
Verfügbarkeit und Ausfallursachen von Oberleitungssystemen auf Autobahnen

Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb

Jürgen Klaus Wilke, Dipl.-Ing.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation.

Referent: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Korreferent: Prof. Eva Kaßens-Noor, Ph.D.

Verfasser:	Dipl.-Ing. Jürgen Klaus Wilke
Titel der Dissertation:	Verfügbarkeit und Ausfallursachen von Oberleitungssystemen auf Autobahnen - Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb
Dissertationsort:	Darmstadt, Technische Universität Darmstadt
Tag der Einreichung:	19.11.2024
Tag der mündlichen Prüfung:	31.01.2025
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2025	
Veröffentlicht unter CC BY 4.0 International https://creativecommons.org/licenses	

Herausgeber:

Technische Universität Darmstadt
Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Otto-Berndt-Straße 2
64287 Darmstadt

www.tu-darmstadt.de/verkehr
ivv@verkehr.tu-darmstadt.de

Schriftenreihe der Institute für Verkehr
Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Heft V 55
ISSN 1613-8317

Ich habe mich bemüht, geschlechtsneutrale Begriffe zu verwenden, damit sich alle Geschlechter von dieser Dissertation angesprochen fühlen. In wenigen Fällen wurden etablierte Fachbegriffe aus der Literatur beibehalten, ebenso wie direkte Zitate. Sollte dennoch eine Formulierung nicht geschlechtsneutral sein, bitte ich um Verständnis – sie ist stets inklusiv gemeint, sofern nicht ausdrücklich ein bestimmtes Geschlecht adressiert wird.

Danksagung

Zunächst möchte ich an dieser Stelle betonen, wie dankbar ich dafür bin, überhaupt die Möglichkeit zur Promotion erhalten zu haben. Dies ist keineswegs selbstverständlich, und für viele Menschen bleibt dieser Weg aus vielfältigen Gründen verwehrt. Es ist mein aufrichtiger Wunsch, dass persönliches Engagement ausreichen sollte, um diesen Weg im Leben beschreiten zu können. Ich durfte und konnte nicht nur diesen Weg gehen, sondern hatte auch die Chance, wertvolle Erfahrungen zu sammeln und großartige Menschen kennenzulernen. Diese haben mich nicht nur begleitet, sondern auch unterstützt und somit einen bedeutenden Beitrag zu meinem Erfolg geleistet. Ihnen gelten mein ausdrücklicher Dank und meine tief empfundene Wertschätzung.

Allen voran bedanke ich mich bei meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze. Herr Prof. Boltze hat mich am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik aufgenommen, mir vom ersten Tag an seine Unterstützung im Promotionsverfahren zugesichert und mir dadurch ein sicheres Forschungsumfeld geschaffen. Seine Anregungen waren stets gewinnbringend und zielführend und haben mich kontinuierlich auf meinem Promotionsweg vorangebracht. Für meine Zeit am Institut bin ich überaus dankbar, ich habe mich hier nicht nur fachlich, sondern auch persönlich weiterentwickelt.

Ein weiterer besonderer Dank gilt meiner Korreferentin, Prof. Eva Kaßens-Noor, Ph.D., die 2022 die Institutsleitung übernahm. Sie hat mich nicht nur in Forschung und Lehre gefordert und gefördert, sondern auch mein Promotionsvorhaben aktiv unterstützt. Frau Prof. Kaßens-Noor hat meine wissenschaftliche Neugier weiter angeregt, mich bei verschiedenen Veröffentlichungen fachlich beraten und wertvolle Impulse für meine Dissertation gegeben.

Ferner danke ich meinen beiden Prüfenden, Prof. Dr.-Ing. Hauke Zachert und Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. habil. Christian Hofstadler sowie dem Vorsitzenden der Prüfungskommission Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn. Ebenso gilt mein Dank den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Dekanats und des Studierendenservices für die hervorragende Zusammenarbeit und die reibungslose Durchführung des Promotionsverfahrens.

Meine herzliche Dankbarkeit richtet sich an meine Kolleginnen und Kollegen am Institut sowie mein ELISA-Team. Es war eine unglaublich bereichernde Zeit, voller wertvoller Erkenntnisse, schöner Geschichten und gemeinsamer Erfolge. Ich wünsche euch allen auf eurem weiteren Weg viel Erfolg und alles Gute!

Ein großer Dank geht auch an die Expertinnen und Experten, die sich die Zeit genommen haben, meine Fragen im Rahmen dieser Dissertation zu beantworten. Sie haben mit ihrem Wissen und ihren Beiträgen maßgeblich dazu beigetragen, meine Erkenntnisse zu schärfen und diese Arbeit auf ein solides Fundament zu stellen.

Meinen Freunden und meiner Familie danke ich von Herzen – einerseits für die bedingungslose Unterstützung in allen Phasen meiner Promotion, andererseits dafür, dass sie mir den nötigen Raum für meine Analysen und die Verschriftlichung gewährt haben. Ich freue mich darauf, nun wieder mehr gemeinsame Zeit mit euch zu verbringen.

Mein unendlicher Dank gilt jedoch meiner Ehefrau Kim. Du hast mich während des gesamten Promotionsverfahrens nicht nur privat, sondern auch fachlich unterstützt und mir stets die notwendige Zeit zum Forschen und Schreiben eingeräumt. Ohne deine Unterstützung (und dein Lektorat) wäre diese Dissertation in dieser Form nicht möglich gewesen.

Meinen Kindern Ava und Emerie danke ich für die unerschöpfliche Energie, die ihr mit voller Hingabe selbst auslebt, aber auch immer wieder auf mich übertragen habt. Es ist faszinierend, wie nah Erschöpfung und Superkraft manchmal beieinanderliegen können.

Diese Arbeit entstand auch in Gedenken an meinen großartigen Schwiegervater Michael.

Kurzfassung

In Deutschland nehmen die Fahrleistung und somit auch die verkehrsbedingten Emissionen im Straßengüterverkehr weiter zu. Aufgrund der emissionsbedingten anthropogen verursachten negativen Folgen auf das weltweite Klima rückt der Verkehrssektor immer stärker in den Fokus zur zwingenden Umsetzung von Maßnahmen, um diese negativen Folgen zu reduzieren. Eine Maßnahme ist dabei der Ausbau von Oberleitungsanlagen auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Die Elektrifizierung durch Oberleitungen stellt dabei einen neuen technologischen Ansatz dar, welcher durch die Ausweisung von insgesamt drei Feldversuchen in Deutschland wissenschaftlich untersucht wird.

In dieser Arbeit werden basierend auf dem ELISA-Feldversuch die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage sowie die Ausfallursachen systematisch analysiert, um Empfehlungen für den Netzausbau und den Betrieb einer Oberleitungsanlage abzuleiten. Dazu wurden drei Forschungsfragen entwickelt, welche innerhalb der Arbeit beantwortet werden:

1. Welche Faktoren limitieren die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen?
2. Wie lassen sich diese Faktoren beeinflussen, um eine höhere Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage zu erreichen?
3. Welche Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage kann zukünftig erreicht werden?

Für die Beantwortung der Forschungsfragen wird auf Grundlage der Daten aus dem ELISA-Feldversuch die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage im Betrachtungszeitraum seit der Inbetriebnahme im Mai 2019 bis Ende 2022 analysiert und die Ausfallursachen identifiziert. Anschließend werden die Wirkungszusammenhänge zwischen den Ausfallursachen und der Anlagenverfügbarkeit untersucht und beschrieben, wobei eine Identifikation der limitierenden Ausfallursachen mit Hilfe einer vergleichenden Bewertung der jeweiligen Ausfallursachen erreicht wird. Die limitierenden Ausfallursachen sowie die Wirkungszusammenhänge dienen im Weiteren dazu, die zukünftige und potenzielle Anlagenverfügbarkeit zu ermitteln.

Die relevanten Erkenntnisse werden fortlaufend in sogenannten Kernaussagen beschrieben und über die Durchführung von Expertenbefragungen validiert. Die Untersuchungen zeigen sechs relevante Ausfallursachen auf, welche die Verfügbarkeit einer zukünftigen Oberleitungsanlage limitieren werden. Diese umfassen:

- Inspektion und Wartung
- Anforderungen durch Dritte
- straßenbetriebliche Aktivitäten
- Arbeitsstätten
- Extremwetterereignisse
- Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden

Unter Beachtung der limitierenden Ausfallursachen (Einflussfaktoren) und der Daten bzgl. der Abschaltungsdauer aus dem Feldversuch ELISA sowie auf Grundlage der Einschätzungen von Experten wird die potenzielle Anlagenverfügbarkeit ermittelt sowie eine Bewertungsmethode für die Anlagenverfügbarkeit einer Oberleitungsanlagen in Form von Bewertungsstufen aufgestellt. Je nach Berücksichtigung der Möglichkeit der Umsetzung eines halbseitigen

Betriebs bei den Einsätzen der Gefahrenabwehrbehörden ergibt sich eine Anlagenverfügbarkeit von 93,9 % (Worst-Case-Szenario) bis zu 98,3 % (Best-Case-Szenario). Höhere Werte sind möglich, wenn die genannten Strategien und Maßnahmen umgesetzt werden, welche zu einer Erhöhung der Verfügbarkeit beitragen können. Die Erreichung einer Anlagenverfügbarkeit von mehr als 99 % wird als realistisch angesehen und stellt die höchste Bewertungsstufe (LOS A) der Anlagenverfügbarkeit dar. Im Allgemeinen sollte eine Anlagenverfügbarkeit A_{OL} von mindestens 96 % erreicht werden (LOS C).

Abschließend werden die Forschungsfragen beantwortet und die Empfehlungen für den Netzausbau und den Betrieb abgeleitet. Folgende Empfehlungen für den Netzausbau werden ausgesprochen:

- Empfehlung zur Bestimmung der Lage einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs
- Empfehlung zur Bestimmung der Segmentlänge einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs
- Empfehlung zur Implementierung der Möglichkeit des halbseitigen Betriebs einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs
- Empfehlung zur Berücksichtigung der klimatischen Veränderungen beim Ausbau einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs

Die Empfehlungen für den Betrieb umfassen hingegen:

- Empfehlung zur Auswahl der Betriebsstrategie einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs
- Empfehlung zur Festlegung einer Bewertungsmethode bzgl. des operativen Betriebs einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs
- Empfehlung zur Entwicklung von Handlungsstrategien bei Störfallereignissen für den operativen Betrieb einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs
- Empfehlung zur zeitlich optimierten Umsetzung planbarer Ereignisse im operativen Betrieb einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs
- Empfehlung zum Personal- und Materialeinsatz im operativen Betrieb einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs

Die erreichbare Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen steht nicht im Widerspruch eines (flächendeckenden) Ausbaus der Oberleitungstechnologie. Der ELISA-Feldversuch und die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen konnten zeigen, dass ein solches System effizient betrieben werden kann. Stellt man sich den Herausforderungen im Verkehrssektor, insbesondere der dringlichen Reduktion der Treibhausgasemissionen, so ist die Oberleitungstechnologie ein vielversprechender Ansatz.

Abstract

In Germany, the number of kilometres driven and therefore also the traffic-related emissions in road freight transport continue to increase. Due to the anthropogenic negative impact of emissions on the global climate, the transport sector is increasingly becoming the focus of urgent measures to reduce these negative consequences. One measure is the expansion of overhead line systems on motorways to electrify road freight transport. Electrification using overhead lines represents a new technological approach, which is being scientifically investigated by means of a total of three field trials in Germany.

In this thesis, the availability of an overhead line system and the causes of failure are systematically analysed based on the ELISA field trial in order to derive recommendations for the expansion of the network and the operation of an overhead line system. Three research questions were developed for this purpose, which are answered in the thesis:

1. What factors limit the availability of an overhead contact line system on motorways?
2. How can these factors be influenced in order to achieve a higher availability of an overhead contact line system?
3. What availability of an overhead line system can be achieved in the future?

To answer the research questions, the availability of the overhead line system in the period under review from commissioning in May 2019 to the end of 2022 is analysed on the basis of the data from the ELISA field test and the causes of failure are identified. The interdependencies between the causes of failure and the system availability are then analysed and described, whereby the limiting causes of failure are identified with the help of a comparative assessment of the respective causes of failure. The limiting causes of failure and the interdependencies are then used to determine future and potential system availability.

The relevant findings are continuously described in so-called core statements and validated by conducting expert surveys. The investigations reveal six relevant causes of failure that will limit the availability of a future overhead line system. These include

- Inspection and maintenance
- Requirements by third parties
- Road operational activities
- Workzones
- Extreme weather events
- Shutdown by the hazard prevention authorities

Taking into account the limiting causes of failure (influencing factors) and the data regarding the shutdown duration from the ELISA field test as well as based on the assessments of experts, the potential system availability is determined and an assessment method for the system availability of an overhead line system is established in the form of assessment levels. Depending on the possibility of implementing half-sided operation in the operations of the emergency response authorities, this results in a system availability of 93.9% (worst-case scenario) to 98.3% (best-case scenario). Higher values are possible, if the aforementioned strategies and measures are implemented, which can contribute to an increase in availability. Achieving a system availability of more than 99% is considered realistic and represents the highest assessment level (LOS A) of system availability. In general, a system availability AOL of at least 96 % should be achieved (LOS C).

Finally, the research questions are answered and recommendations for grid expansion and operation are derived. The following recommendations for network expansion are made:

- Recommendation for determining the location of an overhead line route on motorways for the electrification of heavy goods vehicles
- Recommendation for determining the segment length of an overhead line route on motorways for the electrification of heavy goods vehicles
- Recommendation for implementing the possibility of half-sided operation of an overhead line system on motorways for the electrification of heavy goods vehicles
- Recommendation on taking climatic changes into account when expanding an overhead line system on motorways for the electrification of heavy goods vehicles

The recommendations for operation, on the other hand, include

- Recommendation on the selection of the operating strategy for an overhead line route on motorways for the electrification of heavy goods traffic
- Recommendation on the definition of an assessment method for the operational operation of an overhead line route on motorways for the electrification of heavy goods vehicles
- Recommendation for the development of action strategies in the event of incidents for the operational operation of an overhead line route on motorways for the electrification of heavy goods vehicles
- Recommendation for the time-optimised implementation of plannable events in the operational operation of an overhead contact line on motorways for the electrification of heavy goods vehicles
- Recommendation on the deployment of personnel and materials in the operational operation of an overhead contact line on motorways for the electrification of heavy goods vehicles

The achievable availability of an overhead line system on motorways is not in contradiction to a (nationwide) expansion of overhead line technology. The ELISA field test and the analyses carried out in this thesis were able to show that such a system can be operated efficiently. If the challenges in the transport sector, in particular the urgent reduction of greenhouse gas emissions, are addressed, overhead line technology is a promising approach.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	I
KURZFASSUNG	I
ABSTRACT	III
INHALTSVERZEICHNIS	V
1 EINLEITUNG UND MOTIVATION	1
1.1 Ausgangslage und Handlungsbedarf	1
1.2 Forschungslücke und Forschungsbeitrag	1
1.3 Beschreibung und Abgrenzung der Untersuchungsmethode	2
1.4 Inhaltlicher Aufbau der Arbeit	3
2 GRUNDLAGEN ZU VERKEHR UND UMWELT	6
2.1 Entwicklungen und Zukunftstrends im Verkehrssektor	6
2.1.1 Entwicklungen und Kenngrößen des Güterverkehrs	6
2.1.2 Megatrends und innovative Technologien	8
2.1.3 Nachhaltige Mobilität	12
2.2 Klimaziele und Herausforderungen im Verkehrssektor	14
2.2.1 Klimapolitische Zielsetzungen	14
2.2.2 Bestehende und zukünftige Herausforderungen im Verkehrssektor	16
3 ELEKTRISCHE STRAßENSYSTEME	18
3.1 Relevante Begriffsbezeichnungen	18
3.1.1 Elektrische Straßensysteme	18
3.1.2 Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit	19
3.1.3 Maßnahme, Strategie und Szenario	21
3.1.4 Technologisches Momentum konventioneller Antriebsformen	22
3.2 Das System eHighway	23
3.2.1 Beschreibung des Systems	23
3.2.2 Feldversuche in Deutschland	29
3.2.3 Elektrische Straßensysteme im Regelwerk des Straßen- und Verkehrswesens	31
3.3 Der ELISA-Feldversuch	31
4 FORSCHUNGSDESIGN UND AUSWERTUNGSMETHODEN.....	34
4.1 Identifikation der Forschungsfragen	34
4.1.1 Bestehende Forschungslücke	34
4.1.2 Entwicklung der Forschungsfragen	36
4.2 Entwicklung des Forschungsdesigns	37
4.2.1 Untersuchungsschritte im Forschungsdesign	37
4.2.2 Identifikation der Einflussfaktoren	40
4.2.3 Erfassung der Wirkungszusammenhänge	43
4.2.4 Bewertung der potenziellen Verfügbarkeit	46
4.2.5 Ableitung der Empfehlungen zum Netzausbau und Betrieb	46

4.3	Darstellung der Auswertungsmethoden und Datenerhebung	46
4.3.1	Einleitung und Übersicht	46
4.3.2	Quantitative Auswertungsmethoden	47
4.3.3	Qualitative Auswertungsmethoden	53
4.3.4	Hinweise zur Datenerhebung	53
5	IDENTIFIKATION DER EINFLUSSFAKTOREN	55
5.1	Ausfallursachen groß-technischer Systeme	55
5.2	Entwicklung des Anlagenbetriebstagebuchs	56
5.3	Analyse der Verfügbarkeit und Ausfallzeiten der Oberleitungsanlage	58
5.4	Erfassung der Ausfallursachen im ELISA-Feldversuch	62
5.5	Kategorisierung der Ausfallursachen	65
5.6	Analyse der Ausfallursachen	73
5.7	Zwischenfazit	76
6	ANALYSE DER WIRKUNGSZUSAMMENHÄNGE.....	77
6.1	Identifikation limitierender Ausfallursachen	77
6.2	Identifikation kritischer Betriebszeiten	83
6.3	Analyse der Anlagenverfügbarkeit	90
6.3.1	Einfluss der Betriebsstrategie	90
6.3.2	Einfluss unerwarteter Ausfallursachen	98
6.3.3	Einfluss geplanter Ausfallursachen	101
6.3.4	Einfluss der Gefahrenabwehrbehörden	106
6.3.5	Einfluss der Witterung	112
6.3.6	Einfluss der Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten	120
6.3.7	Einfluss der Personalverfügbarkeit	122
6.3.8	Einfluss der Segmentlänge	126
6.4	Zwischenfazit	129
7	BEWERTUNG DER POTENZIELLEN VERFÜGBARKEIT	130
7.1	Szenariobasierte Analyse der potenziellen Anlagenverfügbarkeit	130
7.2	Durchführung von Expertenbefragungen	135
7.2.1	Zielstellung und Festlegung der Art der Expertenbefragungen	135
7.2.2	Entwicklung der Befragungsisems	136
7.2.3	Organisation und Durchführung der Expertenbefragungen	139
7.2.4	Deskriptive Auswertung der Expertenbefragungen	141
7.3	Validierung der Forschungsergebnisse	144
7.3.1	Validierung der Kernaussagen	144
7.3.2	Validierung der potenziellen Verfügbarkeit	147
7.4	Zwischenfazit	151
8	ABLEITUNG DER EMPFEHLUNGEN ZUM NETZAUSBAU UND BETRIEB	152
8.1	Zusammenfassende Ergebnisdarstellung	152
8.2	Beantwortung der Forschungsfragen	153

8.3	Diskussion der Ergebnisse	156
8.4	Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb	159
8.4.1	Empfehlungen zum Netzausbau	159
8.4.2	Empfehlungen zum Betrieb	161
9	SCHLUSSBETRACHTUNG	165
9.1	Fazit der Dissertation	165
9.2	Offene Fragestellungen	166
9.3	Empfehlungen zum weiteren Vorgehen	168
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS		VIII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS		IX
TABELLENVERZEICHNIS		XIII
LITERATURVERZEICHNIS		XVII
VERZEICHNIS DER GESETZE UND VERORDNUNGEN		I
ANHANG		II
A.I	DTV-Schwerverkehr an ausgewählten Zählstellen in Abschnitt 2.1.1	II
A.II	Kategoriale Zuordnung der Ausfallursachen in Abschnitt 5.5	III
A.III	Liste der Betriebsunterbrechungen in Abschnitt 6.1	IV
A.IV	Werte zur Bestimmung der limitierenden Ausfallursachen zu Abschnitt 6.1	XI
A.V	Darstellung der Werte für Abbildung 31 (HeatMap) in Abschnitt 6.2	XII
A.VI	Ermittlung der Kenngrößen in Abschnitt 6.2	XV
A.VII	Übersicht der aus der Analyse ausgeschlossenen Zeiträume in Abschnitt 6.3.1	XVI
A.VIII	Übersicht der Strombezugsfahrten in Abschnitt 6.3.5	XVIII
A.IX	Fragebogen zu Abschnitt 7.2.2	XIX

1 Einleitung und Motivation

1.1 Ausgangslage und Handlungsbedarf

In Deutschland nimmt die sogenannte Fahrleistung, die in Kilometern gemessene Gesamtstrecke, welche von den unterschiedlichen Verkehrsmitteln (bspw. Pkw, Lkw oder Eisenbahn) in einem Jahr zurückgelegt wird, weiter zu (BMDV, 2022). Einhergehend steigen auch die **verkehrsbedingten Emissionen** (EEA, 2023). Aufgrund der emissionsbedingten anthropogen verursachten negativen Folgen auf das weltweite Klima rückt insbesondere der Verkehrssektor immer stärker in den Fokus zur zwingenden Umsetzung von Maßnahmen, um die negativen Folgen zu reduzieren. Je nach Verkehrsträger, Verkehrsmittel und Verkehrsart (Güterverkehr, Personenverkehr) sind hierbei unterschiedliche Maßnahmen geeignet, einen schnellen und effizienten Beitrag zu leisten. Während bspw. für den Motorisierten Individualverkehr (MIV) batterieelektrische Fahrzeuge zunehmend an Bedeutung gewinnen, zeigen sich im straßengebundenen Güterverkehr bisher keine zufriedenstellenden Erfolge. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass die Maßnahmen für den MIV aufgrund der unterschiedlichen Fahrzeugarten und Einsatzprofile im Straßengüterverkehr nicht ohne Weiteres auf den Straßengüterverkehr übertragen werden können. Ein klimaneutraler Straßengüterverkehr erfordert daher besondere Maßnahmen.

Eine solche Maßnahme stellt die **Elektrifizierung des straßengebundenen Güterverkehrs** durch den Aufbau von sogenannten elektrischen Straßensystemen (Electric Road Systems, ERS) dar. ERS ermöglichen eine effiziente Nutzung der Ressourcen (bspw. Energie), indem die notwendige elektrische Energie erst während der Fahrt dem Verbraucher, dem Lkw, zur Verfügung gestellt wird. Die Zuführung kann dabei sowohl induktiv als auch konduktiv mittels elektrischer Infrastrukturen im Verkehrsraum erfolgen (Bateman et al., 2018, S. 13ff.). Die bekannteste und am weitesten eingesetzte und technologisch erforschte konduktive Stromversorgung ist die Oberleitungstechnologie (OL-Technologie). Während die OL-Technologie bisher vorwiegend für den Schienenverkehr genutzt und teilweise auch bei Bussen als Lösung eingesetzt wird (Oberleitungsbus, O-Bus), wird der Einsatz auf Bundesfernstraßen für schwere Nutzfahrzeuge derzeit erst in drei Forschungsprojekten erprobt. In diesen Forschungsprojekten soll geklärt werden, ob der Ausbau einer OL-Infrastruktur möglich ist und der gewünschte klimawirksame Beitrag wirtschaftlich geleistet werden kann. Eines dieser drei Forschungsprojekte ist das Projekt ELISA (Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen), in welchem zu Beginn ein fünf Kilometer langer Streckenabschnitt auf der Bundesautobahn A5 mit Hilfe der OL-Technologie beidseitig elektrifiziert wurde. Im Jahr 2023 wurde die Elektrifizierung um weitere sieben Kilometer in Fahrtrichtung Süden verlängert. Diese Dissertation ist im Zuge der Bearbeitung im Projekt ELISA entstanden.

1.2 Forschungslücke und Forschungsbeitrag

Der Druck, den Straßengüterverkehr emissionsärmer und bestenfalls nachhaltig zu gestalten, ist nicht nur groß, sondern in den letzten Jahren erheblich angestiegen, da die notwendigen Erfolge ausbleiben. Grundsätzlich stehen im Straßengüterverkehr eine Vielzahl an Technologien bereit, welche vielversprechend diskutiert und erforscht werden, wobei sich jede dieser Technologien, aufgrund von einem Nachteil oder mehreren Nachteilen, bisher nicht gegenüber den konventionellen Antriebsmethoden durchsetzen konnte. Demgegenüber ist die Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge durch den Ausbau von Oberleitungen auf Autobahnen nicht nur technologisch, sondern auch wissenschaftlich ein Novum und entsprechend nicht

standardisiert und wird in den einschlägigen Regelwerken kaum beschrieben. Um die Wirksamkeit in Bezug auf die Zielsetzung, maßgebend die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs unter Beachtung zeitlicher und wirtschaftlicher Kriterien, zu bewerten, sind deshalb umfangreiche Analysen notwendig. Entsprechend wurden eine Vielzahl an Forschungsprojekten initiiert, deren Ergebnisse einen wesentlichen Beitrag im Entscheidungsprozess zur Ausgestaltung zukünftiger Antriebssysteme liefern sollen, um die bestehende Forschungslücke schnellstmöglich zu schließen.

Die wesentlichen Fragestellungen in Bezug auf die zukünftige technologische Ausgestaltung des Straßengüterverkehrs umfassen die Umsetzbarkeit und Einsatzmöglichkeiten der jeweiligen Technologien, die Wirtschaftlichkeit, welche meist insbesondere mit Fokus auf die Investitionskosten diskutiert wird, sowie die Akzeptanz seitens diverser Akteure inkl. der Gesellschaft. Diese Fragestellungen wurden auch im Projekt ELISA aufgegriffen und bereits in weiten Teilen beantwortet. Neben der Umsetzbarkeit der Oberleitungstechnologie konnte insbesondere auch die Aufnahme und Integration der Fahrzeuge in die bestehenden logistischen Prozesse der Transporteure sowie der Beitrag zur Reduktion der klimawirksamen Treibhausgase nachgewiesen werden. Für die Skalierung der zukünftigen Kosten des Ausbaus und des Betriebs einer Oberleitungsanlage ist eine Abschätzung der erforderlichen elektrifizierten Streckenlänge unabdingbar. Ein relevanter Faktor stellt dabei die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage dar, da zur Aufrechterhaltung der Energieversorgung der Fahrzeuge bei geringer Verfügbarkeit Redundanzen einzuplanen sind.

Basierend auf den aktuellen Ergebnissen der deutschen Forschungsprojekte und der vorausgegangenen Projekte in Europa und Amerika wird in dieser Dissertation der Betrieb einer Oberleitungsanlage analysiert, um **Empfehlungen für einen Netzausbau und den zukünftigen Betrieb** aussprechen zu können. Diese Empfehlungen erweitern die bisherigen Forschungsergebnisse und verbessern damit die Entscheidungsgrundlage für die jeweiligen politischen Entscheidungsträger. Weiterhin dienen diese als Grundlage zur Erweiterung des wissenschaftlichen und praxisbezogenen Fachwissens in den jeweiligen Regelwerken.

1.3 Beschreibung und Abgrenzung der Untersuchungsmethode

Im Rahmen dieser Dissertation werden die Forschungsdaten zum Betrieb der Oberleitungsanlage (Infrastrukturdaten) aus dem Forschungsprojekt ELISA herangezogen und analysiert. Diese Daten werden innerhalb eines Unterwerks der Oberleitungsanlage erfasst und umfassen neben den Betriebszeiten (Ein- und Ausschaltzeiten der Oberleitungsanlage) auch die Menge der bereitgestellten Energie an die strombeziehenden Oberleitungs-Lkw (O-Lkw). Neben den Infrastrukturdaten werden zusätzliche Informationen zum Anlagenbetrieb (bspw. die Gründe für geplante und ungeplante Abschaltungen der Oberleitungsanlage), welche seitens des Anlagenbetreibers kontinuierlich bereitgestellt werden, analysiert. Diese Informationen dienen zum einen zur Validierung der Infrastrukturdaten, zum anderen komplettieren sie die Analysen in Bezug auf die Ausfallursachen (vgl. Kapitel 5).

Ausgangspunkt der Analysen innerhalb dieser Arbeit stellen die Forschungsfragen dar, welche auf Grundlage der aktuellen Entwicklungen im Straßengüterverkehr entwickelt und beschrieben werden. Diese dienen zur strukturierten Analyse und Ableitung der Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb einer Oberleitungsanlage und geben im Weiteren den Rahmen zur Aufstellung des Forschungsdesigns. Die jeweilig erforderlichen Analysen zur

Beantwortung der Forschungsfragen lassen sich in insgesamt fünf Analyseschritte untergliedern und umfassen:

1. **Analyse des Anlagenbetriebs:** Entwicklung eines halbautomatisierten Anlagenbetriebstagebuchs, welches die Betriebszeiten und die Ausfallursachen vollständig abbildet. Zu diesem Zweck werden die Ausfallursachen kategorisiert. Durch die Analyse des Anlagenbetriebstagebuchs wird erstmalig eine übersichtliche Darstellung der Betriebszeiten und der Ausfallursachen generiert, welche als Grundlage für die weiteren Analyseschritte dient.
2. **Analyse der Ausfallursachen:** Die vielfältigen Ursachen für die geplanten und ungeplanten Ausfälle der Oberleitungsanlage werden identifiziert, strukturiert sowie kategorisiert und in Bezug auf die Ausfalldauer analysiert.
3. **Analyse der Anlagenverfügbarkeit:** Auf Grundlage der Betriebszeiten und der identifizierten Ausfallursachen kann die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage am Beispiel der Oberleitungsanlage aus dem Feldversuch ELISA umfassend analysiert werden. Die Analyse erstreckt sich hierbei nicht nur auf die reine deskriptive Beschreibung der Anlagenverfügbarkeit der bestehenden Oberleitungsanlage, sondern umfasst insbesondere die Wirkungszusammenhänge zwischen den Ausfallursachen und der Anlagenverfügbarkeit.
4. **Analyse der potenziellen Anlagenverfügbarkeit:** Mit Hilfe der identifizierten Wirkungszusammenhänge wird die potenzielle Verfügbarkeit bei einem zukünftigen Betrieb einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen analysiert.
5. **Validierung der Forschungsergebnisse:** Die gesammelten Erkenntnisse werden in einem abschließenden Analyseschritt aufbereitet und durch Expertenbefragungen mit den Anlagenbetreibern und Anlagenerrichtern validiert.

Die dargestellte Untersuchungsmethode ist an die Vorgehensweise einer Risikobewertung anhand einer RAMS-Analyse¹ gemäß EN 50126 angelehnt. Für die Durchführung einer vollumfänglichen Risikobewertung sind zusätzliche Informationen bspw. zu den jeweilig verbauten elektrischen Komponenten in der Oberleitungsanlage sowie Einblicke in die Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten notwendig. Da diese Informationen zum einen größtenteils nicht vollständig vorliegen und zum anderen auch der Geheimhaltungspflicht des Anlagenbetreibers unterliegen, fokussiert die in dieser Arbeit vorgestellte Untersuchungsmethode insbesondere die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auf Grundlage eingetretener Ereignisse, welche eine Abschaltung der Oberleitungsanlage erforderten (Ausfallursachen).

1.4 Inhaltlicher Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Dissertation ist in **vier Schwerpunktbereiche** und **neun Untersuchungsschritte** (Kapitel) gegliedert (vgl. Abbildung 1).

Der erste Schwerpunktbereich (Einführung und Grundlagen) beschreibt eingängig die Forschungslücke sowie den Forschungsbeitrag und liefert die relevanten Grundlagen in Bezug

¹ Eine RAMS-Analyse (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) stellt ein systematisches Verfahren zur Bewertung von technischen Systemen dar, welches insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen wie der Energieversorgung oder der Medizintechnik angewendet wird. In diesem Verfahren wird ein jeweiliges System anhand von vier wesentlichen Kriterien, der Zuverlässigkeit (Reliability), der Verfügbarkeit (Availability), der Wartungsfähigkeit (Maintainability) und der (System-)Sicherheit (Safety), untersucht.

auf die aktuellen Entwicklungen im Verkehrssektor, den Umwelt- und Klimaschutz sowie die Grundlagen zu den elektrischen Straßensystemen.

Im zweiten Schwerpunktbereich (methodisches Vorgehen) werden zunächst die Forschungsfragen erarbeitet und anschließend das Forschungsdesign inkl. der relevanten Untersuchungsschritte sowie die Auswertungsmethoden vorgestellt.

Der dritte Schwerpunktbereich (Analysen der Verfügbarkeit und der Ausfallursachen einer Oberleitungsanlage) bildet den Hauptteil der Arbeit. Dabei werden in den Kapiteln 5 bis 7 das Anlagenbetriebstagebuch, welches als Grundlage der Analysen dient, entwickelt, die Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit (Ausfallursachen) identifiziert und kategorisiert, die Wirkungszusammenhänge zwischen den Ausfallursachen und der Verfügbarkeit bestimmt und abschließend die potenzielle Verfügbarkeit ermittelt und die Ergebnisse mittels Expertenbefragungen validiert.

Der letzte Schwerpunktbereich (Ergebnisdarstellung und Schlussbetrachtung) fasst die relevanten Ergebnisse zusammen, um die Forschungsfragen zu beantworten und die Empfehlungen für den Netzausbau und den Betrieb abzuleiten. Abschließend werden in der Schlussbetrachtung ein Fazit über die vorliegende Arbeit gezogen, offene Fragestellungen formuliert und Empfehlungen zum weiteren Vorgehen aufgestellt.

Die in Abschnitt 1.3 vorgestellten Analyseschritte bilden den analytischen Hauptteil der Dissertation und spiegeln sich im dritten Schwerpunktbereich wider. Die jeweiligen Analyseschritte werden hierbei in eigenständige Abschnitte gegliedert, welche zwar aufeinander aufbauen, jedoch auch losgelöst voneinander nachvollzogen werden können. In Abbildung 1 werden die Analyseschritte besonders hervorgehoben.

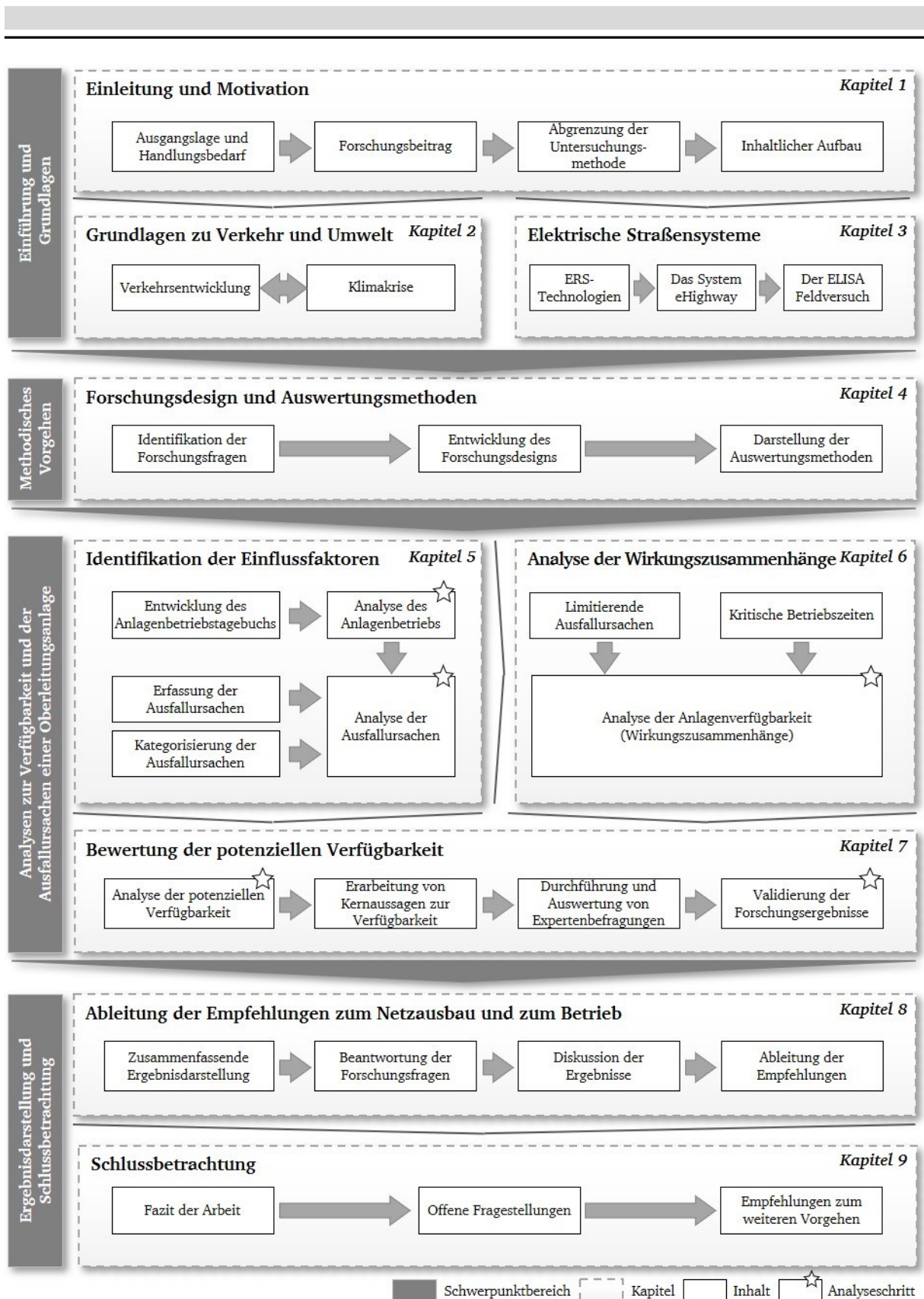


Abbildung 1: Übersicht zum inhaltlichen Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung).

2 Grundlagen zu Verkehr und Umwelt

2.1 Entwicklungen und Zukunftstrends im Verkehrssektor

2.1.1 Entwicklungen und Kenngrößen des Güterverkehrs

Um die Forschungsfragen (vgl. Abschnitt 4.1) beantworten und Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb aussprechen zu können, müssen zunächst die relevanten Grundlagen erarbeitet und dargestellt werden. Verkehr ist, mit Ausnahme der Erlebnismobilität (Götz et al., 2002, S. 9f.), kein Selbstzweck, sondern ist zwangsweise notwendig, um ein Mobilitäts- bzw. Transportbedürfnis zu realisieren bzw. umzusetzen (Braess & Seiffert, 2000, S. 642; Ellersiek, 1958, S. 14). Dabei ist die Verkehrsentwicklung eng mit der gesellschaftlichen Entwicklung verzahnt (Reutter et al., 2020, S. 6ff.). Dies lässt sich anhand unterschiedlicher Kenngrößen, bspw. der Bevölkerungsentwicklung und der Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts (BIP), veranschaulichen. In Abbildung 2 wird die **Transportleistung** für den Güterverkehr im Gesamten und bezogen auf den Straßengüterverkehr sowie das BIP in Deutschland dargestellt.

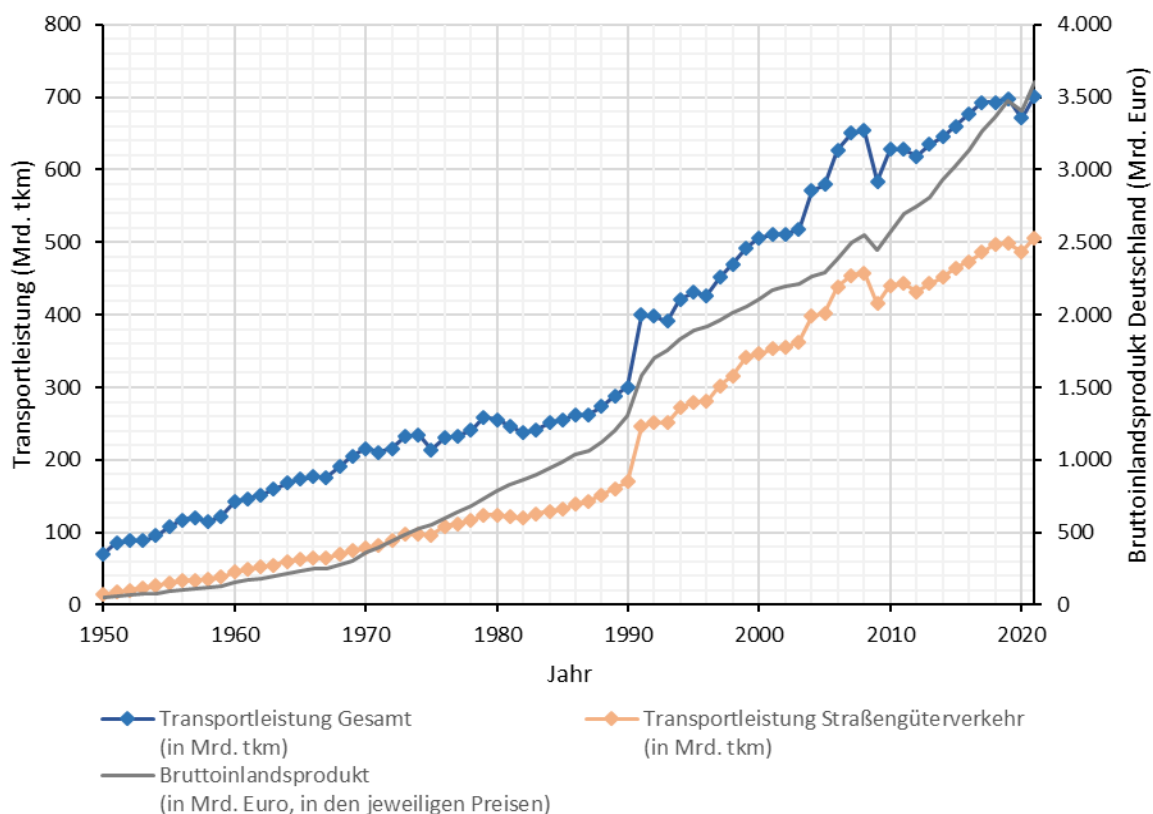


Abbildung 2: Entwicklung der Transportleistung des Güterverkehrs (Gesamt und Straßengüterverkehr) und des Bruttoinlandsprodukts in Deutschland ab 1950; eigene Datenauswertung (BMDV, 2022; BMVW, 2004; DIW, 1991; Statistisches Bundesamt, 2023) sowie eigene Darstellung.

Die Transportleistung im Güterverkehr, gemessen in Milliarden Tonnenkilometern (Mrd. tkm), spiegelt das Produkt aus der Menge der transportierten Güter und der zurückgelegten Entfernung wider. Eine steigende Transportleistung ist somit entweder auf eine Steigerung der Menge an transportierten Gütern oder der zurückgelegten Entfernung oder auf beide Faktoren gleichzeitig zurückzuführen. Da eine wachsende Wirtschaft meist auch zu einer höheren Nachfrage an Wirtschaftsgütern führt, resultiert aus einem steigenden BIP auch eine steigende Transportleistung (Reutter et al., 2020, S. 142). Die gesamte Transportleistung setzt sich

hierbei aus den Anteilen des Güterverkehrs der unterschiedlichen Güterverkehrsarten (Eisenbahn, Straßengüterverkehr, Luftverkehr, Schifffahrt und Rohrfernleitungen) zusammen. Während in den Jahren von 1950 bis 1963 der größte Anteil der Transportleistung im Güterverkehr auf die Eisenbahn entfiel, ist seit 1964 der Straßengüterverkehr maßgebend. Im Jahr 2021 betrug der Anteil des Straßengüterverkehrs an der gesamten Transportleistung bereits mehr als 72 % (BMDV, 2022).

Für Deutschland zeigt sich eine größtenteils konstante Steigerung der Transportleistung im Güterverkehr (vgl. Abbildung 2). Die sichtbaren (teilweise sprunghaften) Veränderungen in den Jahren 1975 (erste Ölpreiskrise), 1979 bis 1982 (zweite Ölpreiskrise), 1991 (Wiedervereinigung), 2009 (Finanzkrise) und 2020 (Corona-Pandemie) können anhand besonderer (wirtschaftlicher, politischer und gesellschaftlicher) Ereignisse erklärt werden. Eine weitere Steigerung der Transportleistung im Straßengüterverkehr ist somit anzunehmen (Reutter et al., 2020, S. 143ff.). Die dem Bundesverkehrswegeplan zugrunde liegende Verkehrsprognose für den Güterverkehr für das Jahr 2030 (BMVI 2016) zeigt dabei eine deutliche Zunahme bei den grenzüberschreitenden Verkehren (+42 %), den Transitverkehren (+51 %) und dem Binnenverkehr (+31 %) gegenüber der Verkehrsleistung von 2010. Der Anstieg der Transportleistung per Lkw wird mit +39 % (auf 607,4 Mrd. tkm in 2030) benannt. Der Anstieg der Transportleistung ist hierbei maßgebend auf einen Anstieg der durchschnittlichen Transportentfernung zurückzuführen. So betrug die mittlere Transportweite im Straßengüterverkehr im Jahr 2000 etwa 84 Kilometer, in 2021 hingegen betrug diese etwa 93 Kilometer (BMDV, 2022; BMVW, 2004).

Das Wachstum im Straßengüterverkehr lässt sich auch anhand einer Zeitreihe über die Anzahl an Schwerverkehrsfahrzeugen auf den Autobahnen in Deutschland an ausgewählten Punkten im Verkehrsnetz als die sogenannte **Verkehrsstärke** darstellen. Zur Beschreibung der Verkehrsstärke wird gewöhnlich der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) angegeben. Das Netz an automatischen Zählstellen wurde in den letzten Jahrzehnten weiter verdichtet und bildet heute das Verkehrsgeschehen auf den Autobahnen sehr gut ab. In Abbildung 3 sind die Daten zum Schwerverkehr an insgesamt fünf dieser Zählstellen entlang der Bundesautobahn A5 dargestellt (vgl. Anhang A.I). Als Ausgangspunkt der Betrachtung wurde das Basisjahr 2003 ausgewählt. Ältere Daten werden seitens der BASt nicht zur Verfügung gestellt.

Die betrachteten Zählstellen zeigen eine Zunahme des Schwerverkehrs in dem festgelegten Zeitraum auf, gleichwohl diese Zunahme je Zählstelle unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Die höchste Zunahme in Bezug auf das Basisjahr 2003, mit einem Wert von 61,5 %, weist die Zählstelle Alsfeld (6811) auf. Hier ist der DTV des Schwerverkehrs von 8.275 Fahrzeuge auf 13.366 Fahrzeuge angestiegen. Die Zählstelle Heppenheim (6940) hingegen verzeichnet im gleichen Zeitraum eine Zunahme von nur 6,7 %, wobei in den vorausgegangenen Jahren sogar ein geringerer DTV des Schwerverkehrs gegenüber dem Basisjahr aufgezeigt werden kann. Analog zur Betrachtung der Transportleistung werden auch bei der Anzahl an Schwerverkehrsfahrzeugen die Auswirkungen der Finanzkrise in 2009 und der Corona-Pandemie in 2020 ersichtlich. Da zusätzlich auch die Verkehrsleistung und die Verkehrsstärke im Personenverkehr angestiegen ist, hat sich in den letzten Jahren auch die Problematik bzgl. der Staus auf den Autobahnen verschärft (ADAC, 2023).

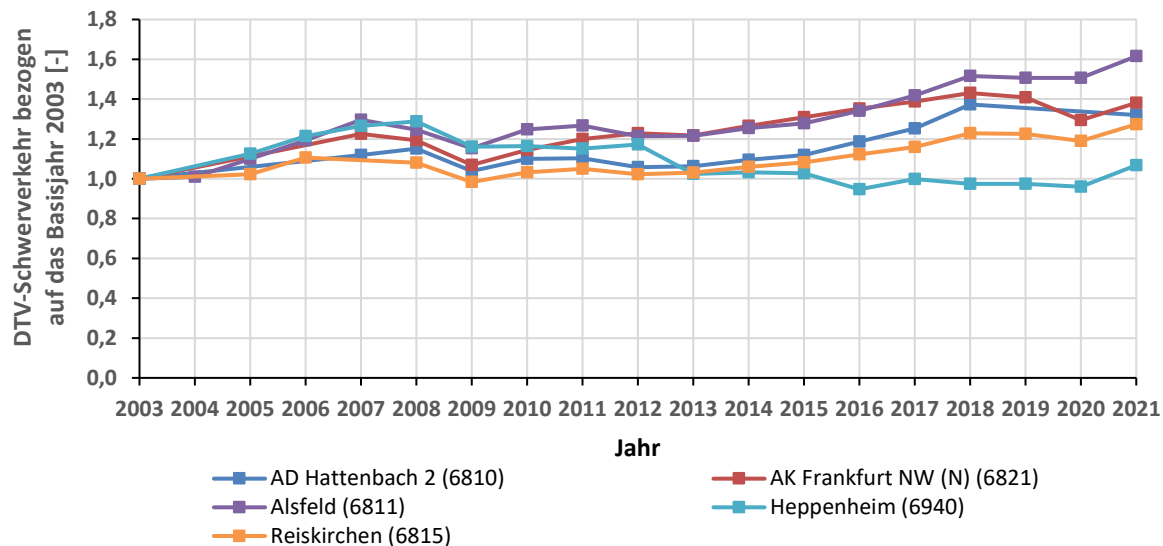


Abbildung 3: Durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV) des Schwerverkehrs an den Zählstellen 6810, 6811, 6815, 6821 und 6940 entlang der A5 in Hessen bezogen auf das Basisjahr 2003 (Daten nach BASt (2024), eigene Darstellung).

Für den Straßengüter(fern)verkehr ist jedoch nicht nur der aktuelle Verkehrszustand auf den Autobahnen, sondern auch die Parkplatzsituation entlang der Transportroute von Bedeutung. Das steigende Verkehrsaufkommen und der damit steigende Bedarf an **Parkmöglichkeiten** auf Raststätten und Autohöfen ist an vielen Stellen im übergeordneten Verkehrsnetz in Deutschland größer als das vorhandene Angebot (Noche et al., 2021; Idding & Zeilinger, 2011). Nicht selten wird daher von der sogenannten Parkplatznott berichtet (BR, 2023; MDR, 2023). Der ADAC beziffert die Anzahl an fehlenden Abstellmöglichkeiten für den Straßengüterverkehr auf 20.000 Lkw-Stellplätze (ADAC, 2022). Insbesondere in den Abendstunden ist der Bedarf an Lkw-Abstellmöglichkeiten an Autobahnen hoch (Gather & Lüttmerding, 2009, S. 802).

