PostGIS verwendet, siehe Unterabschnitt 3.3.6.

### 4.1.3 Erstellung von Übersichtskarten

Für die Darstellung von Ergebnissen, die umfangreicher sind als nur eine Strecke oder ein Streckenabschnitt, sind Karten sehr gut geeignet. Sie stellen die Zusammenhänge übersichtlich dar und bieten die Möglichkeit, Sachverhalte geographisch zuzuordnen. Besonders bei räumlich verteilten Untersuchungen sind sie ein praktisches Werkzeug. Bei der Darstellung von großen Datensätzen können leicht Details überblendet werden oder die effiziente Nutzbarkeit durch lange Ladezeiten der Karten erschwert werden.

Um das zu verhindern, wird im Folgenden ein Algorithmus beschrieben, mit dem effizient Karten erstellt werden können. Die Gesamtkarte wird aus einzelnen Streckenabschnitten zusammengesetzt und der Algorithmus wird auf jeden Streckenabschnitt angewendet. Dabei werden die Start- und die Endhaltestelle vorgegeben.

Für jeden Streckenabschnitt werden zunächst die Referenzstreckendaten eingelesen. Abhängig von der Auflösung der resultierenden Karte werden die Daten der Referenzstrecke auf ein festgelegtes Raster reduziert. In dieser Arbeit wird ein Raster von 100 m verwendet. Danach werden die Daten der Fahrten in beide Fahrtrichtungen für den Streckenabschnitt ausgelesen. Für die geographische Zuordnung müssen neben den auszuwertenden Parametern auch die Fahrzeugposition ausgelesen werden. Die Daten werden dann auf die Positionen der reduzierten Referenzstrecke zugeordnet. Bei Energiekarten, die die mittlere Energie für jeden Referenzpunkt enthalten, muss auf die Anzahl der ausgewerteten Fahrten normiert werden.

In dieser Arbeit werden Verlustenergiekarten und Geschwindigkeitskarten verwendet. Der Algorithmus kann aber auch für andere Kartentypen verwendet werden.

Die Messwerte umfassen lediglich die Fahrten in Einzeltraktion (ET). Sollen auch Doppeltraktionsfahrten (DT) berücksichtigt werden, ist der Anteil an ungenutzter Bremsenergie höher. Für einen Streckenabschnitt ist die Anzahl der Fahrten in Einzeltraktion und Doppeltraktion bekannt. Mit der Gleichung

$$E_{BR,ges} = E_{BR,ET} \frac{n_{ET} + k \cdot n_{DT}}{n_{ET} + n_{DT}} \quad (4.2)$$

kann die Gesamtenergie  $E_{BR,ges}$  durch die Berücksichtigung der Anzahl der Fahrten  $n$  in der jeweiligen Traktionsform und des Gewichtungsfaktors  $k$  berechnet werden.

In dieser Arbeit wird angenommen, dass die ungenutzte Bremsenergie bei Doppeltraktion doppelt so hoch ist wie bei Einzeltraktion. Damit gilt  $k = 2$ .

## 4.2 Ermittlung der Leistung an den Bremswiderständen

### 4.2.1 Berechnung

In Abbildung 4.3 ist der Hauptschaltplan des Antriebsstrangs vom NET2012 gezeigt. Die Grafik erweitert Abbildung 3.8 aus Unterabschnitt 3.3.4 um die für dieses Kapitel relevanten Größen.

Die Wechselrichter erhalten alle die gleichen Steuerungssignale, arbeiten jedoch dahingehend unabhängig voneinander, dass sie die angeschlossene Asynchronmaschine individuell regeln.

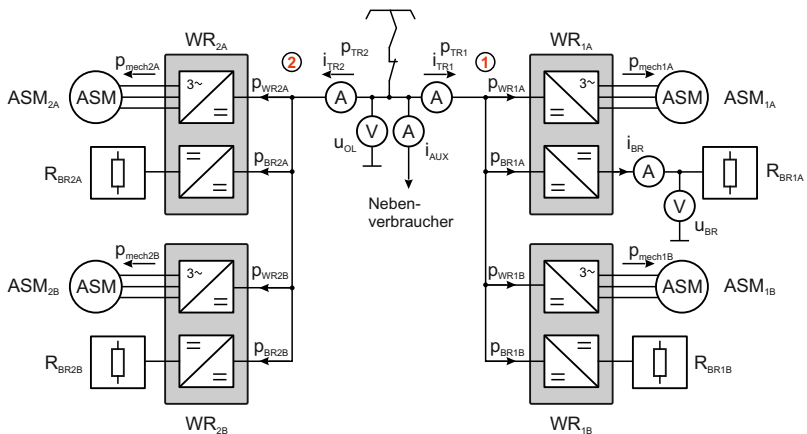


Abbildung 4.3: Hauptschaltplan für das Straßenbahnfahrzeug mit den Sensoren für die Messung am Bremswiderstand.

### Messung am Bremswiderstand

Damit die Widerstände die Bremsleistung aufnehmen, muss die maximal zulässige Oberleitungsspannung überschritten werden. Deren Wert ist für alle Wechselrichter auf dem Fahrzeug fest vorgegeben. Abhängig von der gemessenen Spannung steuert der Wechselrichter den Brems-Chopper so, dass, sobald die Oberleitung nicht die gesamte Bremsleistung aufnehmen

kann, ein Teil der Leistung in den Bremswiderstand fließt und die Oberleitungsspannung nicht weiter ansteigt.

Bei der Planung des Messsystems wurde davon ausgegangen, dass sich die Bremsleistung auf alle Bremswiderstände gleichmäßig aufteilt. In diesem Fall gilt:

$$p_{BR,mess} = u_{BR} i_{BR} = \frac{1}{4} p_{BR,ges} \quad (4.3)$$

Die Umrichter besitzen jeweils eigene Spannungswandler, die die Oberleitungsspannung messen. Fertigungstechnisch bedingt besitzen die Spannungswandler eine geringe Messabweichung. Jeder Wechselrichter misst einen leicht unterschiedlichen Spannungswert, was eine bedeutende Auswirkung hat: Durch die unterschiedlichen Messwerte werden die Bremswiderstände unterschiedlich angesteuert. Bei einigen Wechselrichtern wird der maximal zulässige Wert früher erreicht, wodurch der Bremswiderstand früher eingeschaltet wird. Dies macht sich besonders bei geringer und mittlerer Bremsleistung bemerkbar. Mit zunehmender Bremsleistung reicht die Leistung des einen Widerstandes nicht aus, um die Oberleitungsspannung zu begrenzen, weshalb weitere Widerstände ebenfalls beginnen Bremsleistung aufzunehmen. Die Bremsleistung verteilt sich folglich asymmetrisch auf die Bremswiderstände.

Tabelle 4.1 zeigt die mittlere Abweichung der einzelnen gemessenen Werte. Dabei wird eine Fahrt von Bad Herrenalb nach Ettlingen Albgaubad (22.01.2021, Abfahrt 11:05 Uhr in Bad Herrenalb) mit 13178 Messwerten analysiert. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen innerhalb der typischen Toleranz von Spannungswandlern liegen, die im Bahnbereich verwendet werden. [109]

Das Messsystem erfasst die Leistung des Bremswiderstands von der Asynchronmaschine 1B. Der Wechselrichter hat den Spannungswandler mit der größten Toleranz nach unten, wodurch alle anderen Bremswiderstände zuvor eingeschaltet werden. Es ist also nicht möglich, mit den Messdaten an diesem einen Bremswiderstand die gesamte Verlustleistung an den Wider-

Tabelle 4.1: Mittlere Oberleitungsspannung für eine Fahrt von Bad Herrenalb nach Ettlingen Algbaubad und Abweichung vom Mittelwert aller Messwerte (836 V).

	<b>Mittelwert</b>	<b>Abweichung</b>
$u_{OL}$	837 V	+0,1 %
$u_{ASM,1A}$	835 V	-0,2 %
$u_{ASM,1B}$	833 V	-0,4 %
$u_{ASM,2A}$	836 V	0,0 %
$u_{ASM,2B}$	841 V	+0,5 %

ständen zu ermitteln. Es kann aber eine Abschätzung für die Leistung an den Bremswiderständen vorgenommen werden. Das Vorgehen ist im Abschnitt A.1 erläutert. Zur Auswertung der Messdaten ist dieses Verfahren jedoch zu ungenau, weshalb eine alternative Methode verwendet wird.

### Kennfeldmethode zur Berechnung der Verlustleistung

Wie bereits in Unterabschnitt 3.3.3 beschrieben wurde, werden seit August 2020 die Daten vom Fahrzeugbus erfasst. Damit stehen zusätzliche Daten zur Verfügung, die einen messtechnischen Ansatz zur Berechnung der Bremsleistung ermöglichen.

Der Fahrzeugbus enthält neben der von den Wechselrichtern gemessenen Oberleitungsspannung auch das Luftspaltmoment der einzelnen Maschinen ( $M_{\text{mech},i}$ ) und die Drehzahl der einzelnen Achsen ( $n_i$ ). Unter Berücksichtigung der Läufer- und Lagerverluste und der Getriebeübersetzung (i) können für die Traktionsmaschinen das Drehmoment und die Drehzahl an der Welle berechnet werden. Für die Leistung der Traktionsmaschinen gilt die Gleichung

$$p_{\text{mech}} = 2\pi nM \quad (4.4)$$

Beim Bremsen gilt  $p_{\text{mech}} < 0$ . Für die Ausgangsleistung des Wechselrichters muss dessen Wirkungsgrad berücksichtigt werden. Die Leistung am Bremswiderstand  $p_{\text{BR}}$  ergibt sich dann aus der Differenz der gemessenen Traktionsleistung  $p_{\text{TR}}$  und der berechneten Wechselrichterleistung  $p_{\text{WR}}$  (d.h.  $p_{\text{BR}} = p_{\text{TR}} - p_{\text{WR}}$ ).

Diese Berechnung enthält folgende Problematik: Die Rad-Drehzahlen werden mit dedizierten Sensoren erfasst. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Drehzahlen im Bereich der Sensorabweichung liegen und damit nur geringfügig von den tatsächlichen Werten abweichen. Die von dem Fahrzeugbus übertragenen Drehmomente sind jedoch berechnete Größen. Für die Bestimmung werden die Maschinengleichungen verwendet, deren genaue Parameter nicht bekannt sind. Die über den Fahrzeugbus übertragenen Drehmomente  $\hat{M}_{\text{ASM},i}(t)$  enthalten folglich einen Fehler  $\varepsilon$  und können durch

$$\hat{M}_{\text{ASM},i}(t) = M_{\text{ASM},i}(t) + \varepsilon \quad (4.5)$$

beschrieben werden.

Für die Nutzung bei der Fahrzeugsteuerung muss das Ergebnis nicht präzise sein, eine Schätzung ist ausreichend. Bei der Berechnung der Traktionsleistung und damit auch der Bremsleistung können die Drehmomente vom Fahrzeugbus nicht direkt verwendet werden.

Der Wirkungsgrad einer Asynchronmaschine ist abhängig von der Drehzahl und dem Drehmoment ( $f(M, \eta)$ ). In Abbildung 4.4 wird ein exemplarisches Kennfeld für den motorischen und den generatorischen Betrieb gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Arbeitspunkte bei geringen Drehzahlen bzw. geringem Drehmoment nur einen geringen Wirkungsgrad besitzen. Ferner gibt es Bereiche im mittleren Drehmoment- und Drehzahlbereich, in denen der Wirkungsgrad mit über 94 % sehr groß ist.

Zur besseren Veranschaulichung ist in Abbildung 4.5 ein vereinfachtes Ersatzschaltbild gezeigt, das die Abbildung 4.3 auf nur eine Traktionsmaschine und einen Wechselrichter reduziert. Es ist der Leistungsfluss beim



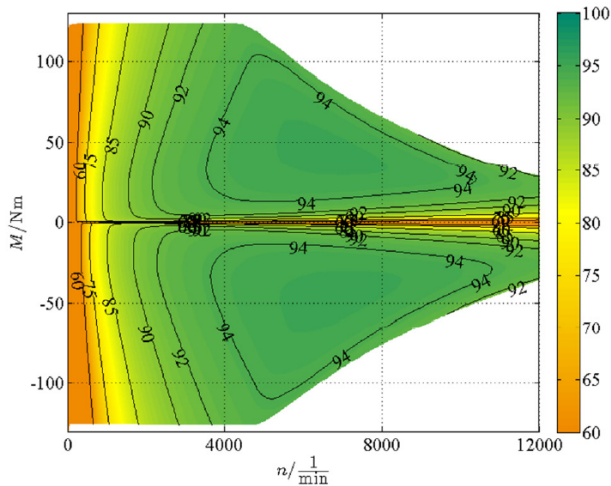


Abbildung 4.4: Wirkungsgradkennfeld (in %) einer Asynchronmaschine (aus [110])

Beschleunigen des Fahrzeugs gekennzeichnet. Beim Bremsen ist der Leistungsfluss negativ. Bei dem Strom- und dem Spannungswandler, die sich bei dem Anschluss zum Stromabnehmer befinden, handelt es sich um die Wandler des Messsystems.

Die mechanische Leistung ( $\hat{p}_{\text{mech}}$ ) ist die Leistung der Asynchronmaschine an der Welle. Sie wird aus dem Drehmoment und der Drehzahl berechnet, die über den Fahrzeugbus erfasst werden. Wie schon beschrieben, ist dieser fehlerbehaftet, was durch den Block **E** abgebildet wird.

Der Wechselrichter, die Asynchronmaschine und der Berechnungsfehler werden zu einem Block zusammengefasst. Das Gesamtsystem wird dadurch beim Beschleunigen zum Block **K** und beim Bremsen zum Block **G** vereinfacht. Je nach Zustand sind die Größen  $\hat{M}_{\text{mech}}$  und  $p_{\text{WR}}$  Ein- oder Ausgänge. Beim Beschleunigen ist das Luftspaltdrehmoment  $\hat{M}_{\text{mech}}$  abhängig von der Eingangsleistung und der Drehzahl. Beim Bremsen wird  $\hat{M}_{\text{mech}}$  zu einem Eingangs- und  $p_{\text{WR}}$  zu einem Ausgangsparameter. Die Wechselrichterleis-

tung wird dabei aus der Drehzahl und dem Luftspaltdrehmoment berechnet.

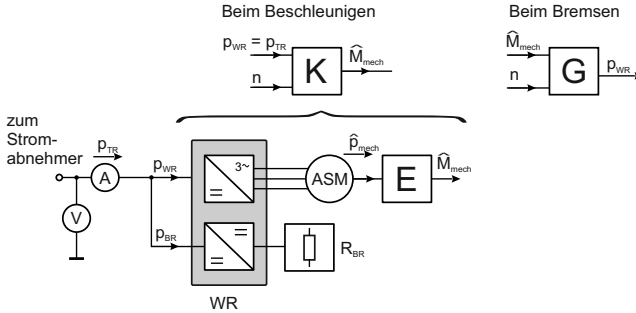


Abbildung 4.5: Vereinfachtes Ersatzschaltbild für die Kennfeldberechnung und die Zusammenfassung zu den Blöcken **K** und **G**

Der Block **G** wird verwendet, um die Gleichstromleistung vom Wechselrichter beim Bremsen zu berechnen.

$$\begin{aligned}
 p_{WR}(M, n) &= \mathbf{G}(\hat{M}_{\text{mech}}, n) \\
 &= \eta_S(\hat{M}_{\text{mech}}, n) \cdot \hat{p}_{\text{mech}}(\hat{M}_{\text{mech}}, n) \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

$$= \eta_S(\hat{M}_{\text{mech}}, n) \cdot 2\pi n \hat{M}_{\text{mech}} \quad (4.7)$$

$\eta_S(\hat{M}_{\text{mech}}, n)$  ist der Systemwirkungsgrad für die Asynchronmaschine und den Wechselrichter und beinhaltet auch den Modellfehler beim Bremsen. Ist der Systemwirkungsgrad bekannt, können die fehlerbehafteten Werte für das Drehmoment und die Drehzahl aus dem Fahrzeugbus verwendet werden, um die Ausgangsleistung des Wechselrichters beim Bremsen zu berechnen.

An der Gleichstromseite des Wechselrichters in Abbildung 4.5 gilt die Leistungsbilanz:

$$p_{TR} = p_{WR} + p_{RB} \quad (4.8)$$

Die Leistung des Wechselrichters  $p_{WR}$  und die Leistung am Bremswiderstand  $p_{RB}$  sind unbekannt, lediglich die gesamte Traktionsleistung  $p_{TR}$  wird gemessen. Beim Beschleunigen fließt die gesamte Traktionsleistung  $p_{TR}$  in den Wechselrichter. Es gilt  $p_{RB} = 0$  und die Leistung des Wechselrichters entspricht dann der gemessenen Traktionsleistung  $p_{TR}$ . Beim Bremsen speist der Wechselrichter in die Gleichstromseite ein ( $p_{WR} < 0$ ) und dessen Leistung teilt sich auf den Messwert  $p_{TR}$  und die Leistung des Bremswiderstands auf.

Nach Tabelle 4.1 ist die maximale Spannungsabweichung der Stromwandler in den Wechselrichtern  $+0.5\%$ . Es kann also davon ausgegangen werden, dass beim Bremsen die Bremswiderstände nicht eingeschaltet werden, wenn die tatsächliche Oberleitungsspannung unterhalb von  $895\text{ V}$  liegt. Dann gilt:

$$p_{BR} = 0 \quad \text{für } u_{OL} < 895\text{ V} \quad (4.9)$$

Werden nur Arbeitspunkte betrachtet, für die  $u_{OL} < 895\text{ V}$  gilt, tritt keine Bremswiderstandsverlustleistung auf und die gemessene Traktionsleistung entspricht der Wechselrichterleistung ( $p_{TR} = p_{WR, \text{mess}}$ ).

Der Antriebsstrang der Straßenbahn besteht aus mehreren Wechselrichtern und Traktionsmaschinen. Das Hauptschaltbild aus Abbildung 4.5 muss daher noch so erweitert werden, dass alle Komponenten aus dem ursprünglichen Hauptschaltbild in Abbildung 4.3 enthalten sind. Die Traktionsleistung setzt sich wie folgt zusammen:

$$p_{TR} = p_{TR1} + p_{TR2} \quad (4.10)$$

$$p_{TR1} = p_{WR1A} + p_{WR1B} + p_{BR1A} + p_{BR1B} \quad (4.11)$$

$$p_{TR2} = p_{WR2A} + p_{WR2B} + p_{BR2A} + p_{BR2B} \quad (4.12)$$

Die gesamte Wechselrichterleistung berechnet sich aus der Summe der Leistung der einzelnen Wechselrichter. Beim Bremsen gilt für die Leistung an

allen Widerständen:  $p_{BR1A} = p_{BR1B} = p_{BR2A} = p_{BR2B} = 0$ . Die gesamte Traktionsleistung entspricht der Wechselrichterleistung und es gilt:

$$p_{TR} = p_{WR} = \eta_S \cdot [\hat{p}_{mech1A} + \hat{p}_{mech1B} + \hat{p}_{mech2A} + \hat{p}_{mech2B}] \quad (4.13)$$

Der Systemwirkungsgrad  $\eta_S$  ist abhängig von dem Drehmoment und der Drehzahl. Aus den Messdaten werden sämtliche Betriebspunkte ausgelesen, für die zunächst die Bedingung  $u_{OL} < 895 \text{ V}$  gilt. Sowohl der Drehzahlbereich als auch der Drehmomentbereich werden in Intervalle mit  $10 \frac{1}{\text{min}}$  bzw. 10 Nm Breite unterteilt. Alle Messwerte werden in die verschiedenen Bereiche zugewiesen. Aus den erfassten Drehzahlen  $n_{ASM,x}$  und den Drehmomenten  $\hat{M}_{ASM,y}$  wird die Leistung  $\hat{p}_{mech,x,y}$  berechnet. Der Systemwirkungsgrad berechnet sich aus den Mittelwerten für jedes Intervall mit der Gleichung

$$\eta_S(n_x, M_y) = \frac{\bar{p}_{TR}(n_x, M_y)}{\bar{\hat{p}}_{mech}(n_x, M_y)} \quad (4.14)$$

Der Systemwirkungsgrad ist in Abbildung 4.6a dargestellt. Es umfasst die Auswertung der Messdaten sämtlicher Fahrten in dem Zeitraum September 2020 bis September 2021. Wie bei dem Kennfeld in Abbildung 4.4 ist der geringe Wirkungsgrad in den Bereichen mit geringer Drehzahl und mit geringem Drehmoment zu erkennen. Insgesamt liegt der Systemwirkungsgrad höher als der Wirkungsgrad einer einzelnen Asynchronmaschine (vgl. Abbildung 4.4). Die Leistung der Maschine wird aus dem geschätzten Drehmoment ( $\hat{M}_{ASM}$ ) berechnet, welches durch die Schätzung einen Fehler beinhaltet. Weicht das tatsächliche Drehmoment nach unten ab, steigt der Wirkungsgrad.

Die Anzahl der Messpunkte für jeden Betriebspunkt ist in Abbildung 4.6b gezeigt. Abhängig von Drehmoment und Drehzahl ist in dieser Grafik die Anzahl der Messwerten für jedes Intervall farblich dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, welche Arbeitspunkte im Fahrgastbetrieb häufig auftreten.

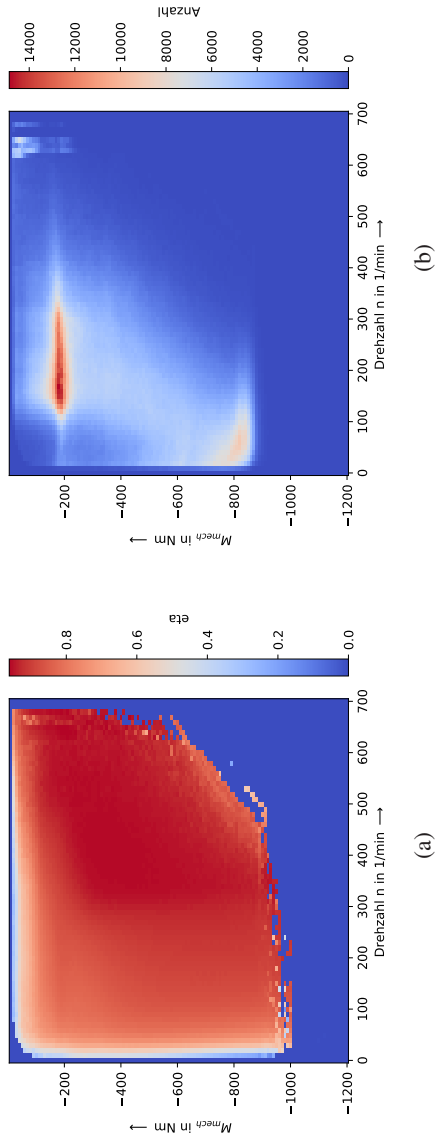


Abbildung 4.6: Wirkungsgradkennfeld und Anzahl der Messpunkte für jeden Betriebspunkt

ten. Besonders der Drehmomentbereich um  $-200$  Nm sticht mit über 12000 Messwerten heraus.

Abbildung 4.7 fasst die beiden Kennfelder in Abbildung 4.6 zusammen, indem sie das Wirkungsgradkennfeld mit Konturlinien zeigt. Die Konturen der Wirkungsgrade sind in schwarz dargestellt und die Konturen der Anzahl der Messwerte in weiß. Im Betrieb treten hauptsächlich Wirkungsgrade von unter 90 % auf.

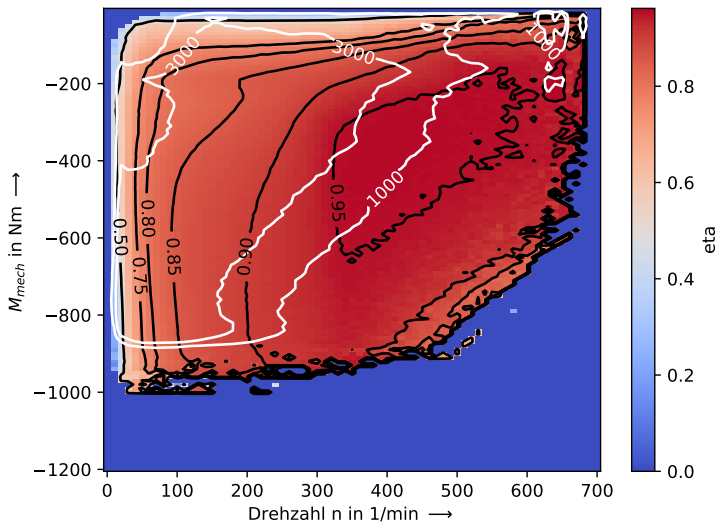


Abbildung 4.7: Wirkungsgradkennfeld mit Konturen für den Wirkungsgrad (schwarz) und der Anzahl der Messwerte (weiß)

### Unterschied zwischen den beiden Methoden

Die Berechnung der Bremsenergie aus den Messdaten am Bremswiderstand ist als Richtwert zu verstehen, weil sie mehrere Annahmen enthält, die den

Sachverhalt vereinfachen. Durch die Auswertung der Daten aus dem Fahrzeugbus ist eine präzisere Abschätzung möglich, da Messdaten ausgewertet werden und keine Annahmen gemacht werden, die die Genauigkeit einschränken.

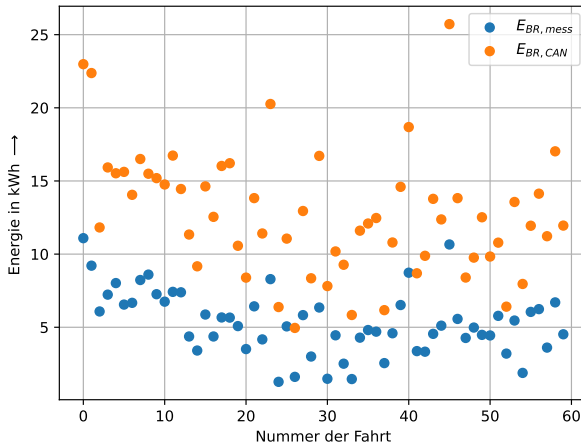


Abbildung 4.8: Vergleich der berechneten Energie mit den beiden unterschiedlichen Methoden zur Bestimmung der Verlustleistung an den Bremswiderständen.

Es wird der Streckenabschnitt von Bad Herrenalb nach Ettlingen Albgaubad betrachtet, da es sich bei dem Abschnitt um eine Strecke mit großer Höhendifferenz handelt (Bad Herrenalb 351 m ü.N. und Ettlingen Albgaubad 140 m ü.N.) und dadurch viel ungenutzte Bremsenergie auftritt. Die Auswertung kann nur für den Zeitraum erfolgen, in dem für beide Methoden Messwerte vorliegen. Dies ist der Zeitraum vom 01.09.2020 bis 01.04.2021.

In Abbildung 4.8 ist die für jede Fahrt berechnete Bremsenergie dargestellt. Im Mittel liegt die mit dem Fahrzeugbus ermittelte Bremsenergie um den Faktor 2,6 höher als die über die Messungen am Bremswiderstand berechne-

te Energie. Diese deutliche Abweichung zeigt, dass die aus den Messungen am Bremswiderstand ermittelten Daten nicht für die Auswertungen verwendet werden können. Dadurch reduziert sich der Messzeitraum erheblich und es sind deutlich weniger Messfahrten für die Auswertungen zur ungenutzten Bremsenergie vorhanden.

### 4.2.2 Prüfung auf Plausibilität

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Berechnung der ungenutzten Bremsleistung aus den Daten vom Fahrzeugbus für einen Streckenabschnitt auf Plausibilität untersucht. Es wird die Talfahrt von der Haltestelle Bad Herrenalb zur Haltestelle Ettlingen Albgaubad betrachtet. Der Streckenabschnitt hat eine Höhendifferenz von ungefähr 210 Höhenmetern, so dass die mittlere Steigung negativ ist.

Die Energie  $E_X$  ist das zeitliche Integral über die Leistung  $p_X(t)$ . Für die zeitdiskreten Messwerte wird das Integral zur Summe. Für den Zeitraum von  $n_s$  bis  $n_e$  gilt

$$E_X = \frac{1}{f_s} \sum_{n=n_s}^{n_e} p_X(n) \quad (4.15)$$

Im Folgenden wird die etwas vereinfachte Schreibweise verwendet

$$E_X = \frac{1}{f_s} \sum_{n=n_s}^{n_e} p_{X,n} \quad (4.16)$$

Die Fahrzeugenergie  $E_{Fz}$  entspricht der gemessenen Energie am Stromabnehmer und berechnet sich aus

$$E_{Fz} = \frac{1}{f_s} \sum_{n=n_s}^{n_e} i_{Fz,n} \cdot u_{OL,n} \quad (4.17)$$

Der Fahrzeugstrom berechnet sich aus den Messgrößen:

$$i_{Fz,n} = i_{TR1,n} + i_{TR2,n} + i_{AUX,n} \quad (4.18)$$



Für die Leistung werden die einzelnen Ströme mit der Oberleitungsspannung  $u_{OL}$  multipliziert und durch die Abtastezeit  $f_s$  geteilt. Die Fahrzeugenergie umfasst die gemessene Leistung der Traktion ( $i_{TR1} + i_{TR2}$ ), die die Leistung beim Beschleunigen und die Rekuperationsleistung beim Bremsen beinhaltet. Der Energiebedarf der Nebenverbraucher wird mit dem Strom  $i_{AUX}$  berechnet.