Die beschriebenen Kenngrößen zum Straßengüterverkehr in Deutschland zeigen eindrucksvoll auf, dass die aktuellen Problematiken im Verkehrssektor nicht nur seit langer Zeit absehbar sind, sondern zeigen indes, dass ein rasches Handeln seitens der relevanten Entscheidungsträger unumgänglich geworden ist. Es ist im Weiteren jedoch nicht nur die Verkehrsmenge, welche die Umsetzung geeigneter Maßnahmen begründet. Vielmehr unterliegt der Verkehrssektor wieder einmal mehr einem umfassenden **Transformationsprozess**, welcher, angetrieben durch die bestehenden Megatrends, den innovativen Entwicklungen und dem Ziel einer nachhaltigen Mobilität, einen direkten Einfluss auf die Ausgestaltung der Maßnahmen aufweist (Bertolini et al., 2008, S. 69ff.; Pel & Boons, 2010, S. 1256f.; Ruhrort, 2019, S. 26ff.).

2.1.2 Megatrends und innovative Technologien

Der Verkehrssektor ist zur Erläuterung von sozialen und technischen Veränderungen ein klassisches Beispiel. So beschreibt Geels (2005a, S. 2) das Verkehrssystem umfassend als ein **sozio-technisches System**, welches aufgrund von Innovationen in ein neues sozio-technisches (Verkehrs-)System übergeht. Als einfaches Beispiel führt Geels (2005a, S. 2) den Übergang von Pferdekutschen zu den Automobilen auf (vgl. Geels (2005b)). Weitere Meilensteine innovativer Entwicklungen, welche den Verkehrssektor maßgeblich geformt und verändert haben, sind mitunter die Entwicklung neuer Antriebstechnologien, wie die Dampfmaschine, der

Verbrennungsmotor oder Turbinen, die Etablierung neuer Mobilitätsdienstleistungen, wie Sharing-Angebote, Mitfahrorganisationen, und die Entwicklung bzw. der Ausbau digitaler Anwendungen, wie On-Demand-Verkehre und teilautomatisiertes Fahren (Hoppe et al., 2014; Jittrapirom et al., 2017, S. 13; Morris, 2007, S. 8).

Neben den technischen Entwicklungen tragen jedoch auch die sozialen Veränderungen maßgebend zu einer Transformation des Verkehrssektors bei. Hierzu zählen bspw. die Urbanisierung und das Bevölkerungswachstum, das (steigende) Nachhaltigkeits- und Umweltbewusstsein, die wachsende Sharing Economy und die demografischen Veränderungen, aber auch die politisch eingebrachten regulatorischen Maßnahmen, welche insbesondere der Zielerreichung einer sicheren und nachhaltigen Mobilität dienen (Hoppe et al., 2014, S. 4; Zhao, 2010, S. 236).

Bereits im Jahr 1982 hat sich Naisbitt (1982, S. 2) mit diesen Entwicklungen auseinandergesetzt und den Begriff der **Megatrends** etabliert. Inzwischen ist das Konzept der Megatrends weit verbreitet und wird auch heute noch genutzt, um die relevanten Herausforderungen zu identifizieren. Hoppe et al. (2014, S. 3f.) beschreiben die folgenden Megatrends als jene, welche den Verkehrssektor prägen werden:

- **Globalisierung:** Das weltweite Wirtschaftswachstum, welches einen enormen Einfluss auf die Nachfrage von Verkehr bzw. Mobilitätsdienstleistungen, den Fahrzeugmarkt und die Entwicklung von Verkehrstechnologien aufweist.
- **Wachstum der Weltbevölkerung:** Durch das Wachstum der Weltbevölkerung wird auch die Nachfrage nach Ressourcen, wie bspw. Energie, sowie Gütern weiter steigen. Steigende Preise, die weitere Ausbeutung natürlicher Ressourcen, der Anstieg des Handels und des Verkehrs sind die Folgen. Dabei ist das Wachstum der Weltbevölkerung nicht gleichverteilt, sodass auf der einen Seite ineffiziente und auf der anderen Seite überlastete Verkehrsinfrastrukturen entstehen können.
- **Urbanisierung:** Die Verlagerung von Bevölkerung und Wirtschaft in die Großstädte schreitet weiter voran. In Großstädten ermöglicht die Mischung verschiedener Nutzungen – Wohnen, Arbeiten, Einkaufen und Freizeit – zwar eine verbesserte Nutzung von Ressourcen, jedoch stellen die Spitzenverkehrszeiten eine wesentliche Herausforderung dar. In ländlichen Regionen zeigt sich hingegen ein anderes Bild. Hier liegt die größte Herausforderung darin, sowohl einen vergleichbaren Zugang zu den wichtigen Einrichtungen (bspw. Gesundheitsversorgung, Bildung, Einkaufsmöglichkeiten und Arbeitsplätzen) zu schaffen als auch gleichzeitig die Kosten gerecht zu verteilen.
- **Zunahme der sozialen Ungleichheiten:** Durch das steigende Wohlstandsgefälle steigen auch die sozialen Ungleichheiten. Eingeschränkter Zugang zu Arbeitsmärkten, Wohnraum, Bildung und Gesundheitsversorgung spiegelt sich in unterschiedlicher oder ausschließlicher Zugänglichkeit im Verkehrswesen wider, abhängig von der Preisgestaltung der diversen Mobilitätsdienstleistungen.
- **Demografischer und sozialer Wandel:** Die demografische Alterung wird erhebliche Auswirkungen auf die Mobilitätsbedürfnisse und -dienstleistungen haben. Derzeitig bestehende gesellschaftlichen Veränderungen (bspw. Verringerung der Haushaltsgrößen) beeinflussen die Nachfrage nach Wohnraum, was zu neuen Siedlungsstrukturen und Verkehrsverlagerungen führt.

- **Aufkommende Wissensgesellschaft und -wirtschaft:** Die Verlagerung der Wirtschaft von Produktion zu den Dienstleistungen führt indes dazu, dass die verbleibenden Produktionszweige durch eine Steigerung der Tätigkeiten in der Forschung und Entwicklung auf hochwertige Produkte ausgerichtet sind, wodurch ein höheres Bildungs- und Wissensniveau erforderlich ist. Dies begünstigt die Entwicklung umweltfreundlicher Verkehrstechnologien sowie neuer Mobilitätskonzepte.
- **Klimawandel, Umweltverschmutzung und Umweltethik:** Die Kosten des Klimawandels erfordern neue politische Maßnahmen und Entscheidungen. Dabei treiben umweltpolitische Maßnahmen wie Steuern und Vorschriften zur Bekämpfung von Emissionen die technischen Entwicklungen voran. Weiterhin wächst bei den Menschen das Umweltbewusstsein für Umweltfragen.

Die aufgeführten Megatrends führen teilweise zu erheblichen Veränderungen im Verkehrssektor (Boltze & von Mörner, 2018; Boltze, 2016, S. 853ff.; Hoppe et al., 2014; Walker et al., 2012, S. 40ff.). Gekoppelt mit der fortschreitenden Digitalisierung und den Nachhaltigkeitszielen der EU (European Commission, 2019) stehen die Entwicklungen in Bezug auf das autonome Fahren, die Elektromobilität und die Möglichkeiten zum Mobilitäts-Sharing im Vordergrund (Linden & Wittmer, 2018, S. 16ff.). Dies lässt sich auch anhand der Entwicklung der veröffentlichten wissenschaftlichen Arbeiten in Abbildung 4 aufzeigen.

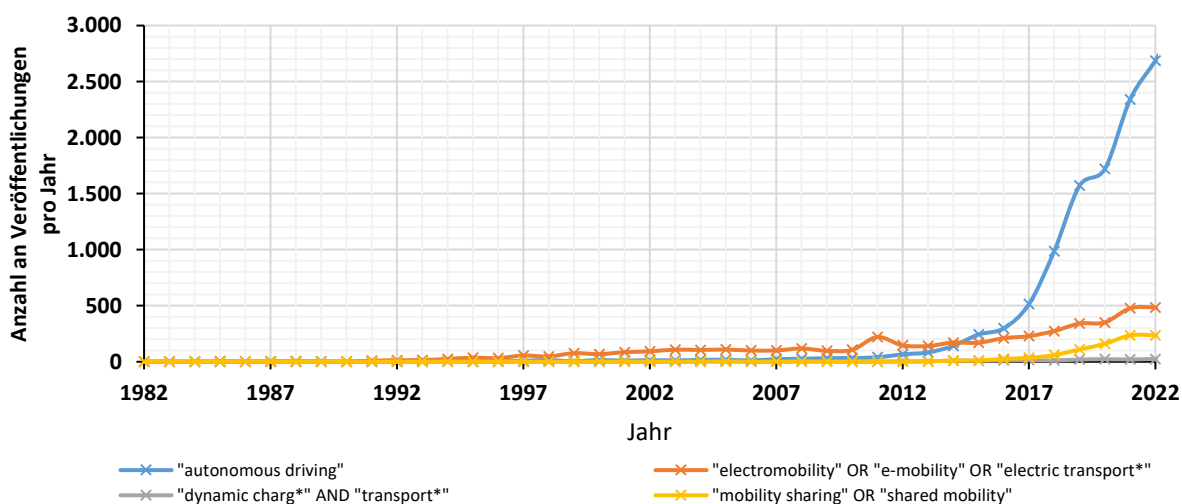


Abbildung 4: Entwicklung der Anzahl an Veröffentlichungen pro Jahr nach ausgewählten Filterkriterien (Daten aus Web of Science - Core Collection (Clarivate Analytics, 2024); eigene Darstellung).

Durchsucht man die Datenbankplattform Web of Science des Unternehmens Clarivate Analytics (Clarivate Analytics, 2024) nach wissenschaftlichen Veröffentlichungen anhand passender Filterkriterien, lassen sich die Ergebnisse in Bezug auf das Erscheinungsjahr ausgeben. Die Anzahl der jährlichen Veröffentlichungen mit der Thematik des autonomen Fahrens sind in den letzten zehn Jahren von 83 (2013) auf 3066 (2023) angestiegen. Zwar weisen die Werte für Arbeiten mit Bezug auf die Elektromobilität (141 auf 452) und zum Mobilitäts-Sharing (2 auf 211) geringer Werte auf, dennoch ist der Anstieg beachtlich. Die Thematik des dynamischen Ladens im Verkehr (vgl. Kapitel 3) findet bisher wenig Beachtung (4 auf 22).

Die Zukunftsinstitut GmbH bündelt die für den Verkehrssektor relevanten Entwicklungen unter dem **Megatrend Mobilität** (Zukunftsinstitut, 2024). Neben „autonomes Fahren“, „E-Mobility“ und „Shared Mobility“ umfasst der definierte Megatrend auch gesellschaftliche und

stadtplanerische Entwicklungen, wie bspw. „Seamless Mobility“, „Mikromobilität“ und „15-Minuten-Stadt“.

Die aufgeführten Beispiele verdeutlichen, dass nicht nur eine Veränderung im Verkehrssektor bevorsteht bzw. bereits durchlaufen wird, sondern vielmehr noch, dass diese Trends identifiziert und allen relevanten Akteuren bekannt sind. Um die verkehrsbedingten Emissionen zu reduzieren, müssen demnach technische Lösungen im Einklang mit den aufgeführten Entwicklungen gefunden werden. Bezogen auf den Straßenschwerverkehr werden dazu die folgenden **technischen Lösungsmöglichkeiten** diskutiert und erprobt (BMDV, 2023b):

- **Verbesserungen der konventionellen Antriebe:** Zu Beginn des Jahres 2023 umfasste der Bestand an zugelassenen mittleren und schweren Nutzfahrzeugen (Lkw und Sattelzugmaschinen über 3,5 t zGG) in Deutschland etwa 757 Tsd. Fahrzeuge (KBA, 2024). Den größten Anteil des Bestands sind Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben, wie Diesel (98,5 %) und Benzin (0,2 %). Die Effizienzverbesserung der konventionellen Antriebe ist daher weiterhin auch ein fokussiertes Ziel der Bundesregierung (BMVI, 2018, S. 22).
- **Nutzung von synthetischen Kraftstoffen:** Die Herstellung der synthetischen Kraftstoffe erfolgt entweder über die Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom, die sogenannten E-Fuels, oder aus Biomasse. Für die Herstellung der E-Fuels werden dazu (grüner) Wasserstoff, bspw. über eine Elektrolyse, und (grüner) Kohlenstoff benötigt (Maus, 2019, S. 116f.). Großer Vorteil der synthetischen Kraftstoffe ist die Nutzbarkeit der bestehenden Infrastrukturen sowie die Speicherbarkeit, wobei demgegenüber die hohen Umwandlungsverluste bei der Herstellung stehen.
- **Wasserstoffbasierte Antriebe:** Quasi konkurrierend zu den E-Fuels stehen die wasserstoffbasierten Antriebe, da (grüner) Wasserstoff auch bei der Herstellung der E-Fuels notwendig ist. Wird der Wasserstoff in einer Wärmekraftmaschine im Fahrzeug verbrannt, so spricht man von einem Wasserstoff-Verbrenner (bzw. Wasserstoffmotor), bei Umwandlung über eine chemische Reaktion durch Protonentausch in einer Brennstoffzelle von einem Brennstoffzellen-Fahrzeug. Wesentlicher Nachteil der Wasserstoffbasierten Antriebe ist die Speicherbarkeit des Wasserstoffes, da dieser in gasförmigen Zustand sich durch unterschiedliche Materialien verflüchtigen kann. Eine Speicherung in flüssiger Form ist möglich, führt jedoch zu erheblichen energetischen Verlusten (Stan, 2020, S. 266ff.).
- **Elektrische Fahrzeugantriebe:** Elektrisch angetriebene Fahrzeuge basieren auf Elektromotoren, bei denen elektrisch generierte elektromagnetische Felder die erforderlichen Kräfte zur Fortbewegung erzeugen. Dadurch weisen Elektromotoren erhebliche Vorteile innerhalb der Drehmomentcharakteristik auf, wobei kein Getriebe erforderlich ist. Die direkte Nutzung des Stroms als Energiequelle drückt sich in einem hohen Wirkungsgrad aus. Nachteile ergeben sich jedoch in der Energiedichte und somit der Speicherung und Reichweite sowie in der bisher nicht ausreichend ausgebauten, aber erforderlichen Ladeinfrastruktur. (Stan, 2020, S. 294ff.)
- **Elektrische Straßensysteme (ERS):** Bei den ERS handelt es sich formal nicht um einen Fahrzeugantrieb, sondern um eine spezielle Form der Energiebereitstellung, entweder konduktiv (bspw. mittels Oberleitungen) oder induktiv (bspw. im Straßenkörper verbaute Spulen). Bei den ERS wird der Strom dynamisch – während der Fahrt – dem Fahrzeug zugeführt, wodurch zusätzliche Standzeiten zum Laden vermieden werden

können und auf kleinere Fahrzeugbatterien zurückgegriffen werden kann. (Bateman et al., 2018, S. 13ff.)

Es ist anzumerken, dass jedes System bzw. jeder Fahrzeugantrieb spezielle Vor- und Nachteile aufweist, gleichsam sich damit auch geeignete (und vordringliche) Anwendungsbereiche ergeben. Durch die Kombination mehrerer Antriebsmöglichkeiten (Hybrid-Fahrzeuge) lassen sich die Nachteile teilweise kompensieren. Der Umschwung auf die diskutierten Technologien ist im Weiteren eng mit dem Ausbau der Energiegewinnung aus erneuerbaren Energiequellen verzahnt. Je mehr (grüner) Strom zur Verfügung steht, desto umweltfreundlicher wird die Nutzung (bzw. Herstellung) und desto unwesentlicher die Umwandlungsverluste (Maus, 2019, S. 135).

2.1.3 Nachhaltige Mobilität

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Entwicklungen im Verkehrssektor sowie die bestehenden Megatrends aufgeführt. Die Herausforderungen und die Potenziale zur Erreichung einer nachhaltigen Mobilität lassen sich daraus ableiten. Die nachhaltige Mobilität als Ziel der Verkehrsplanung ist jedoch auch historisch verankert und derart relevant, so dass dieses in diesem Abschnitt gezielt adressiert wird.

Der Begriff sowie das Konzept der **Nachhaltigkeit** ist heute weitgehend bekannt, gleichwohl die grundlegende Wortdefinition bereits aus dem 18. Jahrhundert stammt. Mit dem im Jahr 1713 erschienenen Werk „Sylvicultura oeconomica“ von Hans Carl von Carlowitz wurde auf die Notwendigkeit einer **nachhaltenden Nutzung** der Waldressourcen hingewiesen, um deren kontinuierliche Verfügbarkeit sicherzustellen (von Carlowitz, 1713, S. 105). Die inzwischen verwendete Definition basiert auf dem sogenannten Brundtland-Bericht aus dem Jahr 1987 und bezeichnet eine nachhaltige Entwicklung als eine Entwicklung, *„die den Bedürfnissen der gegenwärtigen Generation entspricht, ohne die Fähigkeit zukünftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen“* (übersetzt nach WCED (1987, S. 16)). Gemeinhin wird die Nachhaltigkeit gemäß der Ausführungen in der Agenda 21 der Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung von 1992 (kurz: Rio-Konferenz) in drei Dimensionen differenziert (UNCED, 1992, S. 75):

- **Ökologische Nachhaltigkeit:** Schutz und Erhalt der natürlichen Ressourcen und der Ökosysteme.
- **Ökonomische Nachhaltigkeit:** Wirtschaftliche Entwicklung und Wohlstand ohne übermäßigen Ressourcenverbrauch.
- **Soziale Nachhaltigkeit:** Soziale Gerechtigkeit und Chancengleichheit innerhalb und zwischen Generationen.

Diese Dimensionen werden auch als die Säulen der Nachhaltigkeit bezeichnet. Die **Rolle des Verkehrswesens** in Bezug auf eine nachhaltige Entwicklung (nachhaltige Mobilität) wurde ebenfalls in der Agenda 21 erstmalig konkret benannt, nachdem in den vorangegangenen Umweltkonferenzen insbesondere die Notwendigkeit einer umweltgerechten Planung und die Vermeidung von Verschmutzung im Allgemeinen thematisiert worden waren (vgl. Prinzipien 14 und 15 der Weltumweltkonferenz von 1972).

Nachhaltige Mobilität im Verkehrssektor bezieht sich auf Verkehrssysteme und -methoden, die darauf abzielen, die Umweltbelastung zu minimieren, soziale Gerechtigkeit zu fördern und wirtschaftliche Lebensfähigkeit zu gewährleisten. Das Konzept umfasst eine Vielzahl von

Aspekten, darunter die Verringerung von Treibhausgasemissionen (THG), die Reduzierung von Luftverschmutzung, die Schaffung zugänglicher und bezahlbarer Transportmöglichkeiten für alle Bevölkerungsschichten und die Gewährleistung der langfristigen Tragfähigkeit von Verkehrssystemen.

Betrachtet man die Rio-Konferenz von 1992 als Ausgangspunkt zur Umsetzung von Maßnahmen zur Erreichung einer nachhaltigen Mobilität, so lassen sich die umfangreichen fortführenden **Bestrebungen innerhalb der Bundesrepublik Deutschland** beispielhaft wie folgt darstellen:

- 1992: Einführung der ersten Euro Norm (Euro 1) zur Reduzierung der Abgasemissionen, welche neue Grenzwerte für Schadstoffe wie Kohlenmonoxid, Stickoxide, Kohlenwasserstoffe und Partikel festlegte. (Umweltbundesamt, 2013)
- 1997: Verabschiedung des Kyoto-Protokolls als ein Schlüsselereignis in der Entwicklung nachhaltiger Mobilität, das erstmals verbindliche Zielvorgaben für die Reduzierung von Treibhausgasemissionen setzte (United Nations, 1997).
- 2002: Einführung der ersten nationalen Nachhaltigkeitsstrategie, die Ziele und Maßnahmen für eine nachhaltige Entwicklung in verschiedenen Sektoren, einschließlich dem Verkehrssektor, festlegt und alle vier Jahre fortgeschrieben wird (Bundesregierung, 2002).
- 2005: Einführung der streckenbezogenen Straßenbenutzungsgebühr für schwere Nutzfahrzeuge auf Autobahnen (Lkw-Maut) auf Grundlage des Autobahnmautgesetz für schwere Nutzfahrzeuge (ABMG), um den Güterverkehr umweltfreundlicher zu gestalten, bspw. durch die Verlagerung auf die Schiene, und die Verkehrsinfrastruktur zu finanzieren.
- 2005: Einführung der Umweltzonen zur Verbesserung der Luftqualität in Städten gemäß dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG). Die ersten Umweltzonen wurden im Jahr 2008 in Berlin, Hannover und Köln ausgewiesen. (Boltze et al., 2019, S. 219ff.; Umweltbundesamt, 2015, S. 15)
- 2015: Einführung des Elektromobilitätsgesetzes (EmoG) mit dem Ziel der Förderung der Elektromobilität durch Bevorrechtigungen für Elektrofahrzeuge, wie kostenlose Parkplätze und die Nutzung von Busspuren. (BMDV, 2024)
- 2016: Unterzeichnung des Pariser Abkommens und Einführung des nationalen Klimaschutzprogramms 2050, um langfristige Klimaziele und Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors festzulegen. (BMUB, 2016; Europäisches Parlament, 2019)
- 2018: Einführung des *Sofortprogramms Saubere Luft* zur Verbesserung der Luftqualität in Städten, einschließlich der Förderungen der Umstellung auf emissionsfreie Busse und des Ausbaus der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge (BMDV, 2023a).
- 2019: Einführung des Klimaschutzgesetzes (KSG) zur Festlegung verbindlicher Klimaziele für verschiedene Sektoren, einschließlich des Verkehrssektors. Ziel ist die Reduzierung der Treibhausgasemissionen um mindestens 55 % bis 2030 im Vergleich zu 1990.
- 2023: Aktualisierung der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) zur Förderung des Radverkehrs, bspw. durch die Einführung von Fahrradstraßen und besseren Regelungen für Radfahrende an Kreuzungen.

Wie sich anhand der beispielhaft aufgeführten Maßnahmen zeigt, erfordert die Umsetzung nachhaltiger Mobilität einen **ganzheitlichen Ansatz**, der sowohl politische, soziale als auch technologische Aspekte umfasst:

- **Politische Maßnahmen und Planung:** Städte und Länder entwickeln Verkehrspläne und -politiken, die den öffentlichen Verkehr, Radfahren und Gehen fördern und den Autoverkehr einschränken. Dies kann bspw. durch die Bereitstellung von Fahrradwegen, Fußgängerzonen, Parkraumbewirtschaftung und die Förderung von Carsharing- und Ride-Hailing-Diensten erreicht werden.
- **Technologische Innovationen:** Die Entwicklung und Förderung von sauberen und effizienten Technologien sind entscheidend. Dazu gehören Elektrofahrzeuge, Wasserstoffantriebstechnologien, verbesserte Batteriespeichersysteme und die Nutzung erneuerbarer Energien im Verkehrssektor.
- **Verhaltensänderungen:** Ein Umdenken bei Einzelpersonen und Organisationen ist notwendig, um nachhaltige Verkehrsmittel zu bevorzugen. Bildung und Bewusstseinsbildung spielen dabei eine wichtige Rolle.
- **Ökonomische Anreize und Besteuerung:** Steuerliche Anreize für saubere Fahrzeuge, Subventionen für den öffentlichen Verkehr und die Besteuerung von kohlenstoffintensiven Verkehrsmitteln sind wichtige Instrumente, um nachhaltige Mobilität zu fördern.
- **Städtebau und Raumplanung:** Die Gestaltung von Städten und Siedlungen beeinflusst das Verkehrsverhalten erheblich. Eine kompakte, multifunktionale Stadtgestaltung mit kurzen Wegen kann den Bedarf an motorisiertem Verkehr reduzieren.
- **Internationale Zusammenarbeit:** Angesichts der globalen Natur der Herausforderungen im Bereich der Nachhaltigkeit ist die internationale Zusammenarbeit für den Austausch von Best Practices, die Koordinierung von Politiken und die Förderung globaler Standards unerlässlich.

In den letzten Jahrzehnten hat sich das Konzept der nachhaltigen Mobilität stetig weiterentwickelt und ist inzwischen zu einem zentralen Aspekt in der Verkehrsplanung und -politik geworden.

2.2 Klimaziele und Herausforderungen im Verkehrssektor

2.2.1 Klimapolitische Zielsetzungen

Die Ziele der nachhaltigen Mobilität basieren maßgebend auf den **klimapolitischen Zielsetzungen**, welche auf europäischer und nationaler Ebene beschlossen werden. Dabei ist zwischen unverbindlichen politischen Zielsetzungen und rechtlich verpflichtenden Zielsetzungen zu unterscheiden. Nach dem die Bundesrepublik Deutschland bereits im Jahr 1990 eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 25 % bis 2005 gegenüber dem Jahr 1987 beschlossen hatte, wurde durch die Ratifizierung des Kyoto-Protokolls im Jahr 1997 (siehe Abschnitt 2.1.3) eine (erstmalig) verpflichtende Anpassung der Zielsetzung auf eine Reduktion der THG um 21 % bis 2012 gegenüber 1990 vorgenommen (DPG, 2005, S. 4ff.). Das Kyoto-Protokoll stellte dabei das Ergebnis der 3. Klimakonferenz (Conference of Parties, COP 3) dar.

Auf Basis der jährlich stattfindenden Klimakonferenzen wurde nach Auslaufen des Kyoto-Protokolls schließlich im Jahr 2015 auf der 21. Klimakonferenz (COP 21) das Übereinkommen von Paris verabschiedet und anstelle fester Reduktionsziele der THG die Einigung erzielt, eine Begrenzung der Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau

zu erreichen. Die Zielerreichung unterliegt dabei den Vertragsstaaten und soll durch die Aufstellung nationaler Klimaschutzbeiträge (*Nationally Determined Contributions*, NDC) sichergestellt werden. Daraufhin verpflichteten sich die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union im Rahmen ihrer NDC die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 % im Vergleich zu 1990 zu reduzieren, durch die zusätzliche Verabschiedung des *European Green Deal* soll bis 2050 die Klimaneutralität erreicht werden. (Umweltbundesamt, 2023) Deutschland hat die Vorgaben der EU über das nationale Klimaschutzgesetz (KSG) im Jahr 2019 umgesetzt und im Jahr 2021 weiter verschärft (BGBI. 2021 Teil I S. 3905), wobei die Klimaneutralität bereits bis 2045 das erklärte nationale Ziel ist.

Das KSG umfasst in seiner aktuellen Fassung in Anlage 2a zu § 5 Absatz 1 Satz 2 KSG im Weiteren (noch) Zielsetzungen bis ins Jahr 2030 für die einzelnen Sektoren (Sektorenziele). So soll der Verkehrssektor eine Jahresemissionsmenge von 85 Mio. t Kohlendioxid-Äquivalente (CO₂-Äq.) im Jahr 2030 aufweisen, während der Wert im Jahr 2022 noch 147,9 CO₂-Äq. betrug (Umweltbundesamt, 2023). Im jährlich erscheinenden Projektionsbericht des Umweltbundesamtes wird die bereits erzielte und die potenzielle Reduktion der THG je Sektor bewertet. Dabei ist für den Verkehrssektor festzuhalten, dass die forcierten Jahresemissionsmengen nicht eingehalten werden und sich dieser Sektor maßgeblich für die Zielverfehlung zu verantworten hat (Umweltbundesamt, 2024b, S. 8f.).

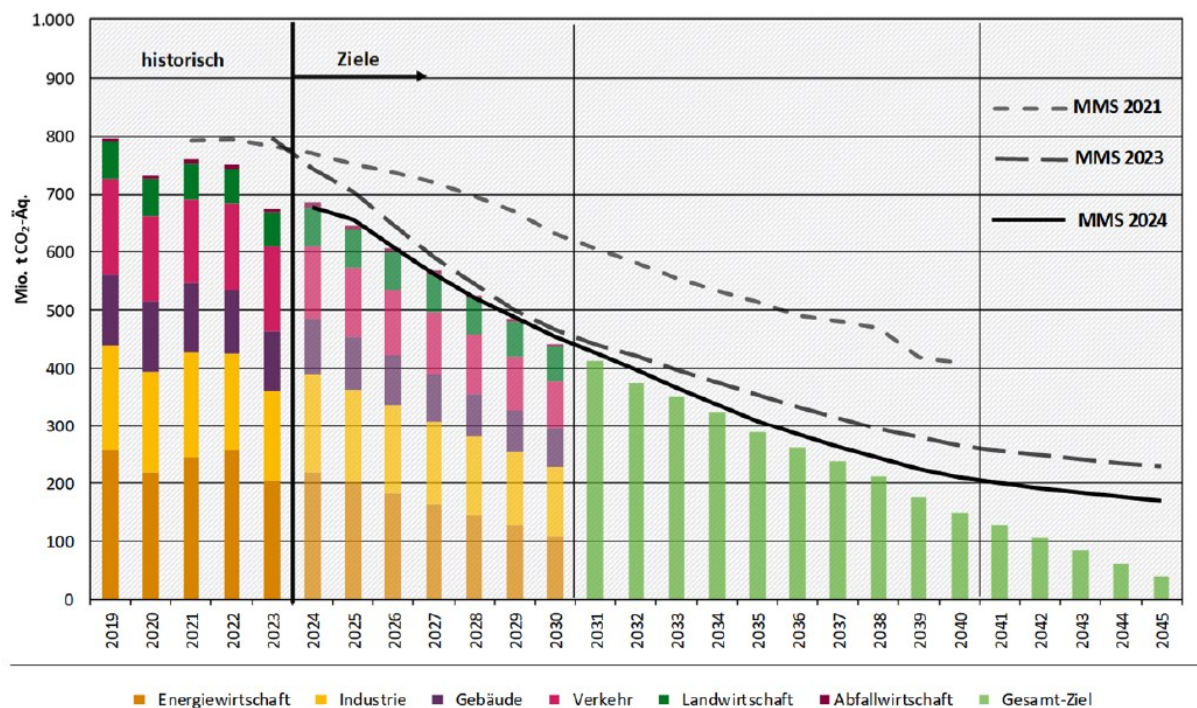


Abbildung 5: Entwicklung der THG in Deutschland je Sektor sowie ausgewiesener Zielpfad bis 2030. Abbildung aus Umweltbundesamt (2024b, S. 8f.).

Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der erzielten und gesetzten sektorenbezogenen Jahresemissionsmengen der THG in Deutschland auf. Das KSG sieht in seiner aktuellen Fassung vor, dass bei einer Überschreitung der Jahresemissionsgesamtmengen die jeweilig zur Überschreitung verantwortlichen Sektoren kompensierende Maßnahmen (Sofortprogramme) beschließen und diese schnellstmöglich umsetzen (vgl. §8 KSG). Mit der zweiten Novelle des KSG, welche sich derzeit in der Vorbereitung zum Beschluss befindet, werden hingegen die

Sektorenziele dahingehend aufgehoben, dass die Einsparungen anderer Sektoren positiv angerechnet werden können (Deutscher Bundestag, Drucksache 20/11183 vom 24.04.2024).

2.2.2 Bestehende und zukünftige Herausforderungen im Verkehrssektor

Die aufgeführten Entwicklungen und Zukunftstrends (vgl. Abschnitt 2.1) sowie die klimapolitischen Zielsetzungen (vgl. Abschnitt 2.2.1) verdeutlichen, dass der Verkehrssektor in Deutschland vor einer Vielzahl an bestehenden und zukünftigen Herausforderungen steht, die sowohl die Infrastruktur selbst als auch Umwelt, Technologie und gesellschaftliche Aspekte betreffen. Die übergeordneten Ziele des Verkehrssektors haben sich in den letzten Jahrzehnten kaum verändert, jedoch hat sich der Schwerpunkt in der planerischen Ausrichtung verschoben. Retzko und Boltze (1993, S. 20) definieren insgesamt vier **Oberziele** für die Verkehrsplanung und das Verkehrsmanagement: Schonung der natürlichen Ressourcen und Reduzierung der Umweltbelastungen, Befriedigung der Mobilitätsbedürfnisse, Erhöhung der Verkehrssicherheit und Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.

Betrachtet man die historische Entwicklung der Verkehrsplanung in Deutschland, so stellt man fest, dass sich das politische Engagement zur Umsetzung verkehrsplanerischer Maßnahmen durch die jeweils vorherrschenden Rahmenbedingungen ergab. Hierbei lässt sich folgende Einteilung vornehmen:

- **Wiederaufbau und Wirtschaftswachstum (ab 1945 bis ca. 1972):** Die Nachkriegsjahre sind in erster Linie durch den Wiederaufbau geprägt, insbesondere im Verständnis, dass ein wirtschaftliches Wachstum durch ein funktionierendes und leistungsfähiges Verkehrssystem unterstützt bzw. gar vorbereitet wird. Die Charta von Athen, die die funktionale Trennung bebauter Gebiete nach Wohnen, Arbeiten, Freizeit und Verkehrssystemen forcierte², diente dabei als Vorbild der Raumplanung. Im Sinne einer „autogerechten Stadt“ lag der Fokus der Verkehrsplanung auf der Befriedigung des Mobilitätsbedürfnisses, wobei nicht selten eine räumliche Trennung der unterschiedlichen Verkehrsarten vorgenommen wurde.
- **Gesundheit und Umweltschutz (ab ca.1972 bis ca. 1987):** Das wirtschaftliche Wachstum führte zu einem rasanten Anstieg des Autoverkehrs. So stieg in Deutschland die Anzahl an zugelassenen Pkw von ca. 600 Tsd. im Jahr 1950 auf fast 14. Mio. Fahrzeuge im Jahr 1970 an (Zahlenbilder, 2020). Dieser rasche Anstieg führte unweigerlich zu neuen Problemen im Verkehrssektor, insbesondere zu vermehrten Staus, Luftschadstoffbelastungen und Verkehrsunfällen. Im Jahr 1970 zählte Deutschland einen Höchstwert von 19.193 Getöteten im Straßenverkehr (Statistisches Bundesamt, 2024b). Auch im internationalen Kontext wurden die Nachteile diskutiert und Lösungen gesucht (vgl. (Buchanan, 1963; Dollinger, 1972; Meadows et al., 1972)). Es folgten bspw. die Einführung der ersten verpflichteten Umweltverträglichkeitsprüfungen in den USA durch den National Environmental Policy Act (NEPA) im Jahr 1969 sowie die Einführung der Anschnallpflicht in Deutschland im Jahr 1976. In den Vordergrund der Verkehrsplanung rückten nun mehr die Reduzierung der Umweltbelastungen sowie die Erhöhung der Verkehrssicherheit.

² Der internationale Kongress moderner Architektur“ (Congrès Internationaux d'Architecture Moderne, CIAM) formulierte in Athen (1933) insgesamt 95 Leitsätze in Bezug auf eine funktionale Stadtplanung. Die letzten 25 Leitsätze dienen der Zusammenfassung der Ergebnisse. Der 77. Leitsatz definiert die Funktionen einer Stadt: „The key to urbanism are to be found in the four functions: inhabiting, working, recreation (in leisure time), and circulation“ (Le Corbusier, 1973, S. 95).

-
- **Gesundheit, Umweltschutz und Klimaschutz (ab ca. 1987):** Die immer weiter zunehmenden Probleme und das steigende Bewusstsein in Bezug auf die klimatischen Veränderungen forderten, das Ziel des Umweltschutzes auch auf den Klimaschutz auszudehnen. Ausgangslage bildete der Brundtland-Bericht (WCED, 1987) aus dem Jahr 1987 (vgl. Abschnitt 2.1.3). Seither wurden die politischen Zielsetzungen sukzessive verschärft und zwingen die Verkehrsplanung, umfangreiche Maßnahmen und Strategien zur Schonung der natürlichen Ressourcen und zur Reduzierung der Umweltbelastungen umzusetzen. So wurden bspw. die kommunalen Verkehrsentwicklungspläne durch die Aspekte einer nachhaltigen Planung ergänzt.

Die nun anhaltenden Megatrends bringen neue technische Entwicklungen und Lösungsmöglichkeiten, um den Verkehrssektor nachhaltig zu gestalten. In Anbetracht der Notwendigkeit des Handelns zur Erreichung der klimapolitischen Ziele ist es unabdingbar, die Vorteile der alternativen Antriebstechnologien und die Umsetzung der Automatisierung und Digitalisierung zu evaluieren. Das Feld der bestehenden Herausforderungen im Verkehrssektor ist entsprechend größer denn je und umschließt zusammengefasst folgende Kernthemen:

- Umweltbelastungen und Klimaschutz
- Infrastrukturerhalt und -ausbau
- Verkehrssicherheit
- Elektromobilität und alternative Antriebe
- Digitalisierung und intelligente Verkehrssysteme
- Multimodale Mobilitätslösungen
- Gesellschaftlicher Wandel und demografische Entwicklungen
- Finanzierung und politische Rahmenbedingungen

Betrachtet man den Klimaschutz und somit die Reduktion der THG im Verkehrssektor als das derzeitige vordringliche Ziel, so müssen dringend Lösungen im Straßenverkehr (Personen- und Güterverkehr) ausgearbeitet und umgesetzt werden, da der Straßenverkehr über 80 % der THG im Verkehrssektor in Deutschland ausmacht (EEA, 2023; Umweltbundesamt, 2024a). Während im Personenverkehr der Elektroverkehr zunehmend an Bedeutung gewinnt, bspw. durch den Ausbau von Lademöglichkeiten und dem steigenden Angebot von Elektrofahrzeugen, fehlt es im Güterverkehr bisher an einer politischen Weichenstellung und somit an zufriedenstellenden Erfolgen.

Eine mögliche Maßnahme zur Reduktion der THG im Straßengüterverkehr stellt die Elektrifizierung durch den Aufbau von sogenannten elektrischen Straßensystemen (ERS) dar (Bateman et al., 2018). Durch die Möglichkeit des dynamischen Ladens, der Bereitstellung von Strom zum Fahren und Laden der Batterie während der Fahrt, können die Nachteile bei der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs, wie bspw. das Gewicht der Fahrzeugbatterie und die Standzeit der Nutzfahrzeuge zum Laden an einer Ladesäule, ausgeglichen werden (Wilke et al., 2024). Demgegenüber stehen die Kosten und der Aufwand zum Aufbau eines solchen Oberleitungssystems, welche auch von der Verfügbarkeit des Systems selbst abhängen.

3 Elektrische Straßensysteme

3.1 Relevante Begriffsbezeichnungen

3.1.1 Elektrische Straßensysteme

Die Elektrifizierung des Straßenverkehrs (Personen- und Güterverkehr) ist inzwischen weltweit ein relevantes Thema und in vielen Staaten wesentlicher Bestandteil zur Reduktion der klimawirksamen Treibhausgase (Environmental Protection Agency, 2016; European Union, 2017; Haghani et al., 2023). Während im Personenverkehr eine Elektrifizierung weitestgehend durch den Ausbau der Ladeinfrastruktur und durch die Subventionierung elektroangetriebener Fahrzeuge vorangetrieben wird (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2022; Wissenschaftliche Beirat, 2012), steht der Güterverkehr auf den Straßen vor größeren Herausforderungen. Hier werden für die Überwindung der Fahrstrecken erheblich größere Energiemengen benötigt, gleichzeitig sind auch größere Laderaten notwendig, um die Standzeit der Nutzfahrzeuge gering zu halten.

Die Entwicklung einsetzbarer und effizienter elektrischer Nutzfahrzeuge startete bereits Ende des 19. Jahrhunderts (Stan, 2020, S. 293ff.), jedoch konnten sich die Elektromotoren zunächst nicht durchsetzen. Erst durch das Aufkommen der Klimaproblematik und der dringenden Notwendigkeit des Handelns haben sich eine Vielzahl von Fahrzeugherstellern der Entwicklung angeschlossen, so dass inzwischen Fahrzeuge mit einer Reichweite von 300 km bis zu 600 km auf dem Markt vorzufinden sind, je nach Größe der Fahrzeugbatterie. Hierbei geht die Erhöhung der Reichweite um 100 km wegen des Batteriegewichts mit einer Reduktion der Nutzlast um etwa 800 kg einher. (MAN Deutschland, 2024) Ohne dem Ausbau der entsprechenden Ladeinfrastruktur und aufgrund der Problematik bzgl. der erforderlichen Standzeiten scheint eine vollständige Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs jedoch nicht erreichbar. Aus diesem Grund wurden alternative Lösungsansätze entwickelt, um die Fahrzeuge des Straßengüterverkehrs effizient laden zu können. Diese Lösungsansätze setzen auf eine linienförmige Ladeinfrastruktur zum dynamischen Laden während der Fahrt und werden als **elektrische Straßensysteme** (Electric Road Systems; ERS) bezeichnet. (Bateman et al., 2018)

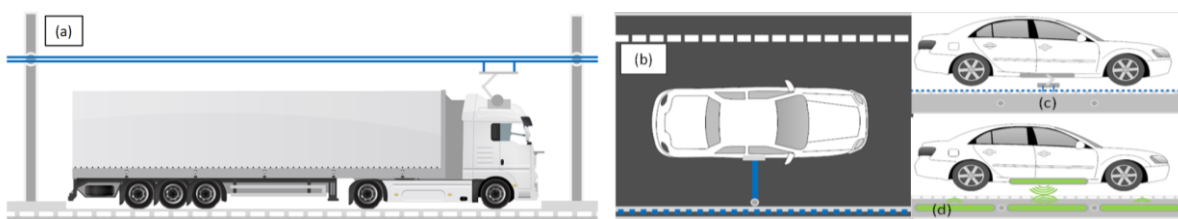


Abbildung 6: Arten von ERS: Konduktiv mit Oberleitung (a), mit Stromschiene von der Seite (b) oder in der Fahrbahn (c); Induktiv (d), Bildquelle: Bateman et al. (2018, S. 14).

Beim dynamischen Laden wird der Strom über einen Stromabnehmer am Fahrzeug während der Fahrt in das Fahrzeug geführt und dort für die Traktion sowie zum Laden der Batterie verwendet. Die vier möglichen Arten der Stromzuführung der jeweiligen ERS sind in Abbildung 6 dargestellt. (Bateman et al., 2018) Während sich die Oberleitungssysteme in erster Linie nur für größere Fahrzeugaufbauten, wie Sattelzugmaschinen, Lkws oder Busse eignen, können die anderen Systeme für alle Fahrzeugtypen angewendet werden. Alle Systeme werden international in kleineren oder größeren Projekten und Versuchsstrecken in Bezug auf die

Umsetzbarkeit im Realbetrieb analysiert; die Oberleitungstechnologie ist dabei jedoch technologisch am weitesten fortgeschritten (Widegren et al., 2022, S. 8).

3.1.2 Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Analyse der Verfügbarkeit eines Oberleitungssystems auf Autobahnen, so dass eingangs die Begrifflichkeit „Verfügbarkeit“ im Kontext dieser Arbeit zu beschreiben und zum anderen auch gegenüber dem Begriff „Zuverlässigkeit“ abzugrenzen ist.

Der Begriff der **Zuverlässigkeit** (*Reliability*) bezieht sich im Kontext technischer Systeme auf die Wahrscheinlichkeit, dass ein System oder eine Komponente des Systems unter vorgegebenen Bedingungen über einen bestimmten zukünftigen Zeitraum hinweg fehlerfrei funktioniert. Die Zuverlässigkeit lässt sich in unterschiedlichen Funktionen, der Überlebenswahrscheinlichkeit, der Ausfalldichte oder der Ausfallrate, darstellen. Da es sich bei der Angabe zur Zuverlässigkeit um eine Wahrscheinlichkeit handelt, nimmt diese letztlich Werte zwischen 0 und 1 an. (Lienig & Brümmer, 2024, S. 51ff.) Gemeinhin nimmt die Zuverlässigkeit eines technischen Systems bzw. einer Komponente über die Zeit ab. Dies drückt sich durch eine sinkende Überlebenswahrscheinlichkeit aus, welche ab einen bestimmten Zeitpunkt quasi Null wird. Über die Ausfalldichte kann hingegen erfasst werden, in welchem Zeitraum mit einem Ausfall (eher) zu rechnen ist, wobei die Ausfallrate λ , als mathematische Ableitung der Ausfalldichte nach der Zeit, die zeitliche Veränderung der Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls abbildet.



Abbildung 7: Typischer Verlauf der Ausfallrate λ über die Zeit t , Bildquelle: Lienig & Brümmer (2024, S. 55).

Die Ausfallrate verdeutlicht entsprechend die sich verändernde Fehleranfälligkeit eines Systems oder einer Komponente über den Betriebszeitraum und wird häufig in Form der sogenannten Badewannenkurve beschrieben (Roesch, 2012). So ist erwartungsgemäß nach der Inbetriebnahme eines Systems mit einer erhöhten Anzahl an Ausfällen zu rechnen, bspw. aufgrund geringer Erfahrungen bzgl. des Zusammenspiels der Komponenten oder aufgrund neuer, bisher kaum eingesetzter Komponenten. Über den Betriebszeitraum hinweg treten Störungen und Ausfälle eher zufallsbedingt auf (Bonart & Bär, 2020), d. h. in ihrer Häufigkeit seltener (Zufallsausfälle), solange, bis sich die tatsächliche Lebensdauer an die maximal mögliche Überlebensdauer annähert. In dieser letzten Phase steigt die Ausfallrate erneut an (Spätausfälle).

In diesem Zusammenhang sind zwei weitere Kenngrößen abzugrenzen, die **mittlere Lebensdauer** (*Mean time to failure*, MTTF) und der **mittlerer Ausfallabstand** (*Mean time between failures*, MTBF). Der MTTF-Wert beschreibt jenen Zeitraum, in welchem es im Mittel (über alle betrachteten Systeme oder Komponenten) zu keinem (technischen) Ausfall bzw. zu keinem Totalversagen kommt. Bei reparierbaren Komponenten und Systemen, bei welchen es

über den Lebenszeitraum hinweg zu mehr als einem Ausfall kommen kann, zieht man den MTBF-Wert als Kenngröße heran, welcher den Mittelwert (Erwartungswert) bis zum nächsten Ausfall abbildet. (Lienig & Brümmer, 2024, S. 53f.) Dabei wird die Zeitspanne zwischen den jeweiligen Ausfällen (Nettozeitabstand) betrachtet.

Die Bewertung der Zuverlässigkeit einer Oberleitungsanlage ist entsprechend schwierig, da der Betrachtungszeitraum relativ kurz ist und somit die Veränderung der Ausfallrate nur eingeschränkt beschrieben und die Überlebenswahrscheinlichkeit aufgrund der Betrachtung eines einzigen Systems nicht beschrieben werden kann. Aus diesem Grund fokussieren sich die Betrachtungen innerhalb dieser Arbeit auf die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage.

Die **Verfügbarkeit** (*Availability*) gibt den Prozentsatz eines Betrachtungszeitraumes wieder, in dem ein System bzw. eine Komponente tatsächlich verfügbar, d. h. funktionsfähig und einsatzbereit, war. Somit umfasst die Verfügbarkeit nicht nur die Zuverlässigkeit eines Systems, sondern auch die Möglichkeit der Reparatur, so dass in Bezug auf die Beschreibung der Verfügbarkeit eine zusätzliche Kenngröße, die mittlere Zeit vom Ausfall bis zur Instandsetzung (*Mean Time To Repair*, MTTR), eingeführt wurde. Der MTTR-Wert kann vereinfacht auch als **mittlere Ausfalldauer** bezeichnet werden, umfasst in jedem Fall jedoch zwei zeitliche Komponenten: die Detektion und Identifikation der Ausfallursache sowie die Behebung (Reparatur und Instandsetzung) der Ausfallursache. (Lienig & Brümmer, 2024, S. 67f.)

Wie beschrieben, lässt sich die Verfügbarkeit A abbilden, indem man die tatsächliche Betriebszeit t_O bzw. die gesamte Ausfalldauer t_F betrachtet und diese in das Verhältnis zur erwarteten Betriebszeit t_E im Betrachtungszeitraum T setzt, wie in Gleichung 1 dargestellt.

$$A_T = \frac{t_{O,T}}{t_{E,T}} = \frac{t_{E,T} - t_{F,T}}{t_{E,T}} \quad (1)$$

mit:

- A = Verfügbarkeit (*Availability*)
- t_O = Beobachtete (*Observed*) Betriebszeit
- t_E = Erwartete (*Expected*) Betriebszeit
- t_F = Gesamte Ausfalldauer (*Failure*)
- T = Betrachtungszeitraum

Gleichung 2 zeigt die Verwendung der benannten Kenngrößen zur Ermittlung der Verfügbarkeit auf:

$$A_T = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{1}{1 + \frac{MTTR}{MTBF}} \quad (2)$$

mit:

- A = Verfügbarkeit (*Availability*)
- MTBF = mittlerer Ausfallabstand
- MTTR = mittlere Ausfalldauer

Die Nutzung der Kenngrößen verdeutlicht insbesondere den Zusammenhang der mittleren Ausfalldauer und des mittleren Ausfallabstands auf die Verfügbarkeit, da letztlich das Verhältnis beider Kenngrößen maßgebend ist. Dies bedeutet, dass auch unzuverlässige Systeme mit geringen mittleren Ausfallabständen hohe Verfügbarkeiten aufweisen, sofern die mittlere

Ausfalldauer geringgehalten werden kann, bspw. durch eine schnellere Identifikation und Behebung der Ausfallursache. (Lienig & Brümmer, 2024, S. 68)

3.1.3 Maßnahme, Strategie und Szenario

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Bereitstellung von Hinweisen zum Netzausbau und zum Betrieb einer Oberleitungsanlage, um eine bestmögliche Verfügbarkeit herzustellen. Diese Hinweise umfassen ferner auch **Maßnahmen und Strategien**, welche als Störfallprogramme für bestimmte **Szenarien** zusammengefasst werden können. In Abbildung 8 ist der Zusammenhang der Begriffe zwischen einer aufgetretenen Störfallsituation, den möglichen Maßnahmen oder auch Maßnahmenbündel, welche zusammengefasst als Strategie bezeichnet werden, und dem Szenario dargestellt.