Bei einer Talfahrt entspricht die gesamte Energie des Systems der Summe aus der potentiellen und der gemessenen Fahrzeugenergie

$$E_{ges} = E_{Fz} + E_{pot} \quad (4.19)$$

Sie teilt sich auf in die Energie des Laufwiderstands ( $E_{Lauf}$ ), der Nebenverbraucher ( $E_{AUX}$ ), der Bremswiderstände ( $E_{BR}$ ) und sonstige Verluste ( $E_x$ ) wie die Scheibenbremsen und Bogenwiderstände. Es gilt:

$$E_{Fz} + E_{pot} = E_{AUX} + E_{Lauf} + E_{BR} + E_x \quad (4.20)$$

Für die potentielle Energie wird angenommen, dass die Masse des Fahrzeugs konstant 70 t beträgt. Zu Beginn des betrachteten Streckenabschnitts beträgt die potentielle Energie daher 40 kWh.

Die Laufwiderstandsenergie berechnet sich mit der Gleichung

$$E_{Lauf} = \frac{1}{f_s} \sum_{n=n_s}^{n_e} (a_R v_n^2 + b_R v_n + c_R) v_n \quad (4.21)$$

Für die Parameter  $a_R$ ,  $b_R$  und  $c_R$  werden die Werte aus dem Unterabschnitt 3.4.1 verwendet.

Die Bremsleistung zur Ermittlung von  $E_{BR}$  wird mit dem im Unterabschnitt 4.2.1 beschriebenen Kennfeldmethode durchgeführt.

Für die Berechnung des Energiebedarfs der Nebenverbraucher werden die Messdaten für die jeweilige Fahrt verwendet. Es gilt:

$$E_{AUX} = \frac{1}{f_s} \sum_{n=n_s}^{n_e} u_{OL,n} \cdot i_{AUX,n} \quad (4.22)$$

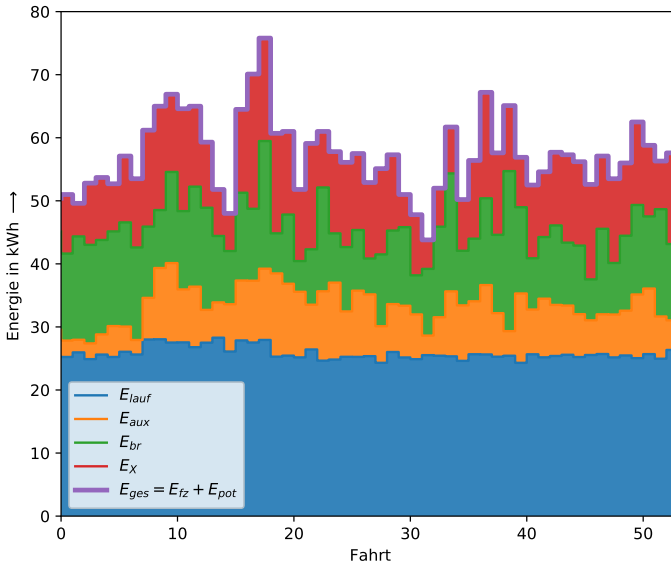


Abbildung 4.9: Prüfung der Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der ungenutzten Bremsenergie auf Plausibilität

In Abbildung 4.9 ist die Zusammensetzung der Energieanteile dargestellt. Durch die sehr ähnlichen Fahrprofile ist die Energie des Laufwiderstands nahezu konstant. Besonders bei den ersten Fahrten, bei denen die Nebenverbraucherenergie gering ist, ist erkennbar, dass mehr Energie in den Bremswiderständen umgewandelt wird.

Für die potentielle Energie, die in diesem Streckenabschnitt einen großen Anteil der Gesamtenergie ausmacht, wird eine konstante Masse angenommen. Das muss bei der sonstigen Verlustenergie  $E_{\chi}$ , die im Mittel bei unge-

fähr 20 % der Gesamtenergie liegt, berücksichtigt werden.

Insgesamt scheinen die Ergebnisse jedoch plausibel, da die Summe der Energien aus den Verlusten durch den Laufwiderstand, der Verlustleistung am Bremswiderstand und dem Energiebedarf der Nebenverbraucher nicht die Gesamtenergie übersteigt. Die Kennfeldmethode aus Unterunterabschnitt 4.2.1 wird daher in den folgenden Abschnitten für die Berechnung der ungenutzten Bremsleistung verwendet.

### 4.3 Datengrundlage

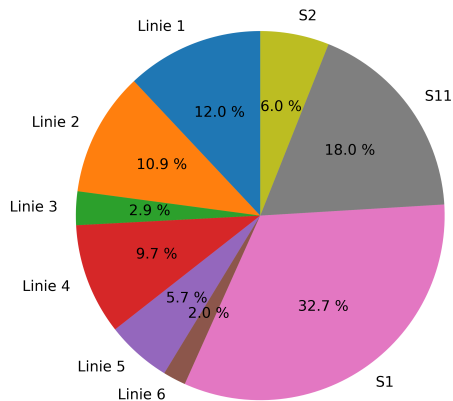


Abbildung 4.10: Anteil der Betriebsstunden auf den verschiedenen Linien

Sämtliche Fahrten im Zeitraum vom 01.09.2020 bis zum 15.05.2021 werden für die Erstellung der Karten und als Grundlage für die Simulationen ausgewertet. In diesem Zeitraum wurden 1314 Stunden Messdaten im Fahrgastbetrieb aufgezeichnet.

Im Allgemeinen gibt es für die Messstraßenbahn keine besonderen Einsatzschwerpunkte, sondern sie wird im regulären Fahrgastbetrieb wie jedes andere Fahrzeug eingesetzt. Der Einsatz auf die verschiedenen Linien ist dennoch ungleichmäßig und es ergeben sich unterschiedliche Menge an Mess-

daten pro Linie. Die Ursache sind die Einsatzpläne der Fahrzeugtypen. Auf einigen Linien werden die Fahrzeuge vom Typ NET2012 bevorzugt oder seltener eingesetzt. In Abbildung 4.10 ist die prozentuale Aufteilung der Messdaten auf die neun Linien im Streckennetz für den betrachteten Zeitraum dargestellt. Die Hälfte der Messdaten stammt von den Linien S1 und S11. Auf der Linie 6 und der Linie 3 wurden nur wenige Messfahrten durchgeführt.

Für die Erstellung der Verlustleistungs- und Geschwindigkeitskarten werden immer vollständige Fahrten von der Start- zur Endhaltestelle ausgewertet. Umleitungsfahrten werden in den Auswertungen nicht berücksichtigt. Ein Teil der Daten in den Auswertungen basiert auf dem Fahrplan in den jeweiligen Streckenabschnitten. Als Grundlage wird der Aushangfahrplan mit dem Stand aus Mai 2021 verwendet.

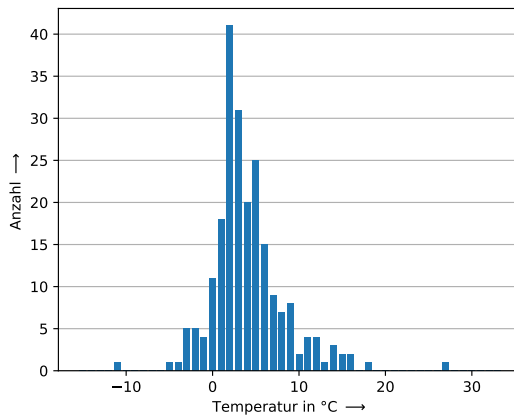


Abbildung 4.11: Histogramm der Umgebungstemperatur für die ausgewerteten Messfahrten

Der Unterabschnitt 3.4.2 zeigte den Einfluss der Temperatur auf den Energiebedarf der Nebenverbraucher. Es besteht eine deutliche Abhängigkeit, der Energiebedarf wird bei ungefähr 16 °C minimal. Die Temperatur be-

einflusst also, wie auch schon in [26] gezeigt, den Anteil an ungenutzter Bremsenergie.

In Abbildung 4.11 ist das Histogramm der mittleren Umgebungstemperatur für die ausgewerteten Fahrten gezeigt. Die Klassenbreite beträgt 1 °C. Die meisten Fahrten wurden in den Wintermonaten durchgeführt, wodurch die mittlere Temperatur für alle Fahrten bei ungefähr 5 °C liegt. Es ist daher davon auszugehen, dass die Ergebnisse für den Anteil an ungenutzter Bremsenergie insgesamt geringer ausfallen werden als bei der tatsächlichen Integration eines Speichers in das Streckennetz.

#### 4.4 Gefahrene Geschwindigkeit im Streckennetz

Die gefahrene Geschwindigkeit hat einen Einfluss auf die Bremsenergie und damit auch auf deren ungenutzten Anteil. Beim generatorischen Bremsen werden die kinetische und die potentielle Energie in elektrische Energie umgewandelt. Für die beiden Energien gelten:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (4.23)$$

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h \quad (4.24)$$

Die Kenntnis über die gefahrene Geschwindigkeit im Streckennetz und die Topographie kann folglich einen ersten Überblick zu Streckenabschnitten mit einem hohen Anteil an ungenutzter Bremsenergie geben und hilft im Folgenden, die Abschnitte im Netz zu vergleichen.

In Abbildung 4.12 ist das 95. Perzentil der gefahrenen Geschwindigkeiten im gesamten Streckennetz dargestellt. Die Geschwindigkeit ist farblich gekennzeichnet: von dunklem Blau für geringe Geschwindigkeiten über Rot bis Gelb für hohe Geschwindigkeiten. Zum Erstellen der Karte wird der im Unterabschnitt 4.1.3 beschriebene Algorithmus verwendet.

Die Karte weist einige Besonderheiten auf: die südlichen Randbereiche des Streckenabschnitts der S1/S11 sind von hohen Geschwindigkeiten und gro-

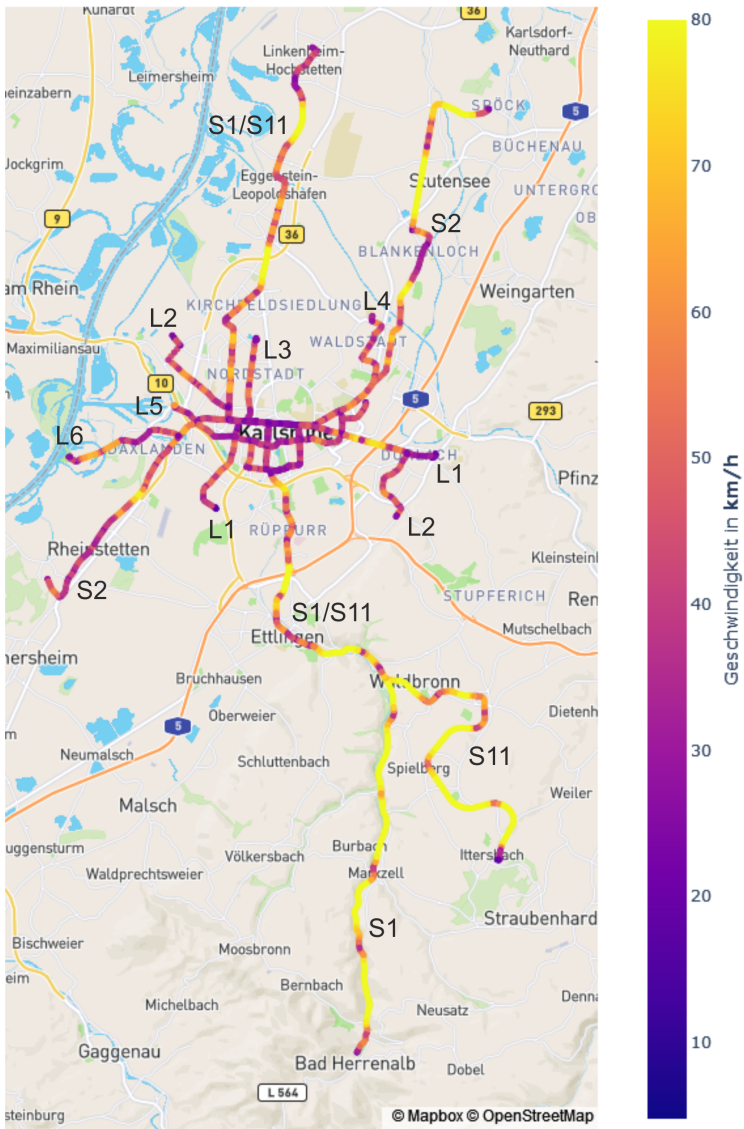


Abbildung 4.12: Gefahrene Geschwindigkeit im gesamten Streckennetz mit Linienbezeichnung (erstellt mit ©Mapbox und ©OpenStreetMap)

ßen Haltestellenabständen geprägt. Im nördlichen Teil der S1/S11 ist der Haltestellenabstand insgesamt geringer, es gibt aber auch einige Abschnitte, bei denen über eine längere Strecke mit der maximalen Geschwindigkeit gefahren wird. In den Außenbereichen wird auch bei geringem Abstand zwischen den Haltestellen auf die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von 80 km/h beschleunigt, die Geschwindigkeit kurz gehalten und wieder abgebremst.

Im nördlichen Teil der Linie S2 gibt es ebenfalls Abschnitte, in denen der Haltestellenabstand groß ist und mit hoher Geschwindigkeit gefahren wird. Dagegen befinden sich im südwestlichen Teil kurze Haltestellenabschnitte und es wird insgesamt langsamer gefahren.

In der Innenstadt teilen sich die Straßenbahn und der Individualverkehr häufig die Infrastruktur, dadurch wird nur mit geringen Geschwindigkeiten gefahren.

### **4.5 Verlustenergie im Streckennetz**

Die ungenutzte Bremsenergie im gesamten Streckennetz wird mit der im Unterabschnitt 4.2.1 beschriebenen Kennfeldmethode ermittelt. Dafür werden die Fahrten auf allen Linien im Streckennetz analysiert. Es werden jeweils beide Fahrtrichtungen gemeinsam betrachtet und alle vollständigen Messfahrten ausgewertet. Bei der Auswertung wird auf die Anzahl der ausgewerteten Fahrten auf den einzelnen Linien normiert. Für die Rasterung der Streckendaten wird ein Abstand von 100 m verwendet. Die Abbildung 4.13 zeigt die resultierende Übersichtskarte mit der mittleren ungenutzten Bremsenergie für das gesamte Streckennetz.

Die Menge an Energie für jede Position ist durch die Farbe und durch die Größe der Punkte dargestellt: je größer die Energiemenge desto größer der jeweilige Punkt. Die Farbe der Punkte verhält sich analog: Dunkle Farbtöne stellen einen geringen Anteil, helle Farbtöne einen hohen Anteil ungenutzter Bremsenergie dar.

Durch die Rasterung ist die Energie in den einzelnen Punkten größtenteils

#### 4 Ungenutzte Bremsenergie im Karlsruher Streckennetz

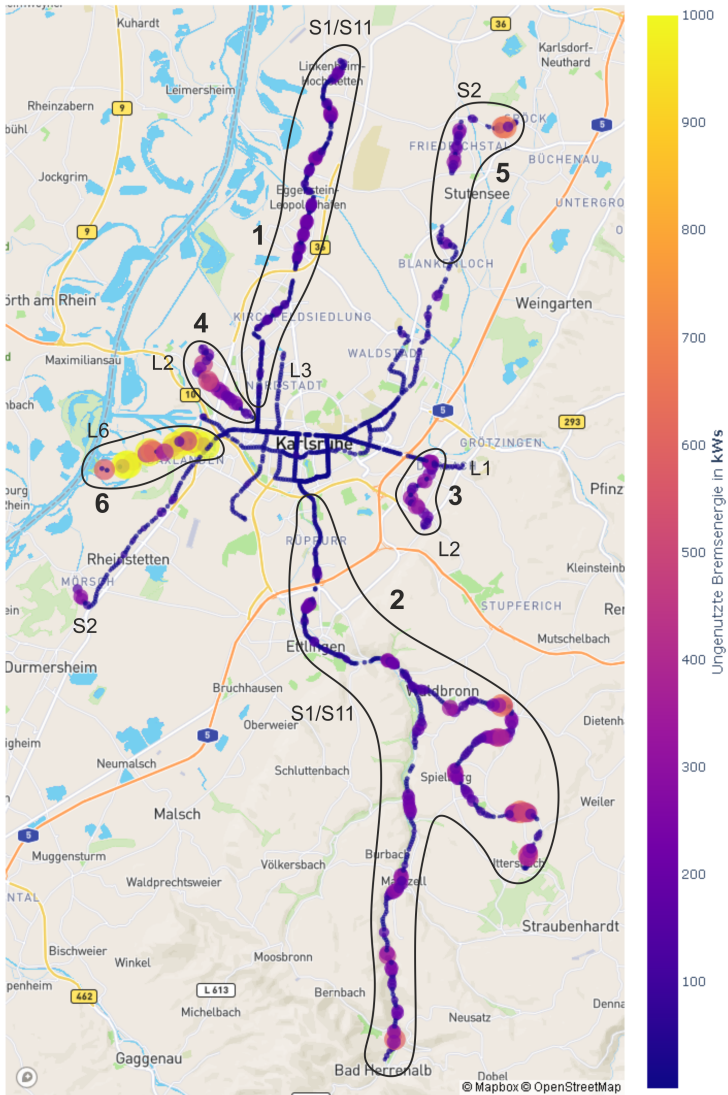


Abbildung 4.13: Mittlere ungenutzte Bremsenergie im Karlsruher Streckennetz (erstellt mit ©Mapbox und ©OpenStreetMap)



sehr gering. Als Einheit wurde statt der üblichen Einheit Kilowattstunde die Einheit Kilowattsekunde verwendet. Die im Durchschnitt ungenutzte Bremsenergie ergibt sich durch die Summierung aller Punkte entlang einer Strecke.

Aus der Übersichtskarte in Abbildung 4.13 geht deutlich hervor, an welchen Stellen im Streckennetz viel ungenutzte Bremsenergie auftritt. Auf den Strecken im Innenstadtbereich ist kaum ungenutzte Bremsenergie vorhanden. Dort ist die gefahrene Geschwindigkeit gering und viele Linien teilen sich die Infrastruktur. Dadurch befinden sich in der Regel viele Fahrzeuge in unmittelbarer Umgebung zu den bremsenden Fahrzeugen. Diese nehmen einen Teil der Bremsleistung oder auch die gesamte Bremsleistung auf. Für das einspeisende Fahrzeug ist das Oberleitungsnetz daher aufnahmefähig. Bei den Strecken, die in die Randbezirke führen, ist der Anteil an ungenutzter Bremsenergie höher. In diesen Bereichen verhält es sich in der Regel konträr zur Innenstadt: Es werden hohe Geschwindigkeiten gefahren und es befinden sich nur unregelmäßig Fahrzeuge in der Nähe, die die Bremsleistung aufnehmen.

Einige Abschnitte in der Karte stechen besonders hervor:

**Abschnitt 1 S1/S11 Hochstetten** nördlicher Abschnitt, zwischen den Haltestellen Hochstetten und Moltkestraße / Städtisches Klinikum

Der nördliche Abschnitt der S1/S11 ist ein langer Streckenabschnitt, der aus der Karlsruher Innenstadt nach Linkenheim / Hochstetten führt. Im äußeren Bereich steigt die ungenutzte Bremsenergie mit zunehmender Entfernung zur Innenstadt und es wird in diesem Abschnitt in einem geringen Takt gefahren.

**Abschnitt 2 S1/S11 Schwarzwaldrand** südlicher Abschnitt, zwischen den Haltestellen Albtalbahnhof und Bad Herrenalb bzw. Ittersbach

Der südliche Abschnitt der S1/S11 befindet sich am Rand zum Schwarzwald. In diesem Bereich treffen mehrere Eigenschaften zusammen, die einen großen Anteil an ungenutzter Bremsenergie verursachen: Zum einen besteht eine große Höhendifferenz zwischen der Innenstadt und den Randlagen dieses Abschnittes, die eine hohe potentielle Energie bewirkt. Zum anderen wird mit hohen Geschwindigkeiten gefahren und es befinden sich durch den geringen Takt nur wenige Fahrzeuge in unmittelbarer Umgebung. Wie aus der Karte in Abbildung 4.13 hervorgeht, ist die ungenutzte Verlustenergie in den Abschnitten von Ettlingen nach Bad Herrenalb und von Ettlingen nach Ittersbach deutlich höher als im Teilabschnitt von der Haltestelle Albtalbahnhof nach Ettlingen.

**Abschnitt 3 L2 Wolfartsweier** östlicher Abschnitt, zwischen den Haltestellen Durlach Auer Straße und Wolfartsweier Nord

Der Aufbau der Infrastruktur weicht nicht wesentlich von dem Aufbau im restlichen Netz ab und die Höhendifferenz von Wolfartsweier nach Durlach ist nur gering. Das Oberleitungsnetz ist im Bereich der Verzweigung der Linie 2 und der Linie 1 in Durlach durchgekuppelt, weshalb der Austausch der Bremsenergie zwischen den Fahrzeugen auf den beiden Linien möglich ist. Auch die eingestellten Spannungen der Unterwerke weisen keine Besonderheiten auf.

Die Ursache für die hohen Energieverluste in diesem Streckenabschnitt kann daher nur sein, dass sich die Brems- und Anfahrvorgänge der Fahrzeuge in dem Streckenbereich nur wenig überschneiden und/oder sich nur wenige Fahrzeug im Streckenabschnitt befinden, die die Bremsleistung aufnehmen können.

**Abschnitt 4 L2 Siemensallee** westlicher Abschnitt, zwischen den Haltestellen Knielingen Nord und Yorckstraße

In diesem Abschnitt ist eine deutliche Menge an ungenutzter Bremsenergie vorhanden. Der benachbarte nördliche Streckenabschnitt der Linie 3 in Neureut-Heide führt ebenfalls aus dem Innenstadtbereich hinaus. Dort tritt allerdings nur sehr wenig ungenutzte Bremsenergie auf. Im Vergleich zum Streckenabschnitt der Linie 2 in der Siemensallee sind in beiden Abschnitten die gefahrenen Geschwindigkeiten ähnlich, die Taktung der Fahrzeuge, die Infrastruktur und die Topographie der Streckenabschnitte unterscheiden sich nur geringfügig voneinander.

Die Ursache dafür ist, dass im Bereich der Haltestelle Moltkestraße für den ausgewerteten Messzeitraum ein Kuppelschalter geöffnet ist. Der Energieaustausch mit den Fahrzeugen auf den angrenzenden Streckenabschnitten ist daher nicht möglich. Mit der Fertigstellung der geplanten Umbaumaßnahmen in diesem Bereich wird das Oberleitungsnetz wieder durchgekuppelt sein und es ist zu erwarten, dass dann deutlich weniger ungenutzte Bremsenergie auftreten wird. Die Ergebnisse werden dann wahrscheinlich ähnlich zu den Werten aus dem benachbarten Abschnitt der Linie 3 sein. Die Untersuchung des Streckenabschnitts im Hinblick auf mögliche Energiespeicher muss daher zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt werden.

**Abschnitt 5 S2 Spöck** nördlicher Abschnitt, zwischen den Haltestellen Richard-Hecht-Schule in Spöck und Blankenloch Nord

In der Verlustenergiekarte sind im Streckenabschnitt zwischen Blankenloch Nord und Spöck die Bereiche erkennbar, in denen die Haltestellenabstände groß sind und die Fahrzeuge mit konstanter Geschwindigkeit fahren. Da in diesen Bereichen nur wenig gebremst wird, entstehen Lücken in der Karte.

**Abschnitt 6 L6 Daxlanden** westlicher Abschnitt, zwischen den Haltestellen Rappenwörth und Eckenerstraße

Im untersuchten Zeitraum fuhr die Messstraßenbahn auf der Linie 6 im Abschnitt von Rappenwört nach Daxlanden nur sehr selten. Die Aussagekraft

der Ergebnisse in Abbildung 4.13 ist daher gering. Wie auch bei dem Abschnitt in Knielingen der Linie 2 ist an der Abzweigung von der Michelinstraße/Daxlandener Straße der Kuppelschalter nicht geschlossen. Dieser Abschnitt wird daher nicht weiter betrachtet.

In den späteren Auswertungen werden die Streckenabschnitte der Bereiche 1 bis 5 aus Abbildung 4.13 analysiert.

# 5 Modellbildung und theoretische Betrachtung des Bremsvorgangs

## 5.1 Simulation von Nahverkehrsnetzen

Für die elektrische Untersuchung von gesamten Nahverkehrsnetzen oder einzelnen Streckenabschnitten werden Simulationsumgebungen verwendet. Es gibt mehrere kommerzielle Produkte, mit denen über eine grafische Oberfläche komplexe Situationen, Fahrspiele und ganze Fahrpläne nachgebildet und untersucht werden können. Tabelle 5.1 enthält eine Übersicht einiger am Markt verfügbarer Simulationsprogramme.

In Forschungsarbeiten werden häufig nur einzelne Streckenabschnitte ohne Verzweigungen betrachtet. Dabei reichen meist einfache Simulationsumge-

Tabelle 5.1: Einige auf dem Markt erhältliche Simulationsumgebungen für die Netzberechnung.

<b>Programmname</b>	<b>Hersteller</b>	<b>Referenz</b>
SINANet	Elbas/ Signon	[111]
FABEL	ENOTRAC	[112]
Sitras Sidytrac	Siemens	[113]
OpenTrack	OpenTrack Technology	[114]
Railsim X	SYSTRA Canada	[115]
eTRAX	etab OperationTechnology Inc.	[116]
TrainOps	LTK	[117]

bungen aus, bei denen das Fahrzeugmodell auf den Fahrwiderständen und Wirkungsgradkennfeldern basiert. Die Programme sind so aufgebaut, dass sie die Berechnungen optimal für die zu untersuchende Fragestellung durchführen.

Der Ablauf ist häufig sehr ähnlich: Der betrachtete Streckenabschnitt wird über ein elektrisches Ersatzschaltbild nachgebildet. Daraus werden die analytischen Gleichungen hergeleitet, die das System vollständig beschreiben. Die anschließende Berechnung oder Optimierung kann mit *Matlab/Simulink* [118] (wie in [24], [119]) oder einer anderen geeigneten Software erfolgen.

Die Simulationssoftware *BSTsim* von Ch. Kühn wurde am Institut für Fahrzeugsystemtechnik entwickelt. Sie grenzt sich dadurch von den anderen Forschungsprogrammen ab, dass sie die Berechnung des Lastflusses in einem gesamten Gleichspannungsnetz mit mehreren Fahrzeugen und auch mit sich überschneidenden Strecken ermöglicht. Dabei können verschiedene Fahrzeuge und Fahrertypen konfiguriert werden. Über eine graphische Oberfläche wird das Streckennetz aufgebaut und alle für den Betrieb benötigten Parameter konfiguriert. Die Grundlage für den Betrieb legt dabei der Fahrplan. [25]

In der vorliegenden Arbeit werden die Messdaten als Eingangsparameter für die folgenden Simulationen verwendet. Da diese Funktion nicht in *BSTsim* vorhanden ist und eine Implementierung eine zu große Änderung der Software bedeuten würde, wird das Programm nicht verwendet.

In dieser Arbeit wird ebenfalls ein elektrisches Ersatzschaltbild für die Untersuchung der Streckenabschnitte verwendet. Aus verschiedenen Modellen werden die Streckenabschnitte und Simulationsszenarien zusammengesetzt. Statt einer analytischen Lösung wird wie in [120] für die Untersuchungen eine Schaltungssimulationssoftware verwendet. Dies ermöglicht eine größere Flexibilität bei der Modellierung der Komponenten und bei Untersuchungen, die sich an diese Arbeit anschließen.

Das genutzte *TwinBuilder* von ANSYS [121] ist SPICE [122] ähnlich. Es

enthält allerdings als Erweiterungen graphische Blöcke, wie sie bei *Simulink* verwendet werden, und die Möglichkeit Komponenten in *ANSI C* zu entwickeln. Mit den Block-Komponenten können unter anderem Regelalgorithmen implementiert und mit den C-Komponenten komplexe Modellverhalten aufgebaut werden. Zusätzlich ist es möglich, Skripte in Python [123] zu erstellen, um die Simulation zu steuern und zu automatisieren und umfangreiche Auswertungen der Simulationsergebnisse durchzuführen.

## 5.2 Modellierung der Komponenten

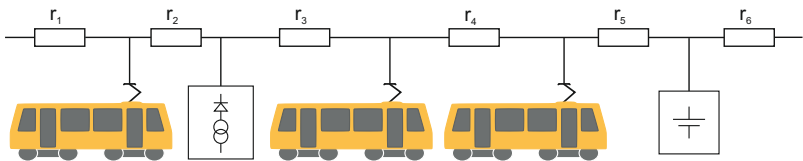


Abbildung 5.1: Vereinfachter Systemaufbau eines Straßenbahnstreckenabschnitts

Für die simulative Untersuchung der elektrischen Verhältnisse im Streckennetz kann ein Straßen-/Stadtbahnsystem in fünf Teilkomponenten unterteilt werden: *Gleichrichterunterwerke*, *Fahrzeuge*, das *Oberleitungssystem*, *Energiespeicher* und *weitere Faktoren*, wie Fahrgäste, die Witterung, der motorisierte Individualverkehr, Fahrradfahrer oder Passanten. Bis auf die weiteren Faktoren werden für alle Teilkomponenten elektrische Ersatzschaltbilder erstellt.

Abbildung 5.1 zeigt exemplarisch den Aufbau einer einfachen Linie mit mehreren Fahrzeugen, einem Gleichrichterunterwerk und einem Energiespeicher, die alle über die Oberleitung miteinander gekoppelt sind. Die *weiteren Faktoren* sind nicht dargestellt. Sie stellen für die Modellierung eine besondere Herausforderung dar.

### 5.2.1 Gleichrichterunterwerk

Der grundsätzliche Aufbau eines Gleichrichterunterwerks wurde bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben. Für die Simulation lässt es sich, wie in Abbildung 5.2 gezeigt ist, durch eine Spannungsquelle, eine Diode und einen Widerstand nachbilden. Die Spannungsquelle  $U_{GUW,0}$  modelliert die Leerlaufspannung des Transformators. Durch die Vereinfachung kann der Brückengleichrichter des Unterwerks durch eine einzelne ideale Diode nachgebildet werden. Der Innenwiderstand des Unterwerks resultiert aus dem Innenwiderstand des Transformators und des Gleichrichters und wird mit dem Widerstand  $R_{GUW,i}$  nachgebildet.

Die in Straßenbahnnetzen eingesetzten Gleichrichterunterwerke besitzen zusätzlich noch eine Überlastabschaltung, die im Fehlerfall oder bei Störungen die Oberleitung abschaltet. Abhängig von der Stärke der Überlast ist eine kurzzeitige Überlastung möglich. Dieses Verhalten wird in der Simulation durch einen Zustandsautomaten nachgebildet.

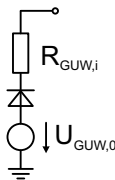


Abbildung 5.2: Simulationsmodell für das Gleichrichterunterwerk

### 5.2.2 Oberleitungssystem

Das vollständige Ersatzschaltbild für die Oberleitung ist in Abbildung 5.3 gezeigt, welches sich aus den Leitungsgleichungen ergibt. Es besteht aus einem Widerstands- ( $R'$ ), Induktivitäts- ( $L'$ ), Leitwerts- ( $G'$ ) und Kapazitätsbelag ( $C'$ ).



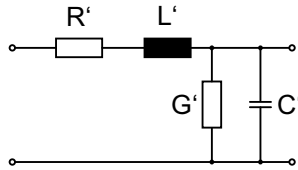


Abbildung 5.3: Leitungsersatzschaltbild

Auf Grund des großen Abstands zwischen der Oberleitung und der Schiene und der geringen Induktivität der Oberleitung kann das Ersatzschaltbild zu einem variablen Widerstand vereinfacht werden. Der resultierende Widerstandswert  $r_{OL}$  ist abhängig von der Oberleitungslänge  $l$  zwischen den beiden betrachteten Objekten, der elektrischen Leitfähigkeit  $\rho$  und dem Oberleitungsquerschnitt  $A$ . Die Leitfähigkeit und die Querschnittsfläche können zum Widerstandsbelag  $R'$  zusammenfasst werden.

$$r_{OL} = \rho \frac{l}{A} = R' \cdot l \quad (5.1)$$

Die Simulation wird mit einer herkömmlichen Simulations-Software für elektrische Netze durchgeführt. Diese Programme sind für statische Netzwerke entwickelt worden, bei denen sich zwar die Parameter der Komponenten ändern dürfen, jedoch nicht die Netzwerktopologie. Werden mehrere Fahrzeuge mit entgegengesetzten Fahrtrichtungen in einem zweigleisigen Streckenabschnitt mit einer quergekuppelter Oberleitung simuliert, kann das Modell in Abbildung 5.1 nicht verwendet werden. Durch die sich permanent ändernde Position der Fahrzeuge ändert sich auch die Reihenfolge der Fahrzeuge im Speiseabschnitt und damit auch die Reihenfolge der Komponenten im Modell. Bei einer statischen Netzwerktopologie müsste die Anordnung der Widerstände geändert werden.

In Abbildung 5.4a ist das Oberleitungsmodell für 5 Komponenten gezeigt, mit der dynamische Straßenbahnnetze simulieren werden können. Die Struktur lässt sich grundsätzlich auch auf deutlich mehr Komponenten erweitern.

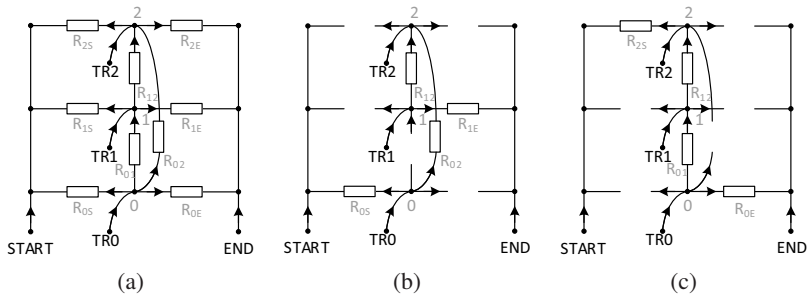


Abbildung 5.4: Ersatzschaltbild für die Oberleitung und unterschiedliche Reihenfolgen im Streckennetz:

- a) allgemeines Ersatzschaltbild
- b) Darstellung der Reihenfolge:  $START \rightarrow TR_0 \rightarrow TR_2 \rightarrow TR_1 \rightarrow END$
- c) Darstellung der Reihenfolge:  $START \rightarrow TR_2 \rightarrow TR_1 \rightarrow TR_0 \rightarrow END$

In diesem Beispiel wird davon ausgegangen, dass die Knoten START und END den Streckenabschnitt definieren und sich dort Unterwerke befinden. Der Knoten START befindet sich am Streckenmeter 0 und der Knoten END am Ende des Streckenabschnitts. Dazwischen liegen die Knoten TR0 bis TR2, an denen die Fahrzeuge oder auch Energiespeicher angeschlossen werden.

Die Streckenkomponente besteht aus einer Matrix von Widerständen, die sämtliche Anschlussknoten miteinander verbindet. Abhängig von der Position der Fahrzeuge werden die Widerstände der Matrix so eingestellt, dass sie das elektrische Netzwerk korrekt abbilden.

Die Abbildung 5.4b zeigt das resultierende Ersatzschaltbild für die Reihenfolge  $START \rightarrow TR_0 \rightarrow TR_2 \rightarrow TR_1 \rightarrow END$  im Netzwerk. Die offenen Zweige ergeben sich daraus, dass die dortigen Widerstandswerte in Relation zu den verbleibenden Widerständen einen deutlich größeren Wert aufweisen, sich hochohmig verhalten und vernachlässigt werden können. Zwar fließt in der Simulation ein geringer Strom durch die hochohmigen Zweige,

der daraus resultierende Fehler ist aber zu vernachlässigen.

Durch eine Änderung der Reihenfolge der Fahrzeuge (START → TR2 → TR1 → TR0 → END) im Streckenabschnitt ergibt sich ein anderes wirksames Ersatzschaltbild, das in Abbildung 5.4c dargestellt ist. Das allgemeine Ersatzschaltbild lässt sich durch eine Änderung der entsprechenden Widerstandswerte dahingehend einstellen.

Für die Implementierung in ANSYS *TwinBuilder* wird die Leitwerksmatrix in Gleichung 5.2 verwendet. In der erstellten C-Komponente werden zunächst die angeschlossenen Komponenten gemäß ihrer Position sortiert, danach werden die Leitwerte berechnet und anschließend wird die Leitwertmatrix erstellt und für die Berechnung verwendet.

$$\begin{bmatrix} 0 & g_{0,1} & g_{0,2} & g_{0,3} & g_{0,4} \\ g_{1,0} & 0 & g_{1,2} & g_{1,3} & g_{1,4} \\ g_{2,0} & g_{2,1} & 0 & g_{2,3} & g_{2,4} \\ g_{3,0} & g_{3,1} & g_{3,2} & 0 & g_{3,4} \\ g_{4,0} & g_{4,1} & g_{4,2} & g_{4,3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

### **Streckenabschnitte mit unterschiedlichen Widerstandsbelägen**

Es kann vorkommen, dass die Oberleitung eines Speiseabschnitts in einigen Bereichen unterschiedlich ausgeführt ist und damit unterschiedliche Widerstandsbeläge besitzt. Um dies mit dem zuvor beschriebenen Modell nachbilden zu können, wäre es grundsätzlich möglich, mehrere Streckenabschnitte mit dem entsprechenden Widerstandsbelag zu verschalten. Zusätzlich muss eine Schalt-Logik implementiert werden, die die Fahrzeuge in die von der Position abhängigen Bereiche schaltet. Da dies sehr aufwändig ist, wird ein anderer Ansatz gewählt:

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wird die Position des Fahrzeugs lediglich für die Berechnung des Oberleitungswiderstands verwendet. Bei

einer Strecke mit unterschiedlichen Widerstandsbelägen kann die Position des Fahrzeugs auf eine äquivalente Strecke mit konstantem Widerstandsbelag abgebildet werden. Die äquivalente Fahrzeugposition verhält sich elektrisch identisch und das Modell aus dem vorherigen Abschnitt kann verwendet werden.

Abbildung 5.5 verdeutlicht das Vorgehen: Die äquivalente Strecke hat einen konstanten Widerstandsbelag von  $50 \text{ m}\Omega/\text{km}$ . Der erste Abschnitt in der originalen Strecke, der ebenfalls einen Widerstandsbelag von  $50 \text{ m}\Omega/\text{km}$  besitzt, wird folglich auf die gleiche Länge abgebildet. Der darauf folgende Abschnitt mit  $100 \text{ m}\Omega/\text{km}$  wird auf die doppelte Länge gestreckt, damit am Ende des zweiten Abschnitts von beiden Abschnitten der gleiche Gesamtwiderstand vorliegt. Der  $25 \text{ m}\Omega/\text{km}$ -Abschnitt wird auf die Hälfte gestaucht.

Die Länge der gesamten äquivalenten Strecke hängt von der Wahl des konstanten Widerstandsbelags ab. Eine gegebene Strecke kann daher auf eine längere oder auch auf eine kürzere äquivalente Strecke abgebildet werden. Die Abbildung muss für alle Komponenten in der Simulation durchgeführt werden. Je nach Standort entlang der Strecke können sich also auch die Positionen der Gleichrichterunterwerke oder der Energiespeicher ändern. Sollen sich die Ergebnisse auf die tatsächliche Strecke beziehen, so muss nach der Simulation die Umkehrfunktion der Abbildung verwendet werden.

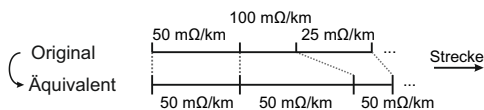


Abbildung 5.5: Überführung einer Strecke mit verschiedenen Widerstandsbelägen in eine äquivalente Strecke mit konstantem Widerstandsbelag

### 5.2.3 Fahrzeugmodell

Viele Fahrzeugmodelle in der Literatur, wie in [7], [25], [124] oder [125], beruhen auf den physikalischen Grundgleichungen. Abhängig vom Untersuchungsschwerpunkt sind die Modelle unterschiedlich komplex aufgebaut. Die Eingangsgrößen des Modells entscheiden, ob zusätzlich auch ein Fahrermodell benötigt wird.

Über den Fahrhebel wird im Fahrbetrieb die Zugkraft  $F_z$  des Fahrzeugs vorgegeben. Die mechanische Leistung des Fahrzeugs ergibt sich aus  $P = F_z \cdot v$ . Durch die Asynchronmaschine erfolgt der Übergang zwischen dem mechanischen und dem elektrischen Bereich. Bei kennfeldbasierenden Modellen kann dann, unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten, die Leistungsaufnahme des Antriebstrangs berechnet werden. Die Leistung der Nebenverbraucher addiert sich zu der Traktionsleistung.

Für den Aufbau eines validen Fahrzeugmodells müssen viele Parameter bestimmt werden, die sich teilweise im Betrieb ändern. Beispiele für solche Modelle sind in den Arbeiten vom M. Eller [126] oder M. Khodaparastan [125] zu finden. Um die Anzahl der zu bestimmenden Parameter möglichst gering zu halten, wird in dieser Arbeit ein datenbasiertes Fahrzeugmodell verwendet.

Abhängig von der Betriebsart wirkt das Fahrzeug beim Beschleunigen als Leistungssenke und als Leistungsquelle beim Bremsen. Die verwendete Simulationsumgebung verfügt über Leistungsquellen als Simulationselement. Die Quelle stellt den Strom so ein, dass die vorgegebene Leistung aufgenommen oder eingepreßt wird. Für das vereinfachte Ersatzschaltbild wird, wie in Abbildung 5.6 dargestellt, die Leistungsquelle  $p_{Fz}$  verwendet, die die vom Fahrer vorgegebene Zugkraft und damit die Fahrzeugleistung einstellt. Ein Teil der Bremsleistung wird von den Nebenverbrauchern aufgenommen. Abhängig von der Aufnahmefähigkeit der Oberleitung wird der verbleibende Teil in die Oberleitung und/oder in die Bremswiderstände eingespeist. Im Ersatzschaltbild wird dieses Verhalten durch die Spannungsquelle mit

einer idealen Diode in Sperrichtung nachgebildet. Kann die Bremsleistung des Fahrzeugs nicht von der Oberleitung aufgenommen werden, steigt die Spannung an. Beim Überschreiten der maximal zulässigen Oberleitungsspannung  $U_{MAX}$  beginnt die Diode zu leiten und begrenzt die Spannung auf den Wert der Spannungsquelle.

Aus den von der Messstraßenbahn erfassten Parametern lässt sich die Leistungsaufnahme des Fahrzeugs berechnen. Die Daten werden als Eingangswerte für die Leistungsquelle verwendet. Dadurch werden sämtliche Parameter des Fahrzeugs und auch das Fahrverhalten des Fahrers in der Simulation berücksichtigt.

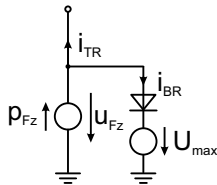


Abbildung 5.6: Elektrisches Fahrzeugmodell

### 5.2.4 Energiespeicher

In dieser Arbeit werden ideale Energiespeicher betrachtet, die nur Energie aufnehmen. Das Rückspeisen der gespeicherten Energie in die Oberleitung wird nicht berücksichtigt. Ein Speicher wird daher mit einer Spannungsquelle und einer idealen Diode in Sperrichtung modelliert. Durch die idealen Komponenten entstehen keine Verluste im Speicher.

Mit dem Überschreiten der Spannung  $U_{ESS}$  beginnt die Diode zu leiten und ein Strom fließt in die Spannungsquelle. Die gespeicherte Energie entspricht dem Integral der Leistung über der Zeit multipliziert mit dem Wirkungsgrad des Speichers.

Soll der Energiespeicher die gespeicherte Energie auch zurückspeisen, muss ein komplexeres Modell verwendet werden. In dieser Arbeit wird diese

Möglichkeit nicht benötigt, da lediglich die eingesparte Energie ermittelt werden soll.

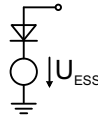


Abbildung 5.7: Simulationsmodell für einen Energiespeicher, der nur Leistung aus dem Oberleitungsnetz aufnimmt.

### 5.2.5 Weitere Faktoren

Für die Modellierung stellen die *weiteren Faktoren* eine besondere Herausforderung dar. Sie fassen sämtliche Parameter zusammen, die im Fahrgastbetrieb einen Einfluss auf das System und insbesondere auf die Simulation haben. Die Möglichkeiten sind dabei vielseitig: so haben die Anzahl der Fahrgästen, die Witterung oder auch andere Verkehrsteilnehmer, wie Fahrradfahrer, Fußgänger oder Autos, einen Einfluss auf den Energiebedarf der Fahrzeuge, da sie das Fahrprofil und die Haltezeiten bestimmen.

Es handelt sich dabei um stochastische Ereignisse, deren Verteilungsdichtefunktionen für simulative Untersuchungen bestimmt oder zumindest abgeschätzt werden müssen. Durch die Vielzahl an Faktoren sind die benötigten Parameter immens. In dieser Arbeit wird dies umgangen, indem Messdaten verwendet werden. Die vielen verschiedenen Betriebssituationen werden durch die Auswertung der Daten über einen langen Zeitraum berücksichtigt.

## 5.3 Theoretische Betrachtung des Bremsvorgangs

Im Folgenden werden die elektrischen Verhältnisse während des Bremsens untersucht. Die Betrachtungen beziehen sich dabei nur auf den generatorischen Anteil und nicht auf die Bremsleistung des gesamten Fahrzeugs. Zwar

werden abhängig von der benötigten Bremskraft im realen Betrieb zusätzlich auch mechanische Bremsen eingesetzt, dies bleibt hier jedoch außer Betracht.

Um die Beschreibungen übersichtlich zu halten, wird als Bremsleistung die Ausgangsleistung des Wechselrichters abzüglich der Leistung der Nebenverbraucher bezeichnet. Die Bremsleistung ist folglich die Leistung, die in die Oberleitung und / oder in die Bremswiderstände fließt. Die Leistung an den Bremswiderständen ist die ungenutzte Bremsleistung.

Mit den Komponenten aus dem vorherigen Abschnitt wird das Modell für einen Streckenabschnitt aufgebaut. In Abbildung 5.8 ist das elektrische Ersatzschaltbild für eine Strecke mit einem Fahrzeug, einem Gleichrichterunterwerk und einem Energiespeicher gezeigt. Der Innenwiderstand und die Leerlaufspannung des Unterwerks sowie der spezifische Widerstand der Oberleitung sind durch den betrachteten Streckenabschnitt vorgegeben. Die maximal zulässige Oberleitungsspannung  $U_{\max}$  ist durch den Betreiber festgelegt und der Wert für den Oberleitungswiderstand ergibt sich aus der Position des Fahrzeugs.

Aus der Abbildung 5.8 geht hervor, dass die Spannung für den Energiespeicher mindestens der Leerlaufspannung des Unterwerks entsprechen muss. Andernfalls würde ein kontinuierlicher Strom zwischen Unterwerk und Speicher fließen.

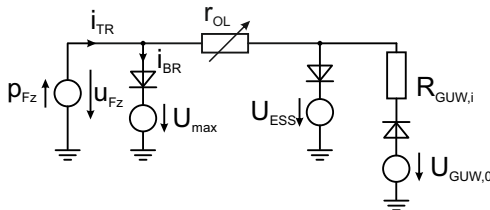


Abbildung 5.8: Allgemeines Ersatzschaltbild für einen Streckenabschnitt mit einem Fahrzeug, einem Energiespeicher und einem Gleichrichterunterwerk.



### 5.3.1 Ein Energiespeicher im Streckenabschnitt

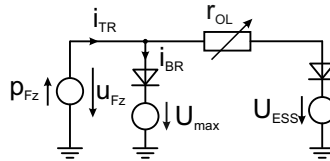


Abbildung 5.9: Vereinfachtes Ersatzschaltbild für ein bremsendes Fahrzeug im Streckenabschnitt

Während des Bremsvorgangs wird von dem Unterwerk keine Leistung eingespeist. Das Ersatzschaltbild aus Abbildung 5.8 kann daher zu dem in Abbildung 5.9 gezeigten Aufbau vereinfacht werden.

Beginnt das Fahrzeug zu bremsen, speist die Leistungsquelle einen Strom ein. Kann die Oberleitung die gesamte Bremsleistung aufnehmen, fließt der Strom lediglich durch den Oberleitungswiderstand  $r_{OL}$  und damit in den Energiespeicher. Der Strom im Bremswiderstand ist Null.

Entfernt sich das Fahrzeug weiter von dem Energiespeicher, steigt der Oberleitungswiderstand an. Überschreitet  $r_{OL}$  einen bestimmten Wert, kann die Oberleitung nicht mehr die gesamte Bremsleistung aufnehmen und ein Teil fließt in den Bremswiderstand. Ab diesem Punkt wird die Spannung an der Leistungsquelle  $p_{Fz}$  durch den Strom  $i_{BR}$  und die Spannungsquelle mit der Spannung  $U_{max}$  begrenzt.

Beim Bremsvorgang müssen folglich zwei Fälle betrachtet werden: Der Fall a, in dem die Oberleitung die gesamte Bremsleistung aufnehmen kann, und der Fall b, bei dem die Oberleitung die Bremsleistung nicht oder nur teilweise aufnehmen kann.

#### Fall a) Vollständige Bremsleistungsaufnahme

Wird die Bremsleistung vollständig von der Oberleitung aufgenommen, vereinfacht sich das in Abbildung 5.9 dargestellte Ersatzschaltbild zu dem in Abbildung 5.10 dargestellten Ersatzschaltbild. Das Fahrzeug brems mit ei-

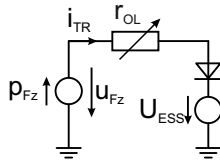


Abbildung 5.10: Resultierendes Ersatzschaltbild für ein bremsendes Fahrzeug, das die gesamte Bremsleistung in die Oberleitung einspeist

ner bestimmten Leistung  $p_{Fz}$ . Die Spannung an dem Fahrzeug stellt sich so ein, dass der Strom  $i_{tr} = \frac{p_{Fz}}{u_{Fz}}$  fließt. Für sie gilt:

$$u_{Fz} = U_{ESS} + r_{OL} \frac{p_{Fz}}{u_{Fz}} \quad (5.3)$$

$$u_{Fz} = \frac{U_{ESS}}{2} + \sqrt{\left(\frac{U_{ESS}}{2}\right)^2 + p_{Fz} r_{OL}} \quad (5.4)$$

Sie ist von der konstanten Spannung an dem Energiespeicher sowie von der Bremsleistung des Fahrzeugs und dem Oberleitungswiderstand abhängig. Die Verlustleistung an der Oberleitung beträgt

$$p_{OL} = \left(\frac{p_{Fz}}{u_{Fz}}\right)^2 r_{OL} \quad (5.5)$$

und der Energiespeicher nimmt die Leistung

$$p_{ESS} = \frac{U_{ESS} p_{Fz}}{u_{Fz}} \quad (5.6)$$

auf.

### Fall b) Teilweise Bremsleistungsaufnahme

Kann nicht die gesamte Bremsleistung in die Oberleitung eingespeist werden, wird ein Teil der Leistung von den Bremswiderständen in Wärme umgewandelt. Das Ersatzschaltbild entspricht dem in Abbildung 5.9 dargestellten Aufbau.

Die Fahrzeugspannung wird durch den Bremswiderstand auf  $U_{max}$  begrenzt. Das bremsende Fahrzeug verhält sich folglich wie eine Spannungsquelle. Dadurch, dass sich der Strom der Leistungsquelle auf die Oberleitung und den Bremswiderstand aufteilt, können *nicht* die Gleichungen 5.4, 5.5 und 5.6 aus dem vorherigen Abschnitt verwendet werden.

Mit der Knotenregel ( $i_{BR} = i_{Fz} - i_{OL}$ ) kann die folgende Gleichung für die Bremsleistung aufgestellt werden:

$$p_{BR} = \left( \frac{p_{Fz}}{U_{max}} - \frac{U_{max} - U_{ESS}}{r_{OL}} \right) U_{max} \quad (5.7)$$

Für die Leistung, die der Energiespeicher aufnimmt, gilt

$$p_{ESS} = \frac{U_{max} - U_{ESS}}{r_{OL}} U_{ESS} \quad (5.8)$$

Die Verlustleistung an der Oberleitung berechnet sich aus

$$p_{OL} = \frac{(U_{max} - U_{ESS})^2}{r_{OL}}. \quad (5.9)$$

### Gesamtleistungsaufnahmedistanz

Ab einem bestimmten Abstand zwischen Fahrzeug und Energiespeicher kann die Oberleitung nicht mehr die gesamte Bremsleistung aufnehmen und ein Teil der Leistung fließt in die Bremswiderstände. Dieser Punkt bildet den Übergang zwischen Fall a) und Fall b) und wird im Folgenden als Gesamtleistungsaufnahmedistanz bezeichnet.

Die Gesamtleistungsaufnahmedistanz wird erreicht, wenn die Fahrzeugspannung  $u_{Fz}$  aus Gleichung 5.4 die maximale Oberleitungsspannung  $U_{max}$  erreicht. Das Umstellen der Gleichung 5.4 und Einsetzen von Gleichung 5.1 ergibt

$$s_{GBR} = \frac{(U_{max} - U_{ESS})U_{max}}{p_{Fz}R'} \quad (5.10)$$

Neben der Abhängigkeit der Systemparameter (max. Oberleitungsspannung, Energiespeicherspannung und Widerstandsbelag der Oberleitung) ist die Bremsleistung des Fahrzeugs eine entscheidende Größe. Mit steigender Bremsleistung sinkt die Gesamtleistungsaufnahmedistanz.

Gleichung 5.10 beschreibt zwei weitere wichtige Zusammenhänge:

Es befinden sich zwei Fahrzeuge und kein Energiespeicher im Streckenabschnitt. Zeitgleich bremst ein Fahrzeug und das andere Fahrzeug beschleunigt. Durch die zeitliche Überlappung kann das beschleunigende Fahrzeug die Bremsleistung aufnehmen. Auch für den Leistungsfluss zwischen den beiden Fahrzeugen gilt Gleichung 5.10. Die Gesamtleistungsaufnahmedistanz entspricht also dem Abstand, bis wohin die Fahrzeuge untereinander die Bremsleistung vollständig austauschen.

Der zweite Zusammenhang ist für die Planung der Infrastruktur wichtig. Die Differenz von  $U_{max}$  und  $U_{ESS}$  ist im Fall b) das Spannungsgefälle am Oberleitungswiderstand, welcher von der Entfernung zwischen dem Fahrzeug und dem Energiespeicher abhängt. Werden vom Betreiber die Spannungsparameter so gewählt, dass eine größere Differenz besteht, wird die Gesamtleistungsaufnahmedistanz erhöht und es kann eine bessere Nutzung der Bremsenergie im Nahverkehrsnetz erreicht werden.

Tabelle 5.2: Parameter für die grafische Betrachtung mit einem Energiespeicher

Parameter	Wert
$U_{ESS}$	750 V
$U_{max}$	900 V
$R'$	0,2 m $\Omega$ /m
$p_{Fz}$	300 kW (konstant)

### Grafische Betrachtung

Zunächst wird der Abstand zwischen Fahrzeug und Speicher variiert und

betrachtet, welchen Einfluss der Oberleitungswiderstand auf das Bremsverhalten hat. Für eine anschauliche Betrachtung wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug mit einer konstanten Leistung über die gesamte Strecke bremst. Die Systemparameter sind in Tabelle 5.2 angegeben.