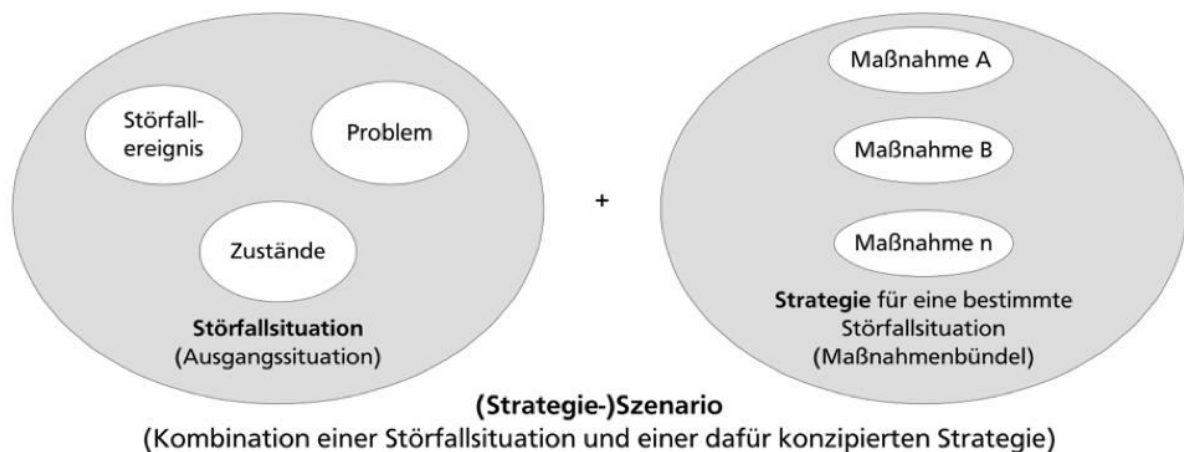


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen Störfallsituation, Strategie und Szenario (Darstellung nach Fornauf (2015, S. 13) nach ZIV (2000) und Andree et al. (2001); übernommen in: FGSV (2003)).

Störfälle treten im Betrieb einer Oberleitungsanlage vielfältig auf und werden in Abschnitt 5.5 beschrieben. Je nach Störfallsituation sind seitens des Anlagenbetreibers unterschiedliche Maßnahmen durchzuführen, um schnellstmöglich in den regulären Betrieb der Oberleitungsanlage zurückkehren zu können. Diese Maßnahmen umfassen bspw. die Einschaltung der Gefahrenabwehrbehörden und die Kontrolle der Funktionsfähigkeit der Anlage sowie die Wiedereinschaltung. Für einzelne Störfallsituationen lassen sich dazu bereits im Vorfeld des Betriebs geeignete und erforderliche Maßnahmen definieren, so dass, durch Auswahl eines (Strategie-)Szenarios, direkt nach der Identifikation der Ausfallursache die Behebung eingeleitet werden kann.

Im Weiteren wird innerhalb dieser Arbeit auch die zukünftige potenzielle Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage betrachtet (vgl. Kapitel 7.1). Auch in diesem Kontext wird die Begriffsbezeichnung Szenario verwendet, dieses Mal jedoch in Bezug auf die Methoden der qualitativen Szenarioanalyse. In diesem Zusammenhang beschreibt ein Szenario einen zukünftigen Pfad einer möglichen Entwicklung (Roos et al., 2022, S. 34ff.), wobei diese Entwicklung in Bezug auf die Verfügbarkeit bspw. Veränderungen der externen Ausfallursachen und der reaktiven Möglichkeiten des Anlagenbetreibers (Einflussparameter) umfassen. Gemäß Spaniol und Rowland (2019) sind die Merkmale eines Szenarios wie folgt definiert (Übersetzung nach (Roos et al., 2022, S. 35)):

- Ein Szenario ist zukunftsorientiert,
- hat einen externen Kontext,

- wird narrativ beschrieben,
- ist möglich und plausibel,
- existiert in einer systematisierten Gruppe und
- hat vergleichbare Unterschiede aufgrund definierter Einflussfaktoren.

Durch die Kombination unterschiedlicher Entwicklungen der verschiedenen Einflussparameter lassen sich differenzierte Szenarien in einem **Szenarien-Trichter** abbilden und die potenziellen Verfügbarkeiten bewerten. Ein solcher Szenarien-Trichter ist beispielhaft in Abbildung 9 dargestellt.

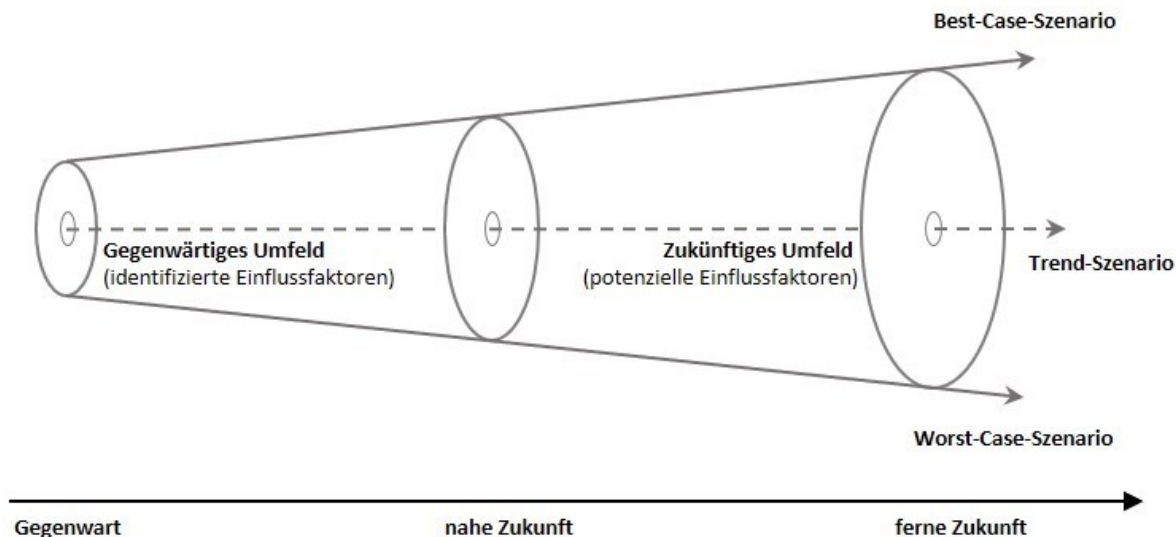


Abbildung 9: Szenario-Trichter innerhalb der Szenarioanalyse (eigene Darstellung).

Das gegenwärtige Umfeld und die ermittelte Verfügbarkeit der betrachteten Oberleitungsanlage in Abschnitt 5.3 stellt den Ausgangspunkt des Szenarien-Trichters dar. Die Kombination der positiven Veränderungen der Einflussparameter führt letztlich zum sogenannten Best-Case-Szenario, die Kombination der negativen Veränderungen zum Worst-Case-Szenario. Die in Abschnitt 7.1 ermittelte potenzielle Verfügbarkeit stellt ein Trendszenario dar.

3.1.4 Technologisches Momentum konventioneller Antriebsformen

Die Etablierung neuer bzw. alternativer Antriebsformen stellt sich als eine große Herausforderung im Verkehrssektor dar (vgl. Abschnitt 2.2.2) und kann über das Momentum der konventionellen Antriebsformen, welche ein **großes technisches System** (Large Technical Systems, LTS) bilden, erläutert werden. Das Konzept der LTS wurde erstmals in den 1980er Jahren von Hughes (1983) beschrieben. Hughes (1983) veranschaulichte die Bedeutung des komplexen Stromnetzes, indem er nicht nur Beispiele solcher Systeme und deren Entwicklungen in den USA, Großbritannien und Deutschland aufzeigte, sondern auch ihre soziale Bedeutung herausstellte. Inzwischen hat sich der Begriff LTS in der Literatur etabliert und umfasst ein komplexes sozio-technisches System, welches nicht nur aus technischen Komponenten besteht, sondern auch in hohem Maße mit der Gesellschaft verknüpft ist (Loorbach et al., 2010). Gökalp (1992) beschreibt ein LTS als „*global in structure and global in scope*“. Neben dem Stromnetz werden bspw. auch Telekommunikation, Internet, Transport- und Eisenbahnnetze sowie städtische Verkehrssysteme als LTS bezeichnet (Geels, 2007; Wilson et al., 2007; Kaijser, 2005; La Porte, 1994; Gökalp, 1992; Hughes, 1983).

Ein wichtiges Merkmal von LTS ist, dass sie, einmal etabliert, kaum durch andere Systeme ersetzt werden können. Hughes (1969) erkannte dieses Merkmal und nannte es **technologisches Momentum**. Das aktuelle Klimaproblem (vgl. Abschnitt 2.2) macht es jedoch notwendig, das etablierte LTS der konventionellen Antriebsformen zu transformieren, um ein nachhaltiges Verkehrssystem zu erhalten (EU Commission, 2020; Madurai Elavarasan et al., 2022; Onat & Kucukvar, 2022; Loorbach et al., 2010), obwohl ein LTS zunächst gegen diese Veränderungen resistent scheint (Markard, 2011; Tongur & Engwall, 2017). Im Verkehrssektor sind diese Veränderungen im Straßenverkehr vorzufinden. Während im Personenverkehr der Ausbau von Ladestationen die Elektrifizierung von Fahrzeugen ermöglicht (He & Chen, 2013; McCollum et al., 2014; Tamba et al., 2022), bedeutet der hohe Energieverbrauch schwerer Fahrzeuge, dass diese Lösung (derzeit) nicht übertragbar ist (Chen et al., 2015; Taljegarda et al., 2020; Haugen et al., 2022). Aus diesem Grund wird weltweit, aber insbesondere in Europa, der Ausbau von ERS diskutiert (Jöhrens et al., 2022b).

Mit den ersten Oberleitungsstrecken auf öffentlichen Straßen in den USA, Schweden und Deutschland (Boltze, 2020; Wang et al., 2019) konnte nicht nur aufgezeigt werden, dass die Elektrifizierung schwerer Fahrzeuge mit Hilfe von ERS zur Reduzierung der THG beitragen wird (Hanesch et al., 2022; Schöpp et al., 2021), sondern sich auch schnell erste Erfolge aufzeigen werden. Mit der erreichten technischen Machbarkeit wird nun die Akzeptanz und der politische Wille benötigt, um den Ausbau von ERS vorantreiben zu können (vergleiche das Strategische Nischenmanagement von Hoogma et al. (2002)). Hier zeigt sich das technologische Momentum des aktuellen Verkehrssystems. Während Tongur und Engwall (2017) es als ein „Henne-Ei“-Dilemma beschreiben, ist es vielmehr ein Problem **fehlender politischer Durchsetzungsfähigkeit** aufgrund unzureichender Nachweise für eine erfolgreiche Transformation des Verkehrssystems.

Es bleibt daher abzuwarten, ob die neuen ERS in der Lage sein werden, die bestehenden technischen Strukturen zu durchbrechen und sich zu einem neuen LTS zu entwickeln. Ein wichtiger Faktor ist in diesem Zusammenhang das Wissen über die Verfügbarkeit und Funktionalität einer Oberleitungsinfrastruktur, wodurch der Forschungsbeitrag dieser Arbeit offensichtlich wird (vgl. Abschnitt 1.2). Weitere Faktoren umfassen bspw. die Digitalisierung in Kombination mit autonomem Fahren (Kassens-Noor et al., 2020), die sich (weiter) ändernden Werte der Gesellschaften (Bijker, 1997) und die Ressourcenknappheit (Demirbas, 2007).

3.2 Das System eHighway

3.2.1 Beschreibung des Systems

Beim eHighway handelt es sich um ein System, welches entwickelt wurde, um den Straßengüterverkehr zu elektrifizieren, wobei der Fokus insbesondere auf dem Schwerlastverkehr liegt. Das Konzept ist vergleichbar mit einer elektrifizierten Oberleitung, wie sie bei Straßenbahnen oder Eisenbahnen verwendet wird, und ist eine Initiative zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und zur Förderung nachhaltiger Transportmethoden (BMUV, 2020; Lehmann et al., 2021, S. 24f.). Das System eHighway nutzt eine Oberleitungsinfrastruktur, an die speziell ausgerüstete Schwerlastverkehre, die sogenannten Oberleitungs-Lkw (O-Lkw), während der Fahrt anschließen können. Diese O-Lkw sind mit einem Stromabnehmer ausgestattet, der es ihnen ermöglicht, Strom von der Oberleitung zu beziehen und rein elektrisch zu fahren (siehe Abbildung 10). Zusätzlich wird die mitgeführte Batterie über den überschüssigen Strom aus der Oberleitung geladen. Wenn die O-Lkw nicht

an die Oberleitung angeschlossen sind, können diese zum einen durch Nutzung des Stroms aus der Batterie oder, sofern es sich um ein Oberleitungs-Hybrid-Lkw (OH-Lkw) handelt, auf herkömmliche Antriebsmethoden, bspw. die konventionellen Verbrennungsmotoren mit Diesel, zurückgreifen. (Lehmann et al., 2021, S. 24ff.)



Abbildung 10: OH-Lkw im Feldversuch ELISA auf der Autobahn A5, Bildquelle: Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik (2022).

Nach Lehmann et al. (2021, S. 25) lässt sich das (Gesamt-)System eHighway in sechs **Teilsysteme** untergliedern:

- Energieversorgung,
- Fahrweg,
- Fahrzeug,
- Planung und Errichtung,
- Anlagenbetrieb sowie
- Systemumgebung.

Diese Teilsysteme beschreiben dabei das System eHighway in planerischer (Planung und Errichtung), betrieblicher (Anlagenbetrieb und Systemumgebung) und technischer (Energieversorgung, Fahrweg und Fahrzeug) Hinsicht. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung der betrieblichen Aspekte. Diese Betrachtungsweise wurde erst durch die Durchführung der Feldversuche ermöglicht und wird darüber hinaus dazu beitragen, planerische Einsichten zu gewinnen. Im Folgenden werden die einzelnen Teilsysteme beschrieben und die Vorteile und Herausforderungen des Systems eHighway sowie die deutschen Feldversuche dargestellt.

Technische Aspekte zum eHighway

Aus technischer Sicht besteht der eHighway aus der Energieversorgung, dem Fahrweg und den Fahrzeugen selbst. Die **Energieversorgung** umfasst in erster Linie den Anschluss an das Mittelspannungsnetz (Netzanschluss), die Abwärtstransformation auf eine niedrigere Spannungsebene in den Unterwerken (Beispiel eines Unterwerks siehe Abbildung 11) sowie die

Bereitstellung des Stroms an die Endverbraucher (O-Lkw) mittels der Oberleitungen. Je nach Speisekonzept kommen dabei eine unterschiedliche Anzahl an Unterwerken, welche jeweils an das Mittelspannungsnetz angeschlossen werden, zum Einsatz.



Abbildung 11: Unterwerk an der Bundesautobahn A5 am Parkplatz Bornbruch (eigene Aufnahme, 2024).

In den Unterwerken wird der Strom auf die erforderliche Nennspannung DC transformiert. Bei den bisherigen Oberleitungsanlagen liegt dieser Wert zwischen 600 V und 700 V. Die Anschlussleistung je Unterwerk beträgt dabei etwa 1000 kW bis 1250 kW, der elektrische Strom, welcher durch die O-Lkws aufgenommen wird, liegt bei 250 A. Bei diesen Werten handelt es sich um die ersten Werte zur Auslegung eines solchen Systems, welche auf den ersten Erkenntnissen aus der Versuchsanlage in Groß Dölln basieren. Eine Variation der Auslegungsparameter ist möglich und wird auch fortlaufend untersucht, da die maximale Anzahl an strombeziehenden O-Lkw in einem Speiseabschnitt von der Auslegung abhängt. (Lehmann et al., 2021, S. 43ff.)

Die Masten zur Führung von Tragseil und Fahrleitung werden, sofern möglich, im Seitenraum aufgestellt und überspannen mit den jeweiligen Auslegern den rechten Fahrstreifen sowie den Seitenstreifen. Es ist zu beachten, dass der Seitenstreifen dabei nicht mit einer Oberleitung ausgestattet wird. In Abbildung 12 ist das Querprofil der Oberleitungsanlage entlang einer Autobahn in Bezug auf das erforderliche Lichtraumprofil gemäß den Vorgaben der RAA dargestellt.

Im gesamten beträgt der lichte Raum 4,70 Meter, wobei ein Zuschlag von 0,20 Meter in diesem Wert für mögliche Erneuerungsarbeiten des Straßenoberbaus eingeschlossen ist, so dass in Ausnahmefällen auch nur eine lichte Höhe von 4,50 Meter eingehalten werden muss. Insbesondere bei Brückenbauwerken oder in Tunnel spielen die Werte eine maßgebende Rolle bei der Elektrifizierung eines Streckenabschnitts. Sofern keine höhenbeschränkenden Vorgaben vorliegen, wird der Fahrdrabt auf einer Höhe von etwa 5,10 Metern geführt. (Lehmann et al., 2021, S. 43ff.)

Der **Fahrweg** umfasst alle zu berücksichtigenden technischen Aspekte, die primär der Fahrbahn zugeschrieben werden, wie bspw. Regelquerschnitte, Entwässerung, Fahrzeugrückhaltesysteme und Lärmschutzwände. So beeinflusst der vorhandene Fahrweg die Komplexität zur Errichtung

einer Oberleitungsanlage und somit auch die Kosten dieser. Die Aufstellung der Oberleitungsmasten erfordert eine Absicherung des Gefahrenpunktes durch eine passive Schutzeinrichtung, wobei für die Dimensionierung des Fahrzeugrückhaltesystems besondere Anforderungen gelten, da – aufgrund der gezielten Errichtung der Oberleitungsanlage an Streckenbereichen mit einem hoch frequentierten Anteil an Schwerverkehren – die Wahrscheinlichkeit eines Anpralls eines beladenen Lkw deutlich erhöht ist. Somit kann eine größere Aufhaltestufe als die nach den Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (FGSV, 2009) vorgegebene erforderlich sein (Rolko et al., 2021, S. 79f.).

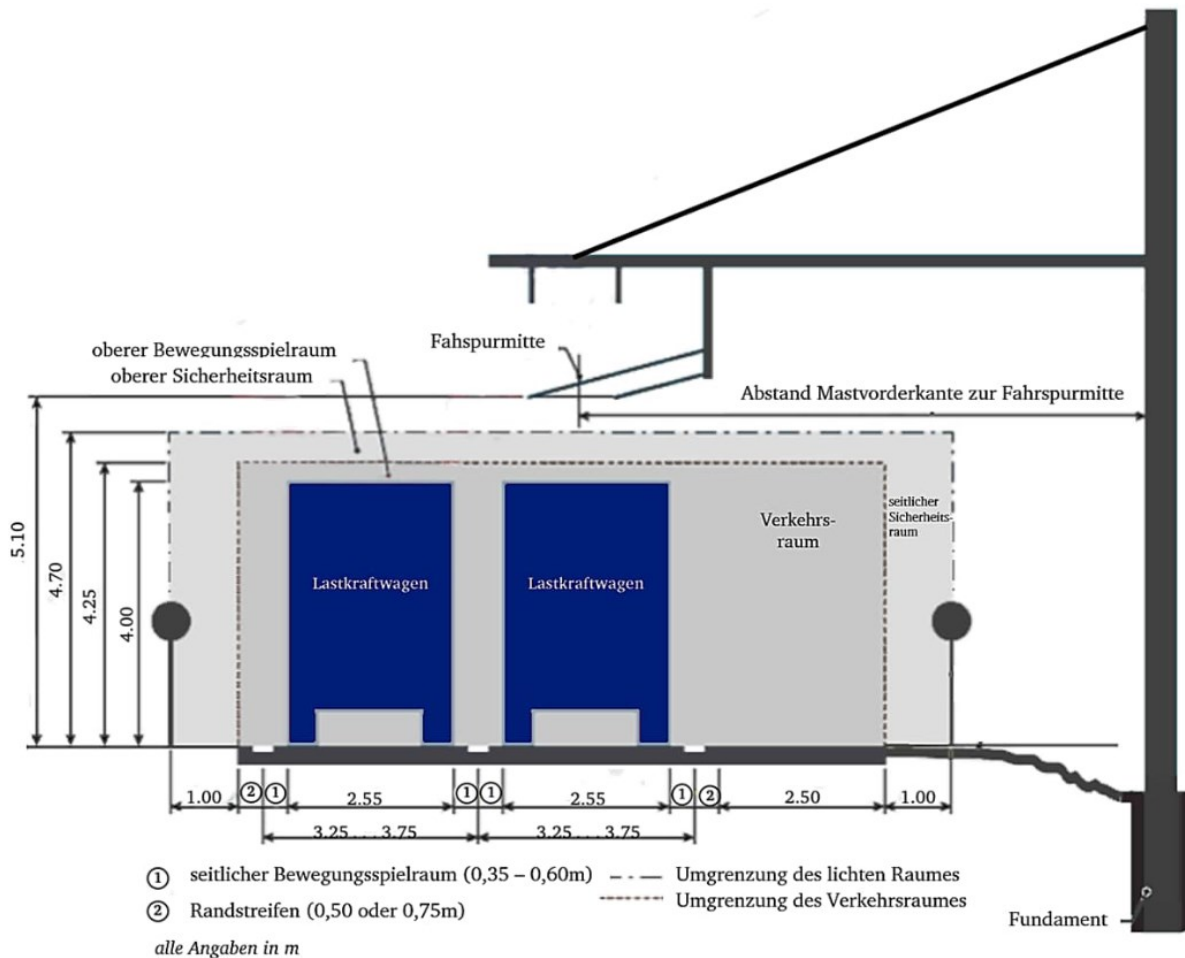


Abbildung 12: Lichtraumprofil und Querprofil einer Oberleitungsanlage. Abbildung nach Lehmann, Sommer, et al. (2021, S. 43), überarbeitet durch Wauri (2024).

Wesentliche Aspekte bei der Errichtung einer Oberleitungsinfrastruktur sind auch die vorhandenen Knotenpunkt- bzw. Anschlussbereiche, Schilderbrücken, Seitenstreifennutzungen oder die Lage der Straße. So sind bspw. in Knotenpunkt- bzw. Anschlussbereichen zusätzliche Fahrstreifen für das Einfahren und Ausfahren vorhanden, wodurch die Ausleger der Oberleitungsmasten eben diese zusätzlichen Fahrstreifen überstrecken müssen. Bei einer vorhandenen (temporären) Seitenstreifenfreigabe kommt es hingegen zu einem Widerspruch zur gewünschten Nutzung der Fahrstreifen für Schwerverkehre, so dass ggf. zusätzlich der Seitenstreifen elektrifiziert werden müsste. Schilderbrücken wirken sich zumindest in Form eines Hindernisses auf die sonst freie Führung der Oberleitung aus. Die Lage der Straße, zum Beispiel in Dammlage, in Einschnittslage oder auch als Brückenbauwerk geführt, führt zu

unterschiedlichen Anforderungen bzgl. des Aufstellens der Oberleitungsmasten. Darüber hinaus kann es insbesondere bei Raststätten erforderlich werden, dass die Oberleitungsmasten aufgrund fehlender Positionierungsmöglichkeiten neben den Seitenstreifen auf der Mittelinsel zu platzieren sind und somit die Ausleger alle regulären Fahrstreifen überspannen müssen.

Das **Fahrzeug**, welches den Strom aus der Oberleitung bezieht, muss mit einem entsprechenden Stromabnehmer, einer Batterie und einem Elektromotor ausgestattet sein. Bei den hybriden Fahrzeugen sind zusätzliche Antriebstechnologien mit den jeweiligen Energiespeichern vorzufinden. Das Ziel der Technologie ist es, dass die erforderliche Traktionsenergie vollkommen über die Oberleitung bezogen werden kann, gleichzeitig aber auch die mitgeführte Batterie geladen werden kann (Rolko et al., 2021, S. 90). Dies ist insbesondere abhängig von den topologischen Streckeneigenschaften (Gefälle oder Steigung), dem Fahrzeuggewicht und der Leistung des Elektromotors. Zusätzlich besteht bei den O-Lkw, wie bei allen elektrischen Antrieben, die Möglichkeit, dass der Elektromotor dazu genutzt werden kann, bei Bremsvorgängen oder bei Gefälleabschnitten Energie zurückzugewinnen (Rekuperation) (Rolko et al., 2021, S. 90).

Die technischen Aspekte werden durch eine Reihe an Fahrzeugassistenzsystemen erweitert. Hierzu zählt der Spurhalteassistent, welcher die Fahrt eines O-Lkw unter der Oberleitung unterstützt. Bei den Oberleitungsfahrzeugen kommt es aus Sicherheitsgründen zu einem automatisierten Abbügelvorgang, sobald das Fahrzeug sich zu weit von der Ideallinie unterhalb der Oberleitung (seitwärts) entfernt. Da der Stromabnehmer mit einer definierten Kraft (Anpressdruck) gegen den Fahrdrabt drückt, könnte sonst ein seitliches Ausscheren mit ausgefahrenem Stromabnehmer zu einer Beschädigung der Oberleitung führen. Zusätzlich sind die Fahrzeuge mit einem System ausgestattet, welches dazu dient, die Oberleitung zu detektieren, so dass der Stromabnehmer nur im elektrifizierten Abschnitt einer Autobahn manuell durch den Fahrenden ausgefahren werden kann. Ein automatisches Ausfahren ist nach aktuellem Stand noch nicht möglich. Das automatische Abbügeln des Stromabnehmers geschieht nicht nur beim (zu weiten) Ausscheren des Oberleitungsfahrzeugs, sondern auch bei der Detektion des Endes einer Oberleitungsstrecke, beim Einschalten der Blinkleuchten oder der Warnblinkanlage sowie bei Störungen in der Energieführung in der Schnittstelle zur Oberleitungsanlage (externe Störung) oder innerhalb des Fahrzeugs (interne Störung). Eine externe Störung tritt bspw. dann auf, wenn die Oberleitungsanlage stromlos geschaltet ist.

Planerische Aspekte zum eHighway

Die **Planung** und im weiteren Schritt die **Genehmigung** einer Oberleitungsstrecke entlang der Autobahnen in Deutschland wurde bereits vielfach in Bezug auf die erforderliche Gesamtstreckenlänge als auch in Bezug auf die Realisierung der deutschen Feldversuche diskutiert. Im Zuge der Konzeptionierung des Feldversuchs ELISA wurde im Vorfeld eine innovative Planungssoftware ermittelt, um die bestmögliche Lage der Oberleitungsstrecke zu identifizieren (Rolko et al., 2021, S. 101ff.). Neben den möglichen Ausbaukosten, welche aufgrund der vorhandenen Eigenschaften der Autobahn je Streckenabschnitt variieren können, wurde dabei das Ausstattungspotenzial auf Grundlage unterschiedlicher Kriterien, wie bspw. planungsrechtlichen, bautechnischen und straßenbetrieblichen Eigenschaften, untersucht. Die Planung der zu elektrifizierenden Streckenabschnitte hängt neben den Kosten und der Umsetzbarkeit auch von der vorhandenen potenziellen Nachfrage, der Nutzung durch die Transportunternehmen, ab. Dieser Aspekt wurde bereits durch mehrere Studien in Deutschland analysiert. Es zeigt sich, dass ein gesamtes Streckennetz von ca. 4.000 km innerhalb von

Deutschland ausreichend ist, um 70 % der Schwerlastverkehre eine ausreichende elektrifizierte Strecke anbieten zu können. (Hacker et al., 2020, S. 19ff.; Jöhrens et al., 2020) Eine zukunftsfähige Realisierung des Systems eHighway bedarf jedoch einer Lösung, welche über die Landesgrenzen hinweg reicht.

Betriebliche Aspekte zum eHighway

Die betrieblichen Aspekte umfassen den Anlagenbetrieb sowie die Systemumgebung. Der **Anlagenbetrieb** bezieht sich dabei auf den operativen Betrieb der Oberleitungsanlage, die Wartung und Instandhaltung sowie das Management von Störfällen und Sondersituationen, welche den operativen Betrieb beeinflussen. Der Anlagenbetrieb lässt sich dabei nur durch die Umsetzung eines realen Einsatzes des Systems eHighway evaluieren, so dass bisher nur vereinzelnde Informationen und Erkenntnisse vorhanden sind (vgl. Abschnitt 4.1.1). Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Schließung dieser Wissenslücke, indem die Betriebszeiten im Feldversuch ELISA analysiert, die Ausfallursachen identifiziert und Erkenntnisse zur Verfügbarkeit gewonnen werden (vgl. Abschnitt 4.2).

Die **Systemumgebung** beschreibt die äußeren Einflüsse, die auf das Gesamtsystem eHighway wirken. Dies umschließt bspw. den Verkehrsablauf auf der Autobahn, die Einsätze der Gefahrenabwehrbehörden, die Witterungseinflüsse und die Arbeiten entlang des elektrifizierten Abschnitts. Der Anlagenbetrieb steht dabei im direkten Zusammenhang mit den Auswirkungen der Systemumgebung, welcher innerhalb dieser Arbeit analysiert werden (vgl. Kapitel 6).

Vorteile und Herausforderungen des Systems eHighway

Das Hauptziel des eHighway-Systems ist die Verringerung der THG im Straßengüterverkehr, räumlich betrachtet insbesondere in den Bereichen mit hohem Lkw-Verkehrsaufkommen. Ein maßgebender Vorteil dieses Systems ist die direkte Versorgung eines O-Lkws mit der notwendigen Traktionsenergie während des Fahrprozesses selbst, wobei zeitgleich zusätzliche Energie in den mitgeführten Energiespeicher geleitet wird, wodurch auch nicht elektrifizierte Streckenabschnitte elektrisch befahren werden können. Die Versorgung des Straßengüterverkehrs mit Energie aus einer Oberleitung verspricht darüber hinaus weitere Vorteile (vgl. Wilke et al. (2024) sowie Mareev und Sauer (2018), Speth und Funke (2021), Schöpp et al. (2021)):

- **Keine Zeitverluste** durch Lade- bzw. Tankvorgänge
- **Geringe Größe des Energiespeichers**, insbesondere im Vergleich zu rein-batterieelektrischen Fahrzeugen und Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen
- **Hoher Anteil der lokal emissionsfreien Fahrtanteile** aufgrund erhöhter elektrischer Reichweite
- **Hoher Wirkungsgrad** und somit effizienter Ressourceneinsatz, insbesondere im Vergleich zu wasserstoffbasierten Antrieben
- **Geringer Ausstoß** klimawirksamer Gase und umweltbelastender Luftschadstoffe
- **Nutzung erneuerbarer Energien** aus lokal gewonnenen Wind- oder Solarparks

Auch wenn die Liste an Vorteilen eindrucksvoll und vielversprechend erscheint, steht das System gleichsam vor größeren Herausforderungen, welche die Umsetzung beeinträchtigen:

-
- **Hohe Infrastrukturkosten:** Der Aufbau der benötigten Oberleitungen entlang von Autobahnen und Hauptverkehrswegen erfordert erhebliche Investitionen.
 - **Eingeschränkte Flexibilität:** Lkw sind nur auf Strecken mit Oberleitungsinfrastruktur elektrisch betreibbar, was ihre Flexibilität im Vergleich zu herkömmlichen Lkw einschränkt.
 - **Implementierung:** Die Integration in bestehende Verkehrsnetze und Logistikketten stellt eine logistische Herausforderung dar.

Zusammenfassend ist der eHighway ein innovativer Ansatz, um den Straßengüterverkehr umweltfreundlicher zu gestalten. Trotz einiger Herausforderungen kann ein solches System einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor leisten.

3.2.2 Feldversuche in Deutschland

Seit der Entwicklung des eHighway-Systems wurden in Schweden (2016 bis 2018), in den Vereinigten Staaten (2018) und in Deutschland (2018 bis 2025) Pilotprojekte initiiert, um die Machbarkeit und Wirksamkeit im öffentlichen Verkehrsraum zu erproben. Während in den Vereinigten Staaten und in Schweden die hierfür realisierten Versuchsstrecken eine Länge von 1,6 km bzw. 2 km aufwiesen (Siemens Mobility, 2015, 2017), wurden in Deutschland innerhalb von drei Feldversuchen vergleichsweise längere Versuchsstrecken errichtet (Boltze, 2020; Zembrot, 2018). Hierbei weist jeder Feldversuch unterschiedliche Charakteristiken sowohl an der Versuchsstrecke selbst als auch in der Ausrichtung der Evaluation auf. Die **deutschen Pilotprojekte** umfassen „FESH“ (Feldversuch Elektrifizierter Schwerverkehr auf Autobahnen) in Schleswig-Holstein, „eWayBW“ in Baden-Württemberg und „ELISA“ (Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen) in Hessen. In Abbildung 13 ist die Lage der drei Versuchsstrecken in Deutschland dargestellt.



Abbildung 13: Lage der eHighway Teststrecken in Deutschland (Stand: 2024; Bildquelle: eHighway.SH (2024b)).

Das Ziel im **FESH-Projekt**, welches auf der Bundesautobahn A1 zwischen Reinfeld und Lübeck durchgeführt wird, umfasst die technische, ökologische, ökonomische Bewertung des Oberleitungssystems. Hierzu pendeln im Auftrag der Spedition Bode fünf OH-Lkw bis Ende 2024 über eine 5 km lange Oberleitungsstrecke je Fahrtrichtung, der Regelbetrieb wurde Anfang 2020 aufgenommen. Die Forschungsschwerpunkte umfassen u. a. das Schwingungsverhalten der Oberleitung, den Fahrdrahtanhub sowie der Verschleiß und die Entwicklung von Ausbaustrategien (eHighway.SH, 2024a; Spedition Bode, 2020).

Die insgesamt 4 km lange Teststrecke im **eWayBW-Projekt** in Baden-Württemberg wurde auf der Bundesstraße B462 nahe Rastatt umgesetzt. Dieses Projekt unterscheidet sich auch dadurch, dass neben der Betrachtung einer Bundesstraße andere Technologien (BEV und Wasserstoff) in die Evaluation eingeschlossen werden. Zusätzlich wurde beim Bau der Strecke eine umfangreiche Akzeptanzanalyse durchgeführt. (Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, 2021; Zembrot, 2018)

Das **ELISA-Projekt** auf der Autobahn A5 in Hessen, zwischen dem Frankfurter Flughafen und der Stadt Darmstadt, gilt als das erste eHighway-System auf einer öffentlichen Autobahn in Deutschland. Es legt einen besonderen Fokus auf die Umweltauswirkungen und zielt darauf ab,

Daten über die Auswirkungen des eHighway-Systems auf die Umwelt, die Lärmreduktion und die Luftqualität zu sammeln.

Diese aufgeführten Projekte sind entscheidend für die Bewertung der Umsetzbarkeit des eHighway-Konzepts in Deutschland und bieten wertvolle Einblicke in die praktische Anwendung dieser Technologie und dessen Potenzial, den Straßengüterverkehr nachhaltiger zu gestalten. Innerhalb dieser Arbeit werden die Analysen auf die Daten aus dem ELISA-Projekt gestützt, so dass der ELISA-Feldversuch in Abschnitt 3.3 näher beschrieben wird.

3.2.3 Elektrische Straßensysteme im Regelwerk des Straßen- und Verkehrswesens

Das deutsche technische Regelwerk des Straßen- und Verkehrswesens wird weitestgehend durch die Richtlinien und Hinweispapiere der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) bestimmt und in Bezug auf den ÖPNV und den Schienenverkehr durch die Schriften des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) und die Regelwerke der Deutschen Bahn AG (DB AG) vervollständigt. Die rechtlichen Regelwerke – in der jeweils aktuellen Fassung gültigen Gesetze und Verordnungen – bilden dabei jedoch den Rahmen, werden aber aufgrund fehlender fachspezifischer Tiefe nicht abschließend aufgeführt. Im internationalen Kontext wird die Thematik der ERS insbesondere durch den Welt-Straßenverband PIARC (heute: World Road Association³) aufgegriffen, welcher im Jahr 2020 die sogenannte Task Force 2.2 Electric Road Systems gründete, mit dem Ziel, den Wissensaustausch und die Erfahrungen mit den ERS zu unterstützen (PIARC, 2020, S. 79ff.).

Obwohl bereits seit 2018 die ersten Komponenten der ELISA-Teststrecke, d. h. die erste ERS im öffentlichen deutschen Straßenraum, aufgebaut wurden, zeigt eine Analyse der bestehenden Regelwerke in Deutschland, dass die Thematik des dynamischen Ladens bisher nicht beschrieben wird. Das punktuelle Laden mittels stationärer Ladesäulen wird hingegen durch die Ladesäulenverordnung (LSV) basierend auf dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) in § 49 Abs. 4 EnWG rechtlich und im Sinne der europäischen Vorgaben der Richtlinie 2014/94/EU geregelt. Die Vorgaben sind jedoch aufgrund der Begrenzung der Definition eines Ladepunktes auf „eine Einrichtung, an der gleichzeitig nur ein elektrisch betriebenes Fahrzeug aufgeladen oder entladen werden kann“ (§ 2 Abs. 2 LSV) zunächst nicht übertragbar.

3.3 Der ELISA-Feldversuch

Die Oberleitungsinfrastruktur im Rahmen des Projekts ELISA wurde entlang der Bundesautobahn A5 zwischen den Anschlussstellen AS Weiterstadt und AS Langen/ Mörfelden auf fünf Kilometer je Fahrtrichtung im Jahr 2018 errichtet und im Jahr 2022 um weitere sieben Kilometer in die südliche Fahrtrichtung verlängert. Insgesamt bestand die Oberleitungsinfrastruktur aus 223 Masten am äußeren Fahrbahnrand, sechs Masten in Mittellage und zwei Unterwerken sowie den zusätzlichen Kabeln (ELISA, 2022, S. 8), Sicherungseinrichtungen und der Fahrdrähte und wurde letztlich um 181 Maste und zwei weitere Unterwerke im Zuge der Verlängerung erweitert (Autobahn GmbH, 2023). Die Unterwerke, welche angeschlossen ans Mittelspannungsnetz beide Fahrtrichtungen mit dem entsprechenden Strom versorgen, befinden sich an der Tank- und Rastanlage Gräfenhausen West, dem Rastplatz Bornbruch, dem Rastplatz Kaiserstein sowie am Rastplatz Brühlgraben.

³ Ursprünglich: Permanent International Association of Road Congresses (PIARC).



Abbildung 14: Lage der ELISA-Teststrecke im ELISA-Projekt (Google Earth 2024, eigene Darstellung).

Nach erfolgreicher Abnahme und erster Probefahrten startete der Anlagenbetrieb am 08.05.2019. Der Betrieb der Oberleitungsinfrastruktur wurde zunächst von der örtlichen Autobahndirektion Hessen Mobil übernommen und von den Operatoren in der Leitstelle der Verkehrszentrale Hessen gesteuert. Um zu Beginn eine kontinuierliche und sichere Betriebssituation herzustellen, operierte die Oberleitungsanlage zunächst im sogenannten Einführungsbetrieb, d. h. an fünf Tagen in der Woche für acht Stunden je Tag (5/8-Betrieb). Die geplante Betriebszeit wurde auf 08:00 Uhr bis 16:00 Uhr festgelegt. Nach erfolgreichem Betriebsstart wurde die geplante Betriebszeit der Anlage zum 01.01.2020 in einen 24/7-Betrieb umgestellt. Die für die Auswertungen relevanten Daten zum Betrieb der Oberleitungsanlage werden im Unterwerk Bornbruch generiert und gesammelt und können per Fernzugriff von der Autobahn GmbH des Bundes abgerufen werden. Die Rohdaten wurden anschließend quartalsweise gebündelt und als csv-Datei für die Analysen zur Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage, als sogenannte **Anlagendaten**, bereitgestellt.

Mit dem Start des Betriebs der Oberleitungsanlage und der Erweiterung der Teststrecke wurden auch die Fahrzeuge, die O-Lkws, sukzessive an die beteiligten Transportunternehmen vergeben, so dass anfänglich fünf und nach der Erweiterung bis zu 11 O-Lkws regelmäßig auf der Teststrecke verkehren. Alle O-Lkws wurden mit einem Datenlogger ausgestattet, welcher die relevanten fahrzeugseitigen Daten (**Fahrzeugdaten**) aufzeichnet, zu Datenpaketen bündelt und per Mobilfunk an einen Dienstleister ebenfalls als csv-Datei übersendet, welcher diese dann cloudbasiert zum Abruf bereitstellt.

Die Anlagendaten und die Fahrzeugdaten stellen die **primäre Datenbezugsquelle** im ELISA-Projekt dar. Um die Abschaltungen der Oberleitungsanlage an die Transportunternehmen zu kommunizieren, wurden seitens des Betreibers der Oberleitungsanlage zusätzliche Informationen per Mail verschickt, welche weitere Informationen zu den Abschaltungen, wie bspw. die Ursache der Abschaltung und die geplante Wiedereinschaltung, umfassen und die Anlagendaten entsprechend komplettieren. Weitere **sekundäre Daten** wurden bspw. durch regelmäßige Befragungen der unterschiedlichen Akteursgruppen oder durch das Aufstellen einer mobilen Wetterstation innerhalb des Projekts erzeugt. Zusätzliche (fremde) Datenquellen

umfassen bspw. die Nutzung der Umfelddaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) oder die Daten zu den Unfällen im Bereich der ELISA-Teststrecke (vgl. Abschnitt 4.3.4).

Die Aufzeichnung der primären Daten erfolgt differenziert. Während die Fahrzeugdaten kontinuierlich nach Einschaltung des Fahrzeugs mittels eines installierten Datenloggers in einem 100 Millisekunden-Takt aufgezeichnet und gespeichert werden, liefert die Anlage bei erkanntem Strombezug eines Fahrzeugs nur alle 10 Sekunden einen Wert zur Energiebereitstellung. Die Ein- und Ausschaltung der Oberleitungsanlage wird als Ereignis erfasst, d. h. der jeweilige Schaltbefehl wird aufgezeichnet. Während es bei den Fahrzeugen anfangs zu Ausfällen und kleineren technischen Problemen des Datenloggers und somit zu Datenverlust kam, wurden die Anlagendaten bis zur Abschaltung aufgrund der Erweiterung lückenlos erfasst.

Für die Auswertung der Daten wurden im Zuge dieser Arbeit zur Verarbeitung der Rohdaten entsprechende Auswertungsskripte in den Skriptsprachen VBA⁴ und Java⁵ entwickelt und angewendet.

⁴ Visual Basic for Applications (VBA) ist eine Skriptsprache von Microsoft, die zur Automatisierung von Aufgaben in Office-Anwendungen wie Excel, Access und Word verwendet wird.

⁵ Java ist eine objektorientierte Programmiersprache, die 1995 von Sun Microsystems (heute Teil von Oracle) entwickelt wurde. Sie ist plattformunabhängig und wird häufig für die Entwicklung von Webanwendungen und mobilen Anwendungen verwendet.

4 Forschungsdesign und Auswertungsmethoden

4.1 Identifikation der Forschungsfragen

4.1.1 Bestehende Forschungslücke

Das in Abschnitt 3.2 beschriebene System eHighway zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs auf Autobahnen stellt in der aktuellen Entwicklungsstufe eine innovative Möglichkeit dar, um die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zu reduzieren. Der Erfolg dieser neuen Technologie ist jedoch an unterschiedliche Erfolgsfaktoren gekoppelt, welche im Vorfeld eines Netzausbaus dieser Technologie einer umfangreichen Analyse bedürfen.

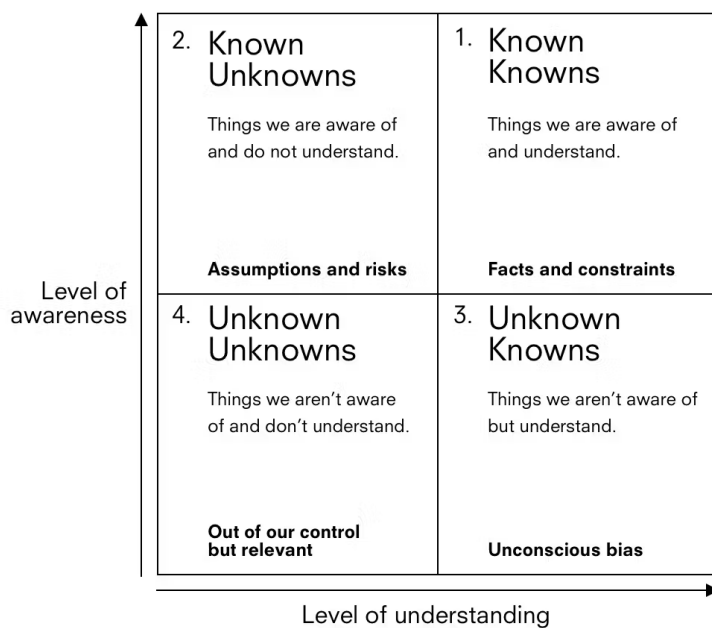


Abbildung 15: Die vier Bereiche der Known-Unknowns-Matrix (Zhang, 2024).

Eine strukturierte Darstellung der Erfolgsfaktoren, bzw. der Unsicherheiten und Risiken, ist mit Hilfe einer *Known-Unknowns*-Matrix gegeben, ein Konzept, welches von Donald Rumsfeld einst popularisiert wurde⁶. (Otto, 2023, S. 30) Dabei werden innerhalb der *Known-Unknowns*-Matrix die jeweiligen Risiken zweidimensional beschrieben, um zwischen dem Bewusstsein eines Risikos und dem Verständnis über das Risiko zu differenzieren. Die Matrix ist in Abbildung 15 dargestellt und legt folgende vier Bereiche fest:

- **Known Knowns:** Dinge, derer wir uns bewusst sind und die wir verstehen.
- **Known Unknowns:** Dinge, derer wir uns bewusst sind und die wir nicht verstehen.
- **Unknown Knowns:** Dinge, die wir verstehen würden, die uns jedoch nicht bewusst sind.
- **Unknown Unknowns:** Dinge, derer wir uns nicht bewusst sind und die wir auch nicht verstehen würden.

⁶ "We also know there are known unknowns — that is to say, we know there are some things we do not know. But there are also unknown unknowns, the ones we don't know we don't know" Donald Rumsfeld (Februar 2002).

Bei Anwendung des Konzepts auf die Oberleitungstechnologie lassen sich nicht nur die Risiken aufzeigen, sondern ferner auch der aktuelle Forschungsstand und die Forschungslücken. Dabei lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

Known Knowns

Der Bereich der *Known Knowns* (auch als „bekanntes Wissen“ bezeichnet) umfasst jene Erfolgsfaktoren, welche bereits identifiziert und ausreichend für eine Bewertung analysiert wurden. Es ist zu beachten, dass die *Known Knowns* insbesondere die erlangten Ergebnisse der durchgeführten Feldversuche (vgl. Abschnitt 3.2.2) umfassen:

- **Technologische Umsetzbarkeit:** Die Oberleitungstechnologie zur Stromversorgung von Lkws über Oberleitungen auf Autobahnen wurde in Pilotprojekten erfolgreich umgesetzt und getestet. (Jöhrens et al., 2022a)
- **Umweltvorteile:** Durch die Implementierung des Systems und der Nutzung der O-Lkws lassen sich die THG im Vergleich zu Diesel-Lkws signifikant reduzieren. (Schöpp, 2024)
- **Infrastruktur:** Die Installation von Oberleitungen entlang der Autobahnen erfordert erhebliche bauliche und finanzielle Investitionen. (Hacker et al., 2023)
- **Verkehrsablauf:** Die Oberleitungstechnologie führt zu keiner signifikanten Beeinflussung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen. (Wauri, 2024)
- **Integration in Transportprozesse:** O-Lkw lassen sich in die Logistikprozesse der Transportunternehmen einbinden. (Linke, 2024)

Known Unknowns

Im Bereich der *Known Unknowns* („bekanntes Unwissen“) finden sich jene Erfolgsfaktoren, welche bereits identifiziert wurden, jedoch bisher nicht ausreichend untersucht und demnach verstanden sind. Diese Faktoren lassen sich als bestehende und bekannte Forschungslücke bezeichnen. Die aktuellen Forschungsprojekte zum Thema der Oberleitungstechnologie dienen letztlich zur Schließung dieser Forschungslücken:

- **Kosten:** Zwar wurden die Kosten eines Netzausbaus bereits mehrfach abgeschätzt, dennoch können bisher keine verlässlichen Aussagen zu den Kosten bei einem flächendeckenden Ausbau getroffen werden. Ebenfalls unsicher sind die Finanzierungsmöglichkeiten sowie die hierfür erforderliche Betriebsstrategie.
- **Akzeptanz:** Bisherige Untersuchungen zur Akzeptanz der Technologie spiegeln das Meinungsbild diverser Akteursgruppen wider, wie bspw. der Lkw-Fahrer (Wauri, 2024), der Energieversorgungsunternehmen (Hein et al., 2023), der Transportunternehmen (Linke, 2024) oder der betroffenen Allgemeinheit (Schöpp, 2024). Große Unterschiede zur Akzeptanz der Technologie zeigen sich zwischen den Akteursgruppen auf. Bisher ist unklar, welche Faktoren die Akzeptanz beeinflussen und wie sich diese auf die Implementierung des Systems auswirkt.
- **Technische Herausforderungen:** Die technischen Herausforderungen sind bisher nicht vollständig gelöst. So gibt es bspw. noch ungeklärte Fragestellungen zu den Einschränkungen bzgl. der Ausstattung der Lkw mit der Pantographentechnologie, der Abrechnung des Energiebezugs oder der länderübergreifenden Standardisierungen.

Unknown Knowns

Innerhalb des Bereichs der *Unknown Knowns* („unbekanntes Wissen“) finden sich jene Erfolgsfaktoren, welche zwar bereits bekannt und verstanden sind, jedoch bisher nicht im

Kontext der Oberleitungstechnologie betrachtet bzw. als übertragbar identifiziert wurden. Eine abschließende Darstellung der *Unknown Knowns* ist nicht möglich. Folgende Faktoren könnten eingeschlossen sein:

- **Technische Komponenten:** Materialversagen oder technische Störungen treten häufig erst nach einer längeren Betriebszeit auf. Es ist denkbar, dass diese Störungen bereits in anderen Anwendungsbereichen bekannt sind und ggf. bereits Lösungsansätze bestehen.
- **Rechtliche Rahmenbedingungen:** Es existieren möglicherweise bereits gesetzliche Regelungen, welche bei der Implementierung der Oberleitungstechnologie zu berücksichtigen, jedoch aktuell nicht bekannt sind.
- **Unveröffentlichte Forschungsergebnisse:** Es könnten bereits Studien oder Forschungsergebnisse vorliegen, welche wichtige Informationen zur Implementierung der Oberleitungstechnologie und den Auswirkungen bereithalten, jedoch momentan nicht veröffentlicht und somit noch in den Bereich „unbekanntes Wissen“ einzuordnen sind.