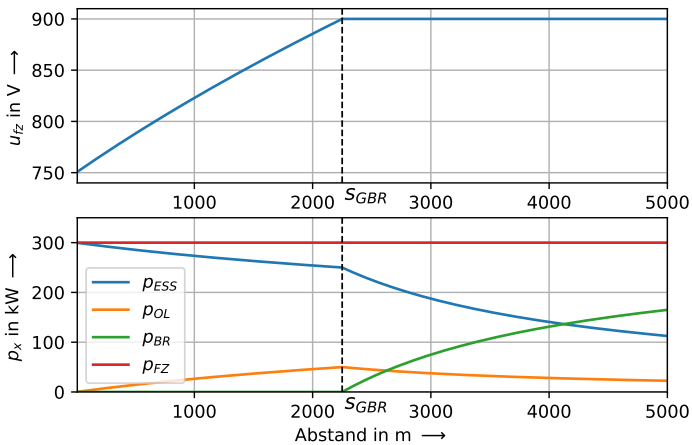


Abbildung 5.11: Örtlicher Verlauf der Oberleitungsspannung und der Leistungen beim Bremsen mit konstanter Leistung

In Abbildung 5.11 sind der örtliche Verlauf der Oberleitungsspannung und der Leistungen im System dargestellt. Das Fahrzeug entfernt sich zunehmend vom Speicher. Bis zum Erreichen der Gesamtleistungsaufnahmedistanz kann die Oberleitung die gesamte Bremsleistung aufnehmen. Die Verluste im System entstehen lediglich durch die Verlustleistung der Oberleitung, die mit zunehmender Entfernung ansteigen. Mit dem Erreichen der Gesamtleistungsaufnahmedistanz (hier: 2250 m) wird die Oberleitungsspannung am Fahrzeug auf 900 V begrenzt. Wie bereits beschrieben nimmt die Verlustleistung am Bremswiderstand (grün) mit zunehmender Entfer-

nung deutlich zu. Dadurch, dass die Fahrzeugspannung nun konstant ist und der Oberleitungswiderstand weiter linear steigt, nehmen die Verluste an der Oberleitung (orange) mit zunehmender Entfernung ab.

Das System erfüllt die folgende Leistungsbilanz:

$$p_{ESS} = p_{Fz} + p_{OL} + p_{BR} \tag{5.11}$$

Die Leistung an dem Energiespeicher ( $p_{ESS}$ , blau) entspricht der Fahrzeugleistung ( $p_{Fz}$ , rot) reduziert um die Verlustleistung der Oberleitung ( $p_{OL}$ , orange) und des Bremswiderstands ( $p_{BR}$ , grün). Oberhalb der Gesamtleistungsaufnahmedistanz nimmt die Energiespeicherleistung stark ab.

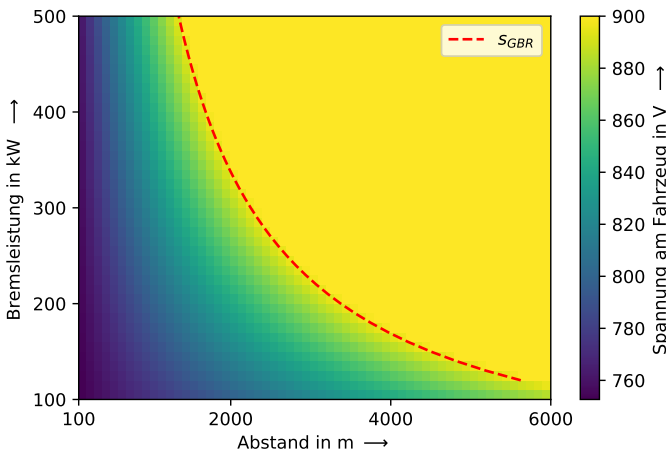


Abbildung 5.12: Resultierende Oberleitungsspannung für die Variation von Abstand und Bremsleistung

Wie beschrieben, ist die Leistung am Energiespeicher nicht nur von der Distanz zwischen Speicher und Fahrzeug, sondern auch von der Bremsleistung abhängig. Die Gesamtleistungsaufnahmedistanz in Abbildung 5.11 ist daher kein konstanter Punkt, sondern von der Leistung abhängig. Abbildung 5.12

zeigt die Spannung am Fahrzeug in Abhängigkeit vom Abstand *und* der Bremsleistung. In rot ist die Gesamtleistungsaufnahmedistanz gekennzeichnet. Der horizontale Verlauf in der Grafik mit der konstanten Bremsleistung von 300 kW entspricht dem Verlauf des oberen Graphen aus Abbildung 5.11. Der Bereich in Abbildung 5.11 bei dem die Spannung konstant ist bildet in Abbildung 5.12 ein Plateau, an dessen Kante sich die Gesamtleistungsaufnahmedistanz befindet.

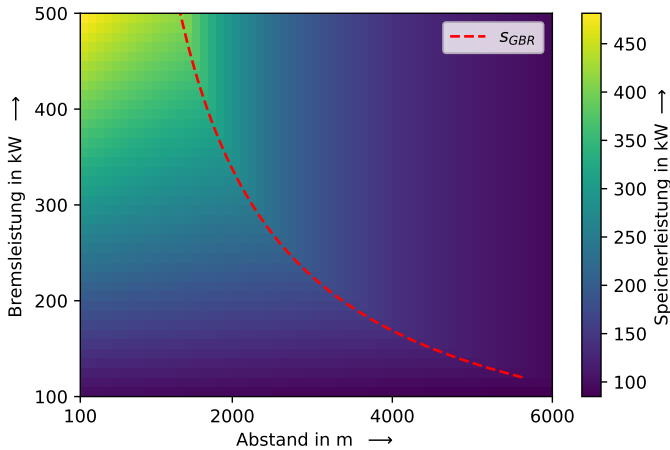


Abbildung 5.13: Leistung am Energiespeicher für unterschiedliche Bremsleistungen und Abstände des Fahrzeugs zum Speicher

Abbildung 5.13 zeigt die Leistung, die der Energiespeicher aufnimmt. Dabei werden ebenfalls der Abstand und die Bremsleistung des Fahrzeugs variiert. Bei kleinen Abständen entspricht die Speicherleistung fast vollständig der Bremsleistung. Der Anstieg der Gesamtleistungsaufnahmedistanz mit abnehmender Bremsleistung und auch der starke Abfall der Speicherleistung beim Überschreiten der Gesamtleistungsaufnahmedistanz sind erkennbar.

Die Verlustleistung an der Oberleitung in Abbildung 5.14 ist für die verschiedenen Bremsleistungen im Bereich der Gesamtleistungsaufnahmedistanz am größten. Dies ist auch in der unteren Grafik in Abbildung 5.11 erkennbar.

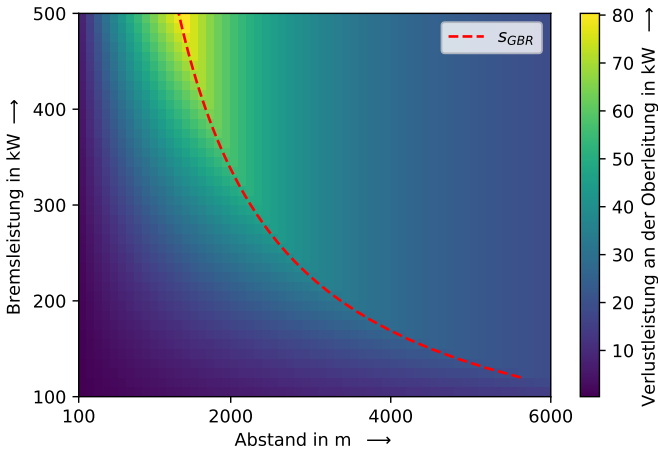


Abbildung 5.14: Verlustleistung an der Oberleitung in Abhängigkeit von der Bremsleistung und dem Abstand des Fahrzeugs zum Speicher

In der analytischen Betrachtung wurde bereits beschrieben, dass kleine Bremsleistungsbeträge weit im Netz übertragen werden können und nur geringe Verluste an der Oberleitung verursachen. In den Abbildungen 5.12, 5.13 und 5.14 wird dieser Sachverhalt ebenfalls deutlich.

In Abbildung 5.15 ist das Verhalten im Betrieb gezeigt, bei dem ein Fahrzeug eine Strecke abfährt und unterwegs bremst. Zunächst befindet sich das Fahrzeug im geringen Abstand zum Energiespeicher (ca. 150 m), dann entfernt es sich zunehmend. Die gekennzeichneten Punkte zeigen die ungenutzte Leistung am Bremswiderstand, die in die Oberleitung eingespeist werden würde, wenn sich ein Energiespeicher im Streckennetz befände.



Im Entfernungsbereich von ungefähr 1700 m steigt die Bremsleistung auf bis zu 500 kW an. Durch die hohe Leistung und die große Entfernung wird die Gesamtleistungsaufnahmedistanz teilweise überschritten. In diesem Beispiel kann die Oberleitung nicht die gesamte Bremsleistung aufnehmen und ein Teil fließt in den Bremswiderstand. Es fallen jedoch nur einzelne Messpunkte in diesen Bereich. Die Aufnahmefähigkeit des Oberleitungssystems steigt insgesamt durch den Energiespeicher deutlich und der Anteil an ungenutzter Energie ist nur gering.

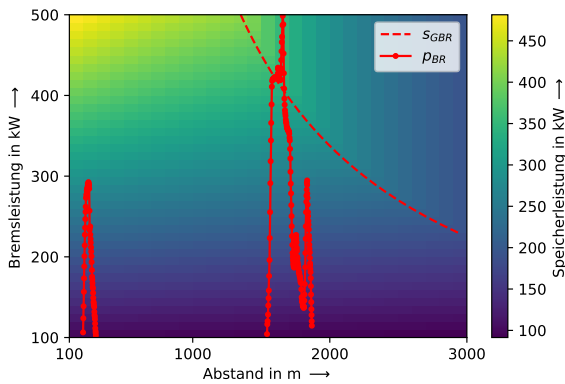


Abbildung 5.15: Bremsleistung  $p_{br}$  eines vorbeifahrenden Fahrzeugs und die Leistung am Energiespeicher

### 5.3.2 Zwei Energiespeicher im Speiseabschnitt

Das Szenario aus dem vorherigen Abschnitt wird um einen weiteren Energiespeicher ergänzt. Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 5.16 gezeigt. Das Fahrzeug befindet sich dabei zwischen den beiden Energiespeichern. Wie bei der vorherigen Betrachtung wird nur der Bremsvorgang untersucht. Es ist also auch kein Gleichrichterunterwerk für das Ersatzschaltbild notwendig. Die Speicher befinden sich an den Positionen  $x_0$  und  $x_1$  mit einem festen

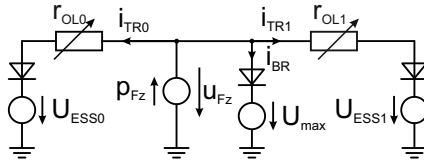


Abbildung 5.16: Ersatzschaltbild für einen Streckenabschnitt mit einem Fahrzeug zwischen zwei Energiespeichern

Tabelle 5.3: Parameter für die grafische Betrachtung mit zwei Energiespeichern

Parameter	Wert
$U_{ESS,0}, U_{ESS,1}$	850 V
$U_{max}$	900 V
$R'$	0,8 m $\Omega$ /m
$p_{Fz}$	200 kW (konstant)
$x_0$	10 000 m
$x_1$	25 000 m

Abstand zueinander ( $|x_1 - x_0|$ ). Für die Fahrzeugposition gilt zu Beginn der Betrachtung  $x(t) < x_0$ . Deshalb wird in der Simulation für die Oberleitung die Komponente aus Unterabschnitt 5.2.2 verwendet. Die Parameter des betrachteten Systems sind in Tabelle 5.3 aufgelistet.

Abbildung 5.17 zeigt die in die Oberleitung eingespeiste Leistung des Fahrzeugs ( $p_{Fz,IN}$ , orange) und die Verlustleistung am Bremswiderstand ( $p_{BR}$ , blau). Zum Vergleich ist die eingespeiste Leistung für den Fall gezeigt, dass sich nur ein Energiespeicher im Speiseabschnitt befindet. In den Bereichen um den Energiespeicher kann die gesamte Bremsleistung in die Oberleitung eingespeist werden. Mit dem Erreichen der Gesamtleistungsaufnahmedistanz wird ein Teil der Leistung im Bremswiderstand umgewandelt. Im Gegensatz zu dem Verlauf mit zwei Energiespeichern ist der Verlauf

von  $p_{FZ,IN}$  bei nur einem Speicher symmetrisch zur Speicherposition  $x_0$ . Bei zwei Speichern nimmt nicht nur der nächstliegende Speicher, sondern auch der andere einen Teil der Bremsleistung auf. Das Plateau von  $p_{FZ,IN}$  im Abschnitt zwischen den Speichern ist folglich etwas ausgeprägter und die Gesamtleistungsaufnahmedistanz ist größer.

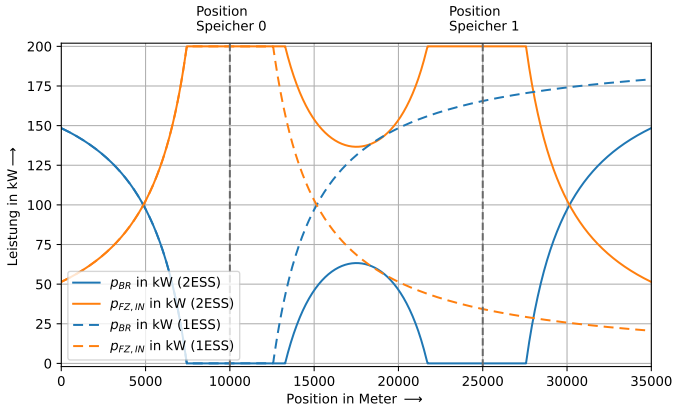


Abbildung 5.17: Eingespeiste Leistung eines bremsenden Fahrzeugs  $p_{FZ,IN}$  bei einem und bei zwei Speichern (ESS) und die Verlustleistung am Bremswiderstand  $p_{BR}$

### 5.3.3 Idealer Energiespeicherabstand

Aus Abbildung 5.17 ist ersichtlich, dass der ideale Speicherabstand im Streckennetz dann erreicht ist, wenn sich die Gesamtleistungsaufnahmedistanzen zwischen den Speichern genau treffen. Es ergibt sich dadurch zwischen ihnen ein durchgehendes Plateau und die gesamte Bremsleistung kann von der Oberleitung aufgenommen werden.

Für den idealen Abstand zwischen den Speichern gilt:

$$s_{\text{ideal}} = 2 \cdot s_{\text{GBR}} = 4 \frac{U_{\text{max}}(U_{\text{max}} - U_{\text{ESS}})}{p_{FZ}R'} \quad (5.12)$$

Die ausführliche Herleitung dazu befindet sich im Anhang im Abschnitt A.2. Wie schon bei den Betrachtungen mit einem Energiespeicher ist auch der ideale Abstand zwischen zwei Speichern abhängig von der Bremsleistung  $p_{Fz}$  und den Systemparametern  $U_{\max}$ ,  $U_{\text{ESS}}$  und  $R'$ . Um den Abstand zwischen den Speichern zu bestimmen, muss zusätzlich die Bremsleistung im Streckenabschnitt bekannt sein.

In [127] findet sich eine gekürzte Fassung von diesem Kapitel.

## 6 Integration von Energiespeichern in das Karlsruher Gleichstromnetz

### 6.1 Simulationsziel und Ablauf

Mit der Simulation sollen die eingesparte Energie, die durch die Speicher erreicht werden kann, und die idealen Speicherpositionen im Streckennetz bestimmt werden. Um den Versuchsraum einzuschränken, werden feste Speicherpositionen vorgegeben. Als mögliche Positionen werden die Unterwerksstandorte festgelegt. Die Vorgabe wird gemacht, da an diesen Stellen im Streckennetz bereits ein Anschluss an die Oberleitung vorhanden ist und durch das Unterwerk möglicherweise Platz für einen Speicher vorhanden ist. Das vereinfacht die Zugänglichkeit und minimiert die Kosten für die Installation der Speicher.

Jeder Streckenabschnitt wird zunächst mit nur einem Energiespeicher untersucht. Für den jeweiligen Standort mit der höchsten Energieeinsparung wird eine Energiespeicherdimensionierung vorgeschlagen. Abhängig vom erreichten Nutzungsgrad der zuvor ungenutzten Bremsenergie wird entschieden, ob anschließend auch mehrere Speicher im Streckenabschnitt untersucht werden.

Die Simulationsszenarien setzen sich aus mehreren Teilen zusammen. Bei den Strecken, auf denen in Einzel- und Doppeltraktion gefahren wird, werden beide Traktionsformen getrennt voneinander ausgewertet. Außerdem werden jeweils Hin- und Rückfahrt und auch Verzweigungen einzeln simuliert. Das Gesamtergebnis ergibt sich aus der Gewichtung der Teilergebnisse.

## 6.2 Besonderheiten bei der Auswertung

### 6.2.1 Definitionen

#### Bremsenergienutzungsgrad

Die Betrachtungen in dieser Arbeit beziehen sich auf den Anteil der ungenutzten Bremsenergie im Streckennetz. Mit der Bremsenergie ist folglich immer, sofern nicht anders angegeben, der ungenutzte Anteil gemeint. Im Folgenden ist der Bremsenergienutzungsgrad  $\eta_{\text{rück}}$  das Verhältnis von der in die Oberleitung eingespeisten Bremsenergie  $E_{OL,in,BR}$  zur ungenutzten Bremsenergie. Die eingespeiste Energie entspricht der ungenutzten Bremsenergie  $E_{BR}$  reduziert um die Verlustenergie in den Bremswiderständen  $E_{RB}$ . Es gilt:

$$\eta_{\text{rück}} = \frac{E_{OL,in,BR}}{E_{BR}} \cdot 100\% = \frac{E_{BR} - E_{RB}}{E_{BR}} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

Befindet sich kein Energiespeicher im Streckennetz, kann die ungenutzte Bremsenergie nicht in die Oberleitung eingespeist werden. Stattdessen wird sie in den Bremswiderständen umgewandelt ( $E_{BR} = E_{RB}$ ). In diesem Fall ist der Bremsenergienutzungsgrad 0 %.

Wird die gesamte Bremsenergie in die Oberleitung eingespeist, ist die Verlustenergie im Bremswiderstand Null ( $E_{RB} = 0$ ) und der Bremsenergienutzungsgrad beträgt  $\eta_{\text{rück}} = 100\%$ .

Der Bremsenergienutzungsgrad ist folglich eine Kenngröße für die Effizienz der Oberleitung und damit ein Maß für die Wirksamkeit des Speichers im Streckenabschnitt.

#### Oberleitungswirkungsgrad

Die Übertragungsverluste sind von verschiedenen Systemparametern und auch von der eingespeisten Leistung abhängig. Durch die Integration von mehreren Speichern in die Oberleitung kann sich der Strom in der Oberleitung aufteilen. Der wirksame Oberleitungswiderstand ändert sich, was sich auf die Übertragungsverluste auswirkt. Für den Vergleich der Szenarien

rien wird der Oberleitungswirkungsgrad verwendet, der wie folgt definiert ist:

$$\eta_{OL} = \frac{E_{OL,in,BR} - E_{ESS}}{E_{OL,in,BR}} = \frac{E_{BR} - E_{RB} - E_{ESS}}{E_{BR} - E_{RB}} = 1 - \frac{E_{ESS}}{E_{BR} - E_{RB}} \quad (6.2)$$

### 6.2.2 Gewichtung der Ergebnisse

Ein Streckenabschnitt kann sich aus mehreren Teilabschnitten zusammensetzen. Dabei kann es sich um Strecken mit Verzweigungen handeln, aber auch um Strecken mit verkürzten Umläufen. Die Anzahl der verfügbaren Messfahrten kann sich, je nach Einsatz der Messstraßenbahn, in den einzelnen Teilabschnitten unterscheiden. Es wird daher jeder Abschnitt separat simuliert und es wird abhängig von der fahrplanmäßigen Anzahl von Fahrten in jedem Teilabschnitt pro Tag und von den anteiligen Fahrten in Doppeltraktion das Gesamtergebnis gewichtet.

In jedem Teilabschnitt wird zwischen Einzel- (ET) und Doppeltraktion (DT) unterschieden. Um die Energie am Speicher zu bestimmen, wird für jeden Teilabschnitt  $j$  und jede Speicherposition  $k$  der Mittelwert von allen Fahrten  $N$  berechnet.

$$\bar{E}_{ESS,ET,k,j} = \frac{1}{N} \sum_i E_{ESS,ET,k,j,i} \quad (6.3)$$

$$\bar{E}_{ESS,DT,k,j} = \frac{1}{N} \sum_i E_{ESS,DT,k,j,i} \quad (6.4)$$

$i$  ist der Index für die Fahrten.

Für die Gesamtenergie wird die Summe aller Teilabschnitte gebildet. Die

Gewichtung der Traktionsform erfolgt über die jeweilige Anzahl der Fahrten laut Fahrplan.

$$\bar{E}_{\text{ESS,ET},k} = \sum_j \frac{n_{\text{ET},k,j}}{n_{\text{ET},k,j} + n_{\text{DT},k,j}} \bar{E}_{\text{ESS,ET},k,j} \quad (6.5)$$

$$\bar{E}_{\text{ESS,DT},k} = \sum_j \frac{n_{\text{DT},k,j}}{n_{\text{ET},k,j} + n_{\text{DT},k,j}} \bar{E}_{\text{ESS,DT},k,j} \quad (6.6)$$

$n_{\text{ET},k,j}$  ist die Anzahl der Fahrten in Einzeltraktion und  $n_{\text{DT},k,j}$  ist die Anzahl von Fahrten in Doppeltraktion jeweils pro Tag.

Die mittlere Gesamtenergie des Speichers für den Streckenabschnitt  $k$  beträgt dann:

$$\bar{E}_{\text{ESS},k} = \bar{E}_{\text{ESS,ET},k} + \bar{E}_{\text{ESS,DT},k} \quad (6.7)$$

### 6.2.3 Wirkungsgrad des Speichers

Die Betrachtungen erfolgen unabhängig von der Speichertechnologie und in den Simulationen werden ideale Energiespeicher angenommen. Beim Aufnehmen der Bremsleistung und beim Rückspeisen in die Oberleitung müssen die elektrischen Verluste der Leistungselektronik und des Speichers berücksichtigt werden. Diese Werte sind vom Betriebspunkt der Komponenten abhängig und nichtlinear. Im Folgenden werden aber, wie in der Literatur üblich, konstante Werte angenommen. Der aus einem Lade- und Entladevorgang bestehende Zykluswirkungsgrad ist von der verwendeten Speichertechnologie abhängig. Nach [55] liegt er für Lithium-Ionen-Speicher zwischen 80 % und 85 %, für Doppelschichtkondensatoren zwischen 77 % und 83 % und für Schwungradspeicher zwischen 80 % und 95 %. Da die Betrachtungen unabhängig von der Speichertechnologie erfolgen, wird für den Zykluswirkungsgrad 80 % angenommen.



### 6.2.4 Speicherdimensionierung

Für die passende Dimensionierung des Energiespeichers werden zwei wesentliche Größen benötigt: die Leistung und die Energie. Alle weiteren Parameter, wie der Spannungsbereich des Speichers, der Bauraum, der Temperaturbereich oder die Kühlung, sind für die folgenden Betrachtungen nicht relevant, da sie von der konkreten Umsetzung abhängen.

Um bei der Dimensionierung die benötigte Speicherleistung zu ermitteln, wird nicht die maximal auftretende Leistung am Speicher verwendet, sondern der Energieanteil ausgewertet. Selten auftretende Leistungsspitzen, die nur einen geringen Anteil im gesamten Energieumsatz besitzen, bestimmen infolgedessen nicht die Dimensionierung. Der Speicher wird dadurch für eine geringere Leistung ausgelegt und günstiger. Es wird dann allerdings nicht die gesamte Bremsenergie aufgenommen.

Bei den Simulationen wird nur die Aufnahme der Bremsenergie bestimmt. Das Rückspeisen der Energie in die Oberleitung wird nicht betrachtet. Der Speicher nimmt beim Bremsen die ungenutzte Bremsleistung auf. Bei einem idealen, verlustfreien System würde beim folgenden Beschleunigungsvorgang genau die gleiche Energiemenge benötigt werden. Durch die Systemverluste wie den Fahrwiderständen, im Speicher oder bei der Energieübertragung, kann davon ausgegangen werden, dass der Energiebedarf beim Beschleunigen größer ist, als die zuvor beim Bremsen gespeicherte Energie. Wird als Betriebsstrategie des Speichers die Aufnahme der Bremsenergie gewählt und findet daher keine weiteres Zwischenladen des Speichers statt, muss die mittlere Energie im Speicher Null betragen.

Um die benötigte Speicherenergie abzuschätzen, wird ein gleitendes Fenster über den simulierten Verlauf der Speicherleistung gelegt. Alle Werte außerhalb des definierten Zeitbereichs werden ausgeblendet. Aus den Werten im Fenster wird die Energie berechnet. Die Fensterung mit anschließender Summierung der Werte entspricht der diskreten Faltung mit einem Recht-

eckfenster. Der maximale Wert der Faltung wird für die Dimensionierung der benötigten Energie des Speichers verwendet.

### 6.3 Untersuchung der Abschnitte

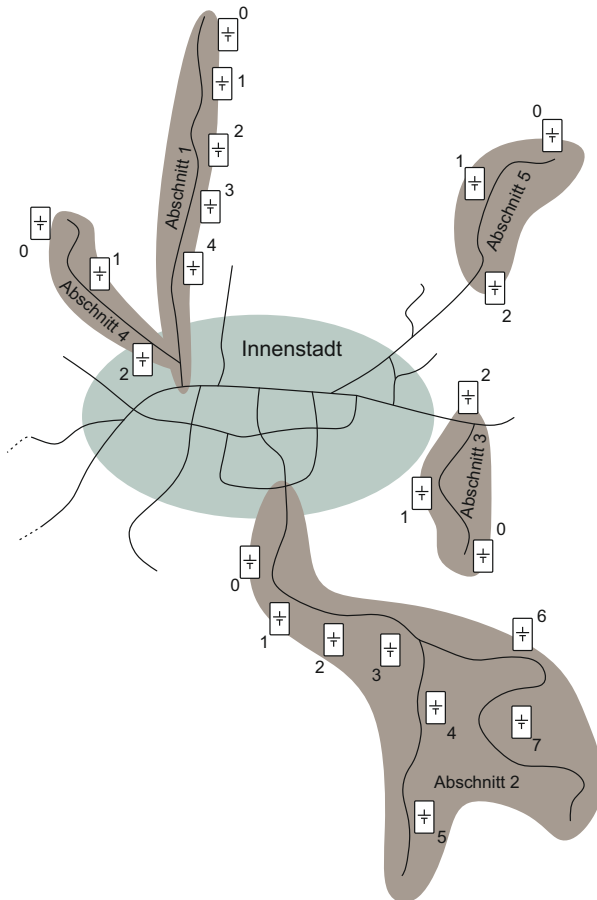


Abbildung 6.1: Übersicht zu den untersuchten Streckenabschnitten und den gewählten Speicherpositionen (nach [128])

Die im Abschnitt 4.5 ausgewählten Streckenabschnitte werden in den folgenden Betrachtungen genauer analysiert. Abbildung 6.1 zeigt die Streckenabschnitte und die ungefähren Speicherpositionen. Wie eingangs beschrieben wurde, befinden sich die Speicher an den jeweiligen Unterwerken. Die Betrachtung der Ergebnisse der ersten beiden Streckenabschnitte erfolgt sehr umfangreich. Da sich das Vorgehen für die weiteren Abschnitte nicht grundsätzlich ändert, werden deren Ergebnisse verkürzt dargestellt.

### **6.3.1 Abschnitt 1: S1/S11 Hochstetten**

Der Bereich umfasst den nördlichen Streckenabschnitt der Linien S1 und S11 zwischen den Haltestellen Hochstetten und Karlsruhe Yorckstraße. Der Streckenverlauf ist 15,7 km lang und umfasst 23 Haltestellen. Nur wenige Abschnitte weisen eine Steigung oder ein Gefälle auf. Die Höhendifferenzen sind dabei nur gering.

Da ein Teil der Umläufe auf der Linie S1/S11 in Neureut-Kirchfeld enden, wird der Streckenabschnitt in zwei Bereiche unterteilt: der erste Teilabschnitt geht von Hochstetten bis Neureut Kirchfeld. Der zweite Teilabschnitt grenzt an die Innenstadt und geht von Neureut Kirchfeld bis Karlsruhe Yorckstraße. Die Anteile der Traktionsform und die Anzahl der ausgewerteten Fahrten in den beiden Abschnitten zeigt Tabelle 6.1.

Mit 104 Fahrten pro Tag finden in dem zweiten Teilabschnitt deutlich mehr Fahrten statt als im ersten Teilabschnitt mit 67 Fahrten. Die zusätzlichen Fahrten auf dem verkürzten Umlauf werden größtenteils als Einzeltraktionsfahrten ausgeführt. Die Anzahl der Fahrten in Doppeltraktion ist für beide Teilabschnitte nahezu identisch. Für den ersten Teilabschnitt ist der verhältnismäßige Anteil an Fahrten in Doppeltraktion daher deutlich höher. Die Gewichtung der Traktionsform muss folglich für jeden Teilabschnitt einzeln durchgeführt werden. Dies erfolgt mit den Gleichungen 6.3 bis 6.7.

Tabelle 6.1: Übersicht zu den Gewichtungsfaktoren im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten

Teil- abschnitt	Fahrten in DT/ET pro Tag	Ausgewertete Fahrten	Fahrten am Tag laut Fahrplan
Hochstetten ↔	DT: 35 ( $\hat{=}$ 52 %)	80	67
Neureut	ET: 32		
Neureut ↔	DT: 37 ( $\hat{=}$ 36 %)	89	104
Yorckstraße	ET: 67		

### Übersicht zum Streckenabschnitt

Als mögliche Standorte für den gesamten Streckenabschnitt werden die Standorte der Gleichrichterunterwerke gewählt. Tabelle 6.2 listet die Standorte auf. Die sechs Unterwerke befinden sich in einem Abstand von 1,4 km bis 3,8 km zueinander. Die Leerlaufspannungen liegen hauptsächlich bei 800 V oder 830 V.

Das Unterwerk Blücherstraße wird in der Simulation ebenfalls berücksichtigt. Durch die hohe Leerlaufspannung von 850 V gibt dieses Unterwerk, wie in Abschnitt 5.3 diskutiert wurde, die Spannung  $U_{ESS}$  für die Energiespeicher in diesem Streckenabschnitt vor. In der Simulation darf es folglich nicht vernachlässigt werden, wegen der innenstadtnahen Lage wird es jedoch als potentieller Speicherstandort ausgeschlossen.

### Gesamtleistungsaufnahmedistanz

Das Histogramm für die ungenutzte Bremsleistung für die Fahrten in Einzel- und Doppeltraktion im Streckenabschnitt ist in Abbildung 6.2 gezeigt. Dabei sind nur Leistungen dargestellt, für die  $p_{BR} > 10 \text{ kW}$  gilt. Aus dem Diagramm geht hervor, dass ein großer Teil der Bremsleistung unterhalb von 300 kW liegt.

Die Speicherspannung muss der maximalen Leerlaufspannung der Gleich-

Tabelle 6.2: Übersicht zu den Gleichrichterunterwerken im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten

Bezeichnung	Name	Abkürzung	Leerlaufspannung	Streckenkilometer
ESS 0	Linkenheim Nord	LN	830 V	1,8
ESS 1	Linkenheim Süd	LS	830 V	3,2
ESS 2	Eggenstein	EGG	800 V	7,0
ESS 3	Neureut	NR	800 V	9,0
ESS 4	Friedrich- Naumann Straße	FN	800 V	12,0
GUW BL	Blücher- straße	BL	850 V	14,5

richterunterwerke im Streckenabschnitt entsprechen. In diesem Abschnitt ist es das Unterwerk an der Blücherstraße. Es gilt daher  $U_{\text{ESS}} = 850 \text{ V}$ . Der mittlere Widerstandsbelag der Oberleitung im gesamten Streckenabschnitt beträgt  $46 \text{ m}\Omega/\text{km}$ .

Die Gesamtleistungsaufnahmedistanz nach Gleichung 5.10 beträgt

$$s_{\text{GBR}} = \frac{(900 \text{ V} - 850 \text{ V}) \cdot 900 \text{ V}}{300 \text{ kW} \cdot 46 \frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}} = 3,3 \text{ km} \quad (6.8)$$

Der ideale Abstand zwischen zwei Speichern beträgt nach Gleichung 5.12  $6,6 \text{ km}$ .

Bei den Simulationsergebnissen ist folglich zu erwarten, dass der Speicherstandort ESS 0 schlecht abschneiden wird. Der ideale Wirkbereich beträgt

bei einem auf der Strecke zentrierten Standort 6,6 km. Auf Grund seiner Randlage am Streckenkilometer 1,8 wird der Wirkungsbereich eingeschränkt, wodurch tendenziell weniger Energie aufgenommen wird.

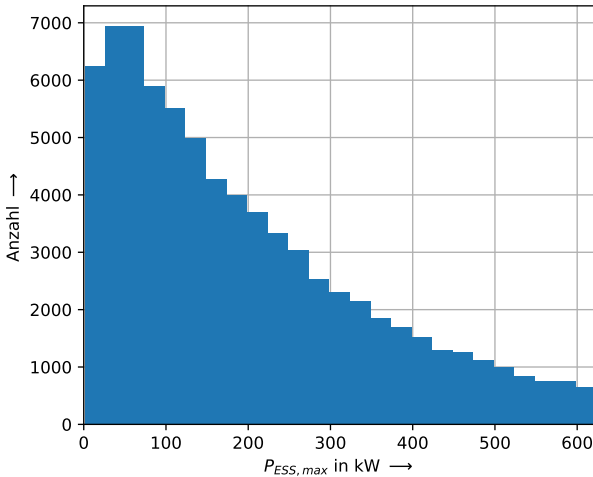


Abbildung 6.2: Histogramm der ungenutzten Bremsleistung für Einzel- und Doppeltraktion im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten (Ausschnitt bis 600 kW)

### Ergebnisse für einen Energiespeicher im Streckenabschnitt

In Tabelle 6.3 sind die Ergebnisse für die aufgenommene und die eingesparte Energie für einen idealen Energiespeicher im Streckenabschnitt aufgelistet.

Mit 450 kWh eingesparter Energie ist ein Speicher am Gleichrichterunterwerk Eggenstein der beste Standort. Die eingesparte Energie berücksichtigt den Zykluswirkungsgrad von 80 %. Der Speicher befindet sich nahezu mittig im Streckenabschnitt, so dass dieser in beide Fahrtrichtungen wirken kann. Der Standort ESS 0 schneidet am schlechtesten ab. Auch am anderen

Tabelle 6.3: Ergebnisse für einen Energiespeicher im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten

<b>Speicher- position</b>	<b>Aufgenommene Energie pro Tag</b>	<b>Eingesparte Energie pro Tag</b>
ESS 0 LN	450 kWh	360 kWh
ESS 1 LS	510 kWh	405 kWh
<b>ESS 2 EGG</b>	<b>560 kWh</b>	<b>450 kWh</b>
ESS 3 NR	540 kWh	430 kWh
ESS 4 FN	460 kWh	370 kWh

Ende des Streckenabschnitts nimmt die eingespeiste Energie ab. Der Standort ESS 4 ist nur geringfügig besser als der Standort ESS 0.

In Abbildung 6.3 ist das Histogramm der Speicherleistung für den Speicher ESS 2 in Eggenstein gezeigt. Der Wertebereich ist dabei auf eine maximale Leistung von 1000 kW begrenzt. Auffallend sind die Sprünge bei den Speicherleistungen von 175 kW, 300 kW und 550 kW. Leistungswerte über 600 kW treten nur selten auf.

Für die Dimensionierung des Speichers wird nicht die maximal auftretende Leistung herangezogen. Wird die Speicherleistung geringer gewählt, kann ein Teil der Bremsleistung nicht aufgenommen werden. Um den Einfluss der Leistungsbegrenzung zu untersuchen, wird die maximale Speicherleistung variiert und die gespeicherte Energie ermittelt. Für den Speicher an der Position ESS 2 ist in Abbildung 6.4 der Anteil an gespeicherter Energie bezogen auf die maximale Energie dargestellt. Die mögliche Speicherleistung wird in 25 kW-Schritten bis 1000 kW variiert.

Zwar beträgt die maximale Leistung am Energiespeicher 1720 kW, mit einer Speicherleistung von 1000 kW lässt sich jedoch nahezu die gesamte Energie aufnehmen. Selbst bei einer Begrenzung auf 700 kW können 99 % der

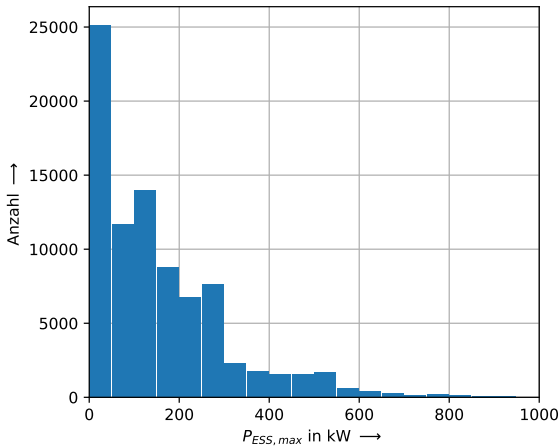


Abbildung 6.3: Histogramm der Speicherleistung an der Position ESS 2 im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten

maximal möglichen Energie gespeichert werden.

Zur Bestimmung der kurzzeitig gespeicherten Energie im Speicher wird für jede simulierte Fahrt die Speicherleistung mit einem Rechteckfenster gefaltet und das Maximum ausgewählt. Das Rechteckfenster hat eine Breite von 1200 Samples, das entspricht einer Dauer von 120 Sekunden.

Abbildung 6.5 zeigt die maximale Kurzzeit-Energie des Energiespeichers ESS 2 für die Fahrten in den jeweiligen Streckenabschnitten. Dabei wird zwischen den Fahrten in Doppeltraktion und Einzeltraktion unterschieden. Der Speicher befindet sich im Abschnitt zwischen Hochstetten und Neureut. Es ist deutlich erkennbar, dass für die Fahrten in diesem Streckenabschnitt kurzzeitig mehr Energie zwischengespeichert wird als im innenstadtnahen Abschnitt zwischen Neureut und Yorckstraße.

Für die Wahl der Energie des Speichers werden die Perzentile der gefenserten Energie für alle Fahrten bestimmt. Das 95. Perzentil beträgt 3,6 kWh und das 99. Perzentil 5,8 kWh.



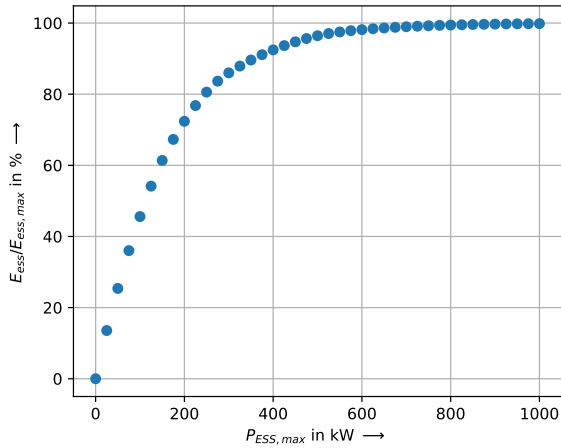


Abbildung 6.4: Anteil an gespeicherter Energie an der Position ESS 2 im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten

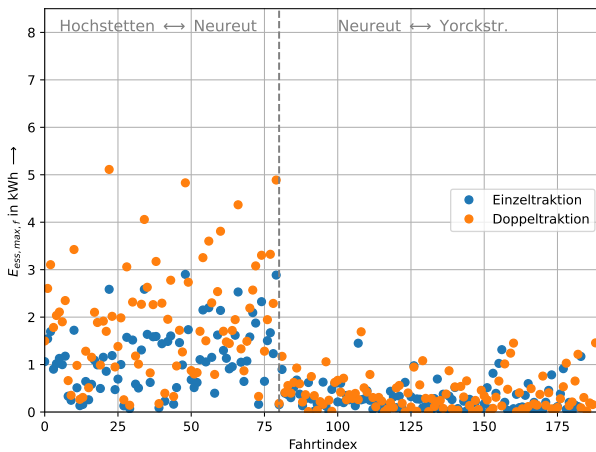


Abbildung 6.5: Gefensterte Energie am Speicher der Position ESS 2 im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten

Soll ein Energiespeicher in den Streckenabschnitt integriert werden, ist die empfohlene Konfiguration ein Energiespeicher mit einer Leistung von 700 kW und einer Energie von 3,6 kWh bis 5,8 kWh.

Der Bremsenergienutzungsgrad für den Streckenabschnitt mit Energiespeicher beträgt 84 %. Der Oberleitungswirkungsgrad liegen bei 95 %.

### Ergebnisse für zwei Energiespeicher im Streckenabschnitt

Um den Bremsenergienutzungsgrad zu erhöhen, werden zwei Energiespeicher in den Streckenabschnitt integriert. Die Varianten bei den möglichen Speicherpositionen werden dadurch eingeschränkt, dass nicht alle Kombinationen berücksichtigt werden. Im vorherigen Abschnitt wurde bereits der ideale Abstand zwischen zwei Speichern im Streckenabschnitt berechnet. Es werden daher nur Speicherkombinationen verwendet, bei denen der Abstand im Bereich von 6,6 km oder größer liegt. Tabelle 6.4 listet die Speicherkombinationen und deren Abstand zueinander auf.

Tabelle 6.4: Speicherpositionen für zwei Speicher im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten

<b>Index</b>	<b>Speicher- position</b>	<b>Abstand zw. den Speichern</b>
0	ESS 0/2	5,2 km
1	ESS 0/3	7,2 km
2	ESS 0/4	10,2 km
3	ESS 1/3	5,8 km
4	ESS 1/4	8,8 km

Für die verschiedenen Speicherplatzkombinationen sind die Simulationsergebnisse bei der Verwendung von idealen Speichern in Tabelle 6.5 aufgeführt. Deren Ergebnisse unterscheiden sich nur geringfügig voneinander und

Tabelle 6.5: Ergebnisse für zwei Energiespeicher im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten

Index	Speicher- position	Aufgenommene Energie pro Tag	Eingesparte Energie pro Tag
0	ESS 0/2	625 kWh	500 kWh
1	ESS 0/3	665 kWh	530 kWh
2	ESS 0/4	655 kWh	520 kWh
<b>3</b>	<b>ESS 1/3</b>	<b>670 kWh</b>	<b>535 kWh</b>
<b>4</b>	<b>ESS 1/4</b>	<b>670 kWh</b>	<b>535 kWh</b>

weichen um weniger als  $\pm 5\%$  vom Mittelwert ab. Die Wahl der Speicherposition kann folglich von den örtlichen Gegebenheiten an den Standorten abhängig gemacht werden.

Entgegen den Ergebnissen aus dem vorherigen Abschnitt schneiden die Kombinationen mit der Speicherposition ESS 0 nur geringfügig schlechter ab.

Für die Speicherkombination ESS 1/4 beträgt der Bremsenergienutzungsgrad 99 % und der Wirkungsgrad der Oberleitung liegt bei 97 %.

Die Anteile an gespeicherter Energie der Speicher ESS 1 und ESS 4 in Abhängigkeit zur Speicherleistung sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Für die Speicher ergeben sich unterschiedliche Verläufe. Mit der Vorgabe, dass 99 % der gesamten Energie gespeichert werden soll, ergibt sich für den Speicher an der Position ESS 1 eine Leistung von 925 kW und für die Position ESS 4 eine Speicherleistung von 700 kW. Die maximal auftretenden Leistungsspitzen betragen 1660 kW für den Speicher ESS 1 und 1375 kW für den Speicher ESS 4.

Zur Bestimmung der Energie des Speichers wird ebenfalls die Faltung mit einem 120 Sekunden breiten Rechteckfenster durchgeführt und es werden

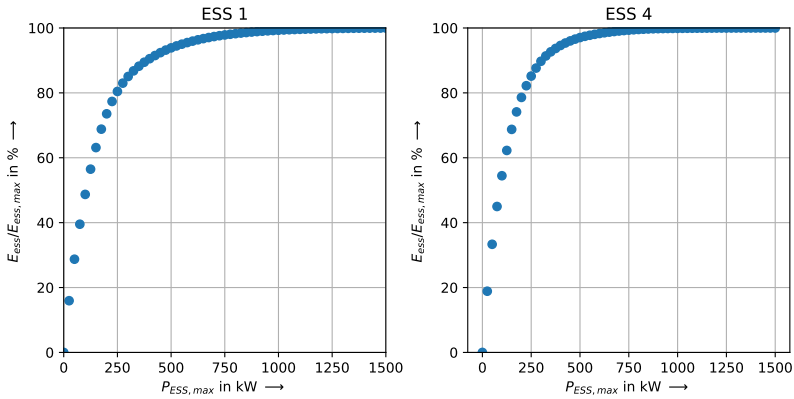


Abbildung 6.6: Anteil an gespeicherter Energie an der Position ESS 2 im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten

die Maximalwerte der Energien ausgewählt. Die Werte für die beiden Speicher sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Während der ESS 1 hauptsächlich im Teilabschnitt Hochstetten-Neureut wirkt, wirkt ESS 4 in beiden Teilabschnitten fast gleichermaßen.

Für ESS 1 betragen das 95. Perzentil 2,7 kWh und das 99. Perzentil 5,4 kWh. Für den Speicher an der Position ESS 4 beträgt das 95. Perzentil 1,7 kWh und das 99. Perzentil 2,6 kWh.

### Diskussion der Ergebnisse

Wird nur ein Energiespeicher in den Streckenabschnitt integriert, eignet sich ein Standort beim mittleren Unterwerk Eggenstein, Standort ESS 2, am besten, da dort die meiste Energie eingespart wird. Wie in der theoretischen Betrachtung beschrieben wurde, sind die Randpositionen weniger gut geeignet.

Bereits mit einem Speicher liegt der Bremsenergienutzungsgrad bei 84%. Mit der Integration eines zweiten Speichers lässt sich der Nutzungsgrad auf

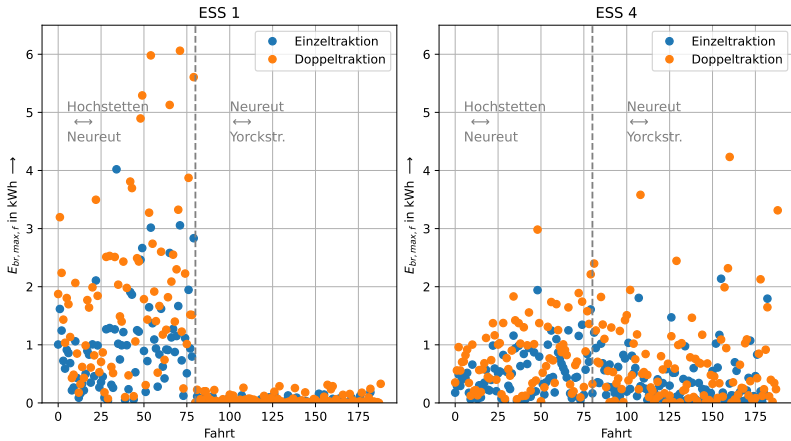


Abbildung 6.7: Gefenstertere Energie am Speicher ESS 1 und ESS 4 im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten

99 % steigern und die Bremsleistung wird fast vollständig in die Oberleitung eingespeist. Zusätzlich werden die Übertragungsverluste reduziert.

Befinden sich zwei Speicher im Streckenabschnitt, ändert sich im Vergleich zu einem Speicher im Abschnitt die Dimensionierung. Durch die geringere Distanz der Speicher zu den Fahrzeugen wird die Gesamtleistungsaufnahmedistanz seltener überschritten, und die Leistung am Speicher ist höher. Dadurch, dass sich der Leistungsfluss auf beide Speicher aufteilen kann, ist die benötigte Speicherenergie geringer.

Auffallend ist, dass die Speicherkombinationen, bei denen sich ein Speicher am Rand des Streckenabschnitts befindet, im Vergleich zu den Untersuchungen mit einem Speicher nicht zwangsläufig schlecht abschneiden.

### 6.3.2 Abschnitt 2: S1/S11 Schwarzwaldrand

#### Streckenübersicht

Der Bereich umfasst die Linie S1 von Karlsruhe Albtalbahnhof bis Bad Herrenalb und die Linie S11 von Karlsruhe Albtalbahnhof bis Ittersbach

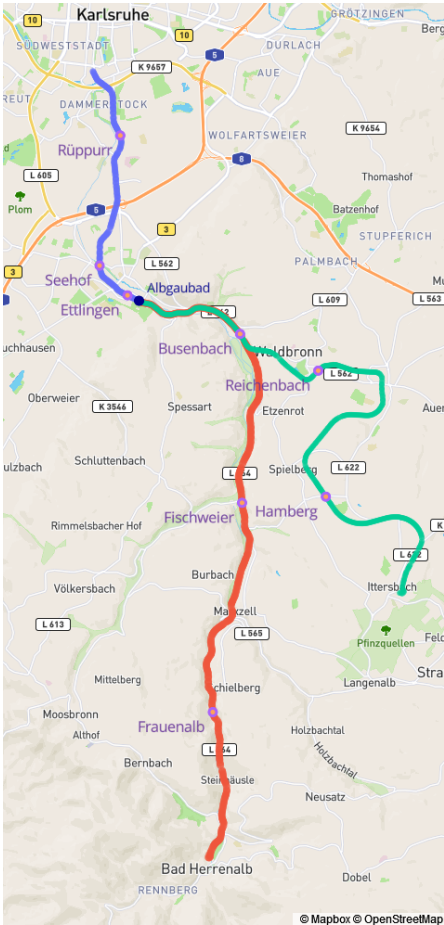


Abbildung 6.8: Linienvverlauf und Unterwerkstandorte im Streckenabschnitt der S1/S11 am Schwarzwaldrand (erstellt mit ©Mapbox und ©OpenStreetMap)

Rathaus. Vom Albtalbahnhof bis Busenbach verlaufen beide Linien auf der gleichen Infrastruktur, bevor sie sich dort trennen. Abbildung 6.8 zeigt den Streckenverlauf.

Die gesamte Strecke wird in drei Teilabschnitte unterteilt. Als Punkt für die Aufteilung wird die Haltestelle Ettlingen Albgaubad (ALG) verwendet. Das vereinfacht die Simulation von verkürzten Umläufen, die an dieser Haltestelle enden.

Der erste Teilabschnitt liegt zwischen den Haltestellen Albtalbahnhof (ATB) und Ettlingen Albgaubad. Der Teilabschnitt umfasst 11 Haltestellen und ist in Abbildung 6.8 blau gekennzeichnet. Der zweite Teilabschnitt ist die Linie S1 zwischen Ettlingen Albgaubad und Bad Herrenalb (BH). Auf dem rot dargestellten Teilabschnitt befinden sich 10 Haltestellen. Der dritte Teilabschnitt ist die Linie S11 zwischen den Haltestellen Ettlingen Albgaubad und Ittersbach Rathaus (ITT). Der Teilabschnitt ist in Abbildung 6.8 grün dargestellt und umfasst 12 Haltestellen.

Die Strecken führen in den Schwarzwald, weshalb die Strecken nicht mehr nur in der Ebene verlaufen. Die Haltestelle Karlsruhe Albtalbahnhof befindet sich bei 114 m über Normalnull. Der Teilabschnitt vom Albtalbahnhof nach Ettlingen Albgaubad (140 m über Normalnull) ist 7,4 km lang und weist zunächst nur eine geringe mittlere Steigung auf.

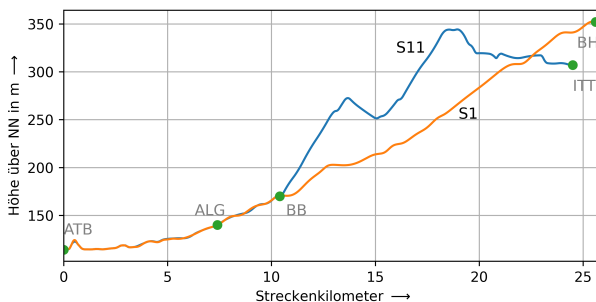


Abbildung 6.9: Topographie der Strecken S1/S11 am Schwarzwaldrand

Die S1 von Ettlingen Albgaubad nach Bad Herrenalb und die S11 von Ettlingen Albgaubad nach Ittersbach Rathaus sind die Teilabschnitte mit der größten mittleren Steigung im Karlsruher Gleichstromnetz. Der Abschnitt nach Bad Herrenalb (352 m über Normalnull) ist 18,1 km lang, bei einer Höhendifferenz von 212 m. Ittersbach Rathaus liegt 307 m über Normalnull und die Strecke nach Ettlingen beträgt 17,1 km mit einer Höhendifferenz von 167 m. Die maximale Erhebung auf dem Teilabschnitt nach Ittersbach ist 344 m über Normalnull. Das beschriebene Höhenprofil der S1 und der S11 für den betrachteten Streckenabschnitt ist in Abbildung 6.9 gezeigt.

Tabelle 6.6: Übersicht zu den Gleichrichterunterwerken im Streckenabschnitt S1/S11 Schwarzwaldrand

<b>Bezeichnung</b>	<b>Name</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Leerlaufspannung</b>	<b>Strecken-kilometer</b>
ESS 0	Rüppurr	RR	820 V	2,0
ESS 1	Seehof	SH	820 V	4,0
ESS 2	Ettlingen	ETT	845 V	7,4
ESS 3	Busenbach	BB	870 V	10,7
ESS 4	Fischweier	FW	790 V	15,5
ESS 5	Frauenalb	FA	840 V	22,7
ESS 6	Reichenbach	RB	820 V	13,7
ESS 7	Hamburg	HA	830 V	20,4

Als Speicherstandorte werden die Positionen der Gleichrichterunterwerke gewählt. Tabelle 6.6 listet die Positionen auf. Ein Teil der Standorte befindet sich in den Teilabschnitten, die nicht von beiden Linien befahren werden. Die Speicherstandorte sind in Abbildung 6.8 gekennzeichnet.

Im Vergleich zum nördlichen Streckenabschnitt der S1/S11 ist der Abstand zwischen den Unterwerken in diesem Abschnitt mit teilweise über 6 km



größer. Die Teilabschnitte von Ettlingen nach Bad Herrenalb und Ittersbach sind größtenteils eingleisig ausgeführt. Durch die hohe Steigung in diesen Streckenabschnitten und den großen Unterwerksabstand sind, wie im Unterabschnitt 2.6.1 beschrieben, Verstärkungsleitungen parallel zur Oberleitung vorhanden. Diese reduzieren den Oberleitungswiderstand und damit den Spannungsfall entlang der Oberleitung.

Tabelle 6.7: Übersicht zu den Gewichtungsfaktoren im Streckenabschnitt S1/S11 Schwarzwaldrand

<b>Teilabschnitt</b>	<b>Fahrten in DT/ET pro Tag</b>	<b>Ausgewertete Fahrten</b>	<b>Fahrten am Tag laut Fahrplan</b>
Bad Herrenalb ↔ Ettlingen	DT: 14 ( $\hat{=}$ 44 %) ET: 18	98	32
Ittersbach ↔ Ettlingen	DT: 10 ( $\hat{=}$ 25 %) ET: 30	86	40
Ettlingen ↔ Albtalbahnhof	DT: 39 ( $\hat{=}$ 34 %) ET: 75	237	114

Die Anzahl der untersuchten Fahrten in den Teilabschnitten ist in Tabelle 6.7 aufgelistet. Auf den Teilabschnitten von Ettlingen nach Bad Herrenalb und von Ettlingen nach Ittersbach wird in beide Richtungen jeweils zwei Mal pro Stunde gefahren. An einem Tag werden daher weniger Fahrten durchgeführt als im gemeinsamen Abschnitt zwischen Karlsruhe und Ettlingen, wo in beide Richtungen im 10-Minuten-Takt gefahren wird. Wie bei den Betrachtungen zum nördlichen Streckenabschnitt sind in diesem Abschnitt der S11/S11 für die einzelnen Teilabschnitte die Anteile der beiden Traktionsformen unterschiedlich.

### Ergebnisse für einen Energiespeicher im Streckenabschnitt

Tabelle 6.8 zeigt die mittlere Energie, die der Speicher pro Tag aufnimmt und die eingesparte Energie pro Tag unter der Annahme, dass der Wirkungsgrad 80 % beträgt. Der beste Standort ist am Unterwerk Reichenbach (ESS 6). Die eingesparte Energie pro Tag beträgt 540 kWh und ist nur geringfügig höher als die eingesparte Energie des Speichers am Unterwerk Busenbach (ESS 3). Beide Speicher befinden sich an der Gabelung der beiden Linien, zentral im gesamten Streckenverlauf.

Das Vorgehen bei der Dimensionierung des Speichers erfolgt analog zu dem Vorgehen aus dem vorherigen Abschnitt: Für den Energiespeicher ESS 6 ergibt sich ein Leistung von 575 kW und eine Energie von 3,6 kWh bei Verwendung des 95. Perzentils bzw. bei dem 99. Perzentil eine Energie von 4,9 kWh. Die maximal am Speicher auftretende Leistung beträgt 1400 kW. Der Bremsenergienutzungsgrad beträgt für den Energiespeicher ESS 6 48 %.

Tabelle 6.8: Ergebnisse für einen Energiespeicher im Streckenabschnitt S1/S11 Schwarzwaldrand

<b>Speicher- position</b>	<b>Aufgenommene Energie pro Tag</b>	<b>Eingesparte Energie pro Tag</b>
ESS 0 RR	400 kWh	320 kWh
ESS 1 SH	485 kWh	385 kWh
ESS 2 ETT	545 kWh	435 kWh
ESS 3 BB	665 kWh	530 kWh
ESS 4 FW	575 kWh	460 kWh
ESS 5 FA	500 kWh	400 kWh
<b>ESS 6 RB</b>	<b>675 kWh</b>	<b>540 kWh</b>
ESS 7 HA	630 kWh	505 kWh

### **Ergebnisse für drei Energiespeicher im Streckenabschnitt**

Um den Bremsenergienutzungsgrad gegenüber einem Energiespeicher im Streckenabschnitt zu erhöhen, werden im Folgenden drei Speicher in den Streckenabschnitt integriert. Bei den Speicherpositionen sind wieder die Positionen der Unterwerke zugelassen. Um die Anzahl der Kombinationen einzuschränken, werden aufeinanderfolgende Unterwerkspositionen zugelassen. Die Tabelle 6.9 zeigt die gewählten Speicherplatzpositionen und die Simulationsergebnisse.