Unknown Unknowns

Den letzten Bereich bilden die *Unknown Unknowns* („unbekanntes Unwissen“). Hierbei handelt es sich um Risiken, welche weder in Bezug auf die Oberleitungstechnologie identifiziert werden konnten noch deren Auswirkungen abgeschätzt werden können.

- **Zukünftige (technologische) Entwicklungen:** Zukünftige technologische Durchbrüche oder Hindernisse, die derzeit nicht vorhersehbar sind, könnten die Implementierung der Oberleitungstechnologie beeinflussen.
- **Unvorhergesehene Auswirkungen:** Wirtschaftliche, soziale oder ökologische Auswirkungen, die erst nach der Einführung der Oberleitungstechnologie auftreten können.

Die Anwendung der *Known-Unknowns*-Matrix auf die Oberleitungstechnologie verdeutlicht auf der einen Seite die Relevanz der Durchführung der Feldversuche, zum anderen werden dabei auch die Forschungslücken nachvollziehbar geöffnet und eine Sensibilisierung für die Risiken geschaffen. Während bei den *Unknown Knowns* noch ein erheblicher Forschungsbedarf vorhanden ist, dessen Aufwand nur bedingt abgeschätzt werden kann, zeigen *Known Unknowns*, dass sich insbesondere die Finanzierung der Technologie als eine besondere Hürde zur Implementierung darstellt.

4.1.2 Entwicklung der Forschungsfragen

Die vorliegende Arbeit wird einen Beitrag zur Schließung der Forschungslücken in Bezug auf die Kosten zum Netzausbau leisten, da die potenzielle Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage letztlich im direkten Zusammenhang mit dem Netzausbau steht. Geringe Verfügbarkeitswerte bedürfen der Schaffung von Redundanzen, bspw. in Form eines engmaschigen Oberleitungsnetzes oder durch den zusätzlichen Ausbau stationärer Ladeinfrastrukturen. Die abschließenden Empfehlungen dieser Arbeit adressieren den Netzausbau und den Betrieb. Für die Analyse der Verfügbarkeit sind drei grundlegende Fragestellungen relevant, welche sich an dem Prozess der Problemlösung, der Problemidentifikation, der Maßnahmenuntersuchung und der Entwicklung von Handlungsstrategien, spiegeln.

1. Forschungsfrage: Welche Faktoren limitieren die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen?

Innerhalb der **Problemidentifikation** ist zunächst zu erfassen, welche Ursachen für die Abschaltung einer Oberleitungsanlage im operativen Betrieb auftreten, die sogenannten Ausfallursachen. Nach der Identifikation der Ausfallursachen sind diese in Bezug auf die Relevanz zu bewerten, indem der Einfluss der Ausfallursache auf die Verfügbarkeit analysiert wird. Hierdurch lassen sich jene Ausfallursachen abgrenzen, welche die Verfügbarkeit signifikant limitieren (limitierende Ausfallursachen). Die Identifikation und Bewertung der limitierenden Ausfallursachen legen den Grundbaustein, um die Empfehlungen aussprechen zu können.

2. Forschungsfrage: Wie lassen sich diese Faktoren beeinflussen, um eine höhere Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage zu erreichen?

Die abschließenden Empfehlungen, welche das Ziel der Arbeit sind, sollen insbesondere Handlungsoptionen bereitstellen, um eine möglichst hohe Verfügbarkeit sicherzustellen. Infolgedessen müssen die Zusammenhänge zwischen den (limitierenden) Ausfallursachen und der Verfügbarkeit in Form von Wirkungszusammenhängen erfasst werden. Durch die Beschreibung der Wirkungszusammenhänge werden die Möglichkeiten der Beeinflussung der Ausfallursachen bzw. der Auswirkungen dieser identifiziert sowie **Maßnahmen zur Steigerung der Verfügbarkeit** entwickelt. Hierauf aufbauend lässt sich die zweite Forschungsfrage beantworten.

3. Forschungsfrage: Welche Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage kann zukünftig erreicht werden?

Sofern die Möglichkeiten der Beeinflussung der Ausfallursachen bzw. der Auswirkungen bekannt sind, sind die Grundlagen zur Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage geschaffen. Die Beantwortung der dritten Forschungsfrage umfasst die **Entwicklung von Handlungsstrategien** auf Grundlage der zuvor entwickelten Maßnahmen, um nicht nur eine hohe Verfügbarkeit sicherzustellen, sondern die bestmögliche zu erreichen. Abschließend lassen sich die Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb ableiten.

Die anhand der Forschungsfragen entwickelte Untersuchungsmethode wird in Abschnitt 4.2 dargestellt und beschrieben. In Abschnitt 8.2 werden die Forschungsfragen abschließend beantwortet und in Abschnitt 8.4 die Empfehlungen ausgesprochen.

4.2 Entwicklung des Forschungsdesigns

4.2.1 Untersuchungsschritte im Forschungsdesign

Die drei Forschungsfragen der Arbeit behandeln im Kern eine umfassende Analyse der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage. Die notwendigen Analyseschritte innerhalb der Untersuchungsmethode wurden bereits in Abschnitt 1.3 aufgezeigt. Für die Beantwortung der Forschungsfragen sind die folgenden vier Untersuchungsschritte von besonderer Bedeutung:

1. Identifikation der Einflussfaktoren (Kapitel 5)
2. Analyse der Wirkungszusammenhänge (Kapitel 6)
3. Bewertung der potenziellen Verfügbarkeit (Kapitel 7)
4. Ableitung der Empfehlungen zum Netzausbau und Betrieb (Kapitel 8)

Die aufgeführten Untersuchungsschritte bauen dabei systematisch aufeinander auf und bilden den Hauptteil **der Untersuchungsmethode**. Um die Einflussfaktoren identifizieren zu können,

wird im ersten Schritt der operative Betrieb der Oberleitungsanlage umfassend und lückenlos in einem Anlagenbetriebstagebuch erfasst, welches als Datenerhebungsinstrument die **primäre Datenquelle** der Arbeit darstellt. Dabei werden innerhalb des Anlagenbetriebstagebuchs die Betriebszeiten und somit auch die Ausfallzeiten der Oberleitungsanlage dokumentiert. Die zusätzliche Erfassung der Ausfallursachen liefert die Grundlage zur Identifikation der Einflussfaktoren. Für die Analyse und Bewertung der Wirkungen der aufgetretenen Einflussfaktoren sind weitere **sekundäre Datenquellen** erforderlich, deren Umfang jedoch erst nach abgeschlossener Auswertung des Anlagenbetriebstagebuchs dargestellt werden kann. Um die potenzielle Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage zu ermitteln, werden die erlangten Erkenntnisse bzgl. der Wirkungen der Einflussfaktoren in einem Zukunftsszenario skaliert, wobei mögliche zukünftige Maßnahmen zur Reduktion der (negativen) Wirkungen evaluiert werden. Eine Qualitätssicherung der Ergebnisse wird durch eine Validierung der Aussagen mit Hilfe einer Befragung von Experten erreicht. Abschließend werden die Empfehlungen zum Netzausbau und Betrieb einer Oberleitungsanlage ausgesprochen.

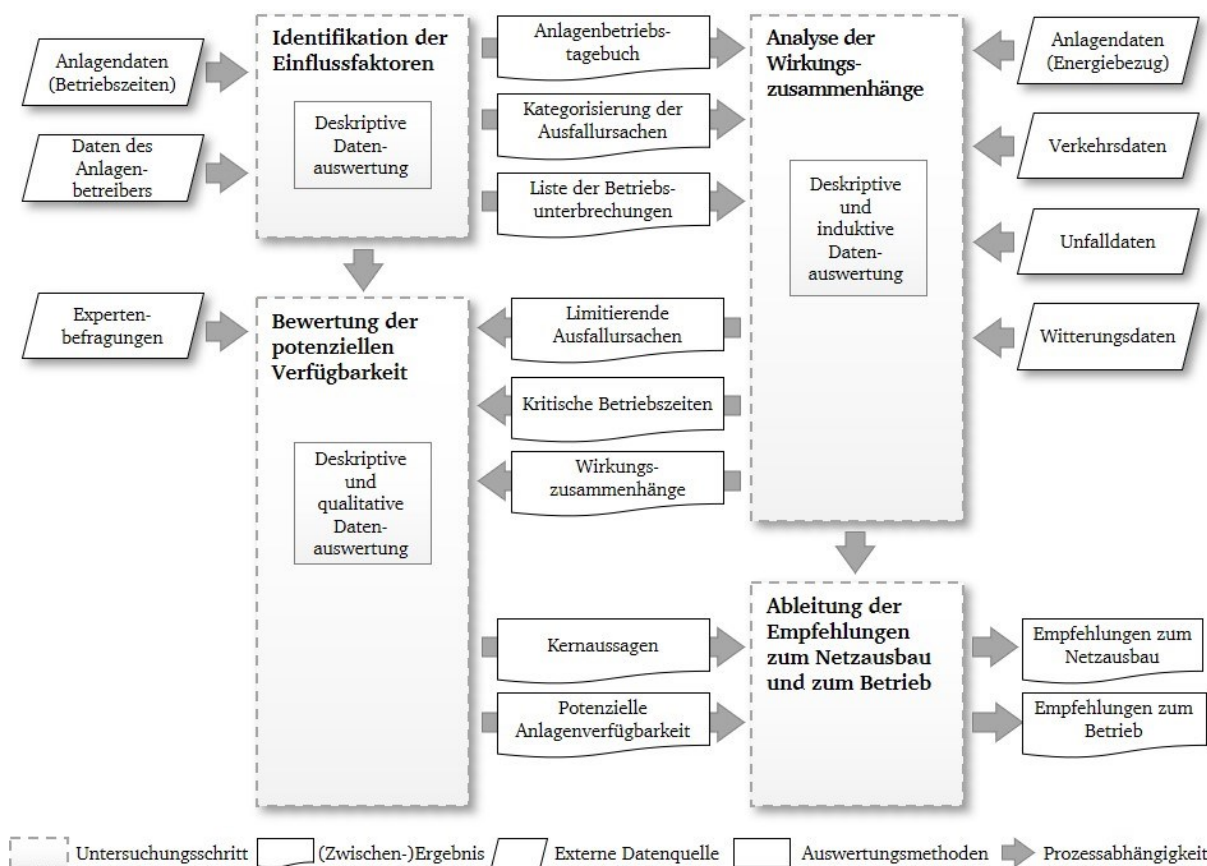


Abbildung 16: Darstellung der Untersuchungsschritte sowie der Zwischenergebnisse, Ergebnisse und externen Datenquellen im Rahmen des Forschungsdesigns (eigene Darstellung).

Das Forschungsdesign umfasst die aufgeführten vier Untersuchungsschritte, die notwendigen Datenquellen, die Auswertungsmethoden sowie die Zwischenergebnisse und Ergebnisse und ist in Abbildung 16 dargestellt. Die einzelnen Untersuchungsschritte werden in den folgenden Abschnitten erläutert, hingegen die Auswertungsmethoden, differenziert nach deskriptiven, induktiven und qualitativen Auswertungsmethoden, in Abschnitt 4.3 beschrieben werden. Die Durchführung der Untersuchungsschritte liefert folgende relevante Zwischenergebnisse:

- **Anlagenbetriebstagebuch:** Das Anlagenbetriebstagebuch stellt eine umfangreiche Dokumentation der Betriebszeiten der Oberleitungsanlage inkl. der Ausfallursachen dar und ist gleichzeitig Ausgangspunkt aller relevanten Untersuchungen. Für die Entwicklung des Anlagenbetriebstagebuchs werden die verfügbaren Daten zum operativen Betrieb aus dem Realbetrieb der ELISA-Teststrecke verwendet (siehe Abschnitt 5.2).
- **Liste der Betriebsunterbrechungen:** Neben dem Anlagenbetriebstagebuch werden die Betriebsunterbrechungen im Betrachtungszeitraum detailliert in einem umfangreichen Verzeichnis erfasst (siehe Abschnitt 5.2). Dieses Verzeichnis enthält zusätzliche Beschreibungen, um die Analysen der jeweiligen Ausfallursachen zu vervollständigen.
- **Kategorisierung der Ausfallursachen:** Für eine strukturierte Analyse der Ausfallursachen werden diese zusätzlich kategorisiert. Hierdurch lassen sich die Betriebsunterbrechungen mit ähnlichen oder gleichen Ausfallursachen gemeinsam analysieren (siehe Abschnitt 5.5).
- **Limitierende Ausfallursachen:** Um die erste Forschungsfrage zu beantworten, werden die jeweiligen Ausfallursachen vergleichend nach Eintrittshäufigkeit und Auswirkung (in Form der Ausfalldauer) bewertet, wodurch die auf die Verfügbarkeit limitierenden Ausfallursachen ermittelt werden können (siehe Abschnitt 6.1).
- **Kritische Betriebszeiten:** Um die Auswirkungen einer Betriebsunterbrechung im Weiteren in Bezug auf die sich ergebenden Einschränkungen zur Stromversorgung der Fahrzeuge bewerten zu können, werden die kritischen Betriebszeiten der Oberleitungsanlage ermittelt und dargestellt (siehe Abschnitt 6.2).
- **Wirkungszusammenhänge:** Die Beschreibung der Wirkungszusammenhänge zwischen den Betriebsunterbrechungen und den Einflussfaktoren stellt den Kern der Analysen innerhalb der Arbeit dar. Die erlangten Erkenntnisse werden als Kernaussagen zusammengefasst und fließen in die Evaluation zur potenziellen Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage ein (siehe Abschnitt 6.3).
- **Potenzielle Anlagenverfügbarkeit:** Die Ergebnisse der Analyse zu den Wirkungszusammenhängen werden verwendet, um die Verfügbarkeit bei einem Ausbau des Systems skalieren zu können. Hierbei werden die zweite und die dritte Forschungsfrage diskutiert (siehe Abschnitt 7.1). Die Ergebnisse werden durch Expertenbefragungen validiert (siehe Abschnitt 7.3).
- **Kernaussagen:** Neben der potenziellen Anlagenverfügbarkeit werden auch die Kernaussagen mit Hilfe der Expertenbefragungen validiert (siehe Abschnitt 7.3). Die Kernaussagen bilden im Weiteren die Grundlage zur Aufstellung der Empfehlungen für den Netzausbau und den Betrieb.
- **Empfehlungen:** Die Forschungsfragen werden abschließend auf Basis der Ergebnisse der Expertenbefragungen beantwortet (siehe Abschnitt 8.2) und die Empfehlungen für den Netzausbau und den Betrieb einer Oberleitungsanlage abgeleitet und strukturiert dargestellt (siehe Abschnitt 8.4).

Die Grundstruktur der Untersuchungsmethode lehnt sich dabei an die erforderlichen Schritte einer Szenarioanalyse an (vgl. Abbildung 17). Der erste Untersuchungsschritt umfasst dabei die Ermittlung der potenziellen Einflussfaktoren sowie deren Analyse und Priorisierung und der zweite Untersuchungsschritt die Festlegung der Ausprägungen, in Form von Wirkungszusammenhängen, und die Erarbeitung der Kernaussagen.

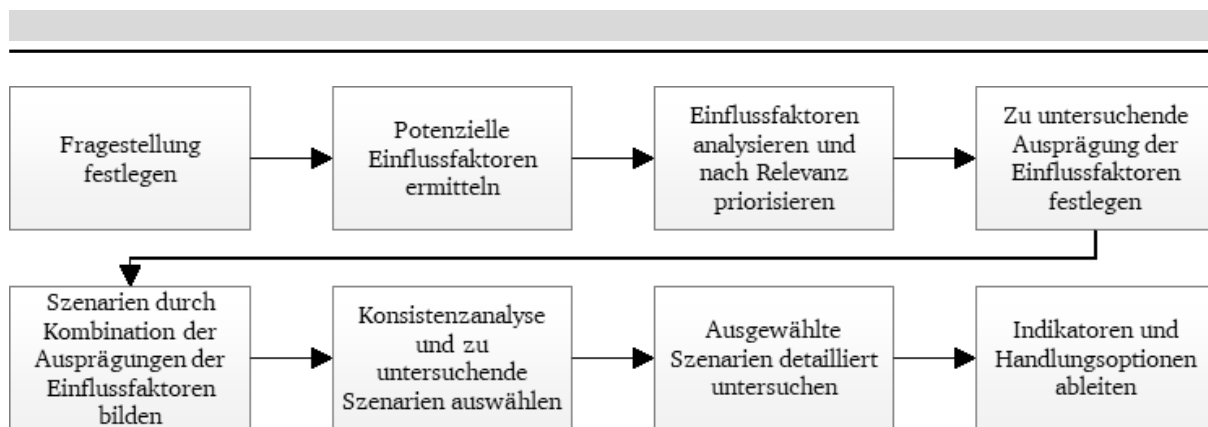


Abbildung 17: Acht Schritte der Szenarioanalyse (Skorna & Nießen, 2020, S. 45).

Die Kombination der Ausprägungen, die Durchführung der Konsistenzanalyse mittels der Experteninterviews sowie die detaillierte Untersuchung der Szenarien zur Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit stellt den dritten Untersuchungsschritt in dieser Arbeit dar. Der letzte Schritt der Arbeit umfasst die Entwicklung der Empfehlungen und spiegelt auch den letzten Schritt in der Szenarioanalyse wider.

Die aufgeführten vier Untersuchungsschritte der Arbeit werden im Folgenden detailliert in Bezug auf die Datenquellen, die Datenaufbereitung und die methodische Vorgehensweise beschrieben. Erforderliche Auswertungsmethoden werden in Abschnitt 4.3 aufgezeigt.

4.2.2 Identifikation der Einflussfaktoren

Datenquellen und Datenaufbereitung

Für die Beantwortung der Forschungsfragen müssen die auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage wirkenden Einflussfaktoren identifiziert werden. Der erste Schritt der Untersuchungsmethode sieht somit vor, dass diese Faktoren auf Grundlage des operativen Betriebs der Oberleitungsanlage identifiziert werden. Die Oberleitungsanlage im ELISA-Projekt wird operativ durch die Autobahn GmbH des Bundes betrieben. Hierzu wurde der operative Betrieb in die Verkehrszentrale Deutschland eingebunden und die Schaltung der Oberleitungsanlage in die Aufgabenbereiche der Operatoren aufgenommen (Gurske, 2022).⁷ Die Operatoren können über die eingerichtete Schnittstelle direkt auf die Oberleitungsanlage zugreifen, die relevanten Parameter überwachen, Schaltungen durchführen sowie die durch die Anlage generierten Daten abgreifen. Im Falle einer Störung oder eines Unfalls auf dem elektrifizierten Streckenabschnitt kann somit die Anlage aus der Verkehrszentrale stromlos geschaltet und geerdet werden. Bei ungeplanten Abschaltungen und insbesondere bei einem erforderlichen Eingreifen durch die Gefahrenabwehrbehörden werden sicherheitsbedingt beide Fahrtrichtungen abgeschaltet. Bei geplanten Arbeiten, bspw. bei Fahrbahnausbesserungen, besteht die Möglichkeit, dass nur eine Fahrtrichtung abgeschaltet wird (halbseitiger Anlagenbetrieb).

Alle Schaltungen sowie die Leistung der Anlage bei Energiebezug durch die Oberleitungsfahrzeuge werden erfasst und gespeichert. Ein umfassender Datenlogger ist hierzu im Unterwerk Bornbruch integriert. Dieser Datenlogger liefert die relevante Datengrundlage für

⁷ Nach Errichtung und Inbetriebnahme lag der operative Betrieb der Oberleitungsanlage bei Hessen Mobil, so dass die Anlage Teil der Verkehrszentrale Hessen (VZH) wurde. Die Anlage wurde zum Jahreswechsel 2019/2020 an die Autobahn GmbH des Bundes übergeben.

die Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit. Die generierten **Daten aus der Oberleitungsanlage** werden automatisiert und zusätzlich bei Bedarf mit Hilfe eines Fernzugriffs durch die Operatoren abgegriffen und liegen final als *.csv-Datei* vor. Für die Aufbereitung der Daten zur Nutzung innerhalb der Arbeit wurde ein mehrstufiges Verfahren auf Basis eines VBA-Codes entwickelt:

1. Stufe: Separierung der Datentabellen

In der ersten Stufe werden die übermittelten Dateien nach Art des Inhalts separiert, da der Datenlogger zwischen kontinuierlichen, automatisierten Aufzeichnungen (*Values*) und ausgelösten Aufzeichnungen (*Events*) differenziert. Die ausgelösten Aufzeichnungen umfassen bspw. die Schaltungen, welche durch die Operatoren durchgeführt werden. Demgegenüber stellt die Erfassung der Leistung der Anlage bei Energiebezug eine kontinuierliche (Erfassung des Leistungswerts alle 10 Sekunden) und automatisierte (bei Erkennung eines Strombezugs) Aufzeichnung dar.

2. Stufe: Strukturierte Prüfung auf Vollständigkeit der Datentabellen

Die zweite Stufe dient der Sicherstellung der Datengüte. In dieser Stufe wird neben der Plausibilität der Daten auch die Vollständigkeit überprüft. Für die Prüfung der Vollständigkeit werden die *Events* mit den *Values* abgeglichen und sichergestellt, dass bspw. kein Energiebezug festgestellt wird, wenn die Anlage (nach erfassten Schaltungen) ausgeschaltet sein müsste. Zusätzlich werden die Zeitstempel der Dateneinträge überprüft und die Datentabellen somit hinsichtlich Datenlücken analysiert. Für die Prüfung der Plausibilität werden die Dateneinträge selbst automatisiert betrachtet. So sollte bspw. die Leistung der Anlage zwischen einem positiven Wert und dem Wert „Null“ liegen und vor dem Befehl einer Einschaltung der Anlage auch eine Abschaltung aufgezeichnet sein. „Unplausible“ Dateneinträge treten bspw. bei Wartungsarbeiten auf, wenn das Wartungspersonal zusätzliche Schaltungen zur Überprüfung der Anlagenfunktionen vornimmt. Da diese Dateneinträge entsprechend innerhalb einer (geplanten) Abschaltung der Anlage vorzufinden sind, werden diese bei der automatisierten Auswertung nicht berücksichtigt.

3. Stufe: Automatisierte Auswertung der Datentabellen

Im letzten Schritt werden die Datentabellen strukturiert und automatisiert ausgewertet und die Ergebnisse direkt ausgegeben. Die Auswertung der *Events* liefert die exakten Ein- und Ausschaltzeiten⁸ für die Oberleitungsanlage, wobei diese für die Fahrtrichtungen getrennt ausgegeben werden. Mit Hilfe der Auswertung der *Values* werden die Energiebezüge und die Energiemengen, welche durch das Unterwerk Bornbruch detektiert und bereitgestellt wurden, ermittelt. Da durch das Unterwerk in Gräfenhausen West eine zweite Energieeinspeisung vorhanden ist, sind die ermittelten Werte zum Energiebezug und den Energiemengen nicht mit der durch die Oberleitungsfahrzeuge aufgenommenen Energiemenge gleichzusetzen.

⁸ Der Zeitstempel sowie die Ein- und Ausschaltzeiten werden im UTC (Universal Time Coordinated) Format ausgegeben.

Das mehrstufige Verfahren zur Datenaufbereitung wurde im Laufe des Projekts mehrfach angewandt und zeigte stets zuverlässige Ergebnisse auf, welche im Rahmen von geplanten Forschungsfahrten validiert wurden. Die generierten Daten zu den Ein- und Ausschaltzeiten dienen als primäre Grundlage zur **Entwicklung des Anlagenbetriebstagebuchs**.

In einem weiteren Schritt werden die Ursachen für die Abschaltungen (Ausfallursachen) ergänzt. Die Ausfallursachen werden bei einer anstehenden oder kurzfristig umgesetzten Abschaltung durch den Betreiber bekanntgegeben, es handelt sich entsprechend um **bereitgestellte Daten des Anlagenbetreibers**. Bei der Übertragung der Ausfallursachen in das Anlagenbetriebstagebuch werden die jeweiligen Ursachen kategorisiert und weitestgehend einheitliche Bezeichnungen verwendet, um die späteren Auswertungen vorzubereiten. Alle Abschaltungen werden zusätzlich strukturiert aufgelistet (**Liste der Betriebsunterbrechungen**).

Ermittlung der Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit

Die aufgetretenen Ausfallursachen stellen letztlich die Einflussfaktoren dar. Somit bedingt die Identifizierung der Einflussfaktoren die Analyse der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage bzw. der Ausfallzeit (vgl. Abschnitt 5.3) und der Ausfallursachen (vgl. Abschnitt 5.6). Für die Durchführung der Analysen sind deskriptive Auswertungsmethoden ausreichend. Folgende Informationen werden dabei gewonnen:

- **Betriebsdauer:** Die Betriebsdauer umfasst jenen Zeitraum, in dem die Oberleitungsanlage funktionsfähig operativ betrieben wurde, wobei zwischen einer erwarteten Betriebsdauer und einer beobachteten Betriebsdauer unterschieden wird.
- **Ausfallzeit:** Die Ausfallzeit stellt die Summe aller Zeiträume dar, in welcher die Oberleitungsanlage abgeschaltet wurde. Sie ergibt sich aus der Differenz der erwarteten Betriebsdauer und der beobachteten Betriebsdauer.
- **Anlagenverfügbarkeit:** Die Anlagenverfügbarkeit zeigt auf, in welchem prozentualen Verhältnis die Anlage funktionsfähig operativ betrieben wurde. Die Verfügbarkeit berechnet sich dabei aus dem Quotienten der beobachteten Betriebsdauer und der erwarteten Betriebsdauer.
- **Art und Dauer der Ausfallursachen:** Alle Betriebsunterbrechungen werden in Bezug auf die Ursache der Unterbrechung (Ausfallursache) und der Abschalt- und der Wiedereinschaltzeit der Oberleitungsanlage (Ausfalldauer) dokumentiert. Die Dokumentation ermöglicht entsprechende deskriptive Aussagen zur Eintrittshäufigkeit, zur Eintrittswahrscheinlichkeit (bezogen auf den Untersuchungszeitraum) und zur Ausfalldauer.
- **Kategorien der Ausfallursachen:** Zur strukturierten Analyse werden die Ausfallursachen kategorisiert, so dass die jeweiligen Ausfallursachen separiert und kategorial bewertet werden können.

Mit Hilfe der gesammelten Informationen lassen sich Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage erfassen, ferner bilden diese die Grundlage, um die Wirkungszusammenhänge zu untersuchen und die limitierenden Ausfallursachen zu ermitteln. Mit dem Abschluss des ersten Untersuchungsschritts werden die Grundlagen gelegt, um die Forschungsfragen entsprechend beantworten zu können.

4.2.3 Erfassung der Wirkungszusammenhänge

Datenquellen und Datenaufbereitung

Für die Erfassung der Wirkungszusammenhänge wird ein drei-stufiges Untersuchungsverfahren angewendet. Dieses umfasst im ersten Schritt die Identifikation der limitierenden Ausfallursachen, die anschließende Identifikation der kritischen Betriebszeiten und im abschließenden Schritt die Ermittlung und Bewertung der Einflüsse der Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage und somit die Darstellung der Wirkungszusammenhänge.

Im ersten Verfahrensschritt werden dabei die jeweiligen Ausfallursachen sowie die Kategorien der Ausfallursachen anhand der Häufigkeit des Auftretens und der Dauer der damit einhergehenden Abschaltung der Oberleitungsanlage vergleichend betrachtet. Hierzu werden die gesammelten Daten aus dem Anlagenbetriebstagebuch bzw. aus der Liste der Betriebsunterbrechungen verwendet. Für den Vergleich der Ausfallursachen werden die absoluten Häufigkeiten sowie die mittlere Ausfalldauer im Betrachtungszeitraum herangezogen. Anhand festgelegter (kritischer) Grenzen lassen sich die limitierenden Ausfallursachen über den Vergleich ableiten. Der erste Verfahrensschritt schließt mit einer Darstellung der relevanten Zusammenhänge, welche im dritten Verfahrensschritt vertiefend analysiert werden sollen, ab.

Der zweite Verfahrensschritt dient der Definition der kritischen Betriebszeiten. Die Grundlage der Untersuchung stellt das reale Schwerverkehrsaufkommen im Streckenbereich der ELISA-Teststrecke dar. Als externe Datenquelle werden die Daten der automatisierten Verkehrszählungen verwendet, welche durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) bereitgestellt werden. Die BASt stellt eine umfangreiche Datengrundlage des Verkehrsaufkommens auf den deutschen Autobahnen bereit (BASt, 2024), wobei zwischen den unterschiedlichen Fahrzeugklassen differenziert werden kann. Für die kritischen Betriebszeiten sind die Daten des Schwerverkehrs heranzuziehen. Die Daten lassen sich für die gewünschten Jahre als csv-Datei herunterladen und können individuell ausgewertet werden.

Im dritten Verfahrensschritt werden die Wirkungszusammenhänge zwischen den jeweiligen Ausfallursachen und der Verfügbarkeit analysiert. Hierzu werden geeignete Datenquellen identifiziert. Die jeweils erforderlichen Datenquellen werden in Kapitel 6 aufgezeigt. Die Analyse umfasst neben den Zusammenhängen auch die Auswirkungen der Abschaltungen anhand der kritischen Betriebszeiten und schließt mit der Entwicklung von Kernaussagen zu den jeweiligen Einflüssen ab.

Ermittlung der limitierenden Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit

Um die limitierenden Einflussfaktoren zu ermitteln, wird auf das Verfahren der Risikobewertung zurückgegriffen, indem, basierend auf der Eintrittshäufigkeit und der Auswirkungen (Skorna & Nießen, 2020, S. 45), eine Einschätzung des Risikos des Ausfalls der Oberleitungsanlage durchgeführt wird. Das Ergebnis wird letztlich für die einzelnen Ausfallursachen visualisiert.

In der Literatur finden sich Risikobewertungen in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen wieder. Wesentliches Ziel einer Risikobewertung ist es, einzelne Risiken zu identifizieren und die möglichen Auswirkungen abzuschätzen (Risikoeinschätzung), um im weiteren Verlauf entsprechende Strategien zur Reduktion des Schadensausmaßes oder zur Erhöhung der

Sicherheit entwickeln zu können (Risikosteuerung). (Höse & Huschens, 2022, S. 1) Hierbei ist ferner zu beachten, dass keine quantitative Modellierung der Eintrittswahrscheinlichkeit erfolgt, sondern der reale Testbetrieb der Oberleitungsanlage der ELISA-Teststrecke betrachtet und ausgewertet wird, so dass die Risikobewertung retrospektiv durchgeführt wird (Vogel, 2021, S. 11).

In der Risikoanalyse wird die Eintrittswahrscheinlichkeit in Verbindung mit dem Schadensausmaß verwendet, um eine mehrzellige oder eine stufenlose Risikomatrix (vgl. Abbildung 18) aufzustellen (Skorna & Nießen, 2020, S. 53ff.).

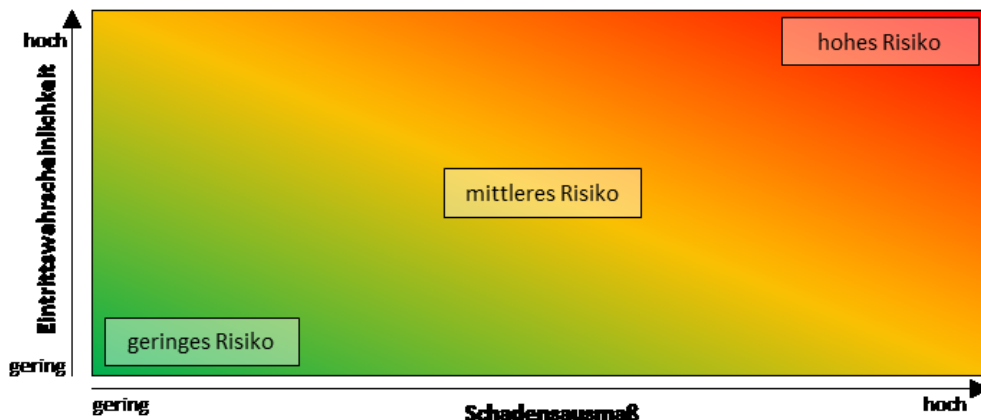


Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung einer stufenlosen Risikomatrix in Anlehnung an Skorna & Nießen (2020, S. 55).

Für die Ermittlung der Eintrittshäufigkeit einer Ausfallursache werden die jeweiligen aufgetretenen Ereignisse (Abschaltungen) summiert. Die gesamte Ausfalldauer der Ausfallursachen (Schadensausmaß bzw. Auswirkungen) wird analog ermittelt. Der Quotient aus der gesamten Ausfalldauer und der Summe der eingetretenen Ereignisse bildet die mittlere Ausfalldauer. Über die Betrachtung der Summe der eingetretenen Ereignisse und der mittleren Ausfalldauer lassen sich die jeweiligen Ausfallursachen sowie die Kategorien der Ausfallursachen in einer Risikomatrix darstellen und somit vergleichend betrachten (vgl. Abschnitt 6.1).

Durch die Definition von Schwellenwerten innerhalb der Risikomatrix lassen sich im weiteren Verlauf die limitierenden Einflussfaktoren bestimmen. Die Analysen werden sowohl für die jeweiligen Ausfallursachen als auch für die kategorisierten Ausfallursachen durchgeführt und liefern den grundlegenden Anhaltspunkt zur Betrachtung der relevanten Wirkungszusammenhänge in dieser Arbeit.

Identifikation kritischer Betriebszeiten

Ein weiträumiger Ausbau einer Oberleitungsinfrastruktur auf den Verkehrsnetzen führt zwangsweise zu Abhängigkeiten in der Verfügbarkeit und Funktionsfähigkeit des Systems, um die Energiebereitstellung sicherzustellen (vgl. Abschnitt 3.1.4). Je nach Nutzung und Stärke der Abhängigkeit erhöhen sich die negativen Auswirkungen bei Ausfall der Energieversorgung. Dieser Zusammenhang wird mit der sogenannten Kritikalität großtechnischer Systeme (Kritische Infrastrukturen) beschrieben. Das Bundesministerium des Innern fasst unter die kritischen Infrastrukturen jene Infrastrukturen, welche eine wichtige Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen aufweisen und deren Ausfall oder Beeinträchtigung zu „nachhaltig

wirkende[n] Versorgungsengpässe[n], erhebliche[n] Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere[n] dramatische[n] Folge[n]“ (BMI, 2009, S. 3) führt. Der Verlust der Gewährleistung und Sicherstellung der Energieversorgung für den Schwerverkehr auf Autobahnen wird unstreitig die benannten Folgen aufweisen können.

Der Schwerverkehr auf den Autobahnen ist jedoch in Form des Aufkommens und der Intensität nicht kontinuierlich, so dass bezogen auf den operativen Betrieb einer Oberleitungsanlage Betriebszeiten vorliegen, innerhalb welcher ein Ausfall weitaus kritischer zu betrachten ist. Diese Zeiträume werden als **kritische Betriebszeiten** bezeichnet und lassen sich aus vorliegenden Daten zum Verkehrsaufkommen ableiten. Für die Identifikation der kritischen Betriebszeiten werden zwei Datenquellen herangezogen und abschließend vergleichend betrachtet:

- Verkehrsdaten der automatisierten Zählstellen, bereitgestellt durch die BAST (vgl. Abschnitt 2.1.1)
- Zeitpunkt der detektierte Energiebezüge (Strombezugsfahrten) innerhalb der Anlagendaten des Betriebs der Oberleitungsanlage (vgl. Abschnitt 4.2.2)

Es ist dabei zu beachten, dass der Schwerverkehr in Deutschland ordnungsrechtlich durch **Fahrverbote** teilweise eingeschränkt ist. Wesentliche Maßnahme ist dabei das Sonn- und Feiertagsfahrverbot, welches seit über 50 Jahren in Kraft ist. So dürfen gemäß § 30 Abs. 3 Satz 1 Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) an Sonn- und Feiertagen im Zeitraum von 0 bis 22 Uhr Lkw über 7,5 t sowie Lkw mit Anhänger auf dem gesamten deutschen Verkehrsnetz nicht verkehren. Ausnahmen sind nach § 30 Abs. 3 Satz 2 StVO bspw. entfernungsabhängige Fahrten im Kombinierten Verkehr sowie Fahrten zur Beförderung von frischen, leichtverderblichen Lebensmitteln einschl. der damit in Zusammenhang stehenden Leerfahrten und Bergungs-, Abschlepp- und Pannenhilfsfahrzeuge. Auf der anderen Seite können lokal auf bestimmten Straßen und Streckenabschnitten Nachtfahrverbote zwischen 22 Uhr abends und 6 Uhr morgens ausgesprochen werden, welche sich auf die Fahrtrittszeit oder die Routenwahl im Straßengüterverkehr auswirken können.

Die Ermittlung der kritischen Betriebszeit basiert auf den realen Verkehrsmengen im Streckenbereich der ELISA-Teststrecke durch Nutzung der Verkehrsdaten der BAST. Da die Daten stundenscharf vorliegen, umfassen die Analysen zum einen die Betrachtung der gesamten Tage im Jahr, zum anderen die Betrachtung der einzelnen Tage selbst. Hierdurch lassen sich Tage und Zeiträume definieren, in welchen eine hohe Verkehrsstärke und somit eine hohe potenzielle Nachfrage vorliegt. Im Umkehrschluss lassen sich die Abschaltzeiten im Kontext der Betriebszeiten untersuchen.

Ermittlung und Bewertung der Einflüsse der Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit

Auf Grundlage der identifizierten und limitierenden Ausfallursachen sowie der kritischen Betriebszeiten werden die Einflüsse der Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit und somit die Wirkungszusammenhänge untersucht. Die Analyse erfolgt umfassend für einzelne Ausfallursachen und für die gebildeten Kategorien der Ausfallursachen, wobei je nach Untersuchungsschwerpunkt zusätzliche Daten, wie bspw. Witterungsdaten, analysiert werden. Die Durchführung der Analyse erfolgt in Abschnitt 6.3 und endet in der Formulierung von Kernaussagen bzgl. der identifizierten Zusammenhänge. Die Kernaussagen der Wirkungszusammenhänge bilden im Weiteren die Grundlage zur Bestimmung der potenziellen Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage sowie für die Durchführung der Expertenbefragungen.

4.2.4 Bewertung der potenziellen Verfügbarkeit

Datenquellen und Datenaufbereitung

Die Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage basiert auf den bereits gewonnenen und ausgewerteten Daten zum Anlagenbetrieb und den detektierten Wirkungszusammenhängen. Es werden keine weiteren Datenquellen verwendet.

Analyse der potenziellen Verfügbarkeit

Für die Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit wird ein zwei-stufiges Verfahren angewendet. Im ersten Schritt werden die Wirkungszusammenhänge in Bezug auf Berücksichtigung innerhalb der potenziellen Verfügbarkeit untersucht, im zweiten Schritt werden diese zur Ermittlung ausgewählt und die potenzielle Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage berechnet.

Für den ersten Schritt werden zunächst die erlangten Ergebnisse bzgl. der Ausfallursachen und der Wirkungszusammenhänge strukturiert aufgearbeitet, um ein Gesamtbild der Ursachen für die Abschaltungen zu erhalten. Hierbei ist festzuhalten, dass auch die Abschaltungen untereinander im Zusammenhang stehen. Dies ist bspw. dann der Fall, wenn im Streckenbereich ein Verkehrsunfall eintritt, welcher zur Abschaltung der Anlage führen würde, diese aber bereits aufgrund eines vorausgegangenen Ereignisses abgeschaltet ist. Weiterhin sind jene Ausfallursachen auszuschließen, welche in einem zukünftigen Betrieb nicht weiter zu erwarten sind. Die Ausfallursachen werden abschließend anhand der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens und der Wirkungen in Bezug auf die Tageszeit beschrieben.

Im zweiten Schritt wird die potenzielle Verfügbarkeit einer (zukünftig betriebenen) Oberleitungsanlage bestimmt, indem das Auftreten der jeweiligen Ausfallursachen im Betrieb der Anlage anhand des Erwartungswertes des Eintretens und der durchschnittlichen Ausfalldauer in Szenarien untersucht wird. Faktoren, welche die durchschnittliche Ausfalldauer oder den Erwartungswerts des Eintretens beeinflussen, werden dabei variiert betrachtet, wodurch eine Abschätzung der potenziellen Verfügbarkeit ermöglicht wird. Die Ergebnisse werden anschließend aufbereitet und mittels der Durchführung von Expertenbefragungen validiert.

4.2.5 Ableitung der Empfehlungen zum Netzausbau und Betrieb

Das Aussprechen der Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb der Oberleitungsanlage stellt den vierten Untersuchungsschritt dieser Arbeit dar. Als Grundlage dienen die Ergebnisse aus den vorausgegangenen Untersuchungen, welche zunächst zur Beantwortung der Forschungsfragen strukturiert zusammengefasst werden. Zur Durchführung des vierten Untersuchungsschritts sind keine weiteren externen Datenquellen einzubeziehen.

4.3 Darstellung der Auswertungsmethoden und Datenerhebung

4.3.1 Einleitung und Übersicht

Je nach Datenlage und Zielstellung einer Auswertung eignen sich unterschiedliche Auswertungsmethoden. Dabei wird zwischen quantitativen und qualitativen Methoden differenziert. Während bei den quantitativen Methoden die statistische Verteilung bestimmter Merkmalskombinationen untersucht wird, wie bspw. Mittelwerte, Standardabweichungen, fokussieren die qualitativen Methoden die Interpretation nicht numerischer Daten, wie bspw.

das Verhalten einer Person. Qualitative Methoden werden vorrangig dazu eingesetzt, um neue Thesen und Theorien zu entwickeln, während die quantitativen Methoden eingesetzt werden, um diese Thesen und Theorien mit geeigneten Kennwerten zu belegen.

Die Auswertungsmethoden sind dabei von den Erhebungsmethoden strikt zu trennen. Auch eine Erhebung von Daten kann quantitativ, bspw. mittels eines Fragenbogens, oder qualitativ, bspw. die Durchführung eines Interviews, erfolgen. Auf die Datenerhebung wird abschließend im Abschnitt 4.3.4 eingegangen.

4.3.2 Quantitative Auswertungsmethoden

Deskriptive Auswertungsmethoden

Unter die deskriptiven Auswertungsmethoden, auch als Deskriptivstatistik (beschreibende Statistik) bezeichnet, fallen jene mathematisch statistischen Verfahren, die zur Beschreibung und Zusammenfassung von Daten verwendet werden. Im Gegensatz zu den induktiven Auswertungsmethoden, auch als Inferenzstatistik (schließende Statistik) bezeichnet, welche Schlussfolgerungen über eine Grundgesamtheit liefern, dienen die deskriptiven Methoden dazu, die in einer Datenmenge enthaltenen Informationen zu beschreiben und darzustellen.

Deskriptive Auswertungsmethoden werden in vielen Bereichen und für diverse Untersuchungsziele eingesetzt. Durch die Anwendung dieser Methoden lassen sich größere Datenmengen verständlich aufbereiten und spezifische Merkmale bzw. Parameter (Eigenschaften und Trends) erfassen. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf eine Vielzahl an deskriptiven Auswertungsmethoden zurückgegriffen. Folgende Kennwerte spielen dabei eine übergeordnete Rolle:

- **Lagemaße:** Das Lagemaß, bzw. die sogenannten Lageparameter, geben eine Tendenz bzgl. des Schwerpunkts der untersuchten Daten wieder. Diese umfassen bspw. den Mittelwert einer Datenreihe oder den Median. Durch die Berechnung des Lagemaßes lassen sich unterschiedliche Stichproben vergleichend beschreiben und erste Hinweise auf einen Zusammenhang ableiten.
- **Streuungsmaße:** Mit Hilfe von Streuungsmaßen lässt sich die Abweichung der jeweiligen Werte vom Lagemaß ableiten. Typische Streuungsmaße bilden die Varianz und die Standardabweichung. Eine kleine Standardabweichung bedeutet, dass die Werte nahe am Mittelwert liegen, während eine große Standardabweichung anzeigt, dass die Werte stark um den Mittelwert verteilt sind. Liegt eine Normalverteilung der Werte vor, so spiegelt die zwei-fache Standardabweichung jenen Wertebereich wider, in welchem sich 95 % der Werte befinden.
- **Zusammenhangsmaße:** Durch die Berechnung eines Zusammenhangsparameter lässt sich, falls vorhanden, der Zusammenhang zweier Datenreihen belegen sowie die Stärke und die Richtung des Zusammenhangs beschreiben. Die wichtigsten Zusammenhangsparameter bilden der Korrelationskoeffizient nach Pearson, der Phi-Koeffizient, der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman und der Cramérs V.

Während bei den Zusammenhangsparametern stets zwei oder mehr Datenreihen miteinander verglichen werden, werden die Lagemaße und Streuungsmaße zunächst für die Beschreibung der betrachteten Daten einer Datenreihe verwendet, können aber im Weiteren vergleichend für mehrere Datenreihen herangezogen werden, bspw. durch einen tabellarischen Vergleich der Werte unterschiedlicher Datensätze oder durch einen visuellen Vergleich in einem Boxplot.

Betrachtet man jedoch nur eine Datenreihe, so kann diese bspw. auch in zeitliche Intervalle differenziert werden und die Kennwerte für eine Trendanalyse für die jeweiligen Intervalle bestimmt werden. Eine solche Trendanalyse wurde bereits in Abbildung 3 auf Seite 8 durchgeführt, um die Entwicklung des Schwerverkehrs an den Messstellen auf der Autobahn A5 beispielhaft aufzuzeigen. In diesem Fall wurden die Mittelwerte der jeweiligen Jahre aus den Datenreihen bestimmt und dargestellt. Zu den gängigsten Visualisierungsmethoden gehören Histogramme, Balkendiagramme und Kreisdiagramme.

Bei der Darstellung der Kennwerte in einem Boxplot lassen sich die relevanten Kennwerte einer Datenreihe in vergleichbarer Form visualisieren. Als Beispiel sind in Abbildung 19 die täglichen Verkehrsmengen für das gesamte Jahr 2021 in Abhängigkeit des Wochentages an einer Zählstelle im Bereich der ELISA-Teststrecke aufgezeigt.

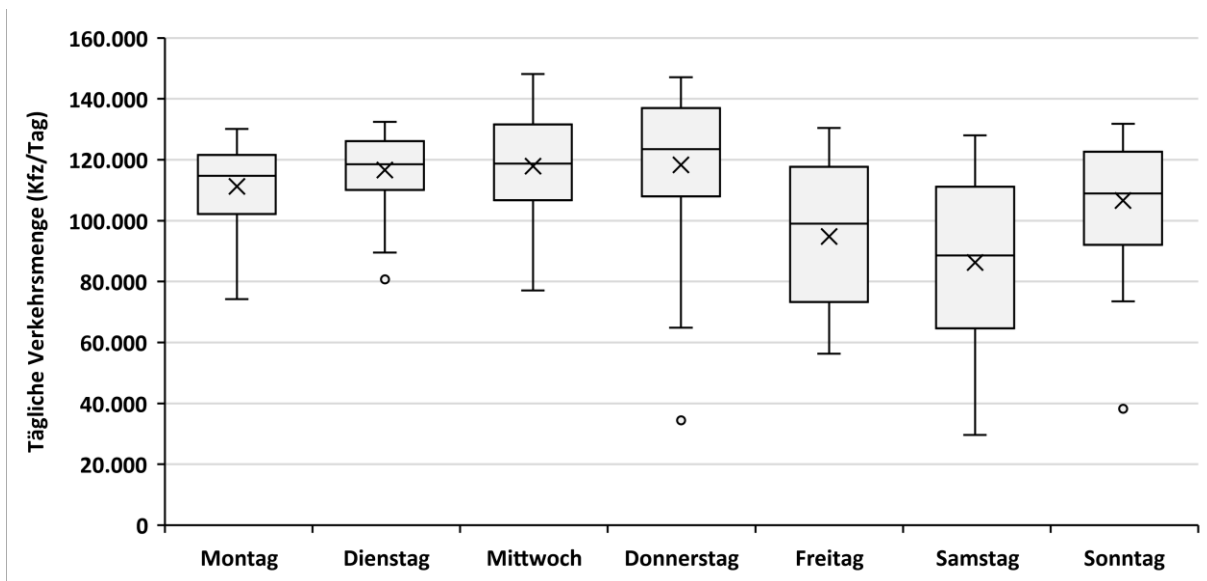


Abbildung 19: Vergleich der täglichen Verkehrsmenge an den Wochentagen auf der A5 an der Zählstelle Erzhausen (6922) für das Jahr 2021 (Daten nach BASt (2024), eigene Darstellung).

Durch die visuelle Aufbereitung der Daten zu den Verkehrsmengen lassen sich Unterschiede direkt erkennen. So weisen die Tage Dienstag bis Donnerstag die höchsten mittleren Verkehrsstärken, gekennzeichnet durch ein „X“, auf. Der Median wird als eine Linie innerhalb der Box dargestellt. Folgende Informationen lassen sich bei einem Boxplot ableiten:

- **Mittelwert:** Der Mittelwert über die Datenreihe (mit „X“ gekennzeichnet).
- **Quantile:** Die 25 %- und 75 %-Quantile bilden den unteren und oberen Rahmen der Box, so dass immer 50 % aller Werte durch die Box abgebildet werden.
- **Interquartilsabstand:** Der Interquartilsabstand (interquartile range, IQR) beschreibt die Spannweite zwischen dem 25 %- und 75 %-Quantil und legt somit die Größe der Box fest. Umso größer der IQR, desto mehr verteilt sind die Werte im Datensatz.
- **Median:** Der Median entspricht dem 50 %-Quantil. Je weiter sich der Median von an das 25 %- oder 75 %-Quantil annähert, umso schiefer sind die Werte im Datensatz verteilt.
- **Innerer Zaun:** Die abschließenden Linien werden als innerer Zaun (whiskers) bezeichnet und haben eine maximale Größe des 1,5-fachen IQR und sind gleichzeitig nicht größer als der größte (oder kleinste) beobachtete Wert.
- **Ausreißer und Extremwerte:** Ausreißer werden als Punkte außerhalb des inneren Zauns dargestellt, hingegen Extremwerte, welche außerhalb eines äußeren Zauns (3-facher IQR; nicht dargestellt) liegen, als ein kleines „x“ gekennzeichnet werden.