Durch die zusätzlichen Energiespeicher lässt sich die eingesparte Energie steigern. Die meiste Bremsenergie nimmt die Speicherkombination ESS 3/5/7 auf. Der Speicher ESS 3 befindet sich beim Unterwerk Busenbach; ESS 5 befindet sich auf der Linie S1 im Teilabschnitt zwischen Busenbach und Bad Herrenalb beim Unterwerk Frauenalb und der Speicher ESS 7 befindet sich entlang der Linie S11 im Teilabschnitt zwischen Busenbach und Ittersbach beim Unterwerk Hamberg. Die Speicherkombination zeichnet sich dadurch aus, dass sich in jedem Teilabschnitt ein Energiespeicher befindet. Die Kombinationen, bei denen sich zwei Speicher in einem Teilabschnitt befinden, schneiden schlechter ab.

Wie im vorherigen Abschnitt werden mit der Variation der Speicherleistung und der dabei eingesparten Energie die Leistung des Speichers und mit der Bestimmung der maximalen Kurzzeit-Energie die Energie des Speichers dimensioniert. Die Ergebnisse fasst Tabelle 6.10 zusammen.

Der Bremsenergienutzungsgrad für die Speicherkombination ESS 3/5/7 beträgt 86 %.

Die Auswirkung der Speicher lässt sich in den Diagrammen mit der maximalen Kurzzeit-Bremsenergie in Abbildung 6.10 erkennen. Da es die Fahrten mit der höchsten ungenutzten Bremsenergie sind, sind für jeden Energiespeicher nur die Fahrten in Doppeltraktion und die Teilabschnitte von Bad Herrenalb und Ittersbach nach Ettlingen Albgäubad dargestellt.

Tabelle 6.9: Ergebnisse für drei Energiespeicher im Streckenabschnitt S1/S11 am Schwarzwaldrand

<b>Index</b>	<b>Speicher- positionen</b>	<b>Aufgenommene Energie pro Tag</b>	<b>Eingesparte Energie pro Tag</b>
0	ESS 0/2/4	785 kWh	630 kWh
1	ESS 0/2/5	820 kWh	650 kWh
2	ESS 0/2/6	800 kWh	640 kWh
3	ESS 0/2/7	865 kWh	690 kWh
4	ESS 0/3/5	990 kWh	795 kWh
5	ESS 0/3/6	835 kWh	670 kWh
6	ESS 0/3/7	1005 kWh	800 kWh
7	ESS 0/4/6	960 kWh	770 kWh
8	ESS 0/4/7	1065 kWh	850 kWh
9	ESS 0/5/7	1110 kWh	885 kWh
10	ESS 1/3/5	1040 kWh	830 kWh
11	ESS 1/3/6	880 kWh	700 kWh
12	ESS 1/3/7	1050 kWh	840 kWh
13	ESS 1/4/6	1015 kWh	810 kWh
14	ESS 1/4/7	1120 kWh	895 kWh
15	ESS 1/5/7	1165 kWh	935 kWh
16	ESS 2/4/6	950 kWh	760 kWh
17	ESS 2/4/7	1075 kWh	860 kWh
18	ESS 2/5/7	1140 kWh	910 kWh
<b>19</b>	<b>ESS 3/5/7</b>	<b>1210 kWh</b>	<b>965 kWh</b>

Tabelle 6.10: Dimensionierung der Speicher im Streckenabschnitt S1/S11 am Schwarzwaldrand

Speicher	$P_{\max}$	$P_{\text{ESS}}$	95. Perz.	99. Perz.
ESS 3	1590 kW	725 kW	4,2 kWh	5,6 kWh
ESS 5	1860 kW	1170 kW	5,5 kWh	7,2 kWh
ESS 7	1580 kW	875 kW	3,9 kWh	5,9 kWh

Bei den Speichern ESS 5 und ESS 7 ist deutlich zu erkennen, dass sie nur in ihren Teilabschnitten wirken. Die Energie, die sie aus dem benachbarten Teilabschnitt aufnehmen, kann vernachlässigt werden. Bedingt durch seine Position wirkt der Speicher ESS 3 hauptsächlich im gemeinsamen Teilabschnitt und damit für beide Linien.

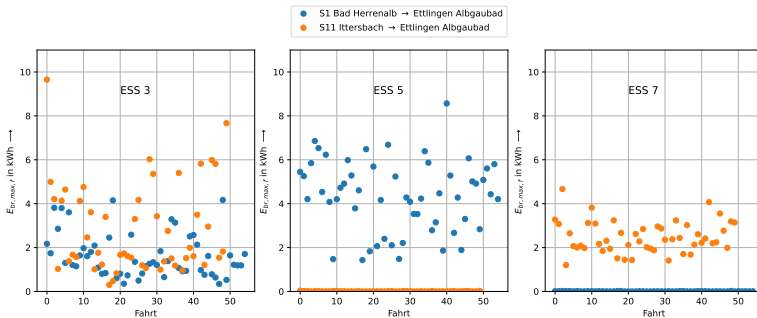


Abbildung 6.10: Energieaufnahme der Speicher für die einzelnen Teile in Streckenabschnitt der S1/S11 am Schwarzwaldrand

## Diskussion der Ergebnisse

Bei dem Abschnitt handelte es sich um einen großen Streckenabschnitt in Randlage. Besonders durch die große Höhendifferenz entsteht in dem Abschnitt viel ungenutzte Bremsenergie. Bereits ein Speicher im Streckenab-

schnitt führt zu einer eingesparten Energie von 560 kWh pro Tag.

Der beste Standort befindet sich im Bereich der Gabelung von der S1 und der S11 am Unterwerk Reichenbach. Der Speicher wirkt dort in beide Teilabschnitten. Die geringste Einsparung wird an den innenstadtnahen Standorten an den Unterwerken Rüppurr und Seehof erreicht. In diesem Teilabschnitt ist der gefahrene Takt höher, so dass sich häufiger Fahrzeuge in unmittelbarer Umgebung eines bremsenden Fahrzeugs befinden, die die Bremsleistung aufnehmen können. Am Standort Rüppurr findet auch ein Energieaustausch zu den anderen Linien statt, die durch die Innenstadt führen.

Der geringe Bremsenergienutzungsgrad der Fahrzeuge von 48 % zeigt, dass die Integration von weiteren Energiespeichern sinnvoll ist. Mit der Integration von drei Speichern steigt der Nutzungsgrad auf über 86 %. Weil jetzt die Abstände zwischen den Fahrzeugen und den Speichern geringer sind, werden auch größere Leistungsspitzen aufgenommen und die Speicher müssen für eine höhere Leistung ausgelegt werden. Auch die kurzzeitig gespeicherte Energie steigt. Bei der besten Speicherkonfiguration befindet sich in jedem Teilabschnitt ein Speicher. Die Speicher in den Teilabschnitten von Ettlingen nach Bad Herrenalb oder Ittersbach wirken dabei fast ausschließlich in ihren Teilabschnitten.

### **6.3.3 Abschnitt 3: L2 Wolfartsweier**

Der Bereich umfasst den süd-östlichen Streckenabschnitt der Linie 2 zwischen den Haltestellen Durlach Auer Str. / Dr. Willmar Schwabe und Wolfartsweier. Der Streckenverlauf ist 3,2 km lang, vorwiegend flach und umfasst 9 Haltestellen. Der Abschnitt wird als gesamter Streckenabschnitt simuliert. Als mögliche Standorte für die Speicher werden wieder die Standorte der Gleichrichterunterwerke gewählt. Die Tabelle 6.11 listet die Standorte auf.

Tabelle 6.11: Übersicht zu den Gleichrichterunterwerken der Linie 2 im Abschnitt Wolfartsweier

<b>Bezeichnung</b>	<b>Name</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Leerlaufspannung</b>	<b>Streckenkilometer</b>
ESS 0	Wolfartsweier Nord	WW	850 V	0,3
ESS 1	Ellmendinger Straße	ES	800 V	2,3
ESS 2	Durlach Bahnhof	DB	850 V	3,2

Für den Zeitraum vom 01.9.2020 bis zum 15.5.2021 werden 49 Fahrten von Durlach nach Wolfartsweier ausgewertet und für die Gegenrichtung von Wolfartsweier nach Durlach werden 50 Fahrten untersucht.

Aus dem Fahrplan ergeben sich 100 Fahrten pro Tag in jede Richtung. Auf der Linie 2 wird nicht in Doppeltraktion gefahren. Es ist daher keine Gewichtung der Ergebnisse erforderlich.

Um die Gesamtleistungsaufnahmedistanz zu berechnen, wird der mittlere Widerstandsbelag von  $59 \text{ m}\Omega/\text{km}$  verwendet. Für eine Bremsleistung von  $300 \text{ kW}$  und eine Speicherspannung von  $850 \text{ V}$  beträgt die Gesamtleistungsaufnahmedistanz  $2,5 \text{ km}$ . Ein einzelner Speicher im Streckenabschnitt wirkt folglich im gesamten Streckenabschnitt.

Die Simulationsergebnisse sind in der Tabelle 6.12 aufgeführt. Die Werte unterscheiden sich nur geringfügig voneinander. Die Speicherposition ESS 1 schneidet am besten ab.

Mit  $99 \%$  ist der Bremsenergienutzungsgrad sehr groß und die Oberleitung ist nahezu vollständig aufnahmefähig. Der Oberleitungswirkungsgrad beträgt  $97 \%$ . Als Speicherdimensionierung für den Standort ESS 2 wird eine

Tabelle 6.12: Ergebnisse für einen Energiespeicher der Linie 2 im Abschnitt Wolfartsweier

<b>Speicher- position</b>	<b>Aufgenommene Energie pro Tag</b>	<b>Eingesparte Energie pro Tag</b>
ESS 0 WW	340 kWh	270 kWh
ESS 1 ES	345 kWh	275 kWh
ESS 2 DB	315 kWh	250 kWh

Leistung von 650 kW und eine Energie von 2,1 kWh (99. Perzentil) empfohlen.

### **Diskussion der Ergebnisse**

Mit einer Strecke von 3,2 km ist der untersuchte Streckenabschnitt von der Haltestelle Wolfartsweier Nord zur Haltestelle Durlach Auer Str./Dr. Willmar Schwabe sehr kurz. Die eingesparte Energie pro Tag ist mit 275 kWh geringer als in den Streckenabschnitten der S1/S11. Die Dimensionierung des Speichers ist mit einer Leistung von 650 kW und einer Energie von 2,1 kWh ebenfalls im Vergleich kleiner. Es ist aber bereits mit einem Energiespeicher im Streckenabschnitt zu erreichen, dass die Oberleitung vollständig aufnahmefähig wird.

#### **6.3.4 Abschnitt 4: L2 Siemensallee**

Der Bereich umfasst den nord-westlichen Streckenabschnitt der Linie 2 zwischen den Haltestellen Knielingen Nord und Moltkestraße. Der Streckenverlauf ist 4,5 km lang, vorwiegend flach und umfasst 10 Haltestellen. Der Abschnitt wird als gesamter Streckenabschnitt, ohne Teilabschnitte, simuliert.

Als mögliche Standorte für den Streckenabschnitt werden nicht nur die



Tabelle 6.13: Übersicht zu den Speicherstandorten der Linie 2 im Abschnitt Siemensallee

<b>Bezeichnung</b>	<b>Name</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Leerlaufspannung</b>	<b>Streckenkilometer</b>
ESS 0	Knielingen Nord	KN	850	0,3
ESS 1	Sudetenstraße	SS	850 V	2,4
ESS 2	Neureuter Straße	NS	850 V	3,5

Standorte der Gleichrichterunterwerke gewählt. Da sich die Unterwerke Knielingen Nord und Neureuter Straße an den Rändern des Streckenabschnitts befinden, ist noch ein zusätzlicher Speicherstandort im Bereich der Haltestelle Sudetenstraße vorgesehen, der sich ungefähr mittig im Streckenabschnitt befindet. Die Tabelle 6.13 listet die Standorte auf.

Für den Zeitraum vom 01.09.2020 bis zum 15.05.2021 werden 13 Fahrten von Knielingen zur Haltestelle Moltkestraße ausgewertet und für die Gegenrichtung von der Moltkestraße nach Knielingen werden 54 Fahrten untersucht. Aus dem Fahrplan ergeben sich 100 Fahrten pro Tag in jede Richtung.

Die Simulationsergebnisse sind in Tabelle 6.14 zusammengefasst. Durch seine zentrale Lage im Streckenabschnitt besitzt der Speicher ESS 1 eine große Wirkweite und spart am meisten Energie ein. Der Bremsenergienutzungsgrad für den Speicherstandort ESS 1 liegt bei 99 %. Aber auch bei den anderen Standorten ist der Nutzungsgrad sehr hoch.

### **Diskussion der Ergebnisse**

Soll sich der Energiespeicher bei einem Unterwerk befinden, so ist die Posi-

Tabelle 6.14: Ergebnisse für einen Energiespeicher der Linie 2 im Abschnitt Siemensallee

<b>Speicher- position</b>	<b>Aufgenommene Energie pro Tag</b>	<b>Eingesparte Energie pro Tag</b>	<b>Bremsenergie- nutzungsgrad</b>
ESS 0 KN	700 kWh	555 kWh	98 %
<b>ESS 1 SS</b>	<b>750 kWh</b>	600 kWh	99 %
ESS 2 NS	630 kWh	505 kWh	95 %

tion ESS 0 der beste Standort. Der Standort ESS 1 ist allerdings etwas besser geeignet, da dieser im mittleren Streckenbereich liegt und damit effektiver in beide Richtungen wirkt. Die Speicher am Abschnittsende (ESS 0 und ESS 2) nehmen auf Grund ihrer Randlage etwas weniger Energie auf. Auch in diesem Abschnitt wird bereits mit einem Speicher erreicht, dass die Oberleitung die Bremsleistung nahezu vollständig aufnehmen kann.

Bei diesem Streckenabschnitt handelt es sich um einen Sonderfall. Da der Abschnitt elektrisch vom Innenstadtnetz getrennt ist, findet kein Energieaustausch mit den Fahrzeugen auf den angrenzenden Linien statt. Vom Haltestellenabstand, der Taktung, der gefahrenen Geschwindigkeit und dem Oberleitungsaufbau ist dieser Streckenabschnitt sehr ähnlich zum nördlichen Verlauf der Linie 3. Dort jedoch tritt kaum ungenutzte Bremsenergie auf. Es ist daher zu erwarten, dass mit den Baumaßnahmen und dem Schließen des Trennschalters die ungenutzte Bremsenergie im Abschnitt der Siemensallee deutlich reduziert wird und der Streckenabschnitt für einen Energiespeicher irrelevant wird. Die Untersuchungen müssen daher zu einem späteren Zeitpunkt erneut durchgeführt werden.

### 6.3.5 Abschnitt 5: S2 Spöck

Der Bereich umfasst den nördlichen Streckenabschnitt der Linien S2 zwischen den Haltestellen Richard-Hecht-Schule in Spöck und Blankenloch

Nord. Der Streckenverlauf ist 6,9 km lang, flach und umfasst 6 Haltestellen. Der Abschnitt wird als gesamter Streckenabschnitt, ohne Teilabschnitte, simuliert.

Ungefähr 20 %<sup>1</sup> der Fahrten in diesem Streckenabschnitt werden in Doppeltraktion durchgeführt. Auf Grund der Randlage wird in diesem Teil der S2 nur ein 20-Minuten-Takt gefahren. Aus dem Fahrplan ergeben sich 50 Fahrten pro Tag in jede Richtung. In dem Streckenabschnitt wurden nur wenige Messfahrten durchgeführt. Ausgewertet werden 14 Fahrten in jede Fahrtrichtung.

Als mögliche Standorte für die Speicher werden die Standorte der Gleichrichterunterwerke gewählt. Die Tabelle 6.15 gibt die Standorte und Leerlaufspannungen an.

Tabelle 6.15: Übersicht zu den Gleichrichterunterwerken der S2 im Abschnitt Spöck

<b>Bezeichnung</b>	<b>Name</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Leerlaufspannung</b>	<b>Streckenkilometer</b>
ESS 0	Friedrichstal Rheinstraße	FR	830 V	2,6
ESS 1	Friedrichstal Kreisstraße	FS	830 V	3,9
ESS 2	Blankenloch Nord	BN	840 V	7,3

Die Simulationsergebnisse für den Streckenabschnitt sind in der Tabelle 6.16 aufgelistet. Die maximal eingesparte Energie am Tag beträgt 105 kWh am Standort ESS 0. Der Standort ESS 1 liegt leicht darunter. Eine Leistung von 425 kW und eine Energie von 2,3 kWh (99. Perzentil) sind eine geeig-

<sup>1</sup> Schätzwert vom Fahrdienstleiter.

nete Speicherdimensionierung für den Standort ESS 0.

Der Bremsenergienutzungsgrad für den Speicherstandort ESS 0 liegt bei 95 %.

Tabelle 6.16: Ergebnisse für einen Energiespeicher der S2 im Abschnitt Spöck

<b>Speicher- position</b>	<b>Aufgenommene Energie pro Tag</b>	<b>Eingesparte Energie pro Tag</b>
ESS 0 FR	135 kWh	105 kWh
ESS 1 FS	120 kWh	95 kWh
ESS 2 BN	85 kWh	65 kWh

### **Diskussion der Ergebnisse**

Im betrachteten Bereich der Linie S2 zwischen Blankenloch und Spöck tritt nur sehr wenig ungenutzte Bremsenergie auf. Die Ursachen sind die durch die Randlage bedingte geringe Taktung und die wenigen Fahrten in Doppeltraktion. Zusätzlich befinden sich lediglich 6 Haltestellen im betrachteten Streckenabschnitt und in den Abschnitten zwischen den Haltestellen wird durch den geraden Streckenverlauf mit konstanter Geschwindigkeit gefahren.

### **6.4 Vergleich der Streckenabschnitte**

Die untersuchten Streckenabschnitte liegen am Rand des Streckennetzes. Sie befinden jeweils zwischen der Endhaltestelle und der Grenze des Karlsruher Innenstadtgebiets.

Wird lediglich ein Speicher in die Oberleitung integriert, schneiden die äußeren Positionen am Streckenende oder in der Nähe zur Innenstadt schlechter ab als die mittleren Standorte.

Bereits ein einzelner Energiespeicher im Streckenabschnitt bewirkt, dass der

Bremsenergienutzungsgrad deutlich gesteigert werden kann. Bei den kürzeren Streckenabschnitten, wie bei der Linie 2, ist der Standort unkritisch. Der Wirkungsbereich des Speichers deckt fast den gesamten Streckenabschnitt ab, wodurch die Ergebnisse für die einzelnen Speicherpositionen dicht beieinander liegen. Dennoch liegen die besten Standorte in der Mitte des Streckenabschnitts.

Der Abschnitt der Linie S1/S11 im Bereich von Hochstetten zur Haltestelle Moltkestraße/Städtisches Klinikum ist mit 15,7 km der zweitlängste. Werden zwei Speicher in das Oberleitungsnetz integriert, ist die beste Speicherplatzkombination nicht mehr eindeutig. Auch im südlichen Abschnitt der S1/S11 am Schwarzwaldrand liegen die Ergebnisse der Speicherkombinationen der Analysen von drei Speichern im Abschnitt dicht beieinander. Bei mehreren Speichern überschneiden sich die Wirkungsbereiche der Speicher und die Bremsleistung teilt sich je nach Fahrzeugposition auf. Im Vergleich zu einem Speicher im Abschnitt müssen die Speicher daher auch anders dimensioniert werden: Die Speicherenergie sinkt, da sich die ungenutzte Bremsenergie auf beide Energiespeicher aufteilt. Der Abstand des bremsenden Fahrzeugs zu den Speichern verringert sich, so dass höhere Leistungsspitzen aufgenommen werden. Die Speicherleistung muss daher höher ausgelegt werden.

Die eingesparte Energie des Speichers im Abschnitt Siemensallee der Linie 2 liegt etwas höher als die beste Speicherposition der S1/S11 am Schwarzwaldrand. Dies zeigt, dass der gefahrene Takt in den Streckenabschnitten einen ähnlich großen Einfluss auf die ungenutzte Bremsenergie hat wie die Höhendifferenz.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Karlsruher Gleichstromnetz auf den Anteil an ungenutzter Bremsenergie messtechnisch-simulativ untersucht. Dazu wurde mit der Messstraßenbahn ein Versuchsträger geplant und aufgebaut, der im Regelbetrieb eingesetzt wird. In dieser Arbeit wurde das Konzept und die Umsetzung von der Planung bis zur Datenauswertung beschrieben.

Seit über 2 Jahre befindet sich das Fahrzeug im Einsatz und das Messsystem erfüllt die drei definierten Anforderungen: sicher, autark und komfortabel. Bis zum September 2021 wurden über 5300 Stunden Messdaten aus dem Fahrgastbetrieb aufgezeichnet. Die Messgrößen umfassen dabei elektrische und mechanische Parameter, Umgebungs- und Zustandsparameter, aber auch Fehlerzustände verschiedener Komponenten. Das Messsystem ist modular aufgebaut und die Messkarten befinden sich an mehreren Positionen auf dem Fahrzeug. Das ermöglicht die Integration von weiteren Sensoren. Die genannten Beispiele zeigen, dass die Messstraßenbahn eine große Vielzahl an Auswertungsmöglichkeiten bietet. Das Projekt liefert für die Betreiber und für die Forschung eine wichtige und umfangreiche Datenbasis.

Bei der Bestimmung der ungenutzten Bremsleistung aus den Messwerten wurden die Herausforderung und ein Lösungsansatz beschrieben. Mit der beschriebenen Methode, die auf einem Kennfeld basiert, kann die ungenutzte Bremsleistung des Fahrzeugs bestimmt werden.

Für die Betrachtung des Bremsvorgangs wurden zunächst Modelle der ver-

schiedenen Komponenten von Straßen- und Stadtbahnnetzen hergeleitet. Diese dienen als Grundlage für die theoretische Betrachtung des Bremsvorgangs. Die verwendeten Modelle orientieren sich dabei an den in der Literatur üblichen elektrischen Ersatzschaltbildern. Die analytische und grafische Betrachtung untersucht die Faktoren, die die Übertragbarkeit der Bremsleistung beeinflussen. Die daraus abgeleitete Gleichung zur Bestimmung der Gesamtleistungsaufnahmedistanz zeigt die Wirkweite von Energiespeichern im Oberleitungsnetz und hilft die Wirksamkeit von Änderungen an der Infrastruktur abzuschätzen. Die Erweiterung der Gleichung führt zum idealen Abstand zwischen zwei Energiespeichern.

Der abschließende simulative Teil dieser Arbeit verwendet die Messdaten und untersucht das Karlsruher Gleichstromstreckennetz. Die Verlustenergiekarte stellt die tatsächliche ungenutzte Bremsenergie im Netz dar. Anhand der Karte wurden fünf Streckenabschnitte ausgewählt, die auf Eignung für Energiespeicher untersucht wurden. Bei der Simulation der Abschnitte wurden ein oder auch mehrere Energiespeicher an unterschiedlichen Standorten integriert und die Energieeinsparung berechnet. Die Ergebnisse der verschiedenen Streckenabschnitte wurden verglichen.

Die hohe mittlere Steigung im südlichen Abschnitt der S1/S11 zwischen Karlsruhe Albtalbahnhof und Bad Herrenalb bzw. Ittersbach führt zu einer großen Menge an ungenutzter Bremsenergie. Der Abschnitt ist daher für weiterführende Untersuchungen geeignet.

Am Beispiel der Linie 2 im Bereich der Siemensallee konnte die Auswirkung eines nicht durchgekuppelten Netzes gezeigt werden. Der schlechtere Austausch mit anderen Linien ist im Vergleich zu anderen ähnlichen Streckenabschnitten deutlich erkennbar. Das unterstreicht die Relevanz und Effektivität von gut vermaschten Netzen.



## 7.2 Ausblick

### Energiespeicher

Mit der Arbeit wurden geeignete Streckenabschnitte und Speicherpositionen im Karlsruher Streckennetz aufgezeigt. Aufbauend auf den Erkenntnissen ist es nun möglich, einen Speicherstandort für einen Demonstrator auszuwählen. Mit dem Testbetrieb können die Simulationsergebnisse dieser Arbeit validiert werden.

In der Simulation wurde von idealen Energiespeichern ausgegangen, mit denen die aufgenommene Energie pro Tag berechnet wurde. Um praxisnahe Ergebnisse zu erhalten wurden bei den Energiespeichern ein Zykluswirkungsgrad von 80 % angenommen. Zwar ist es grundsätzlich möglich, die Energiespeicher mit jeder Speichertechnologie aufzubauen, doch ist es notwendig, zusammen mit den Herstellern die Technologien vor einer konkreten Realisierung in der Praxis genau zu bewerten. Nicht nur die Dimensionierung der Speicher, sondern besonders auch das Alterungsverhalten der Technologien beeinflusst die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems.

Neben der gewählten Speichertechnologie ist eine genauere Betrachtung der Betriebsstrategie interessant. In der Arbeit wurde nur die Aufnahme der ungenutzten Bremsenergie betrachtet. Durch die Bereitstellung der Energie beim Beschleunigen der Fahrzeuge reduziert sich die Spitzenleistung der Unterwerke. Die Spitzenleistung ist ein Kostenaspekt bei der Energieversorgung. Es kann daher einen monetären Vorteil bringen, wenn die Betriebsstrategie nicht nur die Aufnahme- und Bereitstellung der ungenutzten Bremsenergie umfasst, sondern sie auch um eine Vorkonditionierung für die Speicher erweitert. Dadurch werden die Systemverluste verringert und im Speicher steht für die Fahrzeugbeschleunigung eine ausreichende Menge an Energie zur Verfügung. Die Betriebsstrategie wäre folglich eine Kombination aus Lastglättung und Bremsenergiezwischen-speicherung, was auch einen Einfluss auf die Speicherdimensionierung hat.

Zusätzlich zu der Betriebsstrategie wird auch eine Regelung für den Spei-

cher benötigt. Für entsprechende Untersuchungen muss das in dieser Arbeit verwendete Speichermodell erweitert werden. Das ist mit der genutzten Simulationssoftware möglich. Auch das Rückspeisen in die Oberleitung kann dann untersucht werden. Abhängig von der Regelung und der Betriebsstrategie ist es möglich, auch die Alterung des Speichers im Betrieb zu analysieren. Mit den Messdaten kann das System an einem großen Datensatz getestet und bereits vor der Inbetriebnahme optimiert werden.

### **Messstraßenbahn**

Die von der Messstraßenbahn erfassten Parameter ermöglichen eine große Vielfalt an Untersuchungen. Neben den genannten Forschungsfeldern und Auswertungsaspekten ermöglicht der modulare Systemaufbau die Integration von weiteren Sensoren. Das System ist folglich vielfältig erweiterbar.

Wie gezeigt wurde, entfällt ein beachtlicher Teil des Gesamtenergiebedarfs auf die Nebenverbraucher. Durch einen optimierten Einsatz der Heiz- und Klimageräte wäre es möglich, das Fahrzeug energieeffizienter zu betreiben. In dem Messsystem könnte ein Echtzeit-Fahrerassistenzsystem integriert werden, welches im Betrieb die Daten auswertet und konkrete Handlungsempfehlungen ableitet. Das System könnte dann auch für die Fahrerausbildung im Rahmen der Fahrschule zum Einsatz kommen.

Mit den Beschleunigungsdaten können Infrastrukturanalysen durchgeführt werden und daraus Alterungsmodelle abgeleitet werden, um Wartungsempfehlungen zu geben. Die Verschleißmodelle können aus den Daten der Messstraßenbahn erstellt werden und mit zusätzlichen Messungen an der Infrastruktur präzisiert werden.

# A Anhang

## A.1 Abschätzung der gesamten Bremsleistung bei der Messung an einem Bremswiderstand

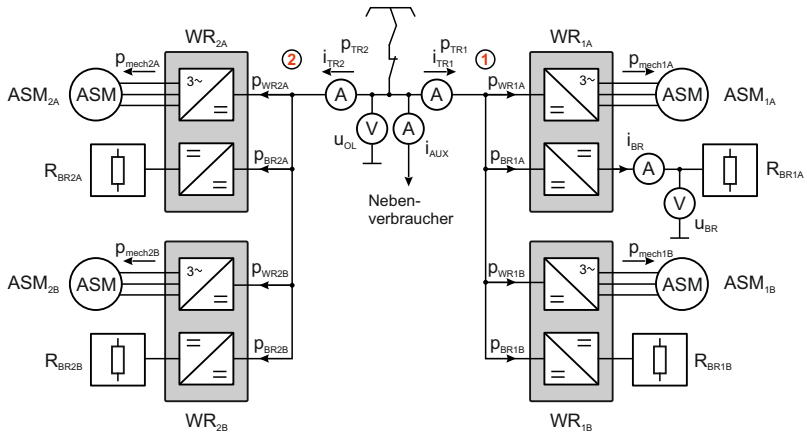


Abbildung A.1: Hauptschaltplan für das Straßenbahnfahrzeug mit den Sensoren für die Messung am Bremswiderstand (entspricht Abbildung 4.3)

Da der Strom in den beiden Traktionsumrichterzweigen ( $I_{TR1}$  und  $I_{TR2}$  in Abbildung A.1) gemessen wird, kann der Anteil bestimmt werden, der von den vorderen Wechselrichtern in die hinteren Bremswiderstände fließt. Es wird angenommen, dass die Bremsleistung aller Asynchronmaschinen gleich ist:

$$p_{meh1A} = p_{meh1B} = p_{meh2A} = p_{meh2B} \quad (\text{A.1})$$

Da die tatsächliche Spannung an den Wechselrichtern nahezu identisch ist, folgt daraus

$$i_{WR1A} = i_{WR1B} = i_{WR2A} = i_{WR2B} \quad (\text{A.2})$$

An dem Bremswiderstand 1B werden Strom und Spannung gemessen. Um die primärseitige Leistung am Brems-Chopper zu ermitteln wird angenommen, dass sie um den Faktor 1,1 höher liegt.

$$p_{BR1A} = 1,1 \cdot i_{BR} u_{BR} \quad (\text{A.3})$$

Weiterhin wird angenommen, dass die Leistung an den Bremswiderständen für den jeweiligen Wagenteil gleich ist:

$$p_{BR1A} = p_{BR1B} \quad \text{und} \quad p_{BR2A} = p_{BR2B} \quad (\text{A.4})$$

Die Gleichungen A.1 bis A.4 sind die grundlegenden Annahmen für die folgenden Betrachtungen. Dabei müssen zwei Fälle unterschieden werden:

- a) Ein Teil der Bremsleistung fließt vom vorderen in den hinteren Wagenteil
  
- b) Es fließt keine Bremsleistung vom vorderen in den hinteren Wagenteil

Um die folgenden Betrachtungen übersichtlich zu halten, werden die Traktionsumrichter teilweise zusammengefasst. Statt WR1A und WR1B wird WR1 bzw. WR2 verwendet. Gleiches gilt auch für die anderen Größen wie Ströme und Spannungen.

Im ersten Fall fließt ein Teil der Bremsleistung von den vorderen Wechselrichtern in die hinteren Bremswiderstände. Es gilt

$$i_{TR1} < 0 \quad \text{und} \quad i_{TR2} > 0 \quad (\text{A.5})$$

In den beiden Knoten 1 und 2 in Abbildung A.1 gelten die Gleichungen

$$i_{TR1} = i_{BR1} - i_{WR1} \quad (\text{A.6})$$

$$i_{TR2} = i_{BR2} - i_{WR2} \quad (\text{A.7})$$

Da die Ströme der Wechselrichter gleich sind (vgl. Gl. A.2), kann die Gleichung A.6 in Gleichung A.7 eingesetzt werden:

$$i_{BR2} = i_{TR2} - i_{TR1} + i_{BR1} \quad (\text{A.8})$$

Der Strom  $i_{BR1}$  setzt sich aus den beiden Teilströmen zusammen ( $i_{BR1} = i_{BR1A} + i_{BR1B}$ ). Mit den Gleichungen A.3 und A.4 berechnet sich die Leistung an den Bremswiderständen RB2 mit der Gleichung

$$p_{RB2} = (i_{TR2} - i_{TR1})u_{OL} + 2,2 \cdot i_{RB1}u_{RB1} \quad (\text{A.9})$$

und die gesamte Bremsverlustleistung mit der Gleichung

$$\begin{aligned} p_{RB,ges} &= p_{RB1} + p_{RB2} \\ &= (i_{TR2} - i_{TR1})u_{OL} + 4,4 \cdot i_{RB1}u_{RB1} \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

Im zweiten Fall fließt kein Strom von dem vorderen in den hinteren Wagenkasten. Folglich gilt:

$$i_{TR1} < 0 \quad \text{und} \quad i_{TR2} < 0 \quad (\text{A.11})$$

Es wird angenommen, dass sich die Verlustleistung auf alle Bremswiderstände gleichmäßig aufteilt und es gilt:

$$p_{RB} = 4,4 \cdot i_{RB}u_{RB} \quad (\text{A.12})$$

Die Ergebnisse der Berechnungen liefern lediglich einen Richtwert. Sie beinhalten mehrere Annahmen, die zu Abweichungen führen.

Neben den unterschiedlichen Schwellen beim Einschalten der Bremswiderstände beeinflusst auch der Schleuderschutz die Ergebnisse. Besonders bei schlechten Verhältnissen (wie Nässe oder verschmutzte Gleise) unterscheiden sich die Reibungszahlen am Rad-Schiene-Kontakt an den verschiedenen Achsen. Der Schleuderschutz verhindert, dass das Drehmoment an den einzelnen Achsen zu groß wird und die Räder zu schleudern beginnen. Dies erfolgt durch eine Reduzierung der Traktionsleistung an der betroffenen Achse. Das führt jedoch zu unterschiedlichen Leistungsaufnahmen der einzelnen Traktionsmaschinen. Dieser Effekt tritt natürlich auch beim Bremsen auf und ist in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

## A.2 Herleitung: Idealer Abstand zwischen zwei Energiespeichern

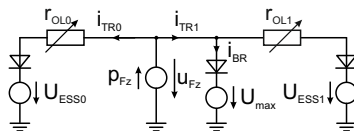


Abbildung A.2: Ersatzschaltbild für ein Fahrzeug zwischen zwei Energiespeichern

Es wird ein Streckenabschnitt betrachtet, bei dem sich zwischen zwei Energiespeichern ein bremsendes Fahrzeug befindet. Mit den Ersatzkomponenten aus Abschnitt 5.2 lässt sich das in Abbildung A.2 gezeigte Ersatzschaltbild aufbauen. Die Spannungsquellen der Energiespeicher müssen den gleichen Wert besitzen.

Damit sich der Strom gleichmäßig aufteilt, muss sich das Fahrzeug genau zwischen den beiden Energiespeichern befinden. Die beiden Oberleitungswiderstände sind dann gleich groß ( $r_{OL1} = r_{OL2}$ ). Die gesamte ungenutzte Bremsleistung kann eingespeist werden, wenn die maximal zulässige Ober-

leitungsspannung nicht überschritten wird.

Für eine gegebene Leistung beträgt der ideale Abstand zwischen den Speichern der Entfernung, wenn der resultierende Oberleitungswiderstand so groß wird, dass die maximal zulässige Spannung erreicht wird.

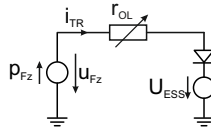


Abbildung A.3: Vereinfachtes Ersatzschaltbild für ein Fahrzeug zwischen zwei Energiespeichern

Das Ersatzschaltbild kann zu dem in Abbildung A.3 gezeigten Aufbau vereinfacht werden. Die Spannungsquelle des Bremswiderstands ( $U_{max}$ ) wird vernachlässigt und die Widerstände werden zu  $r_{OL}$  zusammengefasst. Dabei gilt:

$$r_{OL} = \frac{1}{2}r_{OL1} = \frac{1}{2}r_{OL2} \quad (A.13)$$

Der wirksame Oberleitungswiderstand halbiert sich. In Gleichung 5.10 halbiert sich damit der Widerstandsbelag, und es folgt

$$s_{ideal} = 2 \frac{U_{max}(U_{max} - U_{ESS})}{p_{FZ} \frac{1}{2} R'} \quad (A.14)$$

und

$$s_{ideal} = 4 \frac{U_{max}(U_{max} - U_{ESS})}{p_{FZ} R'} = 2 \cdot s_{GBR}. \quad (A.15)$$





# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

## Formelzeichen

$r_{OL}$	Oberleitungswiderstand	$\Omega$
$p_{OL}$	Verlustleistung der Oberleitung	W
$p_{Fz}$	Leistung des Fahrzeugs	W
$p_{BR}$	Leistung am Bremswiderstand	W
$i_{WRx}$	DC-Strom des Wechselrichters x	A
$p_{WRx}$	Leistung des Wechselrichters x	W
$u_{Fz}$	Spannung am Fahrzeug	V
$p_{mech,x}$	Mechanische Leistung der Achse x	W
$s_{GBR}$	Gesamtleistungsaufnahmedistanz	m
$s_{ideal}$	Idealer Speicherabstand	m
$\varepsilon$	Abweichung des Drehmoments	Nm
$\eta_S$	Systemwirkungsgrad	%
$p_{TR}$	Traktionsleistung	W
$E_X$	Energie	Wh
$E_{Lauf}$	Laufwiderstandsenergie	Wh
$E_{pot}$	Potentielle Energie	Wh
$E_{AUX}$	Energie der Nebenverbraucher	Wh
$E_{BR}$	Energie am Bremswiderstand	Wh
$E_{Fz}$	Fahrzeugenergie	Wh
$E_x$	Sonstige Energie	Wh

### Messgrößen

$i_{TR1}$	Strom in den vorderen Traktionsumrichter	A
$i_{TR2}$	Strom in den hinteren Traktionsumrichter	A
$i_{AUX}$	Strom in die Nebenverbraucher	A
$u_{OL}$	Spannung am Stromabnehmer	V
$n$	Drehzahl	$\text{min}^{-1}$
$u_{BR}$	Spannung am Bremswiderstand	V
$i_{BR}$	Strom in den Bremswiderstand	A

### Parameter

$U_{\max}$	Max. Oberleitungsspannung	V
$U_{ESS}$	Energiespeicherspannung	V
$U_{GUW,x}$	Spannung vom Unterwerk x	V
$R_{GUWi}$	Innenwiderstand vom Gleichrichterunterwerk	$\Omega$
$\theta$	Umgebungstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
$A$	Querschnittsfläche	$\text{mm}^2$
$R_L$	Laufwiderstand	kN
$a_R$	Parameter d. Laufwiderstands	$\frac{\text{kN}}{\text{m}^2/\text{s}^2}$
$b_R$	Parameter d. Laufwiderstands	$\frac{\text{kN}}{\text{m}/\text{s}}$
$c_R$	Parameter d. Laufwiderstands	kN
$R'$	Widerstandsbelag	$\Omega/\text{m}$
$L'$	Induktivitätsbelag	H/m
$G'$	Leitwertsbelag	S/m
$C'$	Kapazitätsbelag	F/m
$\hat{M}_x$	Schätzwert des Drehmoments x	Nm
$M_{ASM}$	Drehmoment im Luftspalt der Asynchronmaschine	Nm

$\varepsilon$	Fehler
$n_S$	Anfangssample
$n_E$	Endsample
$n_{ET}$	Anzahl der Fahrten in Einzeltraktion
$n_{DT}$	Anzahl der Fahrten in Doppeltraktion

### Konstanten

$\rho$	Spez. elektr. Widerstand	0,0178 $\frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$
--------	--------------------------	---

### Abkürzungen und Begriffe

ALG	Ettlingen Albgaubad
ASM	Asynchronmaschine
ATB	Karlsruhe Albtalbahnhof
AVG	Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH
BNU	Bordnetzumrichter
BH	Bad Herrenalb
BOStrab	Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung
CRISP-DM	Cross Industry Standard Process for Data Mining
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DSK	Doppelschichtkondensator
DT	Doppeltraktion
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
ESS	Energiespeicher (engl. energy storage system)
ET	Einzeltraktion
ETL	Extraktion-Transformation-Laden
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GIS	Geoinformationssysteme
GUW	Gleichrichterunterwerk
HKL	Heiz- und Klimaanlage

ITT	Ittersbach
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KVV	Karlsruher Verkehrsverbund
LTE	Long-Term-Evolution (Mobilfunkstandard)
NN	Normalnull
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
rnv	Rhein-Neckar-Verkehr GmbH
RS	Rad-Schiene
SEMMA	Sample, Explore, Modify, Model, and Assess
USV	Unterspannungsversorgung
VBK	Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Struktureller Aufbau der Arbeit . . . . .	7
2.1	Schematischer Aufbau eines Gleichrichterunterwerks . . . . .	11
2.2	Realisierungsmöglichkeiten für Oberleitungen . . . . .	12
2.3	Schematische Darstellung der zweiseitigen Einspeisung mit Querkupplung und Streckentrennstelle . . . . .	13
2.4	Vereinfachter Hauptschaltplan eines Gleichstromfahrzeugs . . .	14
2.5	Vereinfachter Hauptschaltplan eines Gleichstromfahrzeugs mit Energiespeicher . . . . .	20
2.6	Prinzipielles Ragone-Diagramm für verschiedene Speichertechnologien . . . . .	20
3.1	Das gesamte Schienennetz im Karlsruher Verkehrsverbund . . .	26
3.2	Das Schienennetz im Gleichstromnetz des Karlsruher Verkehrsverbunds . . . . .	27
3.3	Höhenprofil des Schienennetzes in Karlsruhe, ohne den südlichen Teil der S1/S11 . . . . .	28
3.4	Höhenprofil des Schienennetzes in Karlsruhe, südlicher Teil der S1/S11 . . . . .	29
3.5	Vorgehensweise im Projekt Messstraßenbahn . . . . .	33
3.6	Parameter, die von der Messstraßenbahn erfasst werden. . . . .	36
3.7	Schematische Anordnung des Messsystems auf dem Fahrzeug .	39
3.8	Übersicht über die Messpunkte im Stromlaufplan . . . . .	40
3.9	Laufwiderstand der Messstraßenbahn . . . . .	45

3.10	Prozentualer Anteil der Nebenverbraucherenergie bezogen auf den Gesamtenergiebedarf in Abhängigkeit von der Temperatur . . . . .	45
3.11	Kurzzeit-Spektrum der Beschleunigungssensoren am vorderen Traktionsdrehgestell für einen Streckenabschnitt vor und nach Umbaumaßnahmen . . . . .	47
4.1	Interpolation von Abtastwerten . . . . .	50
4.2	Auswirkung der Positionsinterpolation . . . . .	51
4.3	Hauptschaltplan für das Straßenbahnfahrzeug mit den Sensoren für die Messung am Bremswiderstand. . . . .	53
4.4	Wirkungsgradkennfeld einer Asynchronmaschine . . . . .	57
4.5	Vereinfachtes Ersatzschaltbild für die Kennfeldberechnung und die Zusammenfassung zu den Blöcken K und G . . . . .	58
4.6	Wirkungsgradkennfeld und Anzahl der Messpunkte für jeden Betriebspunkt . . . . .	61
4.7	Wirkungsgradkennfeld mit Konturen für den Wirkungsgrad und der Anzahl an Messpunkten . . . . .	62
4.8	Vergleich der berechneten Energie mit den beiden unterschiedlichen Methoden zur Bestimmung der Verlustleistung an den Bremswiderständen. . . . .	63
4.9	Prüfung der Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der ungenutzten Bremsenergie auf Plausibilität . . . . .	66
4.10	Anteil der Betriebsstunden auf den verschiedenen Linien . . . . .	67
4.11	Histogramm der Umgebungstemperatur für die ausgewerteten Messfahrten . . . . .	68
4.12	Gefahrenere Geschwindigkeit im gesamten Streckennetz mit Linienbezeichnung . . . . .	70
4.13	Mittlere ungenutzte Bremsenergie im Karlsruher Streckennetz . . . . .	72
5.1	Vereinfachter Systemaufbau eines Straßenbahnstreckenabschnitts	79
5.2	Simulationsmodell für das Gleichrichterunterwerk . . . . .	80

---

5.3	Leitungsersatzschaltbild . . . . .	81
5.4	Ersatzschaltbild für die Oberleitung und unterschiedliche Reihenfolgen im Streckennetz . . . . .	82
5.5	Überführung einer Strecke mit verschiedenen Widerstandsbelägen in eine äquivalente Strecke mit konstantem Widerstandsbelag	84
5.6	Elektrisches Fahrzeugmodell . . . . .	86
5.7	Simulationsmodell für einen Energiespeicher, der nur Leistung aus dem Oberleitungsnetz aufnimmt. . . . .	87
5.8	Allgemeines Ersatzschaltbild für einen Streckenabschnitt mit einem Fahrzeug, einem Energiespeicher und einem Gleichrichterunterwerk. . . . .	88
5.9	Vereinfachtes Ersatzschaltbild für ein bremsendes Fahrzeug im Streckenabschnitt . . . . .	89
5.10	Resultierendes Ersatzschaltbild für ein bremsendes Fahrzeug, das die gesamte Bremsleistung in die Oberleitung einspeist . . .	90
5.11	Örtlicher Verlauf der Oberleitungsspannung und der Leistungen beim Bremsen mit konstanter Leistung . . . . .	93
5.12	Resultierende Oberleitungsspannung für die Variation von Abstand und Bremsleistung . . . . .	94
5.13	Leistung am Energiespeicher für unterschiedliche Bremsleistungen und Abstände des Fahrzeugs zum Speicher . . . . .	95
5.14	Verlustleistung an der Oberleitung in Abhängigkeit von der Bremsleistung und dem Abstand des Fahrzeugs zum Speicher .	96
5.15	Bremsleistung eines vorbeifahrenden Fahrzeugs und die Leistung am Energiespeicher . . . . .	97
5.16	Ersatzschaltbild für einen Streckenabschnitt mit einem Fahrzeug zwischen zwei Energiespeichern . . . . .	98
5.17	Eingespeiste Leistung eines bremsenden Fahrzeugs bei einem und bei zwei Speichern und die Verlustleistung am Bremswiderstand . . . . .	99

6.1	Übersicht zu den untersuchten Streckenabschnitten und den gewählten Speicherpositionen . . . . .	106
6.2	Histogramm der ungenutzten Bremsleistung für Einzel- und Doppeltraktion im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten . . . . .	110
6.3	Histogramm der Speicherleistung an der Position ESS 2 im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten . . . . .	112
6.4	Anteil an gespeicherter Energie an der Position ESS 2 im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten . . . . .	113
6.5	Gefensterte Energie am Speicher der Position ESS 2 im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten . . . . .	113
6.6	Anteil an gespeicherter Energie an der Position ESS 2 im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten . . . . .	116
6.7	Gefensterte Energie am Speicher ESS 1 und ESS 4 im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten . . . . .	117
6.8	Linienverlauf und Unterwerkstandorte im Streckenabschnitt der S1/S11 am Schwarzwaldrand . . . . .	118
6.9	Topographie der Strecken S1/S11 am Schwarzwaldrand . . . . .	119
6.10	Energieaufnahme der Speicher für die einzelnen Teile in Streckenabschnitt der S1/S11 am Schwarzwaldrand . . . . .	125
A.1	Hauptschaltplan für das Straßenbahnfahrzeug mit den Sensoren für die Messung am Bremswiderstand . . . . .	139
A.2	Ersatzschaltbild für ein Fahrzeug zwischen zwei Speichern . . . . .	142
A.3	Vereinfachtes Ersatzschaltbild für ein Fahrzeug zwischen zwei Energiespeichern . . . . .	143



## Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht über einige relevante Forschungsprojekte zu Energiespeichern in Nahverkehrsanwendungen. . . . .	22
3.1	Übersicht der Niederflurfahrzeuge der AVG und VBK . . . . .	31
3.2	Übersicht zu einigen Messgrößen der Messstraßenbahn . . . . .	37
4.1	Mittlere Oberleitungsspannung für eine Fahrt von Bad Herrenalbnach Ettligen Albgäubad und Abweichung vom Mittelwert aller Messwerte (836V). . . . .	55
5.1	Einige auf dem Markt erhältliche Simulationsumgebungen für die Netzberechnung. . . . .	77
5.2	Parameter für die grafische Betrachtung mit einem Energiespeicher . . . . .	92
5.3	Parameter für die grafische Betrachtung mit zwei Energiespeichern . . . . .	98
6.1	Übersicht zu den Gewichtungsfaktoren im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten . . . . .	108
6.2	Übersicht zu den Gleichrichterunterwerken im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten . . . . .	109
6.3	Ergebnisse für einen Energiespeicher im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten . . . . .	111
6.4	Speicherpositionen für zwei Speicher im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten . . . . .	114

6.5	Ergebnisse für zwei Energiespeicher im Streckenabschnitt S1/S11 Hochstetten . . . . .	115
6.6	Übersicht zu den Gleichrichterunterwerken im Streckenabschnitt S1/S11 Schwarzwaldrand . . . . .	120
6.7	Übersicht zu den Gewichtungsfaktoren im Streckenabschnitt S1/S11 Schwarzwaldrand . . . . .	121
6.8	Ergebnisse für einen Energiespeicher im Streckenabschnitt S1/S11 Schwarzwaldrand . . . . .	122
6.9	Ergebnisse für drei Energiespeicher im Streckenabschnitt S1/S11 am Schwarzwaldrand . . . . .	124
6.10	Dimensionierung der Speicher im Streckenabschnitt S1/S11 am Schwarzwaldrand . . . . .	125
6.11	Übersicht zu den Gleichrichterunterwerken der Linie 2 im Ab- schnitt Wolfartsweier . . . . .	127
6.12	Ergebnisse für einen Energiespeicher der Linie 2 im Abschnitt Wolfartsweier . . . . .	128
6.13	Übersicht zu den Speicherstandorten der Linie 2 im Abschnitt Siemensallee . . . . .	129
6.14	Ergebnisse für einen Energiespeicher der Linie 2 im Abschnitt Siemensallee . . . . .	130
6.15	Übersicht zu den Gleichrichterunterwerken der S2 im Abschnitt Spöck . . . . .	131
6.16	Ergebnisse für einen Energiespeicher der S2 im Abschnitt Spöck	132

## Literatur

- [1] Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH, *Kooperation mit Stadtwerken Karlsruhe: Ökostrom für Stadtbahnen*, online, 2017. Adresse: <https://www.avg.info/unternehmen/presse/pressemitteilungen/meldungen/kooperation-mit-stadtwerken-karlsruhe-oekostrom-fuer-stadtbahnen.html> (abgerufen am 19.04.2022).
- [2] Deutsche Bahn, *Nachhaltigkeitskennzahlen 2020*, online, 2021. Adresse: <https://gruen.deutschebahn.com/de/kennzahlen> (abgerufen am 19.04.2022).
- [3] Mäder, J. und Schäfer, T., *Smart Maintenance*, *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, Nr. 4, S. 83–85, 2021.
- [4] Alves, T. und Andrade, A. R., *Scheduling Maintenance Technicians in a Railway Depot*, in *2021 Joint Rail Conference*, (Virtual, Online, 20. Juni–21. Apr. 2021), American Society of Mechanical Engineers, 2021. DOI: 10.1115/JRC2021-60425.
- [5] Tritschler, S., Martin, U., Egerer, A., Feistkorn, M., Hantsch, F. und Tideman, M., *Softwaregestützte Optimierung der Werkstattzuführungen von Stadtbahnfahrzeugen*, *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, Nr. 9, S. 64–68, 2020.
- [6] Nasri, A., Moghadam, M. F. und Mokhtari, H., *Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems*, in *2010 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2010)*, (Pisa, Italy, 14.–16. Juni 2010), 2010, S. 1218–1221.

- [7] Barrero, R., Tackoen, X. und van Mierlo, J., *Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Jg. 224, Nr. 3, S. 207–225, 2010. DOI: 10.1243/09544097JRRT322.
- [8] Khodaparastan, M., Mohamed, A. A. und Brandauer, W., *Recovery of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems*, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, S. 1–17, 2019. DOI: 10.1109/TITS.2018.2886809.
- [9] Kähler, S. und Habel, D., *Ergebnisse des Energiespeichereinsatzes in Hannover-Vahrenheide*, *Elektrische Bahnen*, Nr. 6 (103), S. 299–304, 2005.
- [10] Steiner, M. und Pagiela, S., *Energiespeicher in Schienenfahrzeugen*, *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, Nr. 4, S. 207–214, 2005.
- [11] Klohr, M. und Maroschik, A., *Energiespeicher auf Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen - das erste Serienprojekt*, *Elektrische Bahnen*, Nr. 8-9, S. 444–451, 2012.
- [12] Dürrschmidt, G. und Beitelschmidt, M., *Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz von Straßenbahnfahrzeugen*, *Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz von Straßenbahnfahrzeugen*, Nr. 141, S. 60–66, 2017.
- [13] Barrero, R., Tackoen, X. und van Mierlo, J., *Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network*, in *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, (Harbin, Hei Longjiang, China), 2008, S. 1–8. DOI: 10.1109/VPPC.2008.4677491.
- [14] Ciccarelli, F., Iannuzzi, D. und Lauria, D., *Supercapacitors-based energy storage for urban mass transit systems*, in *2011 IEEE 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, (Bir-

- mingham, UK, 30. Aug.–1. Sep. 2011), IEEE, 2011, S. 1–10, ISBN: 978-90-75815-14-6.
- [15] D'Avanzo, S., Iannuzzi, D., Murolo, F., Rizzo, R. und Tricoli, P., *A sample application of supercapacitor storage systems for suburban transit*, in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, (Bologna, Italien, 19.–20. Okt. 2010), IEEE, 2010, S. 1–7. DOI: 10.1109/ESARS.2010.5665265.
- [16] Calderaro, V., Galdi, V., Graber, G. und Piccolo, A., *Optimal siting and sizing of stationary supercapacitors in a metro network using PSO*, in *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, (Seville, 17.–19. März 2015), IEEE, 2015, S. 2680–2685. DOI: 10.1109/ICIT.2015.7125493.
- [17] La Torre, S. de, Sanchez-Racero, A. J., Aguado, J. A., Reyes, M. und Martiane, O., *Optimal Sizing of Energy Storage for Regenerative Braking in Electric Railway Systems*, *IEEE Transactions on Power Systems*, Nr. 3, S. 1492–1500, 30. DOI: 10.1109/TPWRS.2014.2340911.
- [18] Ciccarelli, F., Iannuzzi, D., Lauria, D. und Natale, P., *Optimal Control of Stationary Lithium-Ion Capacitor-Based Storage Device for Light Electrical Transportation Network*, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Jg. 3, Nr. 3, S. 618–631, 2017. DOI: 10.1109/TTE.2017.2739399.
- [19] Ke, B.-R., Lian, K.-L., Ke, Y.-L., Huang, T.-H. und Mirwandhana, M. R., *Control strategies for improving energy efficiency of train operation and reducing DC traction peak power in mass Rapid Transit System*, in *2017 IEEE/IAS 53rd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, (Niagara Falls, ON, Canada, 5. Juni–11. Mai 2017), IEEE, 2017, S. 1–9. DOI: 10.1109/ICPS.2017.7945098.