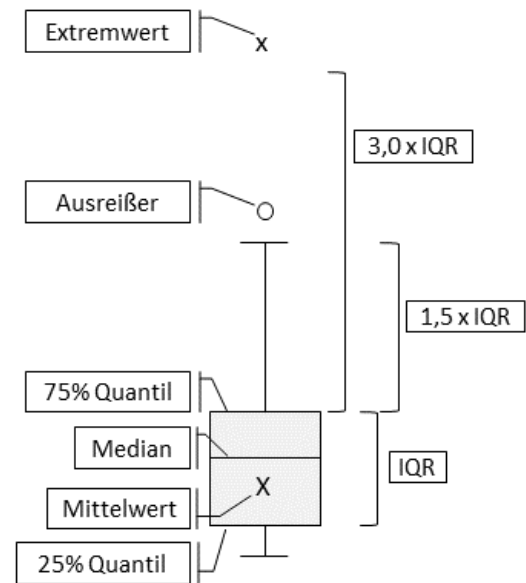


Abbildung 20: Darstellung der Informationen (Legende) eines Boxplots (eigene Darstellung).

Mit Hilfe der Kennwerte lassen sich die Datenreihen weiter beschreiben. So ist bspw. ersichtlich, dass Donnerstag und Samstag im Vergleich zu den anderen Wochentagen eine relativ große Spannweite der Werte aufweisen. Beim Donnerstag lässt sich dies bspw. mit der Häufigkeit von Feiertagen begründen, welche an einem Donnerstag stattfinden und somit zu einem differenzierten Verkehrsverhalten führen. Der aufgezeigte Ausreißer am Donnerstag mit 34.481 Kfz/Tag basiert darauf, dass der 01.01.2021 ein Donnerstag war. Gleichzeitig ist auch der 31.12.2021 ein Donnerstag gewesen und mit 64.839 Kfz/Tag der zweitkleinste Wert und gleichzeitig der Wert des unteren inneren Zauns. Der Dienstag weist den kleinsten IQR auf. Die Verkehrsmengen an einem Dienstag sind somit über das Jahr 2021 sehr konstant gewesen. Das ausgewählte Beispiel verdeutlicht die Möglichkeiten zur deskriptiven Auswertung von Datensätzen und der Nutzung relevanter Kennwerte. Liegen die Werte nicht numerisch vor, so lassen diese sich bspw. über eine Kreuztabelle deskriptiv auswerten.

Tabelle 1 zeigt beispielhaft eine Kreuztabelle für eine deskriptive Auswertung der polizeilich erfassten Verkehrsunfälle in Deutschland für das Jahr 2023 (Statistisches Bundesamt, 2024a). In diesem Beispiel werden die Variablen (Merkmale) Unfallkategorie und Ortslage gegenübergestellt, wobei bei der Unfallkategorie zwischen Unfällen mit Personenschaden, schwerwiegenden Unfällen mit Sachschaden, Unfällen unter dem Einfluss berauschender Mittel und übrigen Sachschadensunfällen unterschieden wird (Merkmalsausprägungen). Bei der Ortslage wird zwischen innerorts, außerorts (ohne Autobahnen) und auf Autobahnen differenziert.

Tabelle 1: Kreuztabelle zur beispielhaften deskriptiven Auswertung der Verkehrsunfälle in Deutschland im Jahr 2023 (Daten nach Statistisches Bundesamt (2024a), eigene Darstellung).

		Unfälle mit Personen- schaden	Schwerw. Unfälle mit Sachschaden	Unfälle unter dem Einfluss berausch. Mittel	Übrige Sachschadens- unfälle	Gesamt
innerorts	Beobachtet	203.260	37.318	12.462	1.590.802	1.843.842
	Erwartet	213.611	47.642	11.462	1.571.127	
außerorts (o. Autobahnen)	Beobachtet	69.544	17.077	2.199	421.169	509.989
	Erwartet	59.083	13.177	3.170	434.559	
auf Auto- bahnen	Beobachtet	19.086	10.705	1.001	134.902	165.694
	Erwartet	19.196	4.281	1.030	141.187	
Gesamt	Anzahl	291.890	65.100	15.662	2.146.873	2.519.525

Die beobachteten Werte innerhalb der Kreuztabelle stellen die tatsächlich erfassten und gemeldeten Zahlen der Verkehrsunfälle dar. So geschahen im Jahr 2023 die meisten Verkehrsunfälle auf Straßen in innerörtlicher Lage (73,2 %). Die hohe Anzahl an innerörtlichen Verkehrsunfällen führt weiterhin dazu, dass auch die absolute Anzahl an Unfällen mit Personenschaden (203 Tsd. Verkehrsunfälle) sowie die Werte der anderen Unfallkategorien vergleichsweise hoch sind. Um einen Vergleich zwischen den Merkmalen herstellen zu können, werden die sogenannten erwarteten Werte innerhalb einer Kreuztabelle dargestellt.

Die erwarteten Werte e ergeben sich dabei aus der Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der beobachteten Werte o , indem bspw. die gesamte Anzahl an innerörtlichen Verkehrsunfällen ($n = 1.843.842$) auf die Merkmalsausprägungen der Unfallkategorien aufgeteilt wird. Die Verteilung erfolgt dabei gleichmäßig über die gesamte Anzahl der jeweiligen Unfallkategorie, und errechnet sich bspw. für die innerörtlichen Unfälle mit Personenschaden mit Gleichung 3 zu:

$$e_{innerorts,U.m.PS} = \frac{o_{innerorts,Ges.}}{o_{Ges.}} * o_{Ges.,U.m.PS} = \frac{1.843.842}{2.519.525} * 291.890 = 213.611 \quad (3)$$

mit:

- o_{ij} = Beobachtete Anzahl
- e_{ij} = Erwartete Anzahl
- i = Ortslage
- j = Unfallkategorie

Durch den Vergleich der beobachteten und erwarteten Werte können nun Rückschlüsse auf die Zusammenhänge geschlossen werden. So liegt bspw. der beobachtete Wert für die Unfälle mit Personenschaden außerorts (ohne Autobahnen) deutlich über dem erwarteten Wert, so dass letztlich ausgesagt werden kann, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Unfall mit Personenschaden in der entsprechenden Ortslage höher gegenüber in anderen Ortslagen ist. Dieser Zusammenhang lässt sich bspw. mit den höheren Geschwindigkeiten bei gleichzeitig vorhandenem Konfliktpotenzial mit dem Fuß- und Radverkehr begründen. Demgegenüber kommt es auf Autobahnen vergleichsweise häufig zu schwerwiegenden Unfällen mit Sachschaden, bedingt durch die sehr hohen Geschwindigkeiten. Auf die Anwendung von

Kreuztabellen wird innerhalb dieser Arbeit mehrfach zurückgegriffen. Diese dienen im Weiteren auch als Grundlage zur Anwendung des Chi²-Tests (induktive Auswertungsmethode).

Deskriptive Auswertungsmethoden sind grundlegende Verfahren der Statistik, die in einer Vielzahl von Disziplinen angewendet werden und es ermöglichen, komplexe Datenmengen zu verstehen und zu interpretieren, indem diese die Datenreihen auf eine einfache und verständliche Weise zusammenfassen und darstellen. Demgegenüber stehen die induktiven Auswertungsmethoden, welche im Folgenden beschrieben werden.

Induktive Auswertungsmethoden

Induktive Auswertungsmethoden, auch als inferenzielle oder schließende Statistik bezeichnet, sind statistische Verfahren, die genutzt werden, um Schlussfolgerungen über eine Grundgesamtheit auf Basis einer Stichprobe zu ziehen. Diese zielen entsprechend darauf ab, Hypothesen zu testen, Aussagen zu Signifikanzen und Prognosen zu treffen. Während die deskriptiven Auswertungsmethoden dazu verwendet werden, um die Unterschiede (bzw. Abhängigkeiten) zwischen zwei oder mehreren Datenreihen aufzuzeigen, lassen sich mit den induktiven Auswertungsmethoden diese Unterschiede statistisch (mit einer festgelegten Unsicherheit) nachweisen. Dieser Nachweis wird als Signifikanz ausgedrückt, welche üblicherweise als p-Wert (p = probability; Wahrscheinlichkeit) ausgegeben wird. Im Allgemeinen werden für die Signifikanz folgende Stufen verwendet:

- $p \geq 0,050$: nicht signifikant
- $p < 0,050$: signifikant (*), mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $< 5 \%$
- $p < 0,010$: hoch signifikant (**), mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $< 1 \%$
- $p < 0,001$: höchst signifikant (***), mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $< 1 \%$

Zur Ermittlung der Wirkungszusammenhänge zwischen den Einflüssen und der Verfügbarkeit in Abschnitt 6.3 werden induktive Auswertungsmethoden herangezogen. Je nach Datenlage (kategorial oder numerisch) können dabei unterschiedliche Verfahren angewendet werden.

Liegen die Datenreihen, welche auf einen Zusammenhang bzw. eine Abhängigkeit hin untersucht werden sollen, kategorisiert vor (Nominaldaten), so kann auf den sogenannten **Chi²-Test** oder den **Exakte Fisher-Test** zurückgegriffen werden. Bei beiden Verfahren handelt es sich um Prüfverfahren, um zwei Datenreihen auf eine stochastische Unabhängigkeit zu prüfen. Dabei bauen beide Prüfverfahren auf der Bildung der Kreuztabellen auf, jedoch lässt sich der Exakte Fisher-Test nur auf eine 2x2-Matrix anwenden. Größere Matrizen benötigen stets die Anwendung des Chi²-Tests.

Beim Chi²-Test wird ein sogenannter Prüfwert (X^2 oder Chi² abgekürzt) mit Hilfe der beobachteten und erwarteten Werte einer Kreuztabelle errechnet (vgl. Gleichung 4).

$$X^2 = \sum_n \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} \quad (4)$$

mit:

- X^2 = Prüfwert
- n = Anzahl Zellen der Kreuztabelle
- o = Beobachtete Anzahl
- e = Erwartete Anzahl
- i = i-te Zelle

Zusätzlich zum Prüfwert bedarf es der Bestimmung des Freiheitsgrades (df) der Kreuztabelle nach Gleichung 5. Dabei gibt der Freiheitsgrad an, wie groß und somit wie umfangreich die Matrix ist. Für eine 2x2-Matrix ergibt sich ein Freiheitsgrad $df = 1$.

$$df = (r - 1) * (c - 1) \quad (5)$$

mit: df = Freiheitsgrad (degree of freedom) der Kreuztabelle
 r = Anzahl Reihen (rows) der Kreuztabelle
 c = Anzahl Spalten (columns) der Kreuztabelle

Auf Grundlage des Freiheitsgrades und dem Prüfwert lässt sich der p-Wert bestimmen, wobei dieser auf Basis empirischer Voruntersuchungen beruht und bspw. aus bestehenden Chi²-Tabellen abgelesen werden kann. Es ist unabdingbar, dass das Ergebnis visuell über die Kreuztabelle nachvollzogen wird, da der p-Wert zwar eine Aussage zur Signifikanz der Unabhängigkeit der Datenreihen liefern kann, jedoch keine Richtung des Zusammenhangs beschreiben kann.

Liegen die Werte der Datenreihen sowohl metrisch als auch kategorial vor, so kann der nicht parametrische **Mann-Whitney-U-Test** angewendet werden. Dieser basiert auf einer Abschätzung der Unabhängigkeit zweier Datenreihen durch eine Rangsumme. Nimmt man das Beispiel nach Tabelle 10, lassen sich bspw. die einzelnen Werte der Quartale im Gesamten betrachten, indem diese nach der Größe sortiert und absteigend die Ränge verteilt werden. Die höchste Verkehrsmenge wurde dabei am 01.04.2021 mit 148.195 Kfz/Tag festgestellt und wird mit der Rangnummer 1 beschrieben, es folgt der 29.10.2021 mit 147.136 Kfz/Tag (Rangnummer 2) und der 01.10.2021 mit 146.123 Kfz/Tag (Rangnummer 3). Schlusslicht bildet der 07.02.2021 (Samstag) mit 29.684 Kfz/Tag (Rangnummer 365).

Es ist dabei zu beachten, dass mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests nur zwei Datenreihen untersucht werden können, und anstelle der Quartale die Werte in Semestern zu rechnen sind. In der Weiterführung der Anwendung des Tests werden die Randsummen R je Semester gebildet und nach Gleichung 6 und Gleichung 7 der sogenannte U-Wert je Datenreihe ermittelt.

$$U_1 = n_1 * n_2 + \frac{n_1 * (n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (6)$$

$$U_2 = n_1 * n_2 + \frac{n_2 * (n_2 + 1)}{2} - R_2 \quad (7)$$

mit: U_1 = U-Wert der ersten Datenreihe
 U_2 = U-Wert der zweiten Datenreihe
 n_1 = Anzahl der Beobachtungen in Gruppe 1
 n_2 = Anzahl der Beobachtungen in Gruppe 2
 R_1 = Summe der Ränge der Beobachtungen in Gruppe 1
 R_2 = Summe der Ränge der Beobachtungen in Gruppe 2

Basierend auf dem kleinsten U-Wert und des Stichprobenumfangs kann, vergleichbar zum Prüfwert, anhand vorberechneter Tabellen der p-Wert und somit die Signifikanz bestimmt werden.

Beim Vorliegen der Datenreihen mit jeweils metrischen Werten (Nominaldaten), kann der sogenannte **t-Test** verwendet werden, welcher jedoch eine Normalverteilung der Werte voraussetzt und aufgrund der Merkmale der vorhandenen Daten innerhalb dieser Arbeit nicht angewendet wird.

Induktive Auswertungsmethoden ermöglichen, fundierte Schlussfolgerungen über eine Grundgesamtheit auf Basis von Stichprobendaten zu ziehen, Hypothesen zu testen und Vorhersagen zu treffen. Durch die Anwendung dieser Methoden kann die Genauigkeit und Verlässlichkeit der gewonnenen Erkenntnisse verbessert werden. Diese Methoden spielen insbesondere für die Berechnung und dem Nachweis der Wirkungszusammenhänge eine entscheidende Rolle.

4.3.3 Qualitative Auswertungsmethoden

Bei den qualitativen Auswertungsmethoden handelt es sich um verschiedene Verfahren, um nicht-numerische Daten auszuwerten, welche bspw. aus Interviews oder Beobachtungen resultieren. In Abschnitt 7.2 wird die Entwicklung, Durchführung und Auswertung einer Befragung zur Validierung der Forschungsergebnisse beschrieben. Dabei ist anzumerken, dass nur bedingt qualitative Fragestellungen implementiert werden und die Auswertung somit überwiegend deskriptiv erfolgt. Die qualitativen Fragestellungen dienen dabei vorrangig der Erfassung neuer Inhalte zur Ergänzung der bisher erlangten Erkenntnisse und somit zur Ableitung weiterer Thesen bzgl. der Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage (Reinders et al., 2022, S. 247).

4.3.4 Hinweise zur Datenerhebung

Wie bereits in Abschnitt 3.3 aufgezeigt, wird im Rahmen des ELISA-Feldversuchs eine Vielzahl an unterschiedlichen Daten generiert, gesammelt und aufbereitet, welche grundsätzlich für die Analyse der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage herangezogen werden können. Die für die nachfolgenden Auswertungen relevanten Erhebungsmethoden umfassen demnach die unterschiedlichen Systeme im Feldversuch selbst (Infrastrukturdaten, Fahrzeugdaten), die Akteure (Befragungsdaten), und die sekundären Bezugsquellen (Emissionsdaten, Verkehrsdaten, Witterungsdaten, Unfalldaten).

Während die Infrastruktur- und Fahrzeugdaten über die jeweiligen Systeme bzw. Teilkomponenten des Feldversuchs generiert und auf definierten Wegen bereitgestellt werden, werden die Befragungsdaten individuell durch eine entsprechende Befragungsmethode erzeugt. Sekundäre Daten, Daten die von anderen Instituten erhoben und bereitgestellt werden, werden auf verschiedenen Wegen eingebunden. Folgende Datenquellen werden verwendet:

- **Infrastrukturdaten:** Datengenerierung in den Datenloggern der Unterwerke der Oberleitungsanlage. Bereitstellung durch die Autobahn GmbH des Bundes als csv-Datei (vgl. Abschnitt 4.2.2).
- **Fahrzeugdaten:** Datengenerierung in den Datenloggern in den O-Lkw. Automatische Übertragung der Daten in eine Daten-Cloud. Bereitstellung durch automatisierten Abruf der Daten mittels einer HTTP/REST-Schnittstelle als csv-Datei (vgl. Abschnitt 3.3).
- **Befragungsdaten:** Datengenerierung durch eigene Datenerhebung. Bereitstellung der Daten nach Export aus entsprechender Erhebungssoftware als csv-Datei (vgl. Abschnitt 7.2).

-
- **Emissionsdaten:** Datengenerierung durch die jeweiligen Länder und Bündelung sowie Bereitstellung als csv-Datei durch die Generaldirektion Klimapolitik der Europäischen Kommission und die Europäische Umweltagentur (EUA), die sogenannte Eurostat (vgl. Abschnitt 1.1). (EEA, 2023)
 - **Verkehrsdaten:** Datengenerierung durch die Autobahn GmbH des Bundes mit Hilfe der automatischen Dauerzählstellen auf den Autobahnen. Bündelung und Bereitstellung durch die Bundesanstalt für Straßen (BASt) als csv-Datei (vgl. Abschnitt 4.2.3). (BASt, 2024)
 - **Witterungsdaten:** Datengenerierung auf Basis der Messstellen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Bündelung und Bereitstellung der Daten durch den DWD über das Climate-Data-Center als csv-Datei (vgl. Abschnitt 6.3.5). (DWD, 2024b)
 - **Unfalldaten:** Datengenerierung und Bündelung durch die Gefahrenabwehrbehörden, insbesondere die Autobahnpolizei. Bereitstellung der Daten durch die Autobahn GmbH des Bundes als csv-Datei (vgl. Abschnitt 6.3.4).

Die jeweilige Datenstruktur sowie ihre Auswertung werden in den jeweiligen Abschnitten beschrieben.

5 Identifikation der Einflussfaktoren

5.1 Ausfallursachen groß-technischer Systeme

Die Ursachen für die Abschaltung eines technischen Systems sind vielseitig und umfassen bspw. Extremwetterereignisse (Chang et al., 2007; Watson et al., 2022), technische Fehler (Andersson et al., 2005) und menschliches Versagen. Gegenwärtig werden Oberleitungssysteme für die Stromverteilung, aber auch für die Elektrifizierung von Schienenfahrzeugen, sowohl regional als auch in Städten, eingesetzt. In einigen Fällen werden auch Oberleitungsbusse anstelle von Straßenbahnen betrieben (Ajanovic & Haas, 2016; Wołek et al., 2021) (Sahm, 1978; Schoblick, 2013, S. 17f.). Der Einsatz von Oberleitungssystemen auf Autobahnen ist daher zunächst nur ein weiteres Anwendungsgebiet, wobei zu beachten ist, dass sich die Anforderungen (die hohe Geschwindigkeit der Oberleitungs-Lkw im Vergleich zu den Oberleitungsbussen, die erforderliche Spurhaltung im Vergleich zu den schienengeführten Straßenbahnen) deutlich unterscheiden.

Beim Abgleich der Ursachen für den Ausfall eines Oberleitungssystems mit den Ursachen für den Ausfall eines groß-technischen Systems (bspw. das Stromnetz) können zunächst folgende Ausfallursachen benannt werden (Behnert & Bruckner, 2018; Panteli & Mancarella, 2015; Gohdes, 2015; Koç et al., 2014; Dueñas-Osorio et al., 2007):

- Wetterereignisse, Temperatur und höhere Gewalt (z. B. starker Wind, extrem hohe Temperaturen),
- Überlastung und Überbelastung von elektrischen Anlagen und Netzen (z. B. technische Ausfälle, Lastabwurf),
- fehlerhafter Netzbetrieb (z. B. geplante (externe) Abschaltungen, unzureichende Wartung),
- menschliche Gewalt (z. B. Sabotage, Cyber-Attacken),
- menschliches Versagen und
- Kurzschluss.

Behnert and Bruckner (2018) haben festgestellt, dass 90 % aller Stromausfälle seit 1965 den ersten drei Kategorien (Witterung, Überlastungen und fehlerhafter Netzbetrieb) zuzuordnen sind; dabei ist jedoch zu beachten, dass das aktuelle Stromnetz nur wenige direkte Konfliktpunkte mit dem Verkehrsnetz (mit Ausnahme der Flugkorridore) aufweist. Bei einem ERS sind somit weitaus mehr Konfliktpunkte vorhanden. Diese umfassen bspw. die direkten mechanischen Einwirkungen durch die Oberleitungs-Lkw oder durch unzureichenden Sicherheitsabstand fremder Fahrzeuge und die indirekten Einwirkungen durch brennende Fahrzeuge unterhalb des Fahrdrachts oder durch Streusalz. Um eine ausreichende Informationslage über die möglichen Ausfallursachen generieren zu können, werden im Rahmen dieser Arbeit die im Feldversuch aufgetretenen Ausfallursachen systematisch ausgewertet.

Weiterhin ist zu beachten, dass Ausfälle vorhersehbar oder unvorhersehbar, erwartet oder unerwartet sein können und durch interne oder externe Ursachen entstehen können (Basciftci et al., 2018; Xing & Levitin, 2013; Markopoulou et al., 2008). Ein wichtiger Unterschied zu den bestehenden groß-technischen Systemen besteht darin, dass das Oberleitungssystem über einen größeren Bereich von Grund auf neu aufgebaut werden muss. Dies würde eine erstmalige Skalierung des Systems bedeuten, wodurch die Ausfallursachen in dieser Phase nicht

vollständig erfasst werden können. Berücksichtigt man den Faktor, dass sich unter einer Oberleitung ein Verkehrsunfall ereignen kann, der zu einem Ausfall des Oberleitungssystems führt, wird deutlich, dass insbesondere äußere Einflüsse die Verfügbarkeit beeinträchtigen können. Außerdem können solche Vorfälle die Oberleitung zusätzlich beschädigen. Die Auswirkungen des Verkehrs auf die Verfügbarkeit sind entsprechend hoch, so dass sich die Ausfallursachen im Vergleich zu den Stromnetzen oder den Oberleitungen im Schienenverkehr unterscheiden. Bisher gibt es keine Überlegungen, welche Ausfallursachen für ein Oberleitungssystem auf Autobahnen in Zukunft relevant sind und wie Straßenverkehrsunfälle als externe Einflussfaktoren die Verfügbarkeit einschränken werden. Zudem werden autonome Fahrzeuge auch einen Einfluss auf die Unfallhäufigkeit im Verkehr haben (Petrović et al., 2020). Um diese Fragen abschließend beantworten zu können, wird in den folgenden Abschnitten zunächst die Verfügbarkeit der ELISA-Teststrecke unter Beachtung der Ausfallursachen analysiert, um in Abschnitt 5.5 eine Übersicht möglicher Ursachen zu erarbeiten sowie eine Kategorisierung der Ursachen vorzunehmen.

5.2 Entwicklung des Anlagenbetriebstagebuchs

Die Analyse der Ausfallursachen und der Anlagenverfügbarkeit bedarf einer belastbaren Datenquelle der operativen Zeiten der Oberleitungsanlage. Aus diesem Grund wurde im Vorfeld der Analysen das Anlagenbetriebstagebuch entwickelt. Dieses enthält neben den Ein- und Ausschaltzeiten zusätzliche Hinweise über die Ursachen einer Abschaltung, die Dauer einer Abschaltung und über die betroffenen Segmente (Abschaltung einer oder beider Fahrtrichtungen). Die notwendigen Informationen wurden zum einen über die Auswertung der Datentabellen gewonnen, zum anderen wurden zusätzlich die bereitgestellten Informationen seitens der Operatoren ausgewertet sowie bei Unklarheiten zum Betrieb diese mit den Operatoren besprochen.

Jede geplante und ungeplante Abschaltung wurde (sofern möglich) frühzeitig durch die Operatoren per Mail bekanntgegeben. So war es möglich, dass die über die Auswertung der Datentabellen identifizierten Abschaltungen mit den erhaltenen Informationen abgeglichen werden konnten. Sofern eine Abschaltursache angegeben wurde, wurde dies im Anlagenbetriebstagebuch hinterlegt. Bei fehlender Information zur Abschaltursache wurde der direkte Kontakt mit den Operatoren aufgenommen. Es werden die beiden elektrifizierten Segmente (Fahrtrichtung Nord bzw. Fahrtrichtung Süd) getrennt erfasst. In Abbildung 21 ist die Erfassung der Betriebszeiten der Oberleitungsanlage je Segment dargestellt.

Anlagenbetriebstagebuch (AB-TB)													
Datum		Fahrtrichtung Süd (Ri. Darmstadt)						Fahrtrichtung Nord (Ri. Frankfurt)					
		Ein- / Ausschaltzeit		Zwischenschaltungen		Betriebszeiten		Ein- / Ausschaltzeit		Zwischenschaltungen		Betriebszeiten	
Datum	Wochen- tag	Erste Ein- schaltzeit (UTC)	Letzte Aus- schaltzeit (UTC)	Anzahl	Dauer	Betriebszeit (brutto)	Betriebszeit (netto)	Erste Ein- schaltzeit (UTC)	Letzte Aus- schaltzeit (UTC)	Anzahl	Dauer	Betriebszeit (brutto)	Betriebszeit (netto)
29.11.2020	So	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
30.11.2020	Mo	00:00:00	23:44:23			23,74	23,74	00:00:00	23:44:25			23,74	23,74
01.12.2020	Di	09:02:14	00:00:00			14,96	14,96	09:02:23	00:00:00			14,96	14,96
02.12.2020	Mi	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
03.12.2020	Do	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
04.12.2020	Fr	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
05.12.2020	Sa	00:00:00	00:00:00	2	00:02:29	24,00	23,96	00:00:00	00:00:00	1	05:33:58	24,00	18,43
06.12.2020	So	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
07.12.2020	Mo	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
08.12.2020	Di	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
09.12.2020	Mi	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
10.12.2020	Do	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
11.12.2020	Fr	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
12.12.2020	Sa	00:00:00	00:00:00	2	00:04:08	24,00	23,93	00:00:00	00:00:00	1	07:22:20	24,00	16,63
13.12.2020	So	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
14.12.2020	Mo	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
15.12.2020	Di	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
16.12.2020	Mi	00:00:00	00:00:00	1	03:43:57	24,00	20,27	00:00:00	00:00:00	1	03:44:09	24,00	20,26
17.12.2020	Do	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
18.12.2020	Fr	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
19.12.2020	Sa	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
20.12.2020	So	00:00:00	19:43:00			19,72	19,72	00:00:00	19:43:02			19,72	19,72
21.12.2020	Mo	06:49:25	00:00:00	1	01:30:35	17,18	15,67	06:49:28	00:00:00	1	01:30:45	17,18	15,66
22.12.2020	Di	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
23.12.2020	Mi	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
24.12.2020	Do	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
25.12.2020	Fr	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
26.12.2020	Sa	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
27.12.2020	So	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00
28.12.2020	Mo	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00	00:00:00	00:00:00			24,00	24,00

Abbildung 21: Ausschnitt aus dem Anlagenbetriebstagebuch: Betriebszeiten (eigene Darstellung).

Grundlage der Erfassung der Betriebszeit eines Segments ist die durch die Auswertung der Datentabellen ermittelte Zeit des Ein- bzw. Ausschaltens der Anlage. Das Anlagenbetriebstagebuch erfasst diese Zeiten mit einer Genauigkeit in Sekunden. Bei Abschaltungen, welche innerhalb eines Tages liegen, handelt es sich um sogenannte Zwischenschaltungen. Kommt es aufgrund eines Ereignisses zu einer Abschaltung, welche nicht wieder zu einer Einschaltung am gleichen Tag des Ereignisses führt, wird diese Ausschaltzeit als „Letzte Ausschaltzeit“ erfasst. Die Wiederinbetriebnahme der Oberleitungsanlage an einem der darauffolgenden Tage wird über die „Erste Einschaltzeit“ repräsentiert. Die Eintragungen in Abbildung 21 verdeutlichen die Systematik der Erfassung:

- **Halbseitiger Anlagenbetrieb:** Beim halbseitigen Anlagenbetrieb wird ein Segment der Oberleitungsanlage (eine Fahrtrichtung) zeitweise ausgeschaltet. Dies bietet sich bspw. dann an, wenn Arbeiten an der Fahrbahn durchzuführen sind. Eine solche Abschaltung fand zum Beispiel am 05.12.2020 und am 12.05.2020 aufgrund von Ausbesserungsarbeiten an einem Brückenbauwerk in Fahrtrichtung Frankfurt statt. Die Überführung der Anlage in den halbseitigen Betrieb und die Rückkehr in den beidseitigen Normalbetrieb der Anlage bedarf einer kurzen Abschaltung beider Fahrtrichtungen, so dass für das nicht durch das Ereignis betroffene Segment zwei Zwischenschaltungen resultieren.
- **Abschaltung der Anlage:** Eine Abschaltung der gesamten Oberleitungsanlage (d. h. beider Segmente) ist bei einem Einsatz der Gefahrenabwehrbehörden aus Gründen der Sicherheit im Pilotbetrieb unumgänglich. Dies führt somit entweder, sofern die Wiederinbetriebnahme am gleichen Tag erfolgen kann, zu einer Zwischenschaltung (16.12.2020 und 21.12.2020) oder zu einer tagesübergreifenden Abschaltung (30.11.2020 bis 01.12.2020 und 20.12.2020 bis 21.12.2020).

Es ist zu beachten, dass die Schaltungen der jeweiligen Segmente getrennt ausgewertet werden und es somit aufgrund der zeitlichen Verzögerungen im Schaltbefehl der Segmente zu einer

unterschiedlichen Dauer der Abschaltung kommt. Dies wird anhand der Abschaltdauer am 16.12.2020 sichtbar. An diesem Tag war trotz identischer Ausfallursache (Ereignis) die Abschaltdauer der nördlichen Fahrtrichtung 12 Sekunden länger.

Datum		Betriebsinformationen			
		Fahrtrichtung Süd (Ri. Darmstadt)		Fahrtrichtung Nord (Ri. Frankfurt)	
Datum	Wochentag	Kategorie	Betriebsunterbrechung (Stunden)	Kategorie	Betriebsunterbrechung (Stunden)
29.11.2020	So		0,00		0,00
30.11.2020	Mo	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	0,26	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	0,26
01.12.2020	Di	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	9,04	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	9,04
02.12.2020	Mi		0,00		0,00
03.12.2020	Do		0,00		0,00
04.12.2020	Fr		0,00		0,00
05.12.2020	Sa	Ausbesserungsarbeiten Brückenbauwerk	0,04	Ausbesserungsarbeiten Brückenbauwerk	5,57
06.12.2020	So		0,00		0,00
07.12.2020	Mo		0,00		0,00
08.12.2020	Di		0,00		0,00
09.12.2020	Mi		0,00		0,00
10.12.2020	Do		0,00		0,00
11.12.2020	Fr		0,00		0,00
12.12.2020	Sa	Ausbesserungsarbeiten Brückenbauwerk	0,07	Ausbesserungsarbeiten Brückenbauwerk	7,37
13.12.2020	So		0,00		0,00
14.12.2020	Mo		0,00		0,00
15.12.2020	Di		0,00		0,00
16.12.2020	Mi	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	3,73	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	3,74
17.12.2020	Do		0,00		0,00
18.12.2020	Fr		0,00		0,00
19.12.2020	Sa		0,00		0,00
20.12.2020	So	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	4,28	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	4,28
21.12.2020	Mo	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	8,33	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	8,34
22.12.2020	Di		0,00		0,00

Abbildung 22: Ausschnitt aus dem Anlagenbetriebstagebuch: Betriebsinformationen (eigene Darstellung).

Die Ausfallursachen (Ereignisse) werden im Anlagenbetriebstagebuch separat als sogenannte Betriebsinformationen erfasst. Jedes Ereignis wird dabei mit einer Ausfallursache beschrieben, wobei jedem Ereignis nur eine Ursache zugeschrieben werden kann. Demgegenüber können die „gleichen“ Ausfallursachen für die Beschreibung unterschiedlicher Ereignisse Verwendung finden (1-n-Beziehung). Die Abschaltung aufgrund des Einsatzes der Gefahrenabwehrbehörden (Ausfallursache) stellt hierbei ein gutes Beispiel für eine mehrfach genutzte Ausfallursache dar.

Die Infrastrukturdaten aus dem Unterwerk Bornbruch wurden durch die Autobahn GmbH des Bundes quartalsweise zur Verfügung gestellt. Die zusätzlichen bereitgestellten Informationen wurden kontinuierlich erfasst.

5.3 Analyse der Verfügbarkeit und Ausfallzeiten der Oberleitungsanlage

Das Anlagenbetriebstagebuch wurde innerhalb der Begleitforschung zum Forschungsprojekt ELISA kontinuierlich fortgeschrieben. Im Rahmen der Dissertation wird die Betrachtung grundsätzlich um den Zeitraum von Mai 2019 (Inbetriebnahme) bis Dezember 2022 (regulärer Betrieb vor der Verlängerung der Anlage) eingeschränkt. Dies ist durch die Erweiterung der Oberleitungsanlage selbst zu begründen, da diese nur eine reduzierte Verfügbarkeit im Jahr 2023 aufgrund der erforderlichen Baumaßnahmen aufweist (halbseitiger Betrieb im Zeitraum vom 09.01.2023 bis zum 30.03.2023 sowie anschließender Abschaltung bis 28.08.2023). Die nach der Erweiterung der Anlage verlängerte elektrische Strecke wurde hingegen nach weiteren fahrzeugseitigen Tests erst Mitte September 2023 in Betrieb genommen. Die Daten aus dem Zeitraum Mitte September 2023 bis 31.12.2023 werden als Vergleichsdaten zusätzlich betrachtet.

Die Dauer der Abschaltungen (Ausfallzeiten) werden in Abhängigkeit der geplanten Betriebszeit der Oberleitungsanlage ermittelt. Über den **Betrachtungszeitraum** hinaus lassen sich zwei Betriebsstrategien mit unterschiedlichen geplanten Betriebszeiten definieren:

- Einführungsphase (7. Mai 2019 - 31. Dezember 2019)
- Regelbetrieb (1. Januar 2020 - 31. Dezember 2022)

Während der **Einführungsphase** können die Ausfallzeiten an einem Tag maximal acht Stunden betragen, da die geplante Betriebszeit zwischen 8 und 16 Uhr an maximal fünf Tagen pro Woche festgelegt ist. Im **Regelbetrieb** wird die Oberleitungsanlage rund um die Uhr betrieben, so dass die Verfügbarkeit der Anlage nur durch die betrieblichen Ausfallzeiten begrenzt wird.

Zunächst werden in Tabelle 2 die beobachteten Betriebstage je Fahrtrichtung kategorisiert aufgezeigt. Hierbei wird zwischen Betriebstage ohne Unterbrechung (Kat A), Betriebstage mit Unterbrechung (Kat B) und Betriebstage ohne Betrieb (Kat C) unterschieden. Auffällig ist, dass in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) der Anteil der Tage, an welchen die Anlage nicht in Betrieb war, wesentlich höher ist gegenüber der Fahrtrichtung Nord (Frankfurt). An 71,3 % (Süd) bzw. 77,8 % (Nord) aller Betriebstage wurde die Anlage ohne eine Abschaltung betrieben.

Tabelle 2: Verteilung der Betriebstage nach Kategorie (Kat A = Betriebstage ohne Unterbrechung, Kat B = Betriebstage mit Unterbrechung, Kat C = Betriebstage ohne Betrieb) je Fahrtrichtung (eigene Darstellung).

Jahr	Erwartete Betriebstage	Beobachtete Betriebstage in Fahrtrichtung Darmstadt			Beobachtete Betriebstage in Fahrtrichtung Frankfurt		
		Kat A	Kat B	Kat C	Kat A	Kat B	Kat C
2019	172	112 (65,1 %)	26 (15,1 %)	34 (19,8 %)	112 (65,1 %)	26 (15,1 %)	34 (19,8 %)
2020	366	231 (63,1 %)	31 (8,5 %)	104 (28,4 %)	299 (81,7 %)	40 (10,9 %)	27 (7,4 %)
2021	365	268 (73,4 %)	34 (9,3 %)	63 (17,3 %)	271 (74,2 %)	37 (10,1 %)	57 (15,6 %)
2022	365	293 (80,3 %)	57 (15,6 %)	15 (4,1 %)	304 (83,3 %)	57 (15,6 %)	4 (1,1 %)
Summe	1268	904 (71,3 %)	148 (11,7 %)	216 (17,0 %)	986 (77,8 %)	160 (12,6 %)	122 (9,6 %)

Für die Ermittlung der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage A_{OL} wird das Verhältnis zwischen der beobachteten Betriebszeit t_O und der erwarteten Betriebszeit t_E betrachtet (siehe Gleichung 8). Es ist zu beachten, dass während des Einführungsbetriebs die Erfüllung der Betriebszeit zwischen der geplanten Betriebszeit (8 und 16 Uhr) bewertet wird. Dies bedeutet, dass bspw. eine längere Betriebszeit über die geplante Ausschaltzeit hinaus nicht betrachtet wird. Da die Fahrtrichtungen getrennt ein- und ausgeschaltet werden können, wird die Verfügbarkeit entsprechend für beide Fahrtrichtungen ermittelt.

$$A_{OL,i} = \frac{t_{O,i}}{t_{E,i}} \quad (8)$$

mit:

- A_{OL} = Verfügbarkeit (*Availability*) der Oberleitungsanlage
- t_O = Beobachtete (*Observed*) Betriebszeit
- t_E = Erwartete (*Expected*) Betriebszeit
- i = Fahrtrichtung [Süd, Nord]

In Tabelle 3 ist die jahresbezogene Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage je Fahrtrichtung dargestellt. Die geplante Betriebsdauer entspricht hierbei jenem Wert, welcher bei einer dauerhaften ununterbrochenen Verfügbarkeit erreicht werden würde. Die realisierte Betriebsdauer gibt die über das Jahr erreichte Summe der beobachteten Betriebszeit wieder. Da innerhalb der Einführungsphase für die beobachtete Betriebszeit die Einschaltzeiten außerhalb der Hauptbetriebszeit (HBZ, Betriebszeit zwischen 8 und 16 Uhr) nicht betrachtet wird, wird diese informativ in der Tabelle ebenfalls angegeben. Die Betriebszeit außerhalb der HBZ geht jedoch nicht in die Berechnung der rechnerischen Anlagenverfügbarkeit ein.

Tabelle 3: Jahresbezogene Anlagenverfügbarkeit je Fahrtrichtung (eigene Darstellung).

Jahr	Fahrtrichtung	Geplante Betriebsdauer [Stunden]	Realisierte Betriebsdauer [Stunden]	Betriebszeit außerhalb der HBZ [Stunden]	Anlagen- verfügbarkeit [%]
2019	Süd (Darmstadt)	1376	1055,56	58,97	76,7
	Nord (Frankfurt)	1376	1055,55	58,93	76,7
2020	Süd (Darmstadt)	8784	6080,44	-	69,2
	Nord (Frankfurt)	8784	7849,52	-	89,4
2021	Süd (Darmstadt)	8760	7012,00	-	80,0
	Nord (Frankfurt)	8760	7125,43	-	81,3
2022	Süd (Darmstadt)	8760	7907,60	-	90,3
	Nord (Frankfurt)	8760	8353,55	-	95,4

Während in der Einführungsphase lediglich eine durchschnittliche Verfügbarkeit von 76,7 % erreicht werden konnte, zeigen die Werte für den Regelbetrieb eine Spannweite von 69,2 % bis 95,4 % auf. Das Jahr 2022 weist die höchsten Verfügbarkeitswerte auf; eine steigende Tendenz der Anlagenverfügbarkeit ist zu erkennen. Die geringen Abweichungen im Jahr 2019 zwischen den beiden Fahrtrichtungen ergeben sich aufgrund der zeitlich versetzten Schaltbefehle im Unterwerk bei Ein- bzw. Abschaltung der Anlage. Auch wenn durch den Operator die Ein- bzw. Abschaltung der Anlage im Gesamten getätigt wird, so kommt es innerhalb des elektrischen Systems zu einer differenzierten Ausführung des Schaltbefehls und somit zu einer zeitlich leicht versetzten Schalthandlung.

Die visuelle Aufbereitung der Verfügbarkeit der Anlage je Fahrtrichtung und monats-scharf verdeutlicht in Abbildung 23 den geringen Wert aus 2020 für die Fahrtrichtung Süd (Darmstadt). Hier lässt sich feststellen, dass diese Fahrtrichtung – aufgrund eines Unfallereignisses mit Beschädigung der Fahrleitung – über drei Monate lang nicht in Betrieb genommen werden konnte. Der Unfall ereignete sich am 24.01.2020 in südlicher Fahrtrichtung und führte zu einem sofortigen Abschalten der Oberleitungsanlage. Da eine Reparatur und somit Inbetriebnahme der gesamten Anlage durch die zu diesem Zeitpunkt startende Corona-Pandemie nicht möglich waren, wurde seitens des Betreibers die Möglichkeit einer getrennten Schaltung beider Fahrtrichtungen implementiert. Am 14.02.2020 konnte daher die nördliche Fahrtrichtung wieder eingeschaltet werden, hingegen die Inbetriebnahme der betroffenen südlichen Fahrtrichtung erst am 06.05.2020 erfolgen konnte. Im Jahr 2021 weisen vor allem die Monate Januar (Wechsel der Zuständigkeiten) sowie März und Dezember (Feststellung und Austausch defekter Isolatoren) eine geringe Verfügbarkeit auf und begründen damit den geringen Wert von 80,0 % bzw. 81,3 %.

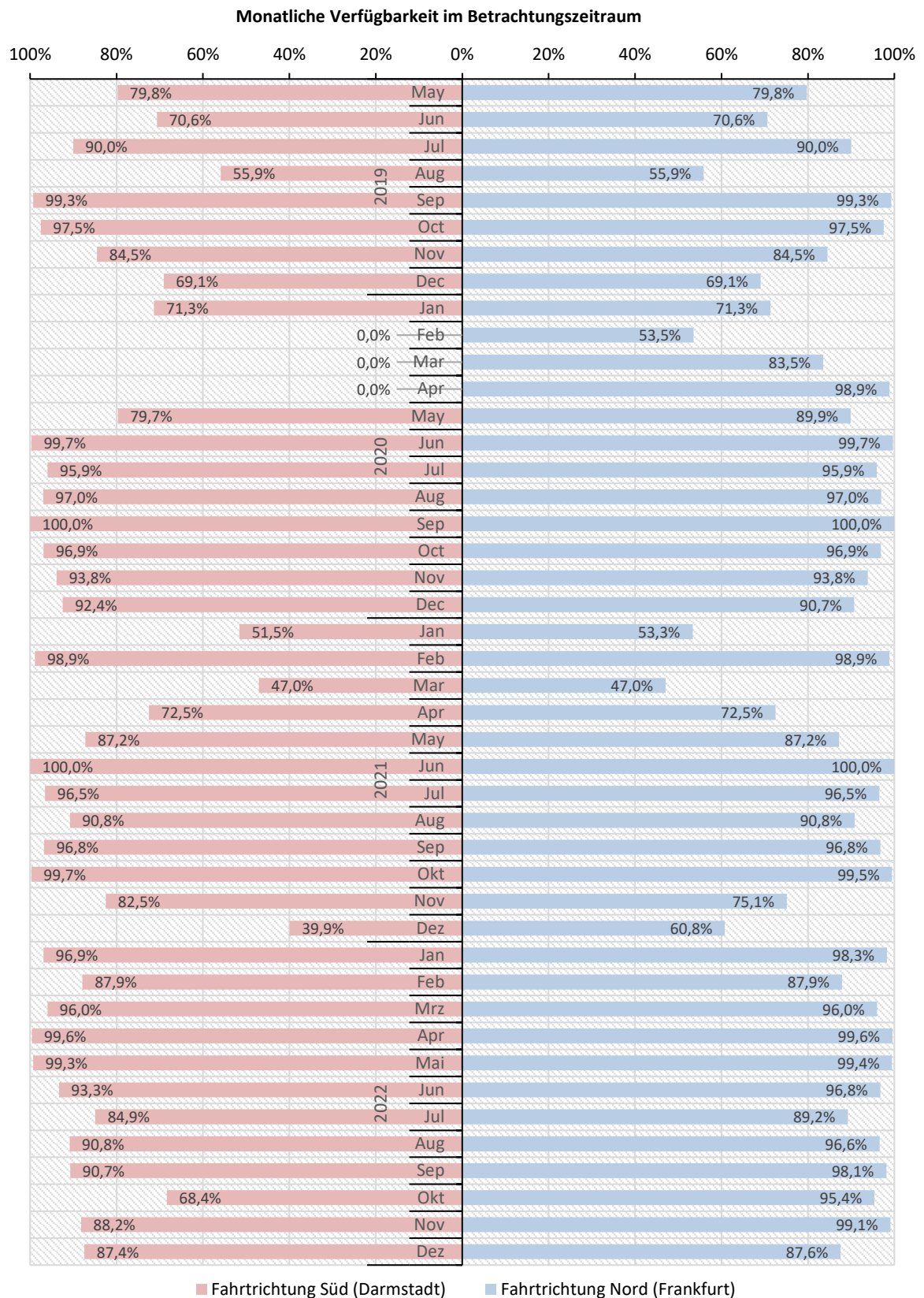


Abbildung 23: Monatliche Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage im Betrachtungszeitraum (Mai 2019 bis Dezember 2022) getrennt nach Fahrtrichtungen (eigene Darstellung).

Die Analyse und Darstellung der Verfügbarkeit und der Ausfallzeiten lässt an dieser Stelle erkennen, dass eine hohe Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage erreicht werden kann.

Gleichzeitig wird deutlich, dass eine Vielzahl an Einflüssen bzw. Ursachen für eine zeitliche Abschaltung vorhanden sein müssen, da ein weitgehend durchgehender Betrieb nur an insgesamt sieben (südliche Fahrtrichtung) bzw. acht (nördliche Fahrtrichtung) Monaten und ein durchgehender Betrieb nur an einem Monat erreicht werden konnte⁹. Im September 2020 wurde die Anlage zu keiner Zeit ausgeschaltet.

Für eine dezidierte Analyse der Verfügbarkeit werden im nächsten Schritt die Ursachen der Ausfallzeiten in die Betrachtung eingeschlossen. Hierdurch wird eine Gesamtübersicht über den Betrieb der Oberleitungsanlage erreicht, so dass in Kapitel 6 eine umfassende Analyse bzgl. der Einflüsse auf die Verfügbarkeit durchgeführt werden kann.

5.4 Erfassung der Ausfallursachen im ELISA-Feldversuch

Wie bereits in Abschnitt 5.1 aufgezeigt, werden für jede Abschaltung der Oberleitungsanlage die Ursachen fahrtrichtungsgetrennt dokumentiert. Diese Dokumentation ermöglicht eine detaillierte Beschreibung der Unfallursachen. Insgesamt konnten im Betrachtungszeitraum 32 unterschiedliche Ursachen identifiziert werden, welche in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) zu einer gesamten Ausfallzeit von ca. 5.624 Stunden und in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) von ca. 3.296 Stunden beigetragen haben (vgl. Tabelle 4).

Die meisten Ursachen traten im gesamten Betrachtungszeitraum weniger als 100 Stunden auf (24 von 32 in Fahrtrichtung Süd und 25 von 32 in Fahrtrichtung Nord). Aufgrund der Möglichkeit des halbseitigen Betriebs der Oberleitungsanlage unterscheiden sich die beiden Fahrtrichtungen teilweise erheblich in den Ausfalldauern der jeweiligen Ursachen. So weist die Fahrtrichtung Nord eine Dauer aufgrund der Abschaltungen im Zuge des Einsatzes der Gefahrenabwehrbehörden von 482,42 Stunden auf, hingegen in der Fahrtrichtung Süd nur 332,46 Stunden ermittelt werden konnten¹⁰. Dies ist letztlich dadurch begründet, da in Fahrtrichtung Süd zwei wesentliche Ausfallursachen maßgeblich waren, welche zu einem halbseitigen Betrieb führten. Diese umfassen die unfallbedingte Abschaltung der Oberleitungsanlage, welche zu einer Beschädigung des Fahrdrachts in südlicher Fahrtrichtung führte, sowie die notwendigen Abschaltungen aufgrund der Erweiterung der Oberleitungsanlage in die südliche Fahrtrichtung.

Die Ausfalldauer aufgrund von Urlaub der Operatoren während der Ferienzeiten, Feiertage und Brückentage sowie aufgrund eines verspäteten Abschaltens oder eines verfrühten Einschaltens traten lediglich in der Einführungsphase auf (vgl. Abschnitt 5.1). Diese beträgt insgesamt etwa 162,25 Stunden je Fahrtrichtung.

Witterungsbedingt können zwei Abschaltungen identifiziert werden. Zum einen kam es bereits in der Einführungsphase aufgrund eines Sturmes zu einer Beschädigung der Oberleitungsanlage, welche innerhalb von ca. zwei Wochen repariert werden konnte (87,36 Stunden je Fahrtrichtung), zum anderen wurde die Anlage aufgrund einer Sturmwarnung im Jahr 2022 vorsorglich ausgeschaltet (64,94 Stunden je Fahrtrichtung). Das Sturmereignis führte zu keiner Beschädigung an der Oberleitungsanlage.

⁹ Unter einem weitgehend durchgehenden Betrieb wird an dieser Stelle eine monatscharfe Verfügbarkeit von mindestens 99 % verstanden, hingegen ein durchgehender Betrieb eine monatscharfe Verfügbarkeit von 100 % bedeutet.

¹⁰ Im Feldversuch ELISA werden bei einem Einsatz der Gefahrenabwehrbehörden aus Sicherheit immer beide Fahrtrichtungen stromlos geschaltet, unabhängig davon, in welcher Fahrtrichtung sich der Einsatz befindet.

Tabelle 4: Ausfallursachen der Oberleitungsanlage und Ausfalldauer (Summe je Ursache in Stunden) je Fahrtrichtung im Betrachtungszeitraum (eigene Darstellung).