- [20] Yang, Z., Yang, Z., Lin, F. und Xia, H., *Improved control strategy of energy storage system considering train operation states*, in *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, (Yokohama, 16.–19. Okt. 2017), IEEE, 2017, S. 1–6. DOI: 10.1109/ITSC.2017.8317623.
- [21] Bocharnikov, Y. V., Tobias, A. M. und Roberts, C., *Reduction of train and net energy consumption using genetic algorithms for trajectory optimisation*, in *IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010)*, (Birmingham, UK, 13.–15. Apr. 2010), IET, 2010, S. 32. DOI: 10.1049/ic.2010.0038.
- [22] Zhao, N., Roberts, C., Hillmansen, S. und Nicholson, G., *A Multiple Train Trajectory Optimization to Minimize Energy Consumption and Delay*, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 16, Nr. 5, S. 2363–2372, 2015. DOI: 10.1109/TITS.2014.2388356.
- [23] ShangGuan, W., Yan, X.-H., Cai, B.-G. und Wang, J., *Multiobjective Optimization for Train Speed Trajectory in CTCS High-Speed Railway With Hybrid Evolutionary Algorithm*, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 16, Nr. 4, S. 2215–2225, 2015. DOI: 10.1109/TITS.2015.2402160.
- [24] Barrero, R., van Mierlo, J. und Tackoen, X., *Energy savings in public transport*, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Jg. 3, Nr. 3, S. 26–36, 2008. DOI: 10.1109/MVT.2008.927485.
- [25] Kühn, C., *Simulation von Fahrspielen und Energieflüssen in Nahverkehrssystemen*, de. KIT Scientific Publishing, 2018. DOI: 10.5445/KSP/1000077162.
- [26] Dürschmidt, G., *Neue Erkenntnisse zur Fahrdynamik und Energieverbrauch von Straßenbahnen durch Nutzung eines Langzeitver-*

- suchsträgers*. Göttingen: Sierke Verlag, 2020, ISBN: 978-3-96548-072-8.
- [27] Boenke, D. und Girnau, G., (Hrsg.), *Stadtbahnsysteme, Grundlagen, Technik, Betrieb - Finanzierung = Light rail systems ; principles, technology, operation, financing*, ger;eng, Hamburg: DVV Media Group, 2014, 990 S., ISBN: 978-3-87154-500-9.
- [28] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., (Hrsg.), *Bahnanwendungen - Speisespannungen von Bahnnetzen*, DIN, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1. Juli 2005.
- [29] Brencher, M., Ehms, H. und Yildirim, O., *Modernisierung und Erweiterung der Energieversorgung des Mainzer Straßenbahnnetzes, Elektrische Bahnen*, Nr. 1, S. 3–12, 2017.
- [30] Schumacher, R., Scherrans, T. und Stephan, A., *Auslegung der Bahnenergieversorgung der Mannheimer Verkehrs-AG für den Stadtbahnbetrieb (Teil 1)*, *Elektrische Bahnen*, Nr. 5, S. 131–138, 1997.
- [31] Schumacher, R., Scherrans, T. und Stephan, A., *Auslegung der Bahnenergieversorgung der Mannheimer Verkehrs-AG für den Stadtbahnbetrieb (Teil 2)*, *Elektrische Bahnen*, Nr. 8, S. 203–209, 1997.
- [32] Flückiger, Y. und Gafner, K., *Energiesparpotential im Bahnenergieversorgungsnetz der Basler Verkehrs-Betriebe*, *Elektrische Bahnen*, Nr. 2/3, S. 58–65, 2020.
- [33] Biesenack, H., George, G. und Hofmann, G., *Energieversorgung elektrischer Bahnen (Lehrbuch Elektrotechnik)*, ger, 1. Auflage. Wiesbaden: Teubner, 2006, 728 S., ISBN: 978-3-519-06249-3.
- [34] Kiessling, F., *Contact lines for electric railways, Planning, design, implementation, maintenance*, eng, 2. Auflage. Erlangen: Publicis Publ, 2009, 994 S., ISBN: 978-3-89578-322-7.

- [35] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, (Hrsg.), *VDV-Schrift 505 Aufbau und Schutzmaßnahmen von Gleichrichter-Unterwerken von Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen*, VDV, Köln: beka GmbH, 1. Apr. 2005.
- [36] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., (Hrsg.), *Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Leistungselektronische Stromrichter für Unterwerke*, DIN, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1. Sep. 2003.
- [37] Nevot, N. und Söffker, C., *Modernisierung bestehender DCBahnstromversorgung mittels Hesop Nicolas Nevot, Elektrische Bahnen*, Nr. 11-12, S. 632–641, 2017.
- [38] Ibaiondo, H. und Romo, A., *Kinetic energy recovery on railway systems with feedback to the grid*, in *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*, (Ohrid, Macedonia, 6.–8. Sep. 2010), IEEE, 2010. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606545.
- [39] Cornic, D., *Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation*, in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, (Bologna, Italy, 19.–20. Okt. 2010), IEEE, 2010, S. 1–9. DOI: 10.1109/ESARS.2010.5665264.
- [40] ALSTOM, *Hesop: Saving energy and costs in a single solution*, online, 2022. Adresse: <https://www.alstom.com/solutions/infrastructure/hesop-saving-energy-and-costs-single-solution> (abgerufen am 19.04.2022).
- [41] Söffker, C. und Gralla, C., *Smarte Bahnenergieversorgung für den Nahverkehr dank Hesop, Elektrische Bahnen*, Nr. 6, S. 309–315, 2016.
- [42] ABB, *Enviline™ ESS – Energy Storage System, Reduce energy and peak power costs*, online, 2022. Adresse: <https://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/railway-switchgear/dc-traction->



- power-supply/energy-management/enviline-ess (abgerufen am 19.07.2022).
- [43] Frank Pupke, *Herstellung und Eigenschaften von Fahrdrähten – Innovation und Installationsempfehlungen*, EIK, (Hrsg.), online, 2014. Adresse: [https://www.plassertheurer.com/fileadmin/user\\_upload/Mediathek/Publikationen/067\\_080\\_Pupke.pdf](https://www.plassertheurer.com/fileadmin/user_upload/Mediathek/Publikationen/067_080_Pupke.pdf) (abgerufen am 19.04.2022).
- [44] Sustainable Bus, *Up to 114 Skoda trams to operate in Rhein-Neckar (Germany). With Skeleton supercaps*, Sustainable Bus, online, 2019. Adresse: <https://www.sustainable-bus.com/trolleybus-tramway/114-skoda-trams-will-operate-in-rhein-neckar-germany-with-skeleton-supercaps/> (abgerufen am 19.04.2022).
- [45] IEEE, (Hrsg.), *IEEE Guide for Wayside Energy Storage Systems for DC Traction Applications*, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/IEEESTD.2017.7883801.
- [46] Rufer, A., Hotellier, D. und Barrade, P., *A Supercapacitor-Based Energy Storage Substation for Voltage Compensation in Weak Transportation Networks*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Jg. 19, Nr. 2, S. 629–636, 2004. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.824408.
- [47] Iannuzzi, D., Pagano, E. und Tricoli, P., *The Use of Energy Storage Systems for Supporting the Voltage Needs of Urban and Suburban Railway Contact Lines*, *Energies*, Jg. 6, Nr. 4, S. 1802–1820, 2013. DOI: 10.3390/en6041802.
- [48] Maoka, A., Ikarashi, H. und Kurino, F., *Demonstration Testing and Evaluation of a Train Running Under its Own Power Using a Stationary Energy Storage System*, online, 2014. Adresse: [http://www.hitachi.com/rev/pdf/2014/r2014\\_10\\_110.pdf](http://www.hitachi.com/rev/pdf/2014/r2014_10_110.pdf) (abgerufen am 19.04.2022).

- [49] Khodaparastan, M., Dutta, O. und Mohamed, A., *Wayside Energy Storage System for Peak Demand Reduction in Electric Rail Systems*, in *2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, (Portland, OR, 23.–27. Sep. 2018), IEEE, 2018, S. 1–5. DOI: 10.1109/IAS.2018.8544599.
- [50] Roch-Dupré, D., López-López, Á. J., Pecharromás, R. R., Cucala, A. P. und Fernández-Cardador, A., *Analysis of the demand charge in DC railway systems and reduction of its economic impact with Energy Storage Systems*, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Jg. 93, S. 459–467, 2017. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.06.022.
- [51] Guo, T., Yang, Z., Lin, F. und Xiong, S., *Optimization of peak load shifting control strategy for battery energy storage system used in urban rail transit*, in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, (Beijing, 29. Okt.–1. Nov. 2017), IEEE, 2017, S. 3901–3906. DOI: 10.1109/IECON.2017.8216667.
- [52] Christen, T. und Carlen, M. W., *Theory of Ragone plots*, *Journal of Power Sources*, Jg. 91, Nr. 2, S. 210–216, 2000. DOI: 10.1016/S0378-7753(00)00474-2.
- [53] Ragone, D. V., *Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles*, in *SAE Technical Paper Series*, (20. Mai 1968), Ser. SAE Technical Paper Series, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1968. DOI: 10.4271/680453.
- [54] Sterner, M. und Stadler, I., *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*, ger. Berlin: Springer Berlin, 2016, ISBN: 978-3-662-48893-5.
- [55] Fuchs, G., Lunz, B., Leuthold, M. und Sauer, D. U., *Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Poten-*

- zial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, online: Smart Energy for Europe Platform GmbH, 2012. Adresse: [https://www.researchgate.net/profile/Dirk-Sauer-2/publication/322478141\\_Technologischer\\_Ueberblick\\_zur\\_Speicherung\\_von\\_Elektrizitaet/links/5b6ef78692851ca65055dbaa/Technologischer-Ueberblick-zur-Speicherung-von-Elektrizitaet.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Dirk-Sauer-2/publication/322478141_Technologischer_Ueberblick_zur_Speicherung_von_Elektrizitaet/links/5b6ef78692851ca65055dbaa/Technologischer-Ueberblick-zur-Speicherung-von-Elektrizitaet.pdf) (abgerufen am 19.04.2022).
- [56] Siemens AG, *Sitras SES Das Energiespeichersystem für den Nahverkehr*, online, 2000. Adresse: <https://docplayer.org/106465888-Sitras-ses-das-energiespeichersystem-fuer-den-nahverkehr.html> (abgerufen am 19.04.2022).
- [57] Gillespie, A. J., Johanson, E. S. und Montvydas, D. T., *Energy Storage in Pennsylvania: SEPTA's Novel and Innovative Integration of Emerging Smart Grid Technologies*, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Jg. 9, Nr. 2, S. 76–86, 2014. DOI: 10.1109/MVT.2014.2313030.
- [58] Ogura, K., Nishimura, K., Matsumura, T. et al., *Test Results of a High Capacity Wayside Energy Storage System Using Ni-MH Batteries for DC Electric Railway at New York City Transit*, in *2011 IEEE Green Technologies Conference (IEEE-Green)*, (Baton Rouge, LA, USA, 14.–15. Apr. 2011), IEEE, 2011, S. 1–6. DOI: 10.1109/GREEN.2011.5754859.
- [59] Garcia-Tabares, L., Iglesias, J., Lafoz, M., Martinez, J. C., Vazquez, C. und Tobajas, C., *Development and Testing of a 200 MJ/350 kW Kinetic Energy Storage System for Railways Applications*, in *Proceedings of the 9th World Congress on Railway Research*, (Lilli, Frankreich, 22.–26. Mai 2011), 2011. Adresse: [https://www.researchgate.net/publication/267297243\\_Development\\_and\\_Testing\\_of\\_a\\_200\\_MJ350\\_kW\\_Kinetic\\_Energy\\_Storage](https://www.researchgate.net/publication/267297243_Development_and_Testing_of_a_200_MJ350_kW_Kinetic_Energy_Storage)

- System\_for\_Railways\_Applications/link/554a002e0cf2a0d4f2974be7/download (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [60] Richardson, M. B., *Flywheel energy storage system for traction applications*, in *International Conference on Power Electronics Machines and Drives*, (Bath, UK, 16. Apr. 2002–18. Apr. 2020), IEE, 2002, S. 275–279. DOI: 10.1049/cp:20020128.
- [61] Flösch, M., *Projekt Stationärer Energiespeicher Landwasser, Abschlussbericht*, Freiburger Verkehrs AG, (Hrsg.), online, 2014. Adresse: [https://www.badenova.de/mediapool/media/dokumente/unternehmensbereiche\\_1/stab\\_1/innovationsfonds/abschlussberichte/2012\\_13/2012-06\\_AB\\_Energiespeicher\\_Landwasser.pdf](https://www.badenova.de/mediapool/media/dokumente/unternehmensbereiche_1/stab_1/innovationsfonds/abschlussberichte/2012_13/2012-06_AB_Energiespeicher_Landwasser.pdf) (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [62] Godbersen, C. und Höschler, P., *Erfahrungen mit statischen Energiespeichern in der DC-Bahnenergieversorgung*, *Elektrische Bahnen*, Jg. 2004, Nr. (102) 5, S. 217–222,
- [63] Morita, G., Konishi, T., Hase, S., Nakamichi, Y., Nara, H. und Uemura, T., *Verification tests of electric double-layer capacitors for static energy storage system in DC electrified railway*, in *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, (Ischia, Italy, 11.–13. Juni 2008), IEEE, 2008, S. 1017–1022. DOI: 10.1109/SPEEDHAM.2008.4581330.
- [64] Meinert, M., *New mobile energy storage system for rolling stock*, in *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, (Barcelona, Spain, 8.–10. Sep. 2009), European Conference on Power Electronics and Applications, Piscataway, NJ: IEEE, 2009, ISBN: 978-1-4244-4432-8.
- [65] Henning, U., Thoolen, F., Lampérth, M., Berndt, J., Lohner, A. und Jänig, N., *Ultra low emission vehicle–transport advanced propulsion*, online, 2006. Adresse: <https://www.researchgate.net/>

- profile/Michael-Lamperth/publication/267221290\_Ultra\_Low\_Emission\_Vehicle\_-\_Transport\_Advanced\_Propulsion/links/54a831650cf256bf8bb7e0a3/Ultra-Low-Emission-Vehicle-Transport-Advanced-Propulsion.pdf (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [66] Steiner, M., Klohr, M. und Pagiela, S., *Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles*, in *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, (Aalborg, Denmark, 2.–5. Sep. 2007), IEEE, 2007, S. 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2007.4417400.
- [67] Moskowitz, J.-P. und Cohuau, J.-L., *STEEM: ALSTOM and RATP experience of supercapacitors in tramway operation*, in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, (Lille, France, 1.–3. Sep. 2010), IEEE, 2010, S. 1–5. DOI: 10.1109/VPPC.2010.5729152.
- [68] Tesar, M., Otto, P., Reimann, S. und Gratzfeld, P., *Karlsruher Messstraßenbahn sammelt Daten zur Optimierung von Energieeffizienz, Pünktlichkeit, Verschleiß und Komfort*, *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, Nr. 3, S. 49–54, 2020.
- [69] Karlsruher Institut für Technologie, *AERO-TRAM - Messungen der räumlichen Variabilität der Luftqualität mittels Straßenbahn*, online, 2016. Adresse: <https://www.aero-tram.kit.edu/> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [70] Baasch, B., Groos, J. C. und Roth, M. H., *Sensorgestützte Anomalie-detektion zur Zustandsbewertung der Schiene mit Regelzügen*, *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, Nr. 12, 2018. Adresse: <https://elib.dlr.de/121905/> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [71] Baasch, B., Heusel, J., Groos, J. C. und Shankar, S., *Eingebettete Zustandsüberwachung der Gleisinfrastuktur, Entwicklung und Erprobung von eingebetteten Multi-Sensor-Systemen für die kontinuierliche Zustandsüberwachung der Gleisinfrastuktur im operativen*

- Betrieb, Der Eisenbahningenieur EI*, Jg. 2019, S. 6–8, 2019. Adresse: <https://elib.dlr.de/129363/> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [72] Hunn, S., Züger, S., Nerlich, I., Schlatter, C. und Wolter, K. U., *Onboard Monitoring in der Schweiz, ein Gemeinschaftswerk dreier Bahnen*, *ZEVrail*, Jg. 144, Nr. 4, S. 86–91, 2020. Adresse: <https://www.zevrail.de/artikel/onboard-monitoring-der-schweiz-ein-gemeinschaftswerk-dreier-bahnen> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [73] Bobsien, S., Schlummer, E. H. und Schlebeck, D., *TechLOK - ein erfolgreiches Projekt zur intelligenten Nutzung von Diagnose-Daten in der Instandhaltung, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, Nr. 4, S. 16–19, 2015. Adresse: [www.schlummer.com/resource/13\\_etr\\_4-15\\_schlummer\\_techlok.pdf](http://www.schlummer.com/resource/13_etr_4-15_schlummer_techlok.pdf) (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [74] TU Darmstadt, *Forschung für die Straßenbahn der Zukunft, Projekt MAAS untersucht Machbarkeit von Automatisierung und Teleoperation*, online, 2019. Adresse: [https://www.tu-darmstadt.de/universitaet/aktuelles\\_meldungen/archiv\\_2/2019/2019quartal2/neuesausdertueinzelansichtbreitespalte\\_231936.de.jsp](https://www.tu-darmstadt.de/universitaet/aktuelles_meldungen/archiv_2/2019/2019quartal2/neuesausdertueinzelansichtbreitespalte_231936.de.jsp) (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [75] HEAG mobilo GmbH, *Machbarkeitsstudie zur Automatisierung und zu Assistenzsystemen der Straßenbahnen (MAAS)*, online, 2017. Adresse: <https://www.heagmobilo.de/de/machbarkeitsstudie-zur-automatisierung-und-zu-assistenzsystemen-der-stra%C3%9Fenbahnen-maas> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [76] Deutsche Bahn, *advanced TrainLab: das schnellste Labor auf Schienen*, online, 2019. Adresse: <https://www.deutschebahn.com/de/Digitalisierung/technologie/advanced-TrainLab-das-schnellste-Labor-auf-Schienen-3953074> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [77] Günther, R., Wenzel, T., Wegner, M. und Rettig, R., *Big data driven dynamic driving cycle development for busses in urban public trans-*

- portation, Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 51, S. 276–289, 2017. DOI: 10.1016/j.trd.2017.01.009.
- [78] Dürrschmidt, G., Beitelschmidt, M. und Harter, M., *5 Jahre Messstraßenbahn Dresden - Erfahrungen und Auswertungsprojekte, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 2014, Nr. 6, S. 36–41, 2014. Adresse: [https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifkm/dmt/ressourcen/dateien/forschung/messstrassenbahn/presse\\_/etr\\_artikel](https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifkm/dmt/ressourcen/dateien/forschung/messstrassenbahn/presse_/etr_artikel) (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [79] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung, EBO*, Version BGBl. I S. 479, 2019. Adresse: <https://www.gesetze-im-internet.de/ebo/BJNR215630967.html> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [80] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen, BOStrab*, Version BGBl. I S. 1410, 2019. Adresse: [https://www.gesetze-im-internet.de/strabbo\\_1987/BOStrab.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/strabbo_1987/BOStrab.pdf) (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [81] Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH, *Stadtbahn verbindet Stadt und Region. Eine Idee aus Karlsruhe setzt sich durch.*, online, 2020. Adresse: [https://www.avg.info/fileadmin/user\\_upload/documents/AVG\\_TrainTrain\\_de.pdf](https://www.avg.info/fileadmin/user_upload/documents/AVG_TrainTrain_de.pdf) (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [82] Karlsruher Verkehrsverbund GmbH, *Liniennetzplan Schiene*, 2020. Adresse: [https://www.kvv.de/fileadmin/user\\_upload/kvv/Dateien/Fahrplaene\\_Netzplaene/Schiene/2021/KVV-Liniennetzplan\\_Schiene.pdf](https://www.kvv.de/fileadmin/user_upload/kvv/Dateien/Fahrplaene_Netzplaene/Schiene/2021/KVV-Liniennetzplan_Schiene.pdf) (abgerufen am 15. 03. 2021).
- [83] Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH, *Die AVG in Zahlen 2020. Geschäftsbericht 2020*, 2022. Adresse: [https://www.vbk.info/fileadmin/user\\_upload/vbk/Dateien/Unternehmen/vbk\\_geschbericht\\_2020\\_Web-Ansicht.pdf](https://www.vbk.info/fileadmin/user_upload/vbk/Dateien/Unternehmen/vbk_geschbericht_2020_Web-Ansicht.pdf) (abgerufen am 19. 04. 2022).

- [84] Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH, *Die VBK in Zahlen 2020. Geschäftsbericht 2020*, 2022. Adresse: [https://www.vbk.info/fileadmin/user\\_upload/vbk/Dateien/Unternehmen/vbk\\_geschbericht\\_2020\\_Web-Ansicht.pdf](https://www.vbk.info/fileadmin/user_upload/vbk/Dateien/Unternehmen/vbk_geschbericht_2020_Web-Ansicht.pdf) (abgerufen am 19.04.2022).
- [85] Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH, *Niederflurwagen GT6-70D/N*, online, 2019. Adresse: <https://web.archive.org/web/20140419212948/http://www.avg.info/oepnv/schienerfahrzeuge/gt6-70dn.html> (abgerufen am 19.04.2022).
- [86] Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH, *Niederflurwagen GT8-70D/N*, online, 2019. Adresse: <https://web.archive.org/web/20140419213229/http://www.avg.info/oepnv/schienerfahrzeuge/gt8-70dn.html> (abgerufen am 19.04.2022).
- [87] Stadler Rail Group, *Niederflur-Stadtbahn CITYLINK, Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH (VBK) und Albtal-Verkehrs-Gesellschaft (AVG), Deutschland*, online, 2019. Adresse: <https://www.stadlerail.com/media/pdf/lrvbkavg0116d.pdf> (abgerufen am 19.04.2022).
- [88] Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G. und Smyth, P., *From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases*, *AI Magazine*, Jg. 17, Nr. 3, S. 37, 1996, Mar. DOI: 10.1609/aimag.v17i3.1230.
- [89] SAS Institute Inc., *Introduction to SEMMA*, online, 2017. Adresse: <https://documentation.sas.com/doc/en/emref/14.3/n061bzurmej4j3n1jnj8bbj1a2.htm> (abgerufen am 19.04.2022).
- [90] Chapman, P., Clinton, J., Kerber, R. et al., *CRISP-DM 1.0, Step-by-step data mining guide*, online: SPSS, 2000. Adresse: <https://www.kde.cs.uni-kassel.de/lehre/ws2012-13/kdd/files/CRISPWP-0800.pdf> (abgerufen am 19.04.2022).
- [91] Azevedo, A. und Santos, M. F., *KDD, SEMMA and CRISP-DM: A Parallel Overview*, in *IADIS European Conf. Data Mining 2008*.



- 
- [92] Chiarini, A., *From total quality control to lean six sigma, Evolution of the most important management systems for the excellence* (SpringerLink Bücher), eng. Milano: Springer Milan, 2012, ISBN: 978-88-470-2658-2. DOI: 10.1007/978-88-470-2658-2.
- [93] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, (Hrsg.), *Implementierung und Betrieb von Big-Data-Anwendungen in der produzierenden Industrie*, VDI/VDE, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1. Dez. 2019.
- [94] Brunn, C., Schnieder, L. und Bock, U., *Big Data – Basis prädiktiver Instandhaltung von Schienenfahrzeugen*, ZEVrail, Jg. 143, Nr. 3, S. 86–91, 2019. Adresse: <https://www.zevrail.de/artikel/big-data-basis-praediktiver-instandhaltung-von-schienenfahrzeugen> (abgerufen am 19.04.2022).
- [95] IEEE, (Hrsg.), *IEEE Standard for Ethernet*, Version 802.3-2015, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/IEEESTD.2016.7428776.
- [96] INKA e.V., *Was ist KA-WLAN?* 2021. Adresse: <https://www.kawlan.de/> (abgerufen am 19.04.2022).
- [97] Schnieder, L., Bock, U. und Pal, D., *IoT-Plattformen zur prädiktiven Instandhaltung von Fahrzeugflotten im Schienenverkehr*, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, Nr. 12, S. 56–59, 2020.
- [98] Hurzlmeier, J., *Auswahl und Implementierung einer Datenbank für Langzeitmessdaten*, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2019.
- [99] The PostgreSQL Global Development Group, *PostgreSQL*, Version 13, online: The PostgreSQL Global Development Group, 2021. Adresse: <https://www.postgresql.org/> (abgerufen am 19.04.2022).
- [100] Timescale Inc, *TimescaleDB*, online: Timescale Inc, 2021. Adresse: <https://www.timescale.com> (abgerufen am 19.04.2022).

- [101] DB-engines, *DB-Engines Ranking*, solid IT gmbh, (Hrsg.), online, 2021. Adresse: <https://db-engines.com/de/ranking> (abgerufen am 19.04.2022).
- [102] PostGIS Project Steering Committee, <http://postgis.net/>, 2021. Adresse: <http://postgis.net/> (abgerufen am 19.04.2022).
- [103] Ramesy, P. und Leslie, M., *Introduction to PostGIS*, PostGIS Project Steering Committee, (Hrsg.), online, 2012. Adresse: <https://postgis.net/workshops/postgis-intro/introduction.html> (abgerufen am 19.04.2022).
- [104] Leineweber, S., *Analyse der Wechselwirkung zwischen Streckengeometrie und Energiebedarf im Karlsruher Straßenbahnnetz*, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, intern, 2020.
- [105] Tesar, M., *Analyse Gesamtenergiebedarf NET 2012*, intern: Karlsruher Institut für Technologie, 2021.
- [106] Kolb, P., *Condition-Monitoring der Schieneninfrastruktur auf Basis von Machine Learning*, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2020.
- [107] Oppenheim, A. V. und Schafer, R. W., *Discrete-time signal processing (Always learning)*, eng, 3. Auflage. Harlow: Pearson, 2014, 1052 S., Oppenheim, Alan V. (VerfasserIn) Schafer, Roland W. (VerfasserIn), ISBN: 978-1292025728.
- [108] Proakis, J. und Manolakis, D., *Digital signal processing (Always learning)*, eng, 4th edition, Pearson New International Edition. Harlow: Pearson Education Limited, 2014, 1013 S., ISBN: 978-1-292-02573-5.

- 
- [109] LEM Europe GmbH, *Voltage transducer DVL-UI series, Unipolar voltage - Current output 4-20mA*, 2001. Adresse: [http://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/dvl\\_ui\\_series.pdf](http://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/dvl_ui_series.pdf) (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [110] Winzer, P. und Doppelbauer, M., *Berechnung von Wirkungsgradkennfeldern von Asynchronmaschinen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode*, de, *ETG-Fachbericht*, Nr. 138, S. 46–51, 2013. DOI: 10.5445/IR/1000047106.
- [111] SIGNON Deutschland GmbH, *SIGNON SINAnet*, 2022. Adresse: <https://signon-group.com/software-produkte/signon-suite> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [112] ENOTRAC AG, *FABEL*, ENOTRAC AG, 2021. Adresse: <https://www.enotrac.com/de/software-tools/fabel.php> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [113] Siemens AG, *sitras Sidytrac*, 2018. Adresse: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:68d51df4-72d2-4ca6-b9a5-6d47f69fff14/siemens-sidytrac-pi-de.pdf> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [114] OpenTrack Railway Technology, *OpenTrack, Eisenbahnsimulation*, 2022. Adresse: [http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack\\_d/opentrack\\_d.html](http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_d/opentrack_d.html) (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [115] SYSTRA Canada, *Railsim X*, 2020. Adresse: <https://www.systracanada.com/en/services-expertise/tools/article/railsim-x-r> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [116] Operation Technology, Inc., *eTraX™*, Operation Technology, Inc. Adresse: <https://etap.com/solutions/railways> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [117] LTK, *TrainOps*, LTK. Adresse: <https://www.ltk.com/trainops> (abgerufen am 19. 04. 2022).

- [118] The MathWorks, Inc., *MATLAB and Statistics Toolbox*, Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks, Inc. Adresse: <https://de.mathworks.com/> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [119] Chymera, M. Z., Renfrew, A. C., Barnes, M. und Holden, J., *Modeling Electrified Transit Systems*, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Jg. 59, Nr. 6, S. 2748–2756, 2010. DOI: 10.1109/TVT.2010.2050220.
- [120] Wen, B. R. und Triplett, J. D., *Computer simulation of rail transit vehicle systems-method and advantages*, in *Proceedings of the 1991 IEEE/ASME 1991*, (St. Louis USA, 21.–23. Mai 1991), 1991, S. 9–11. DOI: 10.1109/RRCON.1991.160921.
- [121] ANSYS, Inc., *Twin Builder*, Version R2019 R3, Canonsburg, PA, United States: ANSYS, Inc. Adresse: <https://www.ansys.com/products/systems/ansys-twin-builder> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [122] Nagel, L. und Quarles, T., *SPICE*, EECS Department of the University of California at Berkeley. Adresse: <http://bwrce.eecs.berkeley.edu/Classes/lcBook/SPICE/> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [123] Python Software Foundation, *Python*, Python Software Foundation, 2021. Adresse: <https://www.python.org/> (abgerufen am 19. 04. 2022).
- [124] Clerici, A., Tironi, E. und Dezza, F. C., *Voltage stabilization and efficiency improvements on DC railways by stand alone energy storage systems*, in *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, (Milan, Italy, 6.–9. Juni 2017), IEEE, 2017, S. 1–7. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977674.

- [125] Khodaparastan, M., Dutta, O., Saleh, M. und Mohamed, A., *Modeling and Simulation of DC Electric Rail Transit Systems with Wayside Energy Storage*, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, S. 1, 2019. DOI: 10.1109/TVT.2019.2895026.
- [126] Eller, M., *Prädiktiver Betrieb von Multi-Hybrid-Antrieben im SPNV*, Diss., Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2019, 173 S. DOI: 10.5445/IR/1000089339.
- [127] Otto, P. und Gratzfeld, P., *Optimal Positioning of Wayside Energy Storage Systems in Local Transportation Networks*, in *2021 Joint Rail Conference*, (Virtual, Online, 20. Juni–21. Apr. 2021), American Society of Mechanical Engineers, 2021. DOI: 10.1115/JRC2021-58018.
- [128] Otto, P. und Gratzfeld, P., *Untersuchung zur Auswirkung von Energiespeichern in Karlsruhe*, *Elektrische Bahnen*, Nr. 3, S. 3–12, 2022.