Ursache	Abschaltungsdauer in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt)	Abschaltungsdauer in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt)	Summe beider Fahr- richtungen
Summe:	5624,40	3295,95	8920,35
Unfallbedingte Ausschaltung der Anlage	2544,26	568,56	3112,82
Defekte Isolatoren - Störung an der Oberleitungsanlage	591,98	591,98	1183,96
Austausch der Isolatoren	527,73	420,78	948,51
Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	332,46	482,42	814,88
Übergabe der Anlage an die Autobahn GmbH	373,99	373,99	747,98
Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	509,90	32,50	542,40
Inspektion und Wartung	124,94	124,94	249,88
IT Arbeiten	95,03	95,03	190,06
Sturmschaden an der Oberleitung	87,36	87,36	174,72
Urlaub / Ferien (Kein Anlagenbetrieb)	71,54	71,54	143,08
Störung in der Betriebszentrale	66,13	66,15	132,28
Witterungsbedingte Abschaltung	64,94	64,94	129,88
Feiertag	48,00	48,00	96,00
Restarbeiten	40,00	40,00	80,00
Kein Anlagenbetrieb (Grund unbekannt)	40,95	38,45	79,40
Reparaturarbeiten nach Unfall	0,00	67,08	67,08
Arbeiten der Autobahnmeisterei (bspw. Mäharbeiten)	24,57	24,73	49,30
Brückenprüfung	0,00	25,31	25,31
Wartungsarbeiten des Energieversorgungsnetzbetreibers	16,69	6,16	22,85
Kritische Temperatur in der Anlage (Manuelle Abschaltung)	11,12	11,12	22,24
Ausbesserung- und Instandhaltungsarbeiten an Bauwerken	1,52	20,43	21,95
Montage der Kamerastandorte	16,98	0,00	16,98
Verspätetes Einschalten / verfrühtes Ausschalten	8,30	8,31	16,61
Brückentag	8,00	8,00	16,00
Reparaturarbeiten Straßenbelag	8,00	8,00	16,00
Arbeiten am Energieversorgungsnetz	5,31	5,31	10,62
Störung an der Oberleitungsanlage	3,07	3,07	6,14
Anbringen von Beschilderung	0,03	1,55	1,58
Inspektionsarbeiten an den Brücken	1,10	0,05	1,15
Arbeiten am Kamerasystem	0,35	0,03	0,38
Erfordernis im Betriebsablauf	0,10	0,11	0,21
Austausch Sensoren nach witterungsbedingtem Ausfall	0,05	0,05	0,10

Es ist zu beachten, dass es sich bei den Werten in Tabelle 4 um aufsummierte Werte über den Betrachtungszeitraum handelt. Dennoch lassen sich fünf Ausfallursachen aufzeigen, welche zu einem längeren Abschalten der Oberleitungsanlage geführt haben (Ausfallzeit länger als 150 Stunden¹¹). Diese umfassen:

#1 Unfall mit Beschädigung während der COVID-19-Pandemie

Bei der längsten Ausfallzeit (in Summe 3045,18 Stunden) handelt es sich um einen Zwischenfall, der durch ein Fahrzeug verursacht wurde, dessen unsachgemäß gelagerte Transportgüter am 24. Januar 2020 in südlicher Richtung mit der Fahrleitung kollidierten und diese beschädigten (unfallbezogene Ausfallzeit). Aufgrund der COVID-19-Pandemie war eine Reparatur innerhalb kurzer Zeit jedoch nicht möglich. Neben dem Kontaktverbot erschwerte die Lieferung von Ersatzteilen unter den Bedingungen der COVID-19-Pandemie die Situation zusätzlich. Letztendlich konnte die Oberleitung in Fahrtrichtung Süd erst im Mai 2020 wieder in Betrieb genommen werden (2476,90 Stunden Ausfallzeit in Fahrtrichtung Süd). Da die Oberleitung in nördlicher Fahrtrichtung keine Schäden aufwies, wurde die Möglichkeit einer separaten Umschaltung der Fahrtrichtung geprüft und schließlich umgesetzt. Mitte Februar wurde die Oberleitungsanlage schließlich in Fahrtrichtung Nord in Betrieb genommen (568,28 Stunden Ausfallzeit in Fahrtrichtung Nord inkl. der Zeit der Abschaltung für die Reparaturarbeiten).

#2 Teilweiser und #3 Vollständiger Austausch der Isolatoren

Die zweit- (1183,96 Stunden) und drittlängste (948,51 Stunden) Ausfallzeit hatten die gleiche Ursache. Hier reagierte das Steinsalz, das beim Streuen von Streusalz auf der Autobahn in den Bereich der Oberleitungsanlage gelangt war, mit den Isolatoren im Bereich der Oberleitung, so dass einige Isolatoren direkt ausgetauscht werden mussten (störungsbedingte Ausfallzeit). Zu diesem Zweck musste die Oberleitungsanlage von Mitte März bis Anfang April abgeschaltet werden (zweitlängste Ausfallzeit mit 591,98 Stunden je Fahrtrichtung). Im Dezember 2021 wurden dann über einen Zeitraum von rund drei Wochen alle Isolatoren durch geeignete Isolatoren ersetzt (drittlängste Ausfallzeit). Der Austausch der Isolatoren in südlicher Fahrtrichtung verursachte eine Ausfallzeit von 527,73 Stunden, in nördlicher Fahrtrichtung von 420,78 Stunden.

#4 Wechsel der Zuständigkeiten

Die viertlängste Ausfallzeit (747,98 Stunden) entstand zum Jahreswechsel von 2020 auf 2021. In diesem Zeitraum war die Oberleitungsanlage für mehr als zwei Wochen komplett abgeschaltet. Grund dafür war der Wechsel der Zuständigkeiten und damit die Übergabe des Systems (betriebs- und systembedingte Ausfallzeit von 373,99 Stunden pro Fahrtrichtung).

¹¹ Der Wert von 150 Stunden bezieht sich auf die Summe der Ausfallzeit beider Fahrtrichtungen (vgl. Tabelle 4). Bei den übrigen Ausfallursachen (Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden, Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage, Inspektion und Wartung, Urlaub / Ferien (kein Anlagenbetrieb) und IT Arbeiten) wurde der Wert nicht ohne Unterbrechung überschritten.

#5 Sturmschaden an der Oberleitung

Die fünftlängste Ausfallzeit (174,72 Stunden) gab es 2019. Hier beschädigte ein sehr starkes Sturmereignis die Oberleitungsanlage (witterungsbedingte Ausfallzeit von 87,36 Stunden je Fahrtrichtung); dies war jedoch der einzige witterungsbedingte Schaden im Betrachtungszeitraum. Im Jahr 2022 wurde das System als Präventivmaßnahme im Vorfeld einer Sturmwarnung für insgesamt 129,88 Stunden abgeschaltet. Es traten keine Schäden an der Anlage auf.

Es wird an dieser Stelle bereits deutlich, dass ein großer Anteil der Ausfallzeiten auf besondere Ereignisse zurückzuführen ist, welche sich in einem etablierten Regelbetrieb nicht derart negativ auswirken werden. Die längste Ausfallzeit resultiert insbesondere aus den eingeschränkten Möglichkeiten zur Instandsetzung aufgrund des innovativen Charakters des Systems selbst und der COVID-19-Pandemie. Bei einem Ausbau des Oberleitungssystems wird sich die Ausfallzeit nach einem derartigen Unfallereignis auf wenige Tage beschränken. Die Ursache für die zweit- und drittlängste Ausfallzeit wurde durch den Austausch und den Einsatz Streusalz-beständiger Isolatoren behoben und wird zukünftig nicht mehr auftreten. Auch die viertlängste Ausfallzeit wird bei einer Etablierung des Systems nicht wiederholt auftreten.

Rechnerisch weisen die aufgeführten fünf längsten Ausfallzeiten einen Anteil von etwa zwei Drittel (68,4 % bezogen auf die Summe beider Fahrtrichtungen) an der gesamten Ausfallzeit der Oberleitungsanlage auf (vgl. Tabelle 5). Bei isolierter Betrachtung beträgt der Anteil 72,1 % (Fahrtrichtung Süd) und 62,0 % (Fahrtrichtung Nord).

Tabelle 5: Anteil [%] der Ausfalldauer [h] der fünf längsten Ausfallursachen an der gesamten Ausfallzeit [h] der Oberleitungsanlage im Betrachtungszeitraum (eigene Darstellung).

Ausfallursache	Abschaltungsdauer in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt)	Abschaltungsdauer in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt)	Summe der Abschaltungsdauer beider Fahrtrichtungen
#1 Unfall	2476,9	568,28	3045,18
#2 Isolatoren	591,98	591,98	1183,96
#3 Isolatoren	527,73	420,78	948,51
#4 Zuständigkeit	373,99	373,99	747,98
#5 Witterung	87,36	87,36	174,72
Summe:	4057,96	2042,39	6100,35
Gesamte Ausfallzeit:	5624,40	3295,89	8920,29
Anteil:	72,15 %	61,97 %	68,39 %

Um eine umfassende Analyse der Ausfallursachen durchführen zu können, werden die aufgetretenen Ursachen im nächsten Schritt kategorisiert.

5.5 Kategorisierung der Ausfallursachen

Ausgehend von den aufgeführten Möglichkeiten zur Charakterisierung von Ausfallursachen in Abschnitt 5.1 werden an dieser Stelle die möglichen Ausfallursachen einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen zusammengetragen und strukturiert dargestellt. Die möglichen

Ausfallursachen werden den im Realbetrieb aufgetretenen Ausfallursachen gegenübergestellt, wodurch sich aufzeigen lässt, welche Zusammenhänge im Rahmen der Betrachtung der Ausfallursachen aus dem Feldversuch ELISA untersucht werden können. Abbildung 24 liefert eine strukturierte Darstellung der möglichen Ausfallursachen einer Oberleitungsanlage, derer Wirkungen sowie der sich aus den Wirkungen ergebenden Prozesse in Form von Folgen und notwendigen Handlungen. Die primären Ausfallursachen lassen sich dabei in sechs übergeordnete Kategorien einteilen, wobei die Wirkungen einzelner primären Ausfallursachen sekundäre Ausfallursachen ergeben.

Organisatorische und betriebliche Ursachen

Die organisatorischen und betrieblichen Ausfallursachen umfassen jene Ursachen, welche aufgrund äußerer Prozesse und Abläufe zu einer Abschaltung der Oberleitungsanlage führen. Die Abschaltungen können dabei geplant oder ungeplant auftreten, eine Störung der Oberleitungsanlage liegt jedoch nicht vor. Folgende Ursachen sind eingeschlossen:

- **Inspektion und Wartung:** Im Zeitraum der regelmäßig durchzuführenden Inspektion und Wartung können Abschaltungen erforderlich werden. Gegebenenfalls sind Reparaturen innerhalb der Inspektion und Wartung vorzunehmen bzw. innerhalb der Inspektion und Wartung eingeplant.
- **Kommunikationsausfall:** In der Regel wird eine Oberleitungsanlage über einen Fernzugriff durch den Anlagenbetreiber bedient. Im Falle eines Ausfalls der Kommunikation zwischen dem Betreiber und der Anlage sollte sich die Anlage bestenfalls automatisiert abschalten.
- **Anforderung durch Dritte:** Abschaltungen können durch Dritte angefordert werden. Dies umfasst bspw. ungeplante Abschaltungen für die Durchführung der Tätigkeiten der Gefahrenabwehrbehörden oder geplante Abschaltungen für die Gewährleistung einer abgesicherten Durchfahrt eines Schwertransports im Streckenbereich oder Arbeiten am Energieversorgungsnetz.
- **Straßenbetriebliche Aktivitäten:** Für die Wartung und Unterhaltung von Straßen werden seitens des Straßenbetriebsdienstes unterschiedliche Maßnahmen ausgeführt, wie bspw. Mäh-, Grünschnitt- oder Reinigungsarbeiten. Diese Maßnahmen können eine Abschaltung einer Oberleitungsanlage erfordern.
- **Arbeitsstätten:** Größere Arbeiten im Verkehrsraum sind regelmäßig notwendig und erfordern zum Teil die Einrichtung von Arbeitsstätten von kürzerer oder längerer Dauer. Je nach Lage der Arbeitsstätte können Abschaltungen erforderlich werden.
- **Innerbetriebliche Prozesse:** Die Abschaltungen aufgrund der innerbetrieblichen Prozesse umfassen jene Ursachen, welche durch den Anlagenbetreiber ausgelöst werden, wie bspw. ungeplante Abschaltungen wegen fehlendem Personal.
- **Betriebsnotwendige Abschaltungen:** Um die Schulung der Operatoren durchzuführen, sind einzelne und kurzzeitige Abschaltungen einer Oberleitungsanlage zu erwarten. Da regelmäßige Schulungen und Übungen unerlässlich sind, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, handelt es sich hierbei um eine betriebsnotwendige Abschaltung.

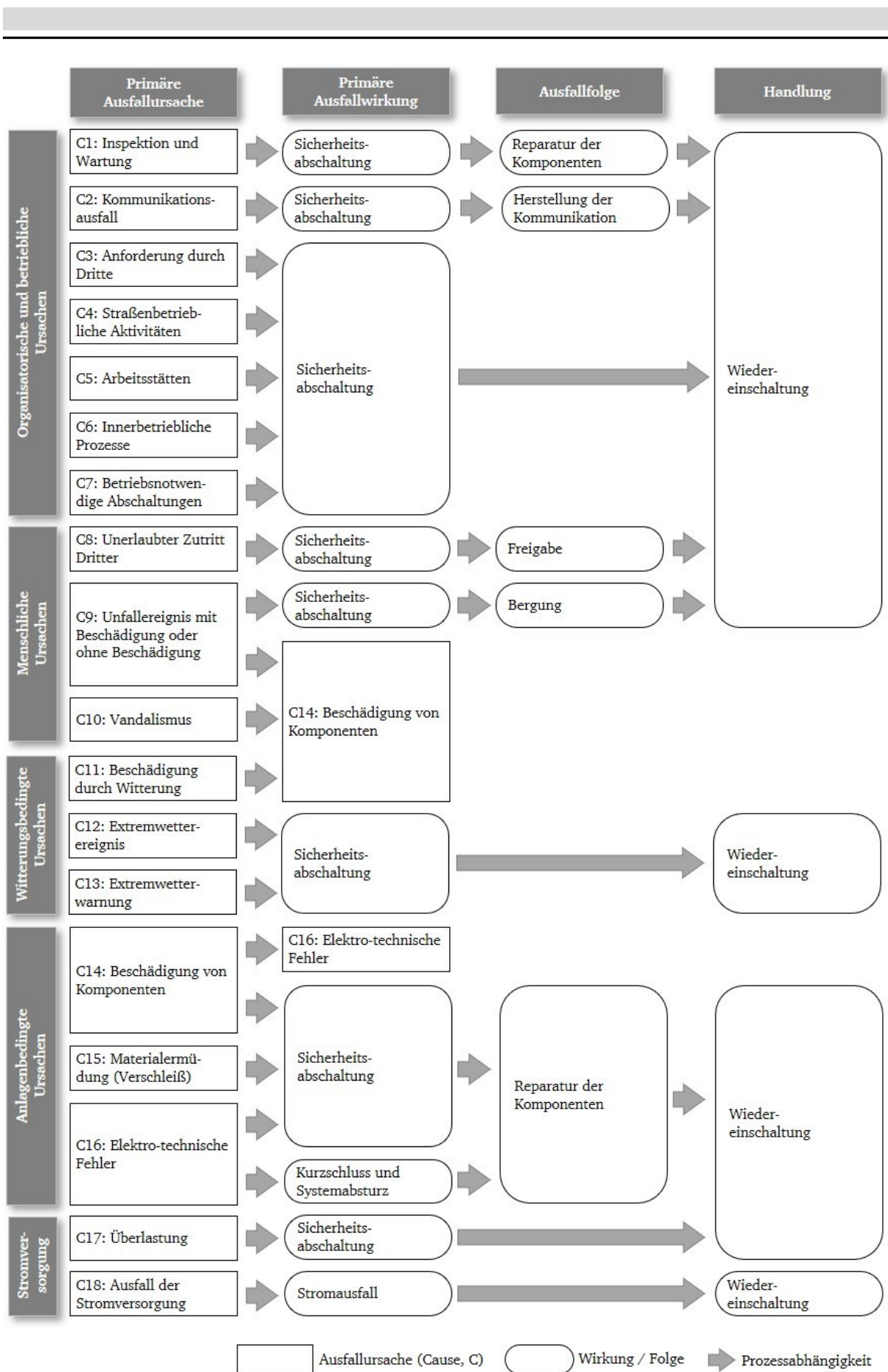


Abbildung 24: Mögliche Ausfallursachen einer Oberleitungsanlage (eigene Darstellung).

Beim Vorliegen einer organisatorischen und betrieblichen Ausfallursache wird die Oberleitungsanlage aufgrund sicherheitsrelevanter Aspekte abgeschaltet (Sicherheitsabschaltung) und kann anschließend durch den Anlagenbetreiber wieder in Betrieb genommen werden. Lediglich beim Ausfall der Kommunikation muss der Grund des Ausfalls identifiziert und das Problem jedoch zunächst behoben werden (Herstellen der Kommunikation).

Menschliche Ursachen

Der Mensch kann vorsätzlich, fahrlässig oder versehentlich für eine Abschaltung verantwortlich sein. Folgende Ausfallursachen werden unterschieden:

- **Unerlaubter Zutritt Dritter:** Halten sich Dritte im direkten Bereich der Oberleitungsanlage, entlang der Autobahn, um oder in den Unterwerken auf, kann eine Abschaltung der Anlage aus sicherheitsrelevanten Gründen durchgeführt werden. Zur Auflösung der Ausfallursache sind ggf. ordnungsrechtliche Maßnahmen erforderlich, in jedem Fall muss die Situation gelöst und eine Freigabe zur Wiedereinschaltung erteilt werden.
- **Unfallereignis ohne Beschädigung:** Straßenverkehrsunfälle treten regelmäßig und aufgrund diverser Ursachen auf. Dabei führen die Unfälle nicht zwangsweise zu einer Beschädigung der Anlage, jedoch mitunter zur Sperrung des elektrifizierten Fahrstreifens. In diesem Fall kann eine Abschaltung notwendig werden, welche erst nach Freigabe durch bspw. die Gefahrenabwehrbehörden aufgehoben werden kann.
- **Unfallereignis mit Beschädigung:** Führt ein Straßenverkehrsunfall zu einer zusätzlichen Beschädigung der Oberleitungsanlage, so muss die Anlage nicht nur zur Bergung der verunfallten Personen und Fahrzeuge abgeschaltet werden, sondern ggf. ist die Abschaltung auch das Resultat einer beschädigten Komponente.
- **Vandalismus:** Vorsätzliche Beschädigungen der Komponenten einer Oberleitungsanlage sind denkbar und können eine entsprechende Abschaltung erforderlich machen.

Das Vorliegen von menschlichen Ursachen impliziert auch das Vorhandensein von Personen bzw. Fahrzeugen. Die Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage ist daher bei diesen Ursachen stets an eine vorausgegangene Freigabe gekoppelt, bspw. durch die Gefahrenabwehrbehörden (hier als Bergung bezeichnet) oder durch das Personal des Anlagenbetreibers.

Witterungsbedingte Ursachen

Eine Oberleitungsanlage ist den unterschiedlichen Witterungen konstant ausgesetzt. Starkregen- und Sturmereignisse sowie hohe Sonneneinstrahlungen können den Betrieb der Oberleitungsanlage beeinträchtigen. Folgende Ausfallursachen lassen sich in Bezug auf die Witterung identifizieren:

- **Beschädigung durch Witterung:** Witterungsereignisse können sich mechanisch auf die Komponenten auswirken und zu einer Beschädigung führen. In diesem Fall stellt die Wirkung der primären Ausfallursache eine sekundäre Ausfallursache, in diesem Fall eine mechanische Ursache, dar. In weiterer Verkettung führt die Beschädigung der Komponenten zu einer sicherheitsbedingten Abschaltung, welche durch das Oberleitungssystem selbst ausgelöst wird.

- **Extremwetterereignis:** Auch ohne einer vorausgegangenen Warnmeldung können Extremwetterereignisse auftreten und eine Abschaltung einer Oberleitungsanlage erfordern. Sofern diese keine Schäden durch das Ereignis erleidet, kann die Anlage nach dem Wetterereignis wieder in Betrieb genommen werden.
- **Extremwetterwarnung:** Das Aufkommen eines Extremwetterereignisses ist meist vorhersehbar. In diesem Fall wird durch den entsprechenden Wetterdienst eine Warnmeldung ausgegeben, wobei unterschiedliche Warnstufen unterschieden werden. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) differenziert die Wetterlage in insgesamt vier Warnstufen, wobei die höchste Stufe ein extrem gefährliches Unwetter voraussagt (DWD, 2024f). Beim Vorliegen einer Unwetterwarnung kann aus Gründen der Sicherheit eine zeitlich begrenzte Abschaltung durch den Anlagenbetreiber geplant werden.

Extremwetterereignisse stellen eine erwartbare, jedoch unplanbare Ausfallursache dar, welche in den kommenden Jahren an Relevanz gewinnen wird. Geeignete Sicherheitsvorkehrungen, wie bspw. eine automatische Abschaltung, sollten innerhalb der Störfallprogramme ausreichend Berücksichtigung finden.

Anlagenbedingte Ursachen

Anlagenbedingte Ausfallursachen können entweder durch eine vorausgegangene primäre Ausfallursache ausgelöst werden oder unabhängig von fremden (mechanischen) Einwirkungen auftreten. Folgende Ursachen können differenziert werden:

- **Beschädigung von Komponenten:** Umfasst die mechanische Beschädigung von relevanten Komponenten, welche zu einer Abschaltung führen. Dementsprechend führt die Wirkung der mechanischen Ursache zu einer (sekundären) elektrotechnischen Ausfallursache.
- **Materialermüdung:** Wenn Materialien über längere Zeit wiederholt belastet werden, können diese allmählich ihre strukturelle Integrität verlieren und aufgrund der Materialermüdung versagen (mechanische Ursache). Diese Ausfallursache ist besonders kritisch, da sie unerwartet auftritt und erhebliche Störungen verursachen kann. Eine Materialermüdung kann entsprechend zu fehlerhaften Komponenten führen (elektrotechnische Fehler).
- **Elektrotechnische Fehler:** Die elektrotechnischen Ursachen beziehen sich auf die elektrischen und elektronischen Komponenten sowie Systeme, hingegen die zuvor genannten mechanischen Ursachen die physischen und strukturellen Komponenten betreffen. Folgende Ursachen wurden identifiziert:
 - **Fehlerhafte Komponenten:** Fehlerhafte Komponenten versagen aufgrund von Produktionsfehlern oder Materialmängeln. Dies kann zu unvorhersehbaren Funktionsstörungen oder vollständigen Ausfällen des Systems führen.
 - **Isolationsfehler:** Isolationsfehler entstehen, wenn die Isolationsmaterialien von Kabeln oder Bauteilen beschädigt oder abgenutzt sind. Dies kann Kurzschlüsse und gefährliche Stromlecks verursachen, die sowohl Menschen als auch Geräte gefährden.
 - **Korrosion:** Korrosion tritt auf, wenn elektrische Kontakte und Verbindungen durch Feuchtigkeit oder chemische Reaktionen abgebaut werden. Dies kann den elektrischen Widerstand erhöhen und zu Funktionsstörungen oder vollständigen Ausfällen führen.

- **Stromschwankungen:** Stromschwankungen, auch als Spannungsschwankungen bekannt, können durch instabile Stromversorgung oder einen Lastwechsel im Netz verursacht werden. Diese Schwankungen können empfindliche elektronische Komponenten beschädigen oder deren Lebensdauer verkürzen.
- **Überspannung:** Überspannung entsteht durch plötzliche Spannungsspitzen, die oft durch Blitzschläge oder Schaltvorgänge im Netz verursacht werden. Diese Spannungsspitzen können elektronische Bauteile durchschlagen und dauerhafte Schäden verursachen.
- **Kurzschluss:** Ein Kurzschluss entsteht, wenn ein unerwünschter direkter Weg für den Stromfluss zwischen zwei Punkten unterschiedlichen Potentials entsteht. Dies kann durch defekte Isolierung oder mechanische Beschädigungen verursacht werden und führt oft zu plötzlichem Ausfall und möglichen Bränden.

Ungewünschte mechanische Einwirkungen sollten (sofern möglich) vorsorglich verhindert werden, bspw. durch Fahrzeugrückhaltesysteme oder erdverlegte Kabeltrassen. Die Durchführung regelmäßiger Wartung und Inspektionen sind entscheidend, um frühe Anzeichen von Materialermüdung zu erkennen und rechtzeitig Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Eine regelmäßige Wartung und Inspektion wirkt sich ebenfalls auf die Häufigkeit des Auftretens von elektrotechnischen Ursachen aus.

Ursachen in der Stromversorgung

Auch in Bezug auf die generelle Stromversorgung lassen sich Ursachen für eine Abschaltung identifizieren. Bei diesen Ursachen liegt kein Fehler bzw. keine Störung der Oberleitungsanlage vor, eine Abschaltung basiert maßgebend auf externalen Einflüssen. Folgende Ursachen wurden identifiziert:

- **Überlastung:** Überlastung tritt auf, wenn elektrische Geräte oder Leitungen mehr Strom führen müssen, als sie für längere Zeit sicher handhaben können. Dies kann zu Überhitzung und letztendlich zum Ausfall der betroffenen Komponenten führen. Um dies zu verhindern, werden bei einer zu hohen Leistung (zu hoher Strombezug) Sicherheitsabschaltungen vorgenommen.
- **Ausfall der Stromversorgung:** Der Ausfall der Stromversorgung kann durch Unterbrechungen im Netz oder Fehler in der Stromversorgungseinrichtung verursacht werden. Dies führt zu einem vollständigen Funktionsausfall der betroffenen elektrischen Systeme und Geräte.

Die einzelnen Ausfallursachen stehen in Abhängigkeit zueinander. So kann bspw. eine fehlerhafte Komponente die Korrosion begünstigen, welche letztlich zu einem Kurzschluss der Anlage führt. Sofern die Ausfallursachen rechtzeitig entdeckt oder durch das System selbst erkannt werden können, ist die Durchführung einer Sicherheitsabschaltung möglich, um eine Reparatur bzw. einen Austausch der fehlerhaften Komponente vorzunehmen. Bei einem Kurzschluss wird hingegen ein Systemabsturz die Folge sein, beim Ausfall der übergeordneten Stromversorgung liegt jedoch keine Störung in der Oberleitungsanlage selbst vor und sie kann nach der Behebung des Problems wieder eingeschaltet werden.

Abgleich mit den Ausfällen im Realbetrieb

Nachdem die jeweiligen Ursachen umfangreich dokumentiert sind, werden die im Feldversuch aufgetretenen Abschaltungen diesen Ursachen zugeordnet, um das Gesamtbild bzgl. der Verteilung der Abschaltungen zu erhalten (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Anzahl der identifizierten Abschaltungen, differenziert nach Ausfallursache und Jahr (eigene Darstellung).

Kategorie	Ausfallursache	2019 ($\Sigma=41$)	2020 ($\Sigma=31$)	2021 ($\Sigma=29$)	2022 ($\Sigma=50$)	Summe ($\Sigma=151$)
Organisatorische und betriebliche Ursachen	Inspektion und Wartung	1	4	0	2	7
	Kommunikationsausfall	1	2	3	0	6
	Anforderung durch Dritte	1	14	9	19	43
	Straßenbetriebliche Aktivitäten	0	0	2	2	4
	Arbeitsstätten	2	2	3	17	24
	Innerbetriebliche Prozesse	29*	1	5	5	40
	Betriebsnotwendige Abschaltungen	1	1**	0	4	6
Menschliche Ursachen	Unerlaubter Zutritt Dritter	0	0	0	0	0
	Unfallereignis ohne Beschädigung	2	0	1	0	3
	Unfallereignis mit Beschädigung	0	7	0	0	7
	Vandalismus	0	0	0	0	0
Witterungsbedingte Ursachen	Beschädigung durch Witterung	1	0	0	0	1
	Extremwetterereignis	2	0	0	0	2
	Extremwetterwarnung	0	0	0	1	1
Anlagenbedingte Ursachen	Beschädigung von Komponenten	0	0	0	0	0
	Materialermüdung	0	0	0	0	0
	Elektrotechnische Fehler	1	0	6	0	7
Stromversorgung	Überlastung	0	0	0	0	0
	Ausfall der Stromversorgung	0	0	0	0	0

*Abschaltung über den Jahreswechsel von 2019 zu 2020; **Abschaltung über den Jahreswechsel von 2020 zu 2021.

Die 151 erfassten Ausfallursachen lassen sich größtenteils den organisatorischen und betrieblichen Ursachen zuordnen, wobei insbesondere die Anforderungen zur Abschaltung durch Dritte (bspw. Energieversorger und Gefahrenabwehrbehörden), die innerbetrieblichen Prozesse und die Arbeitsstätten eine zentrale Rolle spielen. Menschliche Ursachen sind weitestgehend Straßenverkehrsunfälle, die unabhängig von einer Beschädigung der Oberleitungsanlage zu ihrer Abschaltung führten. Eine Abschaltung aufgrund eines unerlaubten Betretens der Oberleitungsanlage oder der Grundstücke der Unterwerke sowie aufgrund von

Vandalismus konnte im Betrachtungszeitraum nicht beobachtet werden. In Bezug auf die witterungsbedingten Ursachen zeigt sich, dass alle drei aufgeführten Kategorien abgedeckt werden können und somit der Einfluss der Witterung umfassend betrachtet werden kann. Störungen, welche durch die Komponenten der Oberleitungsanlage selbst aufgetreten sind, konnten nur vereinzelt festgestellt werden, wobei keine mechanische Ursache aufgetreten ist. Eine Überlastung oder ein Ausfall der Stromversorgung aufgrund externaler Ursachen sind im Betrachtungszeitraum nicht aufgetreten.

Durch die vergleichende Betrachtung wird ersichtlich, dass für einen Großteil an Ursachen Analysedaten im Feldversuch ELISA vorhanden sind, so dass die Untersuchungen zu den Wirkungszusammenhängen eine umfassende Bandbreite unterschiedlicher Einflüsse umfassen können. Aber auch die nicht erfassten bzw. nicht aufgetretenen Ausfallursachen liefern zumindest den Interpretationsspielraum zur Bewertung der Wichtigkeit dieser Ursachen, da die Eintrittswahrscheinlichkeit unter aktuellen Rahmenbedingungen scheinbar gering ist. Im weiteren Schritt werden zusätzliche Differenzierungsmerkmale der Ursachen aufgezeigt, und es wird eine Kategorisierung für die fortführenden Analysen vorgenommen.

Bildung der Kategorisierung

Zur weiteren Differenzierung der Ausfallursachen bietet sich eine Unterscheidung zwischen internen und externen sowie vorhersehbaren und unvorhersehbaren Ausfallursachen an. Zu den externen Ursachen zählen Ausfallzeiten, die nicht durch das Oberleitungssystem selbst verursacht werden. Dies sind z.B. Verkehrsstörungen, wie Unfälle oder Großraumtransporte, die eine Abschaltung der Stromversorgung erforderlich machen, und Witterungseinflüsse, die Beschädigungen an der Oberleitungsanlage verursachen können. Interne Ursachen für eine Abschaltung treten demgegenüber ohne eine Einwirkung von außen auf. Dies ist bspw. der Fall, wenn eine Störung im Unterwerk auftritt oder die Oberleitungsanlage für eine Reparatur oder Wartung abgeschaltet werden muss.

Für eine dezidierte Analyse werden die Kategorien nach vorhersehbaren (planbaren) und unvorhersehbaren (nicht planbaren) Ursachen differenziert. So ist bspw. die Reparatur oder Wartung vorhersehbar und planbar, hingegen eine Störung im Unterwerk für gewöhnlich unvorhersehbar und somit nicht planbar auftreten wird. Bei zusätzlicher Betrachtung der Ursachenherkunft – Witterung, Verkehr, Anlagenbetrieb – lassen sich insgesamt sechs Kategorien unterscheiden, in welche die jeweiligen Ausfallursachen nach Tabelle 4 eingeordnet werden können. Folgende Kategorien wurden gebildet:

- **Störungsbedingte Ausfallursachen** (internal / unvorhersehbar): Ausfallursachen des Oberleitungssystems, bei denen die Ursache für die Störung aus dem System selbst und seiner Beschaffenheit resultiert. Störungsbedingte Ausfallursachen treten dabei ohne äußere Einflüsse auf und sind unvorhersehbar und somit nicht planbar. Dazu gehören z.B. allgemeine Störungen im OCL-System.
- **Wartungsbedingte Ausfallursachen** (internal / vorhersehbar): Ausfallursachen der Anlage aufgrund von geplanten Inspektions- und Wartungsarbeiten an der Oberleitungsanlage. Sind nach einer störungs- oder unfallbedingten Abschaltung zusätzliche (außerplanmäßige) Wartungsarbeiten erforderlich, z. B. Reparatur oder Austausch von Komponenten, so werden diese aufgrund der Kausalität nicht den wartungsbedingten, sondern den störungs- oder unfallbedingten Ausfallzeiten zugeordnet.

- **Unfallbedingte Ausfallursachen** (external / unvorhersehbar): Ausfallursachen des Systems aufgrund mechanischer Einwirkungen auf die Oberleitung (z. B. Unfallereignis mit Beschädigung der Fahrleitung) und aufgrund gezielter (meist kurzfristiger) Abschaltungen der Oberleitung zur Bergung von Pannenfahrzeugen und zur Brandbekämpfung bei Fahrzeugbränden. Häufig werden die unfallbedingten Abschaltungen durch eine Anforderung der Katastrophenschutzbehörden bei einem Unfall im Bereich der Oberleitungsanlage ausgelöst. Auch die erforderliche Zeit für notwendige Reparaturarbeiten nach einem Unfallereignis mit Beschädigung der Oberleitung wird den unfallbedingten Ausfallzeiten zugeordnet.
- **Witterungsbedingte Ausfallursachen** (external / unvorhersehbar): Ausfallursachen der Anlage, welche auf die Witterungsbedingungen (Windgeschwindigkeit, Temperatur, Niederschlag usw.) zurückgeführt werden können. Dies umfasst bspw. witterungsbedingte Beschädigungen an der Oberleitungsanlage oder manuelle Abschaltungen, bspw. aufgrund einer erhöhten Betriebstemperatur im Unterwerk oder aufgrund einer ausgegebenen Sturmwarnung.
- **Arbeitsstättenbedingte Ausfallursachen** (external / vorhersehbar): Ausfallursachen der Anlage, die aufgrund von Baumaßnahmen im Streckenbereich erforderlich sind und eine Abschaltung der Oberleitungsanlage erfordern. Dies umfasst bspw. die Durchführung von Ausbesserungsarbeiten am Fahrbahnbelag, von Instandsetzungsarbeiten an den vorhandenen Brückenbauwerken sowie die Installation von Verkehrskameras am Fahrbahnrand. Da Arbeitsstätten im Verkehrsbereich geplant und beantragt werden müssen, handelt es sich um vorhersehbare Ausfälle der Anlage.
- **Betriebs- und systembedingte Ausfallursachen** (external / unvorhersehbar oder vorhersehbar): Ausfallursachen der Anlage, die durch eine nicht vorhandene Betriebsmöglichkeit, bspw. an Brückentagen im 8/5-Betrieb innerhalb der Einführungsphase, durch ungeplantes Fehlen von Betriebspersonal, durch Störungen in der Betriebszentrale oder in der Kommunikationsschnittstelle zum Unterwerk entstehen. Auch menschliches Versagen ist den betriebs- und systembedingten Ausfallursachen zuzuordnen. Betriebs- und systembedingte Ausfallursachen können sowohl unvorhersehbar als auch vorhersehbar auftreten.

Basierend auf den entwickelten Kategorien werden im weiteren Schritt die Unfallursachen analysiert. Die vollständige Zuordnung der jeweiligen Ausfallursachen zu den Kategorien kann dem Anhang A.II entnommen werden.

5.6 Analyse der Ausfallursachen

Innerhalb der Analyse der Ausfallursachen werden im ersten Schritt die Anteile der Dauer der Ausfälle der jeweiligen Kategorien je Fahrtrichtung ermittelt und betrachtet. In Abbildung 25 sind die Anteile für die Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) dargestellt.

Die Verteilung der Ausfallursachen in den jeweiligen Jahren zeigt zunächst große Unterschiede auf. In der Einführungsphase (im Jahr 2019) weisen über zwei Drittel aller Ausfallzeiten eine betriebs- und systembedingte (43,8 %) oder eine witterungsbedingte Ursache (30,7 %) auf. Es ist zu beachten, dass aufgrund des eingeschränkten Betriebs in der Einführungsphase auch die gesamte Ausfallzeit vergleichsweise gering ist (320,4 Stunden). Die betriebs- und systembedingten Ausfallursachen tragen im Regelbetrieb nur noch zu einem geringen Anteil an der gesamten Ausfallzeit bei. Im Jahr 2020 überwiegen die unfallbedingten Ausfallursachen

(94,6 %), hingegen im Jahr 2021 die störungsbedingten Ausfallursachen (64,1 %) und im Jahr 2022 die arbeitsstättenbedingten Ausfallursachen (62,1 %) die größten Anteile aufweisen.

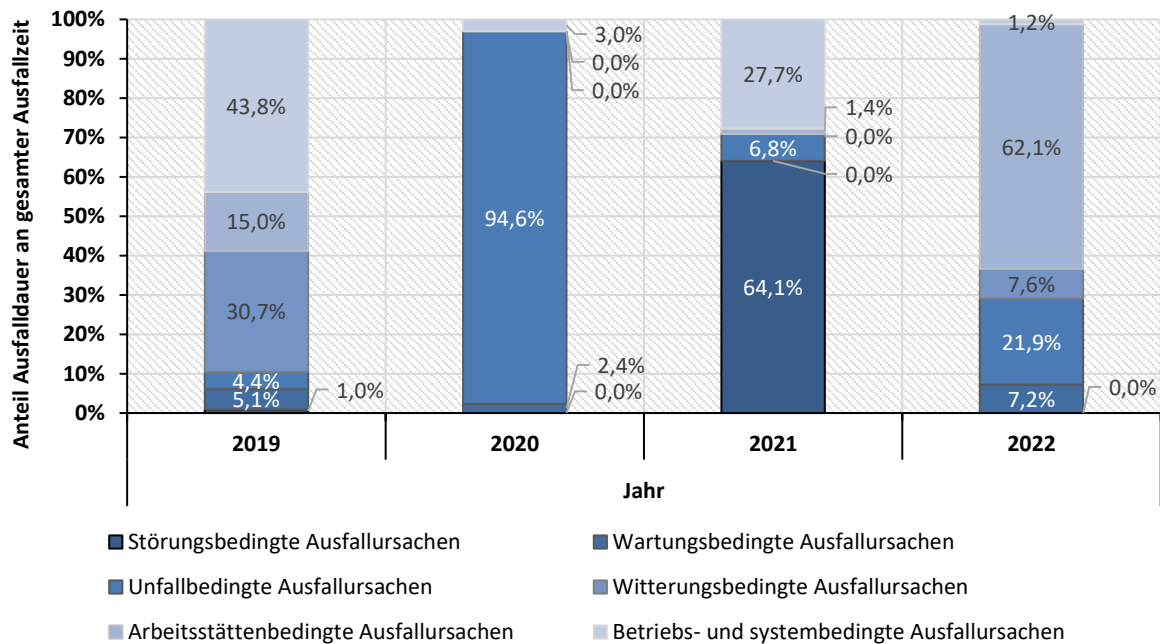


Abbildung 25: Anteil der Ausfalldauer nach Kategorien der Ausfallursachen in Fahrtrichtung Süd (eigene Darstellung).

Die in Abschnitt 5.4 beschriebenen fünf längsten Ausfallursachen decken sich mit Abbildung 25 und verdeutlichen den Einfluss dieser auf die gesamte Ausfallzeit. In Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) führt jedoch weiterhin der Ausbau der Oberleitungsstrecke und der damit verbundenen notwendigen Abschaltung der Anlage zu einem hohen Anteil der Ausfalldauer (arbeitsstättenbedingte Ursachen).

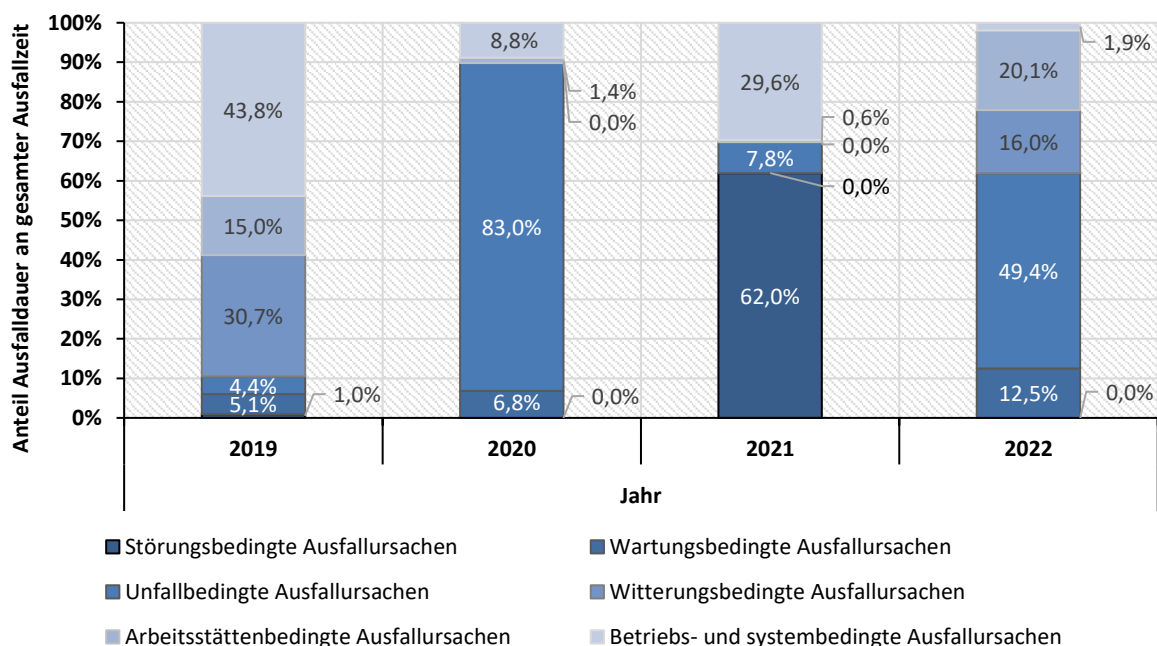


Abbildung 26: Anteil der Ausfalldauer nach Kategorien der Ausfallursachen in Fahrtrichtung Nord (eigene Darstellung).

Abbildung 26 führt die Anteile der Ausfalldauer der Kategorien der Ausfallursachen in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) auf. Das Jahr 2019 ist identisch zur Fahrtrichtung Süd (Darmstadt), da eine getrennte Abschaltung der Fahrtrichtungen erst ab dem 14.02.2020 möglich war (halbseitiger Betrieb, vgl. Abschnitt 5.1). Durch die Möglichkeit der Schaltung der Anlage in nur eine Fahrtrichtung konnte im Jahr 2020 die Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) nach dem Unfallereignis früher als die Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) wieder in Betrieb genommen werden, so dass die unfallbedingten Ausfallursachen einen geringeren Anteil aufweisen (83,0 %). Ein merklicher Unterschied zwischen beiden Fahrtrichtungen ist im Jahr 2022 erkennbar. Da nur in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) die Oberleitungsanlage erweitert wird, war in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) eine geringere Anzahl an Eingriffen erforderlich. Die arbeitsstättenbedingten Ausfallursachen (20,1 %) bilden nur die zweithäufigste Kategorie der Ursachen. Der größte Anteil der Ausfallzeit unterliegt unfallbedingten Ausfallursachen (49,4 %).

In Tabelle 7 sind die absoluten Werte der Ausfallzeiten der jeweiligen Kategorien dargestellt. Besonders deutlich werden die Werte beim Vergleich der Jahre. So weisen die unfallbedingten Ausfallursachen in 2020 und die störungsbedingten Ausfallursachen in 2021 sehr hohe Ausfallzeiten auf, welche im Vergleich zu den anderen Jahren als Extremwerte verstanden werden können. Die unfallbedingten Ausfallursachen liegen in den Vergleichsjahren lediglich im Bereich zwischen 14,2 Stunden und 200,8 Stunden, wobei der Wert von 14,2 Stunden aufgrund der Einführungsphase und dem eingeschränkten Untersuchungszeitraum nicht repräsentativ ist. Bei den störungsbedingten Ausfallursachen liegen bei den Vergleichsjahren maximale Ausfallzeiten von 3,1 Stunden vor.

Tabelle 7: Gesamte Ausfallzeiten in Stunden je Kategorie pro Jahr (eigene Darstellung).

Jahr	2019		2020		2021		2022	
Fahrtrichtung	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord
Gesamte Ausfallzeit [h]	320,4	320,5	2703,6	934,5	1748,0	1634,6	852,4	406,5
Störungsbedingte Ausfallursachen [h]	3,1	3,1	0,0	0,0	1119,8	1012,8	0,0	0,0
Wartungsbedingte Ausfallursachen [h]	16,3	16,3	63,8	63,8	0,0	0,0	61,5	50,9
Unfallbedingte Ausfallursachen [h]	14,2	14,2	2557,3	775,4	118,9	127,7	186,3	200,8
Witterungsbedingte Ausfallursachen [h]	98,5	98,5	0,0	0,0	0,0	0,0	64,9	64,9
Arbeitsstättenbedingte Ausfallursachen [h]	48,0	48,0	0,1	12,9	25,1	9,8	529,2	81,8
Betriebs- und systembedingte Ausfallursachen [h]	140,4	140,4	82,3	82,3	484,2	484,3	10,5	7,9

Betrachtungszeitraum: 07.05.2019 bis 31.12.2022

Auch die arbeitsstättenbedingten Ausfallursachen, mit einer Ausfallzeit von 529,2 Stunden in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) bzw. 81,8 Stunden in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) im Jahr 2022, sind vergleichsweise überhöht aufgrund der Erweiterung der Oberleitungsanlage. Diese

liegen in den Vergleichsjahren bei 0,1 Stunden bis 48,0 Stunden, wobei auch die Extremwerte der Vergleichsjahre eher Ausnahmewerte sind. So entstehen die 48 Stunden insbesondere aufgrund der Restarbeiten nach der Errichtung der Oberleitungsanlage.

Die hier aufgeführten absoluten Werte dienen als Ausgangspunkt der Analyse der Wirkungszusammenhänge im folgenden Kapitel 6. Ziel ist es, auf Grundlage der aufgetretenen Ausfallursachen und Ausfallzeiten die Zusammenhänge auf die Verfügbarkeit darzustellen, um somit die potenzielle Verfügbarkeit einer zukünftigen Oberleitungsanlage abschätzen zu können.

5.7 Zwischenfazit

In Kapitel 5 wurden basierend auf den Herausforderungen der groß-technischen Systeme die Grundlagen zur Analyse der Ausfallursachen beschrieben und im weiteren Verlauf die Anlagenverfügbarkeit ermittelt sowie die im Feldversuch aufgetretenen Ausfallursachen identifiziert, kategorisiert und dargestellt. Die deskriptive Analyse der Anlagenverfügbarkeit zeigt dabei nicht nur, dass diese im Betrachtungszeitraum für die einzelnen Jahre sowie die jeweiligen Fahrtrichtungen sehr unterschiedlich hoch ist, sondern insbesondere auch, dass einzelne Ereignisse einen maßgebenden Einfluss aufweisen. Dabei ist nicht nur zu beachten, wie groß der Einfluss ist, sondern viel mehr, wie oft und mit welchen Auswirkungen diese Ereignisse bzw. die jeweiligen Ausfallursachen aufgetreten sind. Die Analysen wurden durch die Erarbeitung eines umfassenden Anlagenbetriebstagebuchs unterstützt, welches basierend auf den Daten aus dem Unterwerk und durch die Nutzung zusätzlicher Daten des Anlagenbetreibers den gesamten operativen Betrieb im Betrachtungszeitraum widerspiegelt.

6 Analyse der Wirkungszusammenhänge

6.1 Identifikation limitierender Ausfallursachen

Nachdem in Kapitel 5.3 die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage und in Kapitel 5.4 die Ausfallursachen betrachtet wurden, werden in diesem Kapitel die Häufigkeiten der jeweiligen Ausfallursachen sowie die Ausfalldauer im Zusammenhang analysiert, um die **limitierenden Ausfallursachen** zu identifizieren. Hierbei werden die Häufigkeiten und die mittlere Ausfalldauer der Ausfallursachen auf Grundlage der eingetretenen Ereignisse im Betrachtungszeitraum ermittelt. Mit dem Abschnitt 6.1 wird ein erster Beitrag zur Beantwortung der Forschungsfragen (vgl. Abschnitt 4.1.2) geleistet.

Für die Berechnungen wurde basierend auf dem Anlagenbetriebstagebuch eine Liste der Betriebsunterbrechungen erstellt (siehe Anhang A.III), welche alle eingetretenen Abschaltungen bzw. die Ursachen für die Ausfallzeiten der Anlage dokumentiert. Im Unterschied zu den Darstellungen in Kapitel 5.4, in welchem die gesamte Dauer der Ausfallursachen über die Ein- und Ausschaltzeiten ermittelt wurden, werden in der Liste der Ereignisse die zusätzlichen (kurzen) Ausschaltzeiten aufgrund des Umsetzens eines halbseitigen Anlagenbetriebs (vgl. Abschnitt 5.1) nicht mitbetrachtet, so dass die Gesamtsummen nicht identisch sind¹².

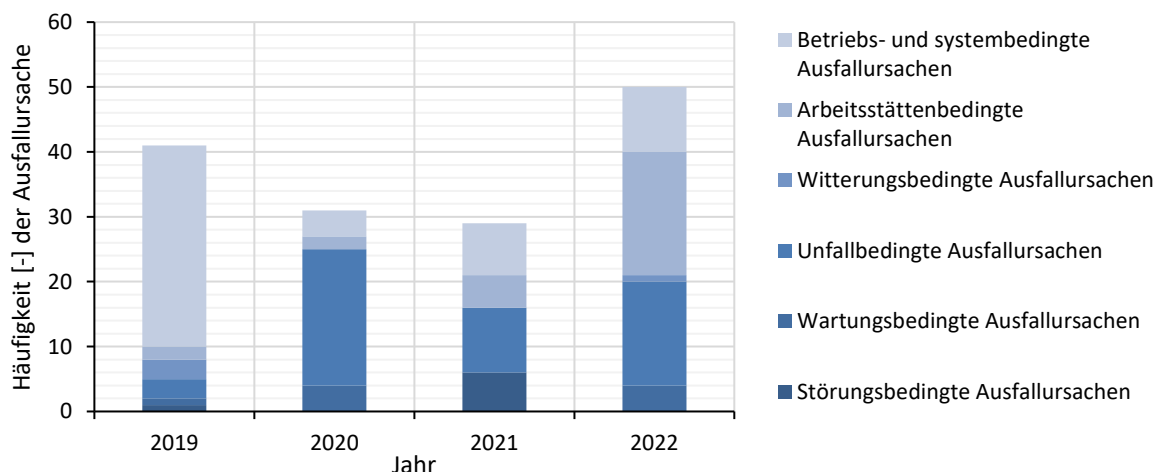


Abbildung 27: Häufigkeiten von Ausfällen der Oberleitungsanlage (kategorisiert) im jeweiligen Betrachtungsjahr (eigene Darstellung).

In Abbildung 27 sind die Häufigkeiten der eingetretenen Ausfallursachen der Anlage je Jahr und bezogen auf die Kategorien nach Abschnitt 5.5 dargestellt. Die Anzahl der Ausfallursachen variiert im Betrachtungszeitraum zwischen 29 Ausfallursachen in 2021 bis zu 50 Ausfallursachen in 2022. Insgesamt konnten 151 Ausfallursachen identifiziert werden.

Innerhalb der Einführungsphase (vgl. Abschnitt 5.1) konnten 31 **betriebs- und systembedingte Ausfallursachen** identifiziert werden. Dies entspricht einem Anteil von 75,6 % in 2019. Die Anzahl der betriebs- und systembedingte Ausfallursachen ist im Regelbetrieb deutlich geringer und weist einen Anteil von maximal 27,6 % in 2021 auf. Der

¹² Die Abweichung beträgt über den Betrachtungszeit insgesamt 1,27 Stunden und somit 0,014 % von 8920,35 Stunden gesamter Ausfallzeit (vgl. Tabelle 4 auf Seite 61). Die gesamte Ausfallzeit nach der Liste der Betriebsunterbrechungen beträgt 8919,08 Stunden (vgl. Anhang A.III).

hohe Anteil in 2019 ist maßgeblich auf die Bedienung der Oberleitungsanlage zurückzuführen, da 15 der 31 Ausfallursachen auf ein verspätetes Einschalten oder ein verfrühtes Ausschalten zurückzuführen sind. Im Regelbetrieb hingegen sind die meist kurzen Abschaltungen bspw. auf die Einübung des Schaltvorgangs bei den Operatoren zurückzuführen.

Arbeitsstättenbedingte Ausfallursachen konnten ebenfalls in jedem Jahr innerhalb des Betrachtungszeitraums festgestellt werden. Während in den Jahren 2019 und 2020 jeweils zwei Abschaltungen zu verzeichnen sind, erhöht sich die Anzahl auf fünf in 2021 und auf 19 in 2022. Die erhöhte Anzahl im Jahr 2021 resultiert aus der Erweiterung des Streckenabschnitts um zusätzliche Kameras zur Verkehrsbeobachtung, im Jahr 2022 sind insbesondere die Erweiterung der ELISA-Teststrecke (11 Abschaltungen) sowie die durchgeführten bautechnischen Prüfungen und Instandhaltungsarbeiten von Brückenbauwerken (5 Abschaltungen) die hauptsächlichen Ursachen der notwendigen Abschaltungen.

Witterungsbedingte Ausfallursachen der Oberleitungsanlage traten nur im Jahr 2019 und im Jahr 2022 auf. Grund der beiden Abschaltungen im Jahr 2019 waren die hohen Außentemperaturen in Verbindung mit einem freistehenden und nicht beschatteten Unterwerk, so dass die Rauminnentemperatur im Unterwerk einen definierten kritischen Wert erreichte und die Abschaltung der gesamten Oberleitungsanlage auslöste, gleichwohl keine Gefährdung im Betrieb der Oberleitungsanlage bestand. Im Jahr 2022 hingegen wurde die Anlage vorsorglich aufgrund einer Sturmwarnung abgeschaltet und nach dem Sturmereignis, welches zu keiner Beschädigung der Anlage führte, wieder in Betrieb genommen.

Auch die **unfallbedingten Ausfallursachen** treten regelmäßig auf, jedoch ist die Anzahl im Jahr 2019, nicht nur aufgrund des für das Jahr eingeschränkten Betrachtungszeitraumes, sondern insbesondere aufgrund der gewählten Betriebsstrategie, mit nur drei Abschaltungen am geringsten. Im Jahr 2020 weisen die unfallbedingten Ausfallursachen, bedingt durch einen Unfall mit einer Beschädigung der Anlage sowie den erforderlichen Reparaturarbeiten, mit 21 Abschaltungen nicht nur den höchsten Wert im Betrachtungszeitraum auf, sondern mit zwei Drittel auch den größten Anteil in 2020. Von den erfassten 50 Abschaltungen über den gesamten Zeitraum sind 43 Abschaltungen auf eine Anforderung der Gefahrenabwehrbehörden zurückzuführen.

Abschaltungen der Oberleitungsanlage aufgrund von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten (**wartungsbedingte Ausfallursachen**) traten im Betrachtungszeitraum regelmäßig auf. Es ist zu beachten, dass im Jahr 2021 die notwendigen Wartungsarbeiten im Rahmen der Reparaturarbeiten an der Anlage infolge des Austauschs der Isolatoren (2021) durchgeführt wurden und entsprechend nicht explizit in der Liste der Ereignisse aufgeführt werden. Die in 2022 aufgezeigte Anzahl an Abschaltungen ($n = 4$) umfassen neben den beiden Tagen für die Inspektion und Wartung der Oberleitungsanlage auch zwei Wartungstage durch den Energieversorgungsnetzbetreiber.

Störungsbedingte Ausfallursachen traten im Betrachtungszeitraum maßgebend im Jahr 2021 auf. Hier waren insgesamt fünf Abschaltungen allein für den Austausch der defekten Isolatoren (März) und für den Austausch aller Isolatoren (November und Dezember) notwendig. Die sechste Abschaltung in 2021 diente dem Austausch von defekten Sensoren und dauerte lediglich drei Stunden. Eine weitere störungsbedingte Abschaltung erfolgte in 2019. Diese basierte auf einem Verdrahtungsfehler im Unterwerk, welcher eine Fehlermeldung zur Folge hatte und entsprechend behoben werden musste.

Neben der kategorialen Betrachtung der Häufigkeiten der Ausfälle können diese auch differenziert nach geplanter und ungeplanter Abschaltung sowie bezogen auf die abgeschaltete Fahrtrichtung betrachtet werden. Abbildung 28 zeigt diese differenzierte Betrachtungsweise auf.

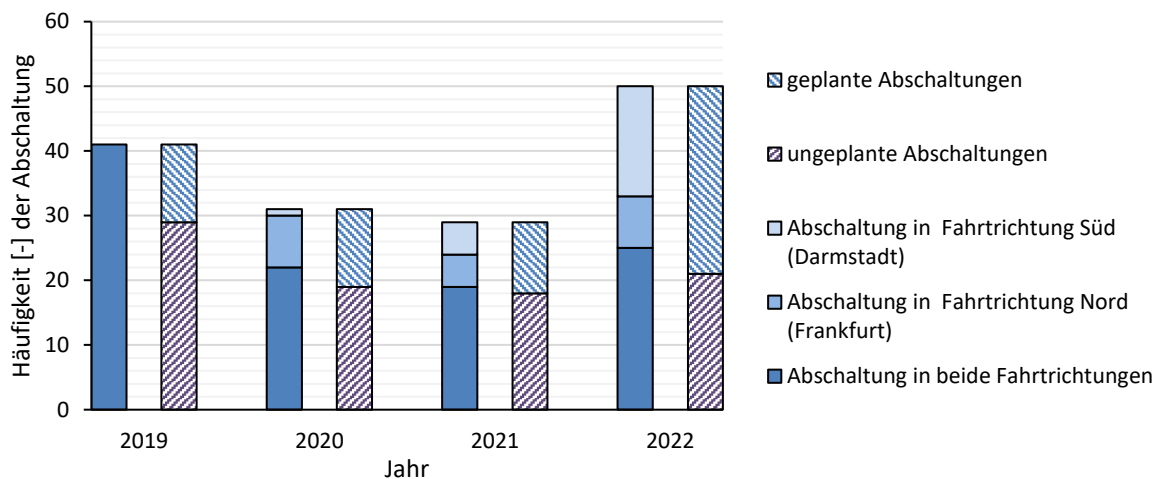


Abbildung 28: Häufigkeiten von Abschaltungen der Oberleitungsanlage (ungeplant und geplant) der jeweiligen Fahrtrichtung und im jeweiligen Betrachtungsjahr (eigene Darstellung).

Während im Jahr 2019 eine **getrennte Schaltung der Oberleitungsanlage** in die jeweiligen Fahrtrichtungen technisch noch nicht möglich war, so zeigt sich, dass auf diese Möglichkeit nach der Implementierung immer mehr zurückgegriffen wurde. So wurde in 2022 die Anlage nur noch an 50 % aller Abschaltungen für beide Fahrtrichtungen stromlos geschaltet, gleichwohl es in diesem Jahr aufgrund der Erweiterung der ELISA-Teststrecke zu einer deutlich erhöhten Anzahl an geplanten Abschaltungen in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) gekommen ist. Der geringe Anteil an Abschaltungen in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) in 2020 basiert auf der Tatsache, dass aufgrund des Unfallereignisses die Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) über einen längeren Zeitraum nicht eingeschaltet werden konnte.

Da eine Anforderung der Gefahrenabwehrbehörden stets zu einer beidseitigen Abschaltung der Oberleitungsanlage führt und jene Abschaltung bezogen auf die **Planbarkeit** unvorhersehbar auftritt, korrelieren diese Häufigkeiten miteinander. Insgesamt konnten über den Betrachtungszeitraum jedoch 64 Abschaltungen aufgezeichnet werden, welche geplant durchgeführt wurden. Dies entspricht etwa 42 %.

Um die **limitierenden Ausfallursachen** identifizieren zu können, wird im nächsten Schnitt die mittlere Ausfalldauer der Ausfallursachen bestimmt. Hierzu werden die Dauer der jeweiligen Ausfallursache summiert und durch die Häufigkeit dividiert. Die über die Liste der Ereignisse ermittelten Werte können dem Anhang A.IV entnommen werden. Die Ergebnisse bezogen auf die kategorisierten Ausfallursachen sind in Abbildung 29 und für die einzelnen Ereignisse in Abbildung 30 dargestellt. Im Kontext dieser Arbeit ist eine limitierende Ausfallursache als solche zu verstehen, welche einen maßgeblichen Einfluss auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage aufweist, indem diese entweder zu einem längeren Ausfallzeitraum oder zu häufigen Abschaltungen führt.

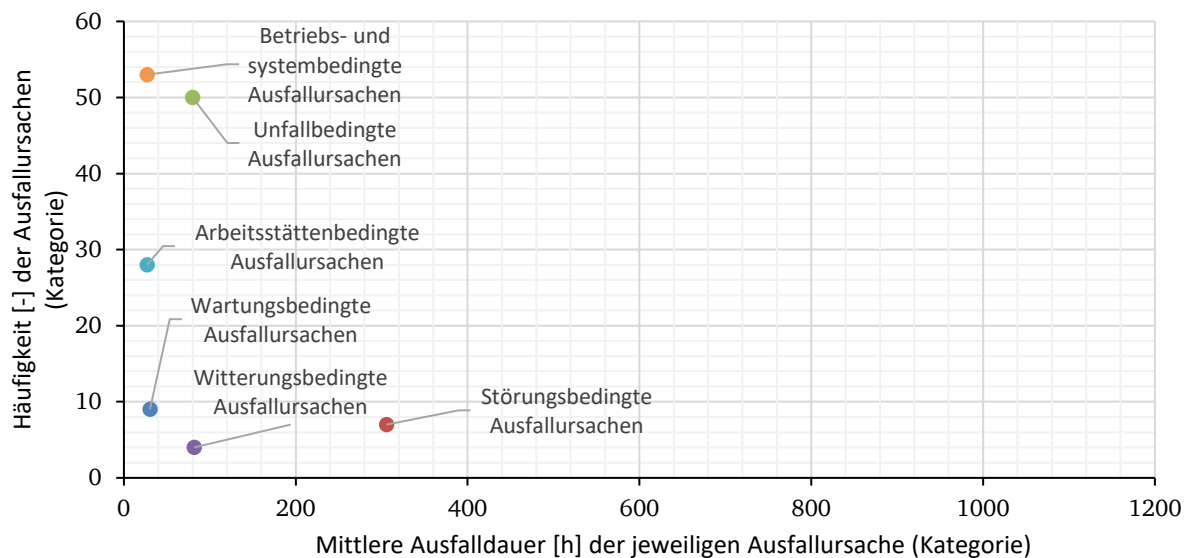


Abbildung 29: Mittlere Ausfalldauer (Mittelwerte in Stunden) und Häufigkeit der Ausfallursachen (kategoriale Betrachtung) im Betrachtungszeitraum (eigene Darstellung).

Bei Betrachtung der Häufigkeit und mittleren Ausfalldauer der kategorisierten Ausfallursachen nach Abbildung 29 zeigen die störungsbedingten Ausfallursachen einen vergleichsweise hohen Wert bei der mittleren Ausfalldauer (ca. 305,5 Stunden) bei gleichzeitig geringer Häufigkeit (7 Ereignisse). Das bedeutet, dass einzelne Störungsereignisse maßgeblich die Verfügbarkeit beeinflussen. Die zweithöchste mittlere Ausfalldauer resultiert aus den witterungsbedingten Ausfallursachen (ca. 81,7 Stunden), welche jedoch nur selten auftreten (4 Ereignisse), hingegen die dritthöchste mittlere Ausfalldauer aus unfallbedingten Ereignissen stammt (ca. 81,1 Stunden, 49 Ereignisse). Die mittlere Ausfalldauer der übrigen Kategorien liegt im Bereich zwischen ca. 25,0 Stunden (wartungsbedingt) und ca. 27,1 Stunden (betriebs- und systembedingt).

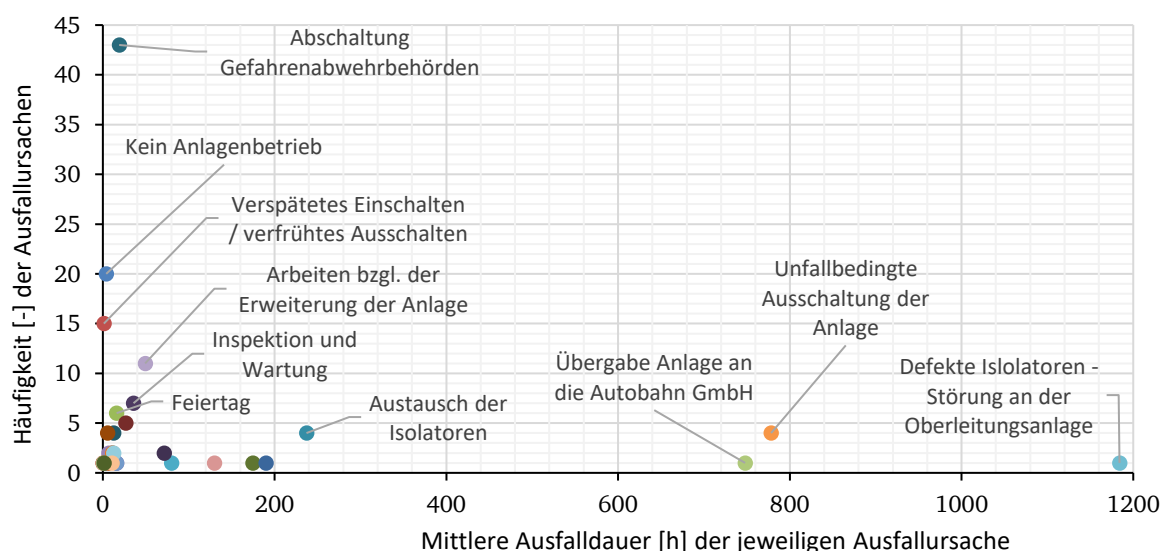


Abbildung 30: Mittlere Ausfalldauer (Mittelwerte in Stunden) und Häufigkeit der Ausfallursachen im Betrachtungszeitraum (eigene Darstellung).

Abbildung 30 führt alle aufgezeichneten Ausfallursachen (N = 32) auf (vgl. Tabelle 4 Seite 63). Der Großteil der Ausfallursachen (n = 22) liegt im Bereich zwischen einer Häufigkeit von 1 bis

5 und einer mittleren Ausfalldauer von bis zu 200 Stunden, wobei zu beachten ist, dass der Betrachtungszeitraum von Mai 2019 bis Dezember 2022 zu Grunde gelegt ist.

In Bezug auf die Häufigkeit lassen sich folgende sechs Ausfallursachen als limitierend einstufen:

- Abschaltungen aufgrund Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden (n = 43)
- Abschaltungen ohne erkennbaren Grund (n = 20)
- Verspätetes Einschalten oder verfrühtes Ausschalten in der Einführungsphase (n = 15)
- Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage (n = 11)
- Inspektion und Wartung (n = 7)
- Abschaltungen aufgrund von Feiertagen in der Einführungsphase (n = 6)

Die Betrachtung der mittleren Ausfalldauer liefert folgende vier limitierende Ausfallursachen:

- Defekte Isolatoren – Störung an der Oberleitungsanlage (n = 1, $t_M = 1183,96$ h)
- Unfallbedingte Abschaltungen der Anlage (n = 4, $t_M = 778,21$ h)
- Übergabe der Anlage an die Autobahn GmbH (n = 1, $t_M = 747,97$ h)
- Austausch der Isolatoren (n = 4, $t_M = 237,12$ h)

Die aufgeführten zehn Ausfallursachen führten im operativen Betrieb zu einer Ausfallzeit von 7.676,97 Stunden (87,2 % bezogen auf die gesamte Ausfallzeit im Betrachtungszeitraum) und spiegeln demnach sehr relevante Einflüsse auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage wider. Um zukünftig eine hohe Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage zu erhalten, werden in Kapitel 6.3 diese Einflüsse näher untersucht, wodurch erste Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb abgeleitet werden können. Hierzu werden folgende Zusammenhänge (Z) betrachtet:

Z1: Der Einfluss der Betriebsstrategie auf den Anlagenbetrieb

Der Betrieb der Anlage in der Einführungsphase führte zu einem erheblichen hohen Anteil an ungeplanten Abschaltungen bzw. Ausfallzeiten. Demgegenüber lassen sich planbare Ereignisse, wie bspw. die Inspektion und Wartung, in jenen Zeitraum schieben, in welchem kein operativer Anlagenbetrieb durchgeführt wird. Der Einfluss der Betriebsstrategie wird in Abschnitt 6.3.1 behandelt. Hierbei werden folgende limitierende Ausfallursachen betrachtet:

- Abschaltungen ohne erkennbaren Grund
- Verspätetes Einschalten oder verfrühtes Ausschalten
- Abschaltungen aufgrund von Feiertagen

Bezogen auf die entwickelten Kategorien umfassen die Untersuchungen insbesondere die betriebs- und systembedingten, die arbeitsstättenbedingten sowie die wartungsbedingten Ausfallursachen.

Z2: Der Einfluss unerwarteter Ausfallursachen auf den Anlagenbetrieb

Bei den unerwarteten Ausfallursachen handelt es sich um jene Ursachen, welche im Vorfeld nicht in ihrem Vorkommen bekannt waren. Bei der Entwicklung neuer Technologien werden diese unerwarteten Probleme und Schwierigkeiten auch als "Kinderkrankheiten" bezeichnet, welche in den frühen Stadien der Einführung oder Implementierung selbst dann auftreten können, wenn die entsprechende Technologie bereits umfassend getestet wurde. Der Einfluss der unerwarteten

Ausfallursachen wird in Abschnitt 6.3.2 behandelt, wobei folgende limitierende Ausfallursachen betrachtet werden:

- Defekte Isolatoren – Störung an der Oberleitungsanlage
- Unfallbedingte Abschaltung der Anlage
- Übergabe der Anlage an die Autobahn GmbH
- Austausch der Isolatoren

Zu den unerwarteten Ausfallursachen zählen in erster Linie die Abschaltungen aufgrund der Störungen im Betrieb der Anlage durch die korrodierten Isolatoren, welche unter die störungsbedingten Ausfallursachen fallen. Darüber hinaus sind unerwartet lange Ausfallzeiten im Bereich der unfallbedingten sowie der betriebs- und systembedingten Ereignisse festzustellen, welche ebenfalls zu betrachten sind.

Z3: Der Einfluss geplanter Abschaltungen auf den Anlagenbetrieb

Neben den unerwarteten Ausfallursachen weisen auch geplante Abschaltungen einen hohen Anteil an den gesamten Ausfallzeiten der Oberleitungsanlage auf. Der Einfluss der geplanten Abschaltungen auf den Anlagenbetrieb wird in Abschnitt 6.3.3 betrachtet. Folgende limitierende Ausfallursachen werden dabei eingeschlossen:

- Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage
- Inspektion und Wartung

Der Zusammenhang Z3 fokussiert sich somit auf die wartungsbedingten und arbeitsstättenbedingten Ausfallursachen, und somit auf die vorhersehbaren Ereignisse (vgl. Abschnitt 5.5).

Z4: Der Einfluss der Abschaltungen aufgrund der Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden

Mit 43 detektierten Ereignissen stellen die Abschaltungen aufgrund der Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden eine maßgebliche Ausfallursache im Anlagenbetrieb dar, so dass der Zusammenhang zwischen den Ereignissen und der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage gesondert betrachtet wird. Somit wird in Abschnitt 6.3.4 folgende limitierende Ausfallursache analysiert:

- Abschaltungen aufgrund Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden

Die Abschaltungen aufgrund der Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden zählen zu den unfallbedingten Ausfallursachen.

Z5: Der Einfluss der Witterung auf den Anlagenbetrieb

Die erfassten Ereignisse, welche zu witterungsbedingten Ausfallzeiten führten, fallen zwar aufgrund der geringen Anzahl und der geringen mittleren Ausfalldauer nicht unter die limitierenden Ausfallursachen (siehe Abbildung 30), dennoch zeigt die kategoriale Darstellung nach Abbildung 29, dass diese einen relevanten Beitrag an den gesamten Ausfallzeiten leisten können. Der Zusammenhang zwischen der Witterung und dem Anlagenbetrieb ist im Weiteren auch aufgrund der zunehmenden Häufigkeit und steigenden Intensität von extremen

Wetterereignissen zu untersuchen und die Ergebnisse in die Planung und den Betrieb von Oberleitungsanlagen aufzunehmen. Die Analysen erfolgen in Abschnitt 6.3.5.

Z6: Der Einfluss der Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten auf den Anlagenbetrieb

Im Betrachtungszeitraum konnten Ereignisse erfasst werden, welche mit einer Beschädigung der Oberleitungsanlage einhergingen. Die Ausfallursachen sind dabei unterschiedlich und basieren nicht nur auf externalen, sondern auch auf internalen Einflüssen. Um den Einfluss auf die Verfügbarkeit zu erfassen, werden die Ereignisse, welche eine Instandsetzung und Reparatur erforderten, in Abschnitt 6.3.6 betrachtet. Da nicht eine Gruppe an Ausfallursachen gezielt angesprochen werden kann, handelt es sich bei dieser Analyse um eine Querschnittsbetrachtung.

Z7: Der Einfluss der Personalverfügbarkeit auf den Anlagenbetrieb

Zwar stellt die Personalverfügbarkeit zunächst keine Ausfallursache dar, dennoch kann diese die Ausfalldauer der einzelnen Ausfallursachen erheblich beeinflussen. Wie in Abbildung 24 (Seite 67) aufgezeigt, sind nach dem Auftreten einer Ausfallursache Prozesse bis zur Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage erforderlich. Diese Prozesse unterliegen der Verfügbarkeit des Personals, so dass der Einfluss auf die Verfügbarkeit in Abschnitt 6.3.7 im Rahmen einer Querschnittsbetrachtung untersucht wird.

Z8: Der Einfluss der Segmentlänge auf den Anlagenbetrieb

Bei einem Segment handelt es sich um einen für sich ein- bzw. ausschaltbaren elektrifizierten Streckenabschnitt. Die in 2019 in Betrieb genommene ELISA-Teststrecke wurde durch die Implementierung des halbseitigen Betriebs in 2020 in zwei Segmente zu je 5 km Länge aufgeteilt. Mit der Erweiterung der Teststrecke in 2023 wurde unterdessen die Segmentlänge in die südliche Fahrtrichtung (Darmstadt) um 7 km auf 12 km verlängert. Der Einfluss der Segmentlängen auf die Häufigkeit des Auftretens der Ausfallursachen sowie folgend auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage stellt einen wesentlichen Aspekt bei der Auslegung eines Oberleitungssystems auf Autobahnen dar und wird in Abschnitt 6.3.8 behandelt.

Die Durchführung der Analysen der Zusammenhänge liefert Ansätze, um die negativen Wirkungen der Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit zu reduzieren. Die Ergebnisse tragen der zweiten Forschungsfrage Rechnung. Um die negativen Wirkungen jedoch qualitativ bewerten zu können, werden zuvor die **kritischen Betriebszeiten** der Oberleitungsanlage erfasst. Diese Betriebszeiten zeichnen sich dadurch aus, dass ein Ausfall der elektrischen Stromversorgung innerhalb dieser Zeiten zu signifikant höheren negativen Auswirkungen gegenüber den unkritischen Betriebszeiten führt. Die kritischen Betriebszeiten basieren entsprechend auf der potenziellen Nachfrage der Energiebereitstellung durch die Nutzenden.

6.2 Identifikation kritischer Betriebszeiten

Durch die Analyse der Verkehrsdaten der **automatisierten Zählstellen** auf der Autobahn A5 kann eine sehr gute Übersicht darüber erlangt werden, an welchen Tagen und in welche

Fahrtrichtung die Verkehrsmengen besonders hoch oder gering sind. Weiterhin können, basierend auf den Tageswerten auch Tagesganglinien ermittelt werden, um die zeitliche Verteilung über die jeweiligen Tage zu erhalten. Die Daten können digital bei der BAST bezogen werden (BAST, 2024). Für die Analyse werden die Daten aus jener verfügbaren Zählstelle verwendet, welche innerhalb des elektrifizierten Bereichs liegt (Zählstelle Erzhausen, ID: 6922). Zum Zeitpunkt der Durchführung der Untersuchungen lagen die Verkehrsdaten nur bis ins Jahr 2021 vor, so dass das Jahr 2021 betrachtet wurde. Die durch die BAST bereitgestellten Verkehrsdaten wurden aufbereitet und die relevanten Kenngrößen ermittelt, welche in Anhang A.V dargestellt sind.

Innerhalb des Querschnitts der ausgewählten Zählstelle werden die vorbeifahrenden Fahrzeuge je Fahrtrichtung erfasst und gemäß der Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) in 8+1 Fahrzeugklassen klassifiziert. Mit Hilfe der Klassifizierung kann die Verkehrsmenge des Schwerverkehrs pro Stunde ermittelt werden, indem die erfassten Verkehrsmengen von Lastkraftwagen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 3,5 t sowie von Sattelkraftfahrzeugen und Bussen addiert werden (vgl. Tabelle 8).¹³

Tabelle 8: Erfassungsarten nach TLS und Ermittlung des Schwerverkehrs (eigene Darstellung).

Klassifizierung in 1 Fahrzeugklasse	Klassifizierung in 2 Fahrzeugklassen	Klassifizierung in 5+1 Fahrzeugklassen	Klassifizierung in 8+1 Fahrzeugklassen
		nicht klassifizierbare Fahrzeuge (nk Kfz)	nicht klassifizierbare Fahrzeuge (nk Kfz)
	Pkw-Ähnliche (PkwÄ)		Motorräder (Krad)
		Pkw-Gruppe (PkwG)	Pkw (Pkw)
			Lieferwagen bis 3,5 t (Lfw)
Kraftfahrzeug (Kfz)		Pkw mit Anhänger (PkwA)	Pkw mit Anhänger (PkwA)
		Lkw (Lkw)	Lkw (Lkw)
	Lkw-Ähnliche (LkwÄ)		Lkw mit Anhänger (LkwA)
		Lkw Fahrzeug-Kombinationen (LkwK)	Sattelkraftfahrzeuge (Sattel-Kfz)
		Busse (Bus)	Busse (Bus)

Tabelle 9 zeigt die ermittelten Werte des durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV) je Fahrzeugklasse sowie differenziert für den Leicht- und Schwerverkehr (LV bzw. SV) an der ausgewählten Zählstelle auf. Mit insgesamt 107.426 Kfz/24h in beide Fahrtrichtungen ist der Streckenabschnitt auf der BAB5 einer der höchstfrequentierten Streckenabschnitte in Deutschland und gehörte im Jahr 2021 im Vergleich aller Zählstellen in Bezug auf die Verkehrsmenge zu den oberen zwei Prozent (Jahreswerte, eigene Berechnung). Die Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) weist dabei gegenüber der Gegenrichtung eine etwa vier Prozent höhere Verkehrsstärke auf, welche sich jedoch nicht gleichmäßig über die

¹³ Es ist zu beachten, dass analog zu den Berechnungen der BAST auch die Fahrzeugklasse „Busse“ in die Berechnung des Schwerverkehrs eingeschlossen wird, gleichwohl dies gemäß der TLS keiner ausgewiesenen Fahrzeuggruppe entspricht.

Fahrzeugklassen verteilt. Mehr als die Hälfte der Fahrzeuge des Schwerverkehrs sind Sattelkraftfahrzeuge (59,4 % in Nord bzw. 60,0 % in Süd).

Tabelle 9: DTV-Werte im betrachteten Streckenabschnitt aus dem Jahr 2021 (eigene Auswertung nach BASt (2024)).

Fahrzeugklassen	Anzahl in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt)		Anzahl in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt)	
	DTV (Kfz)	DTV (LV / SV)	DTV (Kfz)	DTV (LV / SV)
nicht klassifizierbare Fahrzeuge (nk Kfz)	416 Kfz/24h	45.090 Kfz/24h	448 Kfz/24h	46.715 Kfz/24h
Motorräder (Krad)	267 Kfz/24h		272 Kfz/24h	
Pkw (Pkw)	39.132 Kfz/24h		40.667 Kfz/24h	
Lieferwagen bis 3,5t (Lfw)	4.819 Kfz/24h		4881 Kfz/24h	
Pkw mit Anhänger (PkwA)	456 Kfz/24h		447 Kfz/24h	
Lkw (Lkw)	1.595 Kfz/24h	7.557 Kfz/24h	1.670 Kfz/24h	8.063 Kfz/24h
Lkw mit Anhänger (LkwA)	1.287 Kfz/24h		1.466 Kfz/24h	
Sattelkraftfahrzeuge (Sattel-Kfz)	4.532 Kfz/24h		4.787 Kfz/24h	
Busse (Bus)	144 Kfz/24h		140 Kfz/24h	
Kraftfahrzeuge (Kfz)	52.647 Kfz/24h		54.779 Kfz/24h	

Die Daten liegen stundenscharf vor und erlauben somit die Betrachtung und Analyse der gesamten Tage im Jahr sowie die Betrachtung der einzelnen Tage selbst. Die Veränderung des Verkehrsaufkommens im Schwerverkehr über das Jahr 2021 kann als HeatMap-Diagramm veranschaulicht werden (vgl. Abbildung 31).

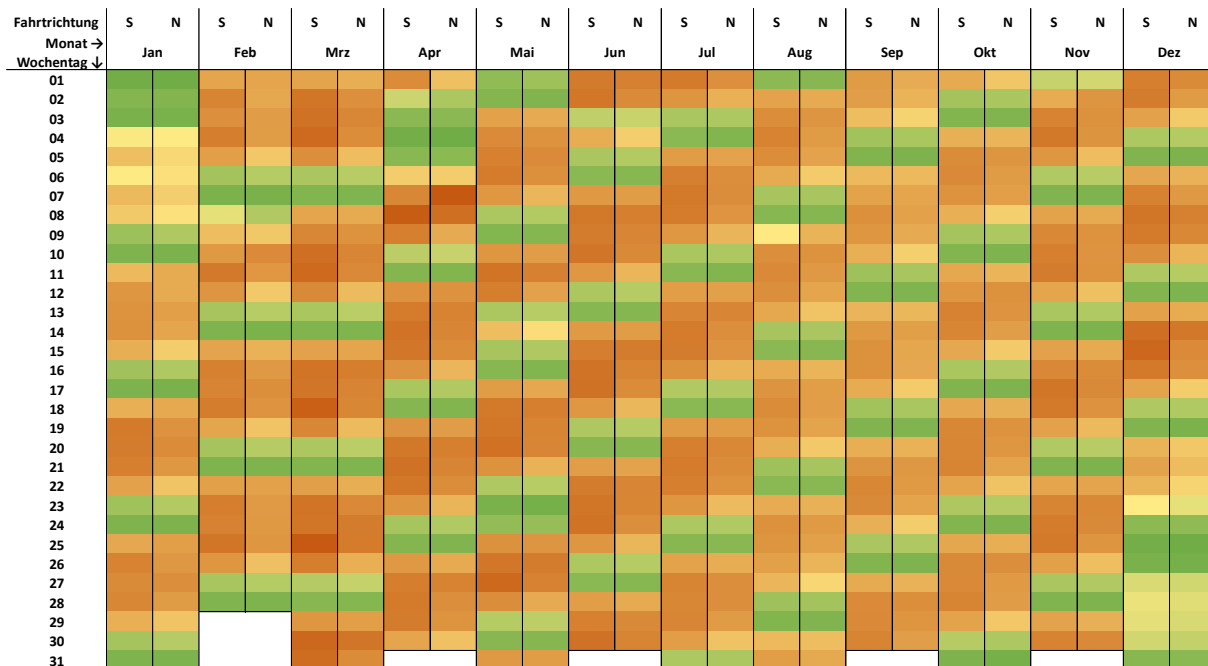


Abbildung 31: HeatMap über die absolute Anzahl an Fahrzeugen im Schwerverkehr in Fahrtrichtung Süd (S) und Fahrtrichtung Nord (N) am Querschnitt der Zählstelle Erzhausen im Jahr 2021 in der Abstufung von geringer Verkehrsstärke (grün) bis hohe Verkehrsstärke (rot). Eigene Berechnungen und Darstellung nach Daten der BASt (2024).

Mit Hilfe des HeatMap-Diagramms lassen sich die Tage mit hohem bzw. geringem Schwerverkehrsaufkommen sehr schnell visuell erfassen, wobei direkt ersichtlich wird, dass das Schwerverkehrsaufkommen an Wochenenden aufgrund des Sonn- und Feiertags-Fahrverbots tendenziell gering ist. Die der Abbildung zugrundeliegenden Verkehrsstärken können der Anhang A.V entnommen werden.

Die geringsten Verkehrsmengen im Schwerverkehr wurden im Jahr 2021 an Weihnachten, Neujahr, Pfingsten sowie zur Osterzeit erfasst. Beachtlich ist, dass das Schwerverkehrsaufkommen im Zeitraum ab dem 24. Dezember bis zum 10. Januar vergleichsweise gering ist. Das stärkste Verkehrsaufkommen ist im März und April sowie in den Wochen vor Weihnachten festzustellen. Auch in Bezug auf die Tageszeit zeigen die beiden Fahrtrichtungen deutliche Unterschiede im Verkehrsaufkommen auf (vgl. Abbildung 32). Während in den Morgenstunden bis etwa 9 Uhr in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) größere Verkehrsmengen erfasst werden, dreht sich das Verhältnis in der restlichen Tageszeit um. Mit einem Wert von 170.708 Fahrzeugen im Jahr (ca. 468 Fz/h) erreichen die Verkehrsmengen in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) zwischen 9 und 10 Uhr den Höhepunkt. In Fahrtrichtung Nord liegt der Höhepunkt zwischen 12 und 13 Uhr bei 182.786 Fahrzeugen im Jahr (ca. 501 Fz/h). Das in Summe beider Fahrtrichtungen identifizierte größte Verkehrsaufkommen lässt sich zwischen 9 und 10 Uhr mit 345.752 Fahrzeugen im Jahr (ca. 947 Fz/h) ablesen.

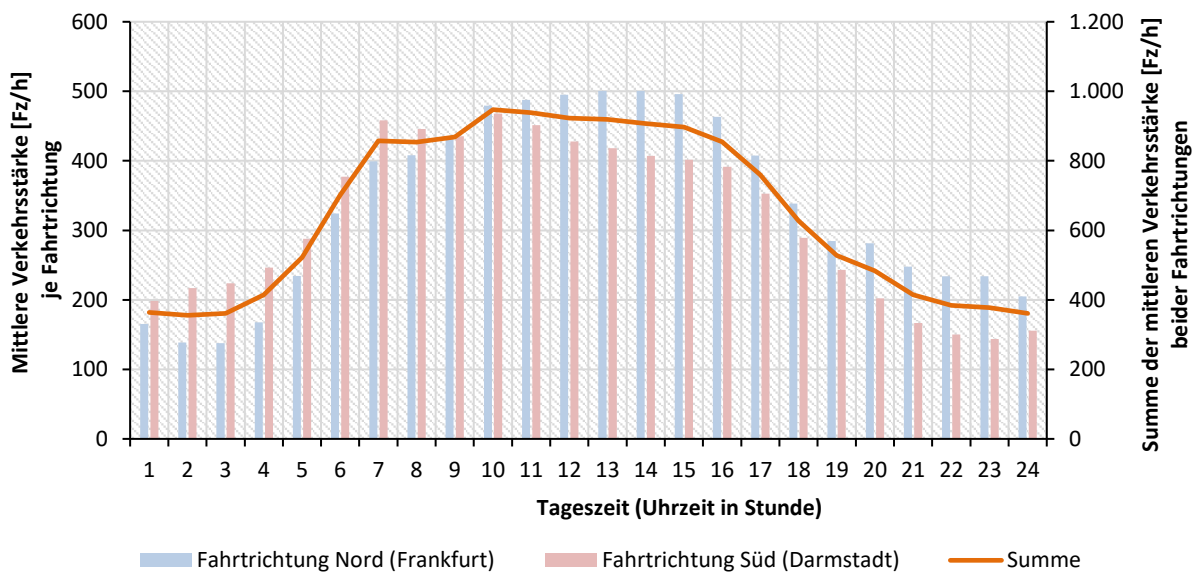


Abbildung 32: Schwerverkehrsaufkommen in Bezug zur Tageszeit und getrennt nach den jeweiligen Fahrtrichtungen sowie in Summe beider Fahrtrichtungen für das Jahr 2021. Eigene Berechnungen und Darstellung nach Daten der BASt (2024).

Die Betrachtungen des Schwerverkehrsaufkommens ermöglichen eine strukturierte Einteilung bzgl. der Kritikalität des Anlagenbetriebs. Unter Berücksichtigung der statistischen Parameter Mittelwert μ (650,85 Fz/h) und Standardabweichung σ (231,51 Fz/h) lassen sich drei Bereiche über das Verkehrsaufkommen definieren:

- **Hauptverkehrszeit im Schwerverkehr:** Die Hauptverkehrszeit bildet jenen Zeitraum der Betrachtung, in welchem ein überdurchschnittlich hohes Verkehrsaufkommen auftritt. Innerhalb dieser Arbeit definiert sich dieser Bereich, indem jene Werte zugeordnet werden, welche größer als $\mu + \sigma$ sind.
- **Nebenverkehrszeit im Schwerverkehr:** Die Nebenverkehrszeit bildet das „normale“ Verkehrsaufkommen ab. Die Werte liegen zwischen $\mu - \sigma$ und $\mu + \sigma$.
- **Schwachverkehrszeit im Schwerverkehr:** In der Schwachverkehrszeit ist ein deutliches reduziertes Schwerverkehrsaufkommen festzustellen. Die Zuordnung erfolgt für Werte welche kleiner als $\mu - \sigma$ sind.

In Abbildung 33 ist die sich ergebende Einteilung der Haupt-, Neben- und Schwachverkehrszeit über die Tageszeit für die Werte des Schwerverkehrs im Jahr 2021 dargestellt. Die Hauptverkehrszeit des Schwerverkehrs an der betrachteten Zählstelle, welche innerhalb der ELISA-Teststrecke liegt, liegt hierbei im Zeitraum von 9 Uhr bis 16 Uhr, die Schwachverkehrszeit hingegen zwischen 21 Uhr und 4 Uhr. Es ist zu beachten, dass es sich bei den Berechnungen nur um eine lokale Einteilung – und somit um eine lokal betrachtete Kritikalität – handelt, welche maßgebend von dem Verkehrsaufkommen abhängt. Bei anderen Zählstellen, mit bspw. geringerem Schwerverkehrsaufkommen, werden bereits geringere Werte zur Hauptverkehrszeit zugeordnet.

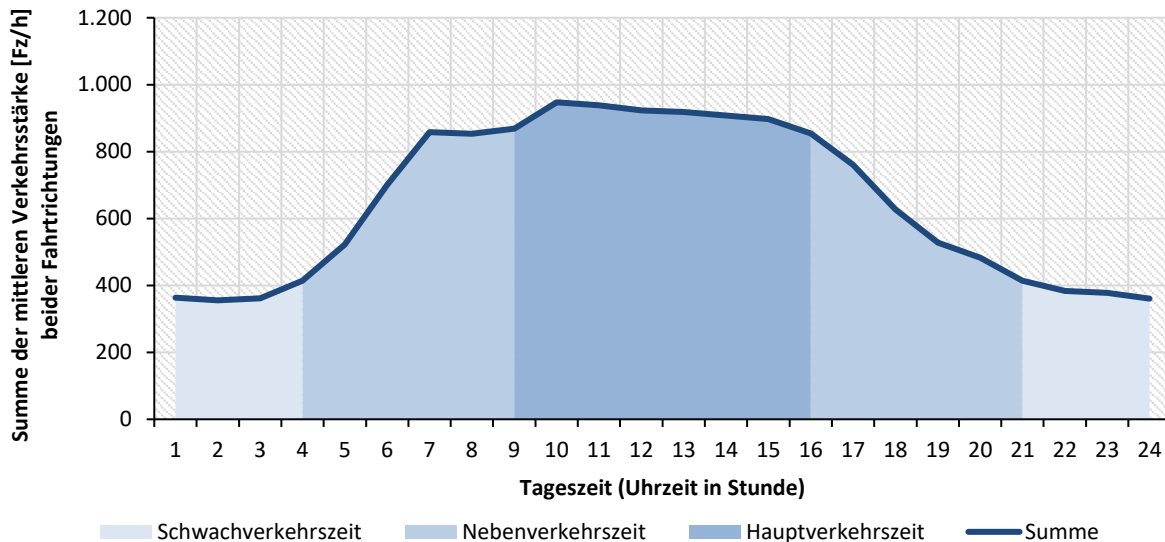


Abbildung 33: Summe der Verkehrsstärke des Schwerverkehrsaufkommens in Bezug zur Tageszeit für das Jahr 2021 sowie differenziert nach Haupt-, Neben- und Schwachverkehrszeit. Eigene Berechnungen und Darstellung nach Daten der BASt (2024).

Die Einteilung nach Abbildung 33 verdeutlicht, dass die (negativen) Auswirkungen bei Abschaltungen einer Oberleitungsanlage mit der betroffenen Verkehrszeit korrelieren, da je nach Verkehrszeit eine größere Anzahl an potenziellen Nutzern der Oberleitungsanlage betroffen sind. Um die negativen Auswirkungen zu minimieren, sollten planmäßige Abschaltungen entsprechend (sofern möglich) außerhalb der Hauptverkehrszeit des Schwerverkehrs sowie an Tagen mit generell geringerem Schwerverkehrsaufkommen (vgl. Abbildung 31) stattfinden.

Zur **Analyse der detektierten Energiebezüge** im Betrieb der Oberleitungsanlage werden die Anlagendaten in Bezug auf die Leistung der Anlage ausgewertet. Ziel der Analyse ist es, eine Tagesganglinie, wie diese in Abbildung 33 anhand des Verkehrsaufkommens dargestellt ist, für die strombeziehenden O-Lkw zu generieren. Sobald ein O-Lkw Strom aus der Oberleitung bezieht, werden die Leistungswerte der Oberleitungsanlage erfasst und alle 10 Sekunden in den Anlagendaten (*Values*) gespeichert (vgl. Abschnitt 4.2.2). Zwar liefern die Anlagendaten somit einen Rückschluss, ob (mindestens) ein strombeziehendes Fahrzeug angebügelt ist, jedoch enthalten die Daten keine (direkte) Information dazu, an welcher Stelle sich das Fahrzeug befindet oder in welche Fahrtrichtung es sich bewegt. Ferner kann auch nicht (direkt) abgelesen werden, ob nur ein Fahrzeug oder mehrere Fahrzeuge zur gleichen Zeit den Strom aus der Anlage beziehen. Indirekt kann zwar über den Verlauf und die Größe des Leistungswerts auf diese Informationen rückgeschlossen werden, jedoch ist diese Aussage aufgrund der hohen Zeitintervalle bei der Erfassung des Leistungswerts ungenau und nicht ausreichend belastbar. Um eine eindeutige Differenzierung zwischen einer tatsächlich angebügelten Fahrt eines O-Lkw und einer über die Anlagendaten detektierten (strombeziehenden) Fahrt zu erreichen, werden die Fahrten über die detektierten Energiebezüge als sogenannte Strombezugsfahrten bezeichnet.

Da die Oberleitungsanlage nur bei Einschaltung den Strom an die O-Lkw abgeben kann, ist eine vergleichbare Betrachtung nur über eine Datenfilterung möglich, indem die Tage mit größeren Störungen (Abschaltungen) nicht betrachtet werden. Aus diesem Grund werden nur jene Anlagendaten aus dem Regelbetrieb (ab dem 01.01.2020) in die Berechnungen eingeschlossen,

welchen ein störungsfreier operativer Betrieb ¹⁴ zugrunde liegt. Der Einschluss störungsbehafteter Betriebstage (bspw. Abschaltungen durch Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden oder halbseitiger Anlagenbetrieb) würde zwangsweise zu einer Verzerrung in den Auswertungen führen.

Im Zeitraum vom 01.01.2020 bis zum 31.12.2022 wurden insgesamt 14.802 Strombezugsfahrten erfasst. 12.791 Strombezugsfahrten fanden dabei an Tagen statt, an welchen die Anlage einen störungsfreien operativen Betrieb aufwies. Hierbei ist zu beachten, dass eine Strombezugsfahrt nicht mit einer Fahrt eines strombeziehenden O-Lkw gleichzusetzen ist. Kommt es bspw. bei einer strombeziehenden Durchfahrt unter der Oberleitungsanlage zu einem kurzzeitigen abbügeln mit anschließendem Anbügelvorgang, so werden im Anlagenbetriebstagebuch zwei Strombezugsfahrten erfasst. Bügelt hingegen ein O-Lkw an die Oberleitung an, während bereits ein vorausfahrender O-Lkw Strom bezieht, so wird dies insgesamt als nur eine Strombezugsfahrt erkannt, welche jedoch entsprechend lang ist.

Da für die weitere Analyse die Häufigkeit der Strombezugsfahrten über die Tageszeit betrachtet wird, ist es jedoch erforderlich, dass die Anzahl der strombeziehenden Fahrten aus den Daten der Strombezugsfahrten abgeleitet wird. Bei einer maximalen nutzbaren Oberleitungsstrecke von etwa 4.800 Meter und einer Geschwindigkeit von mindestens 80 km/h ergibt sich die erwartbare maximale Strombezugsdauer von 216 Sekunden. Energiebezüge mit größerer Strombezugsdauer basieren demnach entweder auf einer (noch) geringeren gefahrenen Geschwindigkeit oder auf einer Hinterherfahrt mehrerer O-Lkw. Um keine doppelten Fälle einzuschließen, werden im weiteren Schritt die detektierten Energiebezüge anhand der Strombezugsdauer gefiltert, wobei lediglich jene Fälle betrachtet werden, in welchen die Strombezugsdauer zwischen 109 und 216 Sekunden liegt. Die Anzahl der für die Analyse verwertbaren Strombezugsfahrten reduziert sich letztlich auf 6.224 Strombezugsfahrten.

Analog zur Betrachtung des Verkehrsaufkommens über die Tageszeit werden die verwertbaren Strombezugsfahrten der jeweiligen Uhrzeit zugeordnet (Strombezugsfahrten pro Stunde; Sbf/h), wobei keine Zuordnung zur jeweiligen Fahrtrichtung vorgenommen werden kann. Eine vergleichende Darstellung der Strombezugsfahrten und der Verkehrsstärke liefert Abbildung 34.

¹⁴ Ein störungsfreier Betrieb der Oberleitungsanlage liegt dann vor, wenn die Betriebszeit am Tag mehr als 23,5 Stunden beträgt.

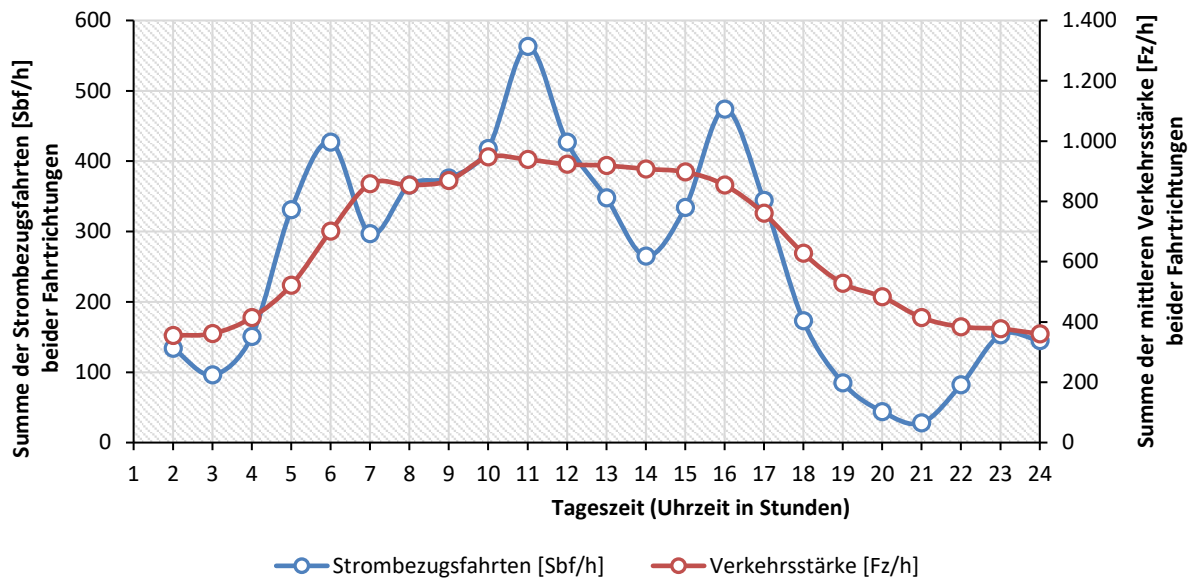


Abbildung 34: Vergleichende Betrachtung der Strombezugsfahrten und des Verkehrsaufkommens über die Tageszeit. Eigene Berechnungen und Darstellung, Daten der Verkehrsstärke nach BASt (2024).

Abbildung 34 verdeutlicht, dass die Tagesganglinie der Strombezugsfahrten einen vergleichsweise ähnlichen Verlauf aufweist wie die Tagesganglinie des Verkehrsaufkommens des Schwerverkehrs im Bereich der ELISA-Teststrecke, gleichwohl sich ausgeprägte Spitzenzeiten in den Energiebezügen – bedingt durch den Pendelverkehr einzelner Transportpartner im Projekt – ergeben. Die meisten Strombezugsfahrten liegen im Bereich zwischen 04:00 Uhr und 17:00 Uhr (ca. 79,9 %). Fast die Hälfte aller detektierten Strombezugsfahrten (ca. 45,5 %) entfallen auf den Zeitraum der Hauptverkehrszeit zwischen 09:00 Uhr und 16:00 Uhr.

Die in diesem Abschnitt durchgeführten Analysen zeigen die Relevanz der Tageszeit bei der Bewertung der Kritikalität einer Abschaltung einer Oberleitungsanlage auf und bilden somit einen wichtigen Baustein zur Analyse der Bewertung der Einflüsse auf die Anlagenverfügbarkeit. Sofern Abschaltungen nicht vermieden werden können, so sollten diese außerhalb der kritischen Betriebszeiten erfolgen. Abschaltungen innerhalb der kritischen Betriebszeiten sind so kurz wie möglich zu halten. Die kritischen Betriebszeiten umfassen hierbei mindestens die Hauptverkehrszeit des Schwerverkehrs.

6.3 Analyse der Anlagenverfügbarkeit

6.3.1 Einfluss der Betriebsstrategie

Einleitung

Bezüglich des operativen Betriebs einer Oberleitungsanlage lassen sich zwei mögliche Betriebsstrategien aufzeigen: der dauerhafte Betrieb (im Projekt ELISA als Regelbetrieb bezeichnet) und der zeitweise Betrieb (die sogenannte Einführungsphase im ELISA-Projekt). In Abschnitt 5.1 wurde bereits die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage deskriptiv in Abhängigkeit des Betriebsjahres und somit auch in Abhängigkeit der Betriebsstrategie bestimmt (vgl. Tabelle 3 auf Seite 60). Die Verfügbarkeit für die Einführungsphase lag dabei mit 76,6 % deutlich unterhalb der Jahreswerte im Regelbetrieb. In Bezug auf die Häufigkeiten der

Abschaltungen weisen die betriebs- und systembedingten Ausfallursachen einen maßgebenden Anteil in der Einführungsphase auf (31 von 41 Abschaltungen in 2019).

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Betriebsstrategie auf die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage analysiert. Hierzu wird zunächst das methodische Vorgehen aufgezeigt, bevor anschließend die Ergebnisse und Erkenntnisse dargestellt und erste Aussagen abgeleitet werden.

Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen für die Untersuchung des Einflusses der gewählten Betriebsstrategie umfasst zwei Stufen. In der ersten Stufe werden basierend auf den Anlagendaten die Zusammenhänge zwischen den Betriebsstrategien und der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage erfasst und analysiert. Die zweite Stufe komplettiert die Analyse durch die zusätzliche Betrachtung der (potenziellen) Nutzer, um neben der Betrachtung der Verfügbarkeit auch die Auswirkungen bei einer Abschaltung der Anlage zu berücksichtigen.

In der ersten Stufe werden zunächst die Betriebstage sowie Ausfallursachen der Betriebsstrategien vergleichend gegenübergestellt. Hierbei ist festzuhalten, dass die jeweilig gewählte Betriebsstrategie sich auf die Anzahl der zu erwartenden Betriebstage auswirkt. Während in der Einführungsphase die Oberleitungsanlage nur an fünf Tagen pro Woche planmäßig betrieben wird, weist sich der Regelbetrieb durch eine planmäßig uneingeschränkte Betriebszeit aus. Die geplante Betriebszeit unterliegt demnach je Betriebsstrategie unterschiedlichen Randbedingungen, welche bei der Analyse der Verfügbarkeit zu berücksichtigen sind. Um dennoch eine Vergleichbarkeit sicherzustellen, werden die Kennwerte auf Grundlage der geplanten Betriebszeiten, bzw. der planmäßigen Betriebstage, ermittelt.

Da nicht nur die Betriebszeit als solche, sondern vielmehr aufgrund der Kritikalität in Kombination mit der Anzahl an Nutzer zu betrachten ist, werden die in der ersten Stufe erlangten Erkenntnisse anhand der negativen Auswirkungen bewertet (zweite Stufe). Hierzu werden die Ausfallzeiten im Kontext der definierten kritischen Betriebszeiten (siehe Abschnitt 6.2) betrachtet. Aus den erlangten Ergebnissen werden in einem letzten Schritt die Kernaussagen bzgl. des Einflusses der Betriebsstrategie auf die Verfügbarkeit abgeleitet.

Ergebnisse und Diskussion

Bezogen auf die Betriebstage lassen sich die Werte nach Tabelle 2 (Seite 59) vergleichend betrachten. Der Anteil der Betriebstage ohne Unterbrechung beträgt in der Einführungsphase 65,1 % und ist somit teilweise deutlich geringer als der Anteil im Regelbetrieb. Lediglich im Jahr 2020 konnte in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) ein geringerer Anteil von 63,1 % festgestellt werden, welcher jedoch durch das Unfallereignis vom 24. Januar 2020 (vgl. Abschnitt 5.4) zu begründen ist.

Der Zusammenhang zwischen den Betriebstagen und der Betriebsstrategie kann mit Hilfe eines Tests auf stochastische Unabhängigkeit auf statistische Signifikanz untersucht werden. Bei einem Stichprobenumfang von mindestens 60 Fällen kann dazu der *Chi-Quadrat-Test* angewendet werden (du Prel et al., 2010, S. 343ff.). Die Fallzahl erstreckt sich über den Betrachtungszeitraum und umfasst 172 Tage im Einführungsbetrieb und 1096 Tage im Regelbetrieb. Beim *Chi-Quadrat-Test* wird die stochastische Unabhängigkeit über einen Vergleich der beobachteten Werte und die bei einer Abhängigkeit der Betriebsstrategie

erwarteten Werte bestimmt. Die entsprechenden Kreuztabellen sind in Tabelle 10 für Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) und Tabelle 11 für die Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) dargestellt.

Tabelle 10: Kreuztabelle zur Untersuchung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen den Betriebsstrategien und der Betriebstage in Fahrtrichtung Süd (eigene Darstellung).

		Betriebstage ohne Unterbrechung	Betriebstage mit Unterbrechung	Betriebstage ohne Betrieb	Gesamt
Einführungsphase	Beobachtet	112	26	34	172
	Erwartet	122,6	20,1	29,3	
Regelbetrieb	Beobachtet	792	122	182	1096
	Erwartet	781,4	127,9	186,7	
Gesamt	Anzahl	904	148	216	1268

Da im Zeitraum der Einführungsphase keine getrennte Abschaltung der Fahrtrichtungen möglich war, zeigen sich in Bezug auf die Verteilung der Betriebstage die gleichen (beobachteten) Werte. Der Vergleich der beobachteten und erwarteten Werte liefert jedoch für beide Fahrtrichtungen das gleiche Ergebnis. So liegen die beobachteten Betriebstage ohne Unterbrechung für die Einführungsphase unterhalb der erwarteten Betriebstage, wodurch der Einfluss der Betriebsstrategie auf die Verfügbarkeit ersichtlich wird. Verzerrt wird der Einfluss jedoch durch die Anzahl der Betriebstage ohne Betrieb, welche in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) mit 216 Tagen deutlich höher ist gegenüber der Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) mit 122 Tagen.

Tabelle 11: Kreuztabelle zur Untersuchung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen den Betriebsstrategien und der Betriebstage in Fahrtrichtung Nord (eigene Darstellung).

		Betriebstage ohne Unterbrechung	Betriebstage mit Unterbrechung	Betriebstage ohne Betrieb	Gesamt
Einführungsphase	Beobachtet	112	26	34	172
	Erwartet	133,7	21,7	16,5	
Regelbetrieb	Beobachtet	874	134	88	1096
	Erwartet	852,3	138,3	105,5	
Gesamt	Anzahl	986	160	122	1268

Nachdem mit Hilfe der Kreuztabellen eine Abhängigkeit visualisiert werden konnte, wird im weiteren Schritt die Signifikanz dieser Abhängigkeit ermittelt. Die Ergebnisse des Signifikanztests sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Ergebnisse des Tests der stochastischen Unabhängigkeit mit $n = 1268$ (eigene Darstellung).

Einflussfaktor	Fälle	Freiheitsgrad df	p-Wert	Signifikanz
Betriebsstrategie (Fahrtrichtung Süd)	1268	2	0,140	ns
Betriebsstrategie (Fahrtrichtung Nord)	1268	2	<0,001	s***

Der Unterschied und somit die Möglichkeit zur getrennten Untersuchung beider Fahrtrichtungen ergibt sich durch die Implementierung des halbseitigen Betriebs der Oberleitungsanlage innerhalb des Regelbetriebs. Der Zusammenhang zwischen der Betriebsstrategie und der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) stellt einen höchstsignifikanten Zusammenhang ($p = <0,001$) dar. Es ist somit mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 1 Promille bewiesen, dass die Betriebsstrategie einen Einfluss auf die Verfügbarkeit aufweist. Dieser Einfluss lässt sich für die Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) aufgrund der langen Ausfallzeit in diese Fahrtrichtung im Regelbetrieb zunächst nicht aufzeigen. Um den Zusammenhang dennoch sichtbar zu machen, wird die Durchführung des Signifikanztests wiederholt, jedoch unter Ausschluss der Betriebstage ohne Betrieb. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Ergebnisse des Tests der stochastischen Unabhängigkeit mit $n < 1268$ (eigene Darstellung).

Einflussfaktor	Fälle	Freiheitsgrad df	p-Wert	Signifikanz
Betriebsstrategie (Fahrtrichtung Süd)	1052	1	0,083	s*
Betriebsstrategie (Fahrtrichtung Nord)	1146	1	<0,001	s***

Durch den Ausschluss der Betriebstage ohne Betrieb reduziert sich die Fallzahl auf 1052 bzw. 1146 betrachtete Betriebstage und der Freiheitsgrad entsprechend auf eine 2x2-Matrix ($df = 1$). Der Zusammenhang zwischen der Betriebsstrategie und der Fahrtrichtung Nord ist weiterhin höchst signifikant, in Bezug auf die Fahrtrichtung Süd lässt sich nun ein signifikanter Zusammenhang (Irrtumswahrscheinlichkeit weniger 10 Prozent) aufzeigen. Die Untersuchung zeigt letztlich auf, dass die Verteilung der Betriebstage ohne Unterbrechung und der Betriebstage mit Unterbrechung zwischen den jeweiligen Betriebsstrategien nachweislich unterschiedlich ist, und die Verfügbarkeit somit von der Betriebsstrategie abhängt.

Nachdem der Einfluss der Betriebsstrategie auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage nachgewiesen werden konnte, werden im nächsten Schritt die Ausfallursachen näher analysiert. Die Häufigkeiten der kategorisierten Ausfallursachen wurden bereits in Abbildung 27 (Seite 77) deskriptiv in Bezug auf die Betriebsjahre beschrieben. Um die Zusammenhänge zwischen den Ausfallursachen und der Betriebsstrategie aufzuzeigen, werden im nächsten Schritt die Häufigkeit (beobachtete Eintrittshäufigkeit) und die Ausfalldauer (beobachtete Auswirkung) der jeweiligen Ursachenkategorie gegenübergestellt.

Die Analysen bedürfen einer weiteren Bereinigung der Auswertungsdaten, da einzelne aufgetretene Ereignisse zu einer zu großen Verzerrung innerhalb der Analysen führen. Bei diesen Ereignissen handelt es sich um jene vier Ereignisse, welche zu den größten Ausfallzeiten der Anlage geführt haben (vgl. Abschnitt 5.4), sowie die Abschaltungen zur Durchführung von Restarbeiten nach der Errichtung der Oberleitungsanlage im Jahr 2019 und aufgrund der Erweiterung der Oberleitungsanlage im Jahr 2022. Diese Ereignisse sind nicht repräsentativ für die Analyse zur Erfassung des Einflusses der Betriebsstrategien auf die Verfügbarkeit. Eine übersichtliche Darstellung der von der Analyse ausgeschlossenen Zeiträume und Ereignisse liefert Anhang A.VII. In Abbildung 35 sind die Werte für beide Fahrtrichtungen dargestellt. Nach der Bereinigung der Auswertungsdaten zeigen die beiden Fahrtrichtungen im Regelbetrieb ähnliche Werte auf.

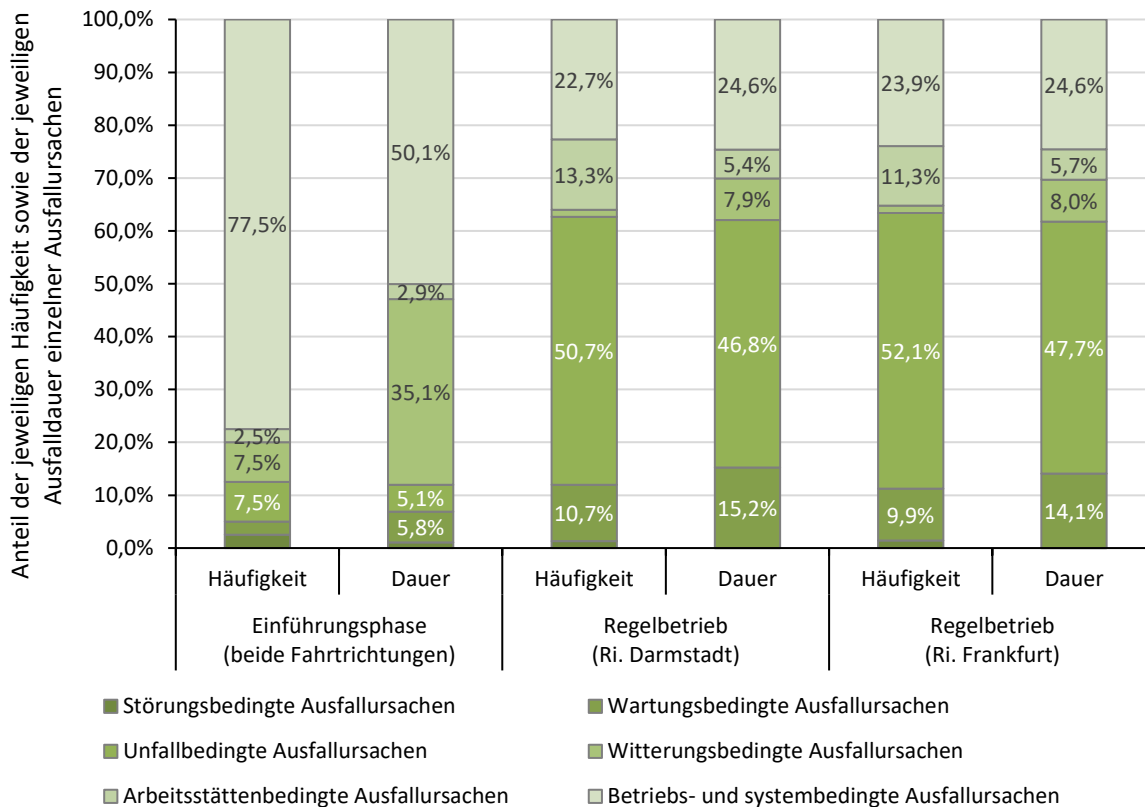


Abbildung 35: Gegenüberstellung der Verteilung der Häufigkeiten und der Ausfalldauer der Ursachenkategorien in Abhängigkeit der Betriebsstrategie (eigene Darstellung).

Folgende Aussagen in Bezug auf die Ausfallursachen können durch den Vergleich der Verteilung dieser auf die gesamte Ausfallzeit getroffen werden:

- Betriebs- und systembedingte Ausfallursachen dominieren den Anteil der beobachteten Eintrittshäufigkeit (77,5 %) sowie der Ausfalldauer (50,1 %) in der Einführungsphase.
- Im Regelbetrieb entfällt die Hälfte der Abschaltungen sowohl in Anzahl als auch in der Dauer auf die unfallbedingten Ausfallursachen.
- Die wartungsbedingten Ausfallursachen weisen im Regelbetrieb einen deutlich höheren Anteil in Bezug auf die Häufigkeit und die Dauer der Abschaltung auf.
- Die arbeitsstättenbedingten Ausfallursachen weisen im Regelbetrieb einen deutlich höheren Anteil in Bezug auf die Häufigkeit und die Dauer der Abschaltung auf.

Um die Auswirkungen der Abschaltungen bewerten zu können, werden im zweiten Schritt die aufgezeigten **Ausfallursachen im Zusammenhang mit den Betriebszeiten** (vgl. Abschnitt 6.2) analysiert. Hierbei ist zu beachten, dass innerhalb der Einführungsphase die Betriebszeit der Oberleitungsanlage auf den Zeitraum von 08:00 Uhr bis 16:00 Uhr beschränkt wurde, und sich somit keine Ausfallereignisse (genauer der Eintrittszeitpunkt des Ereignisses bzw. der Abschaltungszeitpunkt der Oberleitungsanlage) außerhalb des Zeitraumes ergeben werden.

Für die Durchführung der Analyse wird die gesamte Ausfallzeit eines Ausfallereignisses in den jeweiligen Intervallen der Betriebszeiten (Hauptverkehrszeit, Schwachverkehrszeit und Nebenverkehrszeit) eingeordnet. Tabelle 14 zeigt eine solche Zuordnung anhand eines Beispiels aus dem Anlagentagebuch auf. In diesem Beispiel erfolgte die Abschaltung um 18:24:25 Uhr und somit innerhalb der Nebenverkehrszeit von 16:00 Uhr bis 21:00 Uhr. Insofern war die

Nebenverkehrszeit anteilig durch die Abschaltung im Zeitraum von 18:24:25 Uhr bis 21:00 Uhr mit einem Zeitanteil von 2:35:35 betroffen. Die zeitliche Zuordnung zu den verbleibenden Betriebszeiten wird bis zur Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage analog vorgenommen.

Tabelle 14: Beispiel der rechnerischen Verteilung und Zuordnung der Ausfallzeit eines Ausfallereignisses zu den jeweiligen Betriebszeiten (eigene Darstellung).

Grund der Abschaltung	Ausschaltzeit der Anlage [MESZ]	Einschaltzeit der Anlage [MESZ]	Zeitliche Zuordnung zu den Betriebszeiten				
			00:00 bis 04:00	04:00 bis 09:00	09:00 bis 16:00	16:00 bis 21:00	21:00 bis 24:00
Anforderung durch Gefahrenabwehrbehörden	18:24:25 (11.08.2020)	09:11:31 (12.08.2020)	4:00:00	5:00:00	0:11:31	2:35:35	3:00:00

Über die zeitliche Zuordnung lassen sich die Auswirkungen der Abschaltungen der Oberleitungsanlage in Bezug auf die Kritikalität beschreiben. Die zeitlichen Anteile je Betriebszeit werden für die jeweilige Betriebsstrategie aufsummiert und, zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit, durch die Anzahl der relevanten Betriebstage im Betrachtungszeitraum dividiert (167 Betriebstage innerhalb der Einführungsphase und 897 Betriebstage im Regelbetrieb).

So ergeben sich bei einer Ausfallzeit von 280,42 Stunden bei 167 Betriebstagen und von 823,17 Stunden bzw. 816,03 Stunden bei 897 Betriebstagen durchschnittlich tägliche Ausfallzeiten von 1,67 Stunden pro Betriebstag in der Einführungsphase und von 0,92 bzw. 0,91 Stunden pro Betriebstag im Regelbetrieb. In Abbildung 36 sind die Anteile in Abhängigkeit der Betriebszeiten dargestellt. Innerhalb des Regelbetriebs ergeben sich für die jeweiligen Fahrtrichtungen nur marginale Unterschiede.

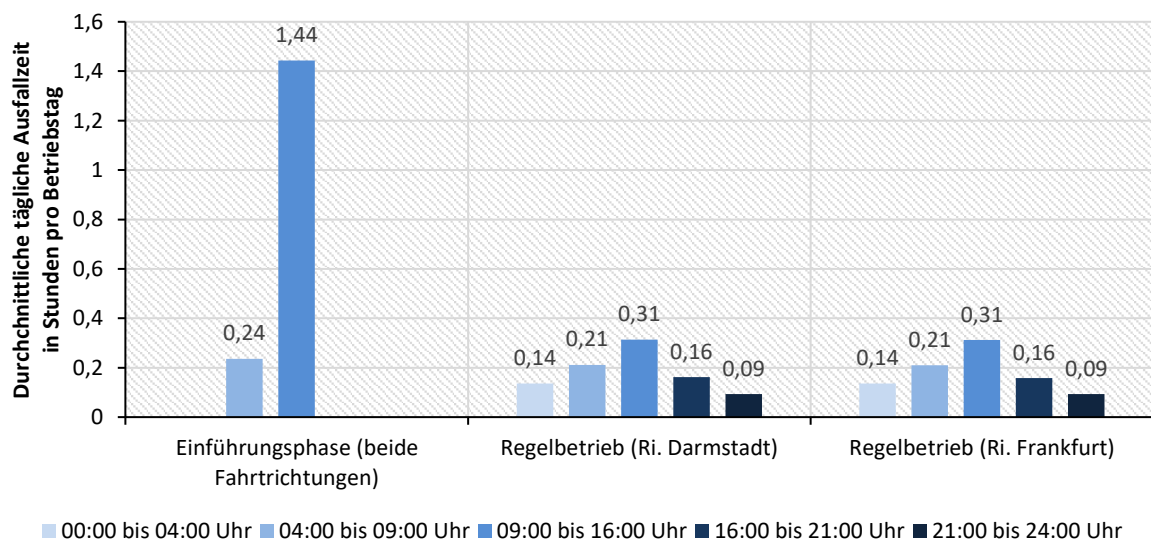


Abbildung 36: Vergleich der durchschnittlichen täglichen Ausfallzeit pro Betriebstag in Abhängigkeit der Betriebsstrategie (eigene Darstellung).

Der erhöhte Wert der durchschnittlichen täglichen Ausfallzeit in der Einführungsphase ist maßgeblich auf die Abschaltung der Oberleitungsanlage während den Feier- und Brückentagen (0,34) sowie in der Urlaubs- und Ferienzeit (0,24) zurückzuführen. Ohne Betrachtung dieser Ausfallursachen erreicht die durchschnittliche tägliche Ausfallzeit einen Wert von 1,10 Stunden. Insgesamt umfassen die betriebs- und systembedingten Ausfallursachen in der Einführungsphase einen Wert von 0,84 Stunden.

Im Regelbetrieb fallen ein Drittel (ca. 34 %) aller Ausfallzeiten innerhalb der Hauptverkehrszeit an, gleichwohl diese nur sieben Stunden des Tages umfassen. Entsprechend höher ist der Anteil innerhalb der Nebenverkehrszeit (ca. 41 %) mit insgesamt 10 Stunden am Tag. Die restlichen 7 Stunden entfallen auf die Schwachverkehrszeit mit einem Anteil an der Ausfalldauer von ca. 25 % (vgl. Abbildung 36).

Die Hauptverkehrszeit stellt in Bezug auf die Kritikalität des Betriebs der Oberleitungsanlage einen entscheidenden Zeitraum dar, in welchem beim Auftreten von Störungen bzw. ungeplanten Abschaltungen möglichst schnell reagiert werden sollte. Dementsprechend sollten planbare Ereignisse außerhalb der Hauptverkehrszeit umgesetzt werden. Die im Betrachtungszeitraum aufgetretenen kategorisierten Ausfallursachen innerhalb der Hauptverkehrszeit sind in Abbildung 37 in Bezug auf die durchschnittliche tägliche Ausfallzeit pro Betriebstag dargestellt.

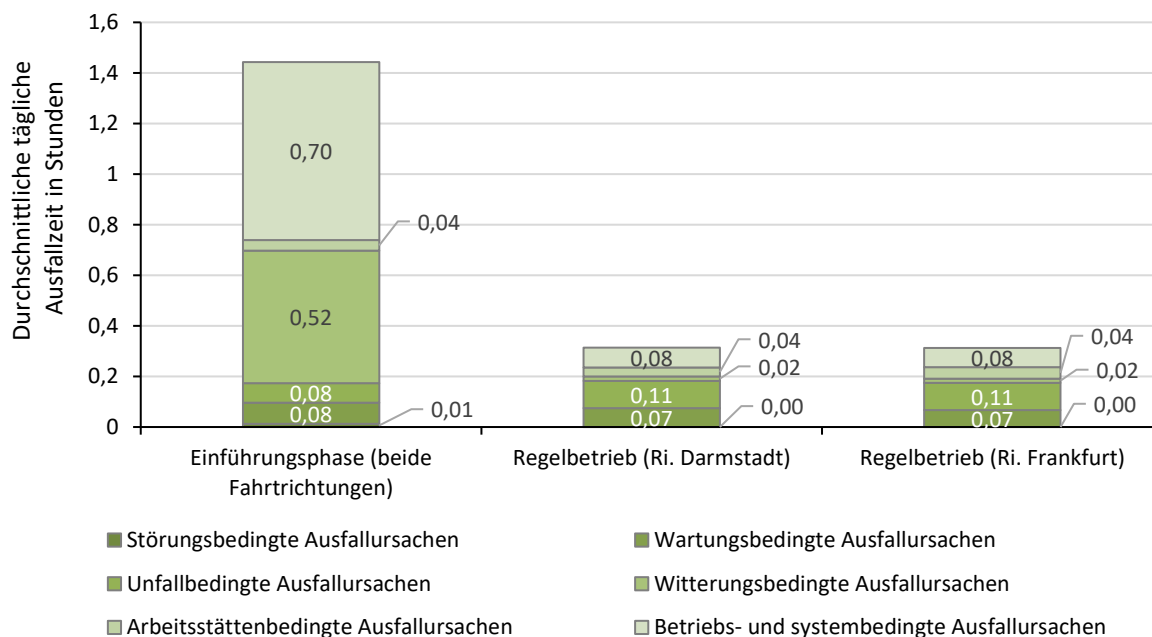


Abbildung 37: Durchschnittliche tägliche Ausfallzeit pro Betriebstag in der Hauptverkehrszeit in Abhängigkeit der Betriebsstrategie (eigene Darstellung).

Während in der Einführungsphase neben den betriebs- und systembedingten Ausfallursachen die witterungsbedingten Ausfallursachen dominieren, weisen im Regelbetrieb auch die unfall- und wartungsbedingten Ausfallursachen einen hohen Anteil auf. Es zeigt sich, dass im Regelbetrieb eine Reduktion der Ausfallzeit, bspw. durch Verlegung der planbaren Ausfallursachen in die Neben- oder Schwachverkehrszeit, möglich ist. Zu diesen planbaren Ausfallursachen zählen insbesondere die wartungsbedingten und arbeitsstättenbedingten Ausfallursachen, welche einen Anteil von ca. 35 % an der Ausfallzeit in der Hauptverkehrszeit im Regelbetrieb ausmachen.

Kernaussagen zum Einfluss der gewählten Betriebsstrategie

Die Wahl der Betriebsstrategie beeinflusst die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage sowie das Auftreten und die Verteilung der Ausfallursachen. Folgende Kernaussagen aus den Analysen zum Einfluss der gewählten Betriebsstrategie auf die Verfügbarkeit lassen sich ableiten:

K1: Die Wahl der Betriebsstrategie wirkt sich signifikant auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage aus.

Die durchgeführten Analysen zeigen einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Betriebsstrategie und der Verfügbarkeit unter Betrachtung der Betriebstage sowie in Bezug auf die Ausfallursachen auf. Der zeitweise Betrieb (im ELISA-Projekt als Einführungsphase bezeichnet) zeigt dabei gegenüber dem dauerhaften Betrieb (Regelbetrieb) eine geringere Verfügbarkeit auf. Maßgebend sind dabei die Ausfallzeiten, welche sich durch die erhöhte Ein- und Ausschalthäufigkeit ergeben sowie zusätzliche Abschaltungen an Feier- und Brückentagen sowie in der Ferien- und Urlaubszeit.

K2: Bei Umsetzung eines zeitweisen Betriebs lassen sich planbare Ereignisse außerhalb der geplanten Betriebszeit durchführen.

Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen sowie Maßnahmen im Anlagenbereich führen zeitweise zu einer Abschaltung der Oberleitungsanlage. Wartungsbedingte und arbeitsstättenbedingte Ausfallursachen waren sowohl innerhalb der Einführungsphase als auch im Regelbetrieb vorzufinden, wobei diese im Regelbetrieb einen Anteil von ca. 35 % an der Ausfallzeit in der Hauptverkehrszeit ausmachten. Im Einführungsbetrieb lassen sich solche Maßnahmen zeitlich außerhalb der geplanten Betriebszeit realisieren, hingegen im Regelbetrieb eine zeitliche Verlegung solcher Maßnahmen ebenfalls gegeben, jedoch weiterhin mit negativen Auswirkungen für die Nutzenden verbunden ist.

K3: Im Regelbetrieb liegt ein großer Anteil der Ausfallzeiten innerhalb der Hauptverkehrszeit.

Die Hauptverkehrszeit bildet jenen Zeitraum der Tageszeit, in welchem eine verhältnismäßig hohe Anzahl an Schwerverkehren (potenzielle Nutzer) den betrachteten Streckenabschnitt befahren. Im Streckenabschnitt der Teststrecke ELISA stellt der Zeitraum von 09:00 Uhr bis 16:00 Uhr die Hauptverkehrszeit dar. Etwa 34 % aller Ausfallzeiten (unter Beachtung der relevanten Betriebstage) sind in den sieben Stunden der Hauptverkehrszeit aufgetreten, wobei insbesondere die unfallbedingten Ausfallursachen, unter anderem aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden, dominieren.

K4: Die geplante Betriebszeit bei Umsetzung eines zeitweisen Betriebs ist auf die potenziellen Nutzer abzustimmen.

Der zeitweise Betrieb in der Einführungsphase umfasst den Zeitraum von 08:00 Uhr bis 16:00 Uhr und deckte somit die Hauptverkehrszeit vollumfänglich und die Nebenverkehrszeit nur zeitweise ab. Da ein Großteil der potenziellen Nutzer jedoch auch in der Nebenverkehrszeit auf den Streckenabschnitt verkehren, sollte die Betriebszeit entsprechend sorgfältig geplant und ausgelegt werden. Die jeweiligen

Zeiträume der Betriebszeiten sollten im Vorfeld ermittelt und in Bezug auf die Kritikalität bewertet werden.

Die Kernaussagen werden in Kapitel 7 mit Hilfe von Expertenbefragungen validiert und dienen im Weiteren als Grundlage zur Ableitung der Empfehlungen zum Ausbau und Betrieb einer Oberleitungsanlage in Kapitel 8.

6.3.2 Einfluss unerwarteter Ausfallursachen

Einleitung

Im operativen Betrieb der Oberleitungsanlage sind im Betrachtungszeitraum Ausfallursachen aufgetreten, welche sowohl in der Art als auch in der Ausfalldauer nicht zu erwarten waren. Diese unerwarteten Ausfallursachen zeichnen sich durch einen erheblichen Einfluss auf die Verfügbarkeit der Anlage aus und führten teilweise zu technischen Anpassungen der Anlage.

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der unerwarteten Ausfallursachen, welche zum Teil auch als Kinderkrankheiten bezeichnet werden können, auf die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage analysiert. Hierzu wird zunächst das methodische Vorgehen aufgezeigt, bevor anschließend die Ergebnisse und Erkenntnisse dargestellt und erste Aussagen zum Einfluss der unerwarteten Ausfallursachen abgeleitet werden.

Methodisches Vorgehen

Für die Analyse des Einflusses der unerwarteten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage werden die Auswirkungen, in Form der Ausfalldauer, betrachtet. Dazu werden zunächst die unerwarteten Ausfallursachen identifiziert und erläutert. Im Anschluss werden die Auswirkungen der unerwarteten Ausfallursachen den Auswirkungen der restlichen Ausfallursachen gegenübergestellt und mittels einer Kontingenzanalyse die Signifikanz des Zusammenhangs bestimmt und somit ein Einfluss der unerwarteten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit nachgewiesen. Abschließend werden die Kernaussagen aus den erlangten Ergebnissen abgeleitet und dargelegt.

Ergebnisse und Diskussion

Von den im Betrachtungszeitraum aufgetretenen Ausfallursachen lassen sich drei Ereignisse als sogenannte „unerwartete Ausfallursachen“ identifizieren. Da es sich bei diesen unerwarteten Ausfallursachen ebenfalls um die Ausfallursachen mit den längsten Ausfallzeiten handelt, welche bereits in Abschnitt 5.4 beschrieben wurden, werden im Folgenden die Ausfallursachen nur durch den Kontext der Betrachtung als „unerwartet“ ergänzt.

#1 Unfall mit Beschädigung während der COVID-19-Pandemie

Bei Abschaltungen aufgrund von Verkehrsunfällen handelt es sich zunächst um erwartbare (jedoch nicht planbare) Ereignisse. Die Häufigkeit der Verkehrsunfälle ist dabei von vielen Faktoren abhängig, maßgebend jedoch von der Qualität der Straßenraumgestaltung und -ausstattung, der Verkehrsmenge und den aktuellen Witterungsverhältnissen (Rolison et al., 2018; Singh & Kathuria, 2021). Die Besonderheit zur Einstufung des Unfallereignisses am 24. Januar 2020 als eine unerwartete Ausfallursache ist hingegen, dass zum einen aufgrund des Abrisses eines Fahrdrachts das Ereignis nicht nur schwerwiegend war, sondern zum anderen, dass das Ereignis zeitgleich zur aufkommenden COVID-19-Pandemie eingetreten

ist. Die Maßnahmen zur Eindämmung der COVID-19-Pandemie erschwerten die Reparaturarbeiten derart, so dass eine Inbetriebnahme der betroffenen Fahrtrichtung erst im Mai 2020 erfolgen konnte.

#2 Isolatoren-Problematik

Neben den Verkehrsunfällen zählen auch die technischen Störungen an der Oberleitung zu den erwartbaren Ausfällen der Anlage. Dennoch ist die sogenannte Isolatoren-Problematik als eine unerwartete Ausfallursache zu klassifizieren, da die Reaktion der Isolatoren auf das Streusalz des Winterdienstes im Vorfeld nicht bekannt war. Die Folge war ein zunächst teilweiser und abschließend vollständiger Austausch der Isolatoren, wobei bereits zur Identifizierung des Problems eine Abschaltung der gesamten Oberleitungsanlage erfolgte.

#3 Wechsel der Zuständigkeiten

Die Überführung der Zuständigkeit des operativen Betriebs der Oberleitungsanlage von Hessen Mobil zur Autobahn GmbH war zunächst ein geplantes Ereignis, die Dauer der Übertragung der Zuständigkeit jedoch unerwartet lang, da eine Vielzahl von internen Voraussetzungen zunächst geschaffen werden mussten. In dieser Zeit konnte die Anlage nicht eingeschaltet werden. Es ist davon auszugehen, dass bei zukünftigen Veränderungen innerhalb der Zuständigkeiten eine schnellere Übertragung sichergestellt werden kann.

Die aufgeführten unerwarteten Ausfallursachen, bzw. genauer die Länge der Ausfallzeiten, resultieren insbesondere aus der Tatsache, dass es sich bei der Teststrecke um eine Pilotanlage handelt. Insgesamt umfasst die Ausfallzeit der aufgeführten Ereignisse einen zeitlichen Umfang von 3.970,60 Stunden in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) und 1.575,03 Stunden in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt). Dies entspricht einem Anteil von 70,6 % in Fahrtrichtung Süd und 47,8 % in Fahrtrichtung Nord. Es ist somit unbestreitbar, dass die unerwarteten Ausfallursachen einen erheblichen Einfluss auf die Verfügbarkeit im Betrachtungszeitraum aufwiesen.

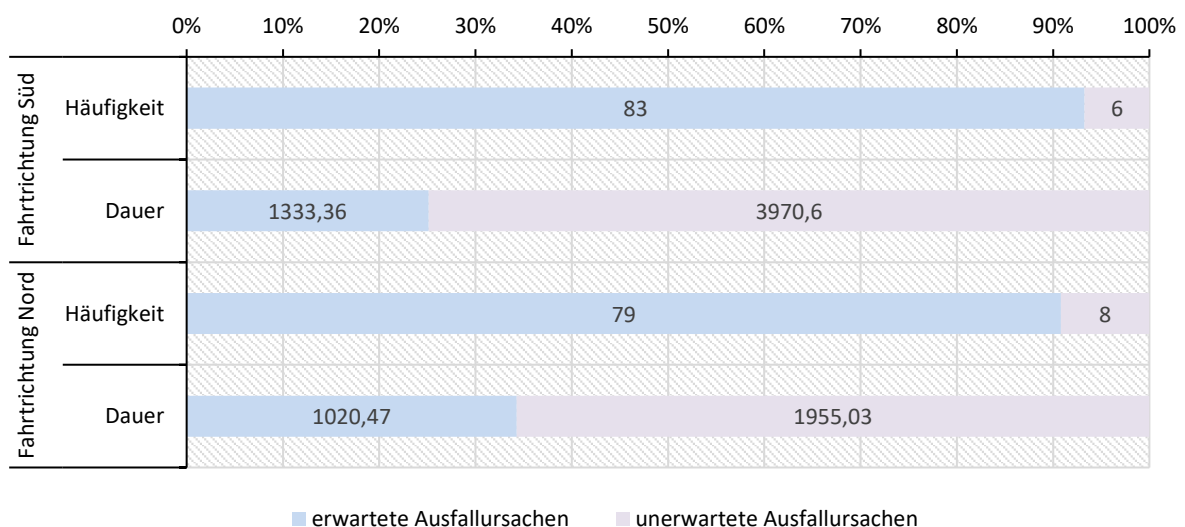


Abbildung 38: Gegenüberstellung der Häufigkeit und der Ausfallzeit (Dauer) in Stunden der erwarteten Ausfallursachen und der unerwarteten Ausfallursachen im Regelbetrieb (eigene Darstellung).

In Abbildung 38 sind die Häufigkeit und die Ausfallzeit der erwarteten und unerwarteten Ausfallursachen getrennt nach den Fahrtrichtungen für den Regelbetrieb dargestellt. Die Einführungsphase wurde aufgrund des zeitweisen Betriebs nicht berücksichtigt, um Verzerrungen auszuschließen. Es zeigt sich, dass im Regelbetrieb weniger als 10 % der Ausfallursachen unerwartete Ereignisse sind, gleichzeitig die Auswirkungen jedoch einen erheblichen Anteil aufweisen. Ein maßgebendes Ziel im Betrieb einer Oberleitungsanlage muss es demnach sein, dass die Ausfallzeit durch vorab geplante Störfallprogramme möglichst gering gehalten wird, indem eine umfangreiche Analyse der möglichen Ausfallursachen sowie der Lösungen dieser Ursachen durchgeführt wird.

Um die statistische Signifikanz bzgl. des Einflusses der unerwarteten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit zu bestimmen wird der Mann-Whitney U-Test angewendet. Die Ergebnisse der Durchführung des Mann-Whitney U-Tests sind in Tabelle 15 getrennt für beide Fahrtrichtungen dargestellt.

Tabelle 15: Ergebnisse des Mann-Whitney U-Tests bzgl. des Einflusses der unerwarteten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit (eigene Darstellung).

Vergleich	n (Gr. A)	Rang- summe (Gr. A)	n (Gr. B)	Rang- summe (Gr. B)	U-Wert	Z-Wert	p-Wert	r
Fahrtrichtung Süd (Darmstadt)	84	3573	7	613	3	-4,33	<0,001	0,45
Fahrtrichtung Nord (Frankfurt)	80	3349	8	567	109	-3,06	0,002	0,33

Gruppe A (Gr. A): erwartete Ausfallursachen; Gruppe B (Gr. B): unerwartete Ausfallursachen.

Der Einfluss der unerwarteten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage ist in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) mit einem p-Wert von $p < 0,001$ höchst signifikant und in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) mit $p = 0,002$ hoch signifikant. Die Effektstärke deutet mit einem $r = 0,45$ und einem $r = 0,33$ auf einen mittleren Effekt hin. Das Auftreten von unerwarteten Ausfallursachen führt somit nachweislich zu einer längeren Abschaltung der Oberleitungsanlage im Vergleich zu den erwarteten Ausfallursachen.

Kernaussagen zum Einfluss der unerwarteten Ausfallursachen

Das Auftreten von unerwarteten Ausfallursachen beeinflusst die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage. Folgende Kernaussagen aus den Analysen zum Einfluss der unerwarteten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit lassen sich ableiten:

K5: Unerwartete Ausfallursachen treten selten auf, führen jedoch zu erheblichen Auswirkungen im operativen Betrieb.

Im Zeitraum von 2020 bis 2022 (Zeitraum des betrachteten Regelbetriebs) konnten insgesamt drei Ausfallursachen als unerwartet identifiziert werden, welche jedoch einen maßgeblichen Anteil an der gesamten Ausfalldauer in diesem Zeitraum aufwiesen. Der Einfluss der unerwarteten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit ist dabei hoch bis höchst signifikant. Dies ist dem Charakter der unerwarteten Ausfallursachen geschuldet, da keine Strategien zur Eindämmung der Ausfallzeit

existieren. Das Auftreten unerwarteter Ausfallursachen innerhalb eines Testbetriebs ist jedoch zu erwarten und auch der Grund, einen solchen Betrieb durchzuführen.

K6: Zur Sicherstellung einer hohen Verfügbarkeit sind Störfallprogramme zu entwickeln.

Störfallprogramme (Strategien) dienen dazu, im Falle des Auftretens eines Problems (bspw. einer Störung im operativen Betrieb) möglichst schnell geeignete Maßnahmen zur Problemlösung und zur Rückkehr in den Regelbetrieb umzusetzen. Zwar lassen sich Störfallprogramme nicht für jede Art eines Störfallereignisses im Vorfeld aufstellen, dennoch sollten mögliche Ausfallursachen, soweit erfassbar, lückenlos vordefiniert und der jeweilige Lösungsansatz beschrieben werden. Mitunter ist es dabei möglich, dass beim Auftreten von unerwarteten Ausfallursachen ein bestehendes Störfallprogramm adaptiert werden kann, wodurch die Reaktionszeit und die Zeitdauer der Problemlösung reduziert werden kann.

Die Kernaussagen werden in Kapitel 7 mit Hilfe von Expertenbefragungen validiert und dienen im Weiteren als Grundlage zur Ableitung der Empfehlungen zum Ausbau und Betrieb einer Oberleitungsanlage in Kapitel 8.

6.3.3 Einfluss geplanter Ausfallursachen

Einleitung

Zusätzlich zu den unerwarteten Ausfallursachen (vgl. Abschnitt 6.3.2) wird in diesem Abschnitt der Einfluss der geplanten Ausfallursachen im Vergleich zu den ungeplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage analysiert. Um Verzerrungen innerhalb der Analyse zu vermeiden, werden die unerwarteten Ausfallursachen aus der Betrachtung entsprechend ausgeschlossen.

Im Folgenden werden das methodische Vorgehen beschrieben und die Ergebnisse und Erkenntnisse dargestellt sowie die ersten Aussagen abgeleitet.

Methodisches Vorgehen

Für die Analyse des Einflusses der geplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage werden die Auswirkungen, in Form der Ausfalldauer, betrachtet. Hierzu werden im ersten Schritt die geplanten und ungeplanten Ausfallursachen identifiziert und dargestellt. Um Verzerrungen in der Analyse zu vermeiden, werden die unerwarteten Ausfallursachen sowie die Abschaltungen im Jahr 2019 (Einführungsphase) nicht betrachtet. Auf Grundlage der Durchführung einer Kontingenzanalyse zwischen den ungeplanten und geplanten Ausfallursachen wird im zweiten Schritt der statistische Zusammenhang auf die Verfügbarkeit bewertet. Die Analysen dienen im Weiteren zur Aufstellung der Kernaussagen bzgl. des Einflusses der geplanten Ausfallursachen auf die Anlagenverfügbarkeit.

Ergebnisse und Diskussion

Der betrachtete Untersuchungszeitraum (Regelbetrieb) umfasst nach Ausschluss der unerwarteten Ausfallursachen in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) insgesamt 83 Ereignisse und in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) 80 Ereignisse. Die gesamte betrachtete Ausfalldauer beträgt

1.333,14 Stunden in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) und 1.019,49 Stunden in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt). Eine deskriptive Übersicht liefern die Werte nach Tabelle 16.

Tabelle 16: Ergebnisse der deskriptiven Auswertung zum Einfluss der geplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit (eigene Darstellung).

Fahrtrichtung	Ursache	Ausfalldauer (Stunden)	Anzahl (n)	Mittelwert (Stunden)	Median (Stunden)	Standardabweichung (Stunden)
Süd (Darmstadt)	geplant	895,41	35	25,58	10,13	39,91
	ungeplant	437,73	48	9,12	3,92	11,56
Nord (Frankfurt)	geplant	437,00	27	16,19	8,62	21,41
	ungeplant	582,49	53	10,99	4,75	14,95

Hinweis: Die Ausfalldauern der ungeplanten Ausfallursachen in Fahrtrichtung Süd (437,73 Stunden) und der geplanten Ausfallursachen in Fahrtrichtung Nord (437,00 Stunden) sind korrekt ermittelt.

Über die Tabelle 16 wird ersichtlich, dass sich die beiden Fahrtrichtungen in Bezug auf die Verteilung der Ausfalldauern unterscheiden. Während in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) die geplanten Ausfallursachen summiert beinahe doppelt so lang sind wie die ungeplanten Ausfallursachen, sind in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) die ungeplanten Ausfallursachen dominierend. Dies ist auf die durchgeführten Arbeiten zur Erweiterung der Oberleitungsanlage in Fahrtrichtung Süd zurückzuführen. So zeigen die erfassten Daten zum Anlagenbetrieb, dass die geplanten Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage insgesamt zehn Abschaltungen mit einer gesamten Ausfallzeit von 509,98 Stunden in Fahrtrichtung Süd und eine Abschaltung mit einer Dauer von 31,91 Stunden in Fahrtrichtung Nord verursachten. Insofern ist zu beachten, dass die ungeplanten Ausfallursachen im regulären Betrieb, d. h. ohne die Beachtung der Erweiterung der Anlage, sowohl in der Anzahl als auch in der jeweiligen Ausfalldauer höhere Werte gegenüber den geplanten Ausfallursachen annehmen, gleichwohl die mittlere Ausfalldauer (Mittelwert) deutlich geringer ist. Maßgebender Faktor hierbei sind die ungeplanten Ausfallursachen aufgrund der kurzfristigen Anforderungen zur Abschaltung der Anlage durch die Gefahrenabwehrbehörden.

Die statistische Signifikanz bzgl. des Einflusses der geplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit lässt sich aufgrund der Datentypen (nominal und metrisch) mit dem Mann-Whitney U-Test bestimmen. Die Ergebnisse der Durchführung des Mann-Whitney U-Tests sind in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Ergebnisse des Mann-Whitney U-Tests bzgl. des Einflusses der geplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit (eigene Darstellung).

Vergleich	n (Gr. A)	Rangsumme (Gr. A)	n (Gr. B)	Rangsumme (Gr. B)	U-Wert	Z-Wert	p-Wert (asym.)	r
Fahrtrichtung Süd (Darmstadt)	35	1770	48	1716	540	-2,77	0,006	0,30
Fahrtrichtung Nord (Frankfurt)	27	1248	53	1992	561	-1,57	0,116	0,18

Gruppe A (Gr. A): geplante Ausfallursachen; Gruppe B (Gr. B): ungeplante Ausfallursachen.

Die durchgeführte Analyse zeigt auf, dass eine hohe Signifikanz ($p = 0,006$) in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) besteht, diese sich aber nicht in die entgegengesetzte Fahrtrichtung bestätigt. Maßgebend für die unterschiedlichen Ergebnisse sind die Abschaltungen aufgrund der

Erweiterung der Oberleitungsanlage, welche in einem zweiten Schritt aus der Analyse ausgeschlossen werden.

Tabelle 18: Ergebnisse des Mann-Whitney U-Tests bzgl. des Einflusses der geplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit ohne Betrachtung der Abschaltungen aufgrund der Erweiterung (eigene Darstellung).

Vergleich	n (Gr. A)	Rang- summe (Gr. A)	n (Gr. B)	Rang- summe (Gr. B)	U-Wert	Z-Wert	p-Wert (asym.)	r
Fahrtrichtung Süd (Darmstadt)	25	1041	48	1660	484	-1,35	0,178	0,16
Fahrtrichtung Nord (Frankfurt)	26	1172	53	1988	557	-1,38	0,168	0,15

Gruppe A (Gr. A): geplante Ausfallursachen; Gruppe B (Gr. B): ungeplante Ausfallursachen.

Mit Ausschluss der Abschaltungen aufgrund der Erweiterung der Oberleitungsanlage aus der Analyse lässt sich die Unabhängigkeit der beiden Stichproben und somit der Einfluss auf die Verfügbarkeit nicht mehr nachweisen. Zwar sind die geplanten Abschaltungen (bspw. aufgrund von Arbeitsstätten) im Mittel länger, jedoch reicht dieser Unterschied nicht aus, um einen signifikanten Unterschied zu den ungeplanten Abschaltungen (bspw. Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden) mit Hilfe des Mann-Whitney U-Tests aufzuzeigen.

Tabelle 19: Aufteilung der Ausfallzeiten (in Stunden) nach geplanter und ungeplanter Ausfallursache in Abhängigkeit der Betriebszeit für Fahrtrichtung Süd (eigene Darstellung).

Ausfallursache	00:00 bis 04:00 Uhr	04:00 bis 09:00 Uhr	09:00 bis 16:00 Uhr	16:00 bis 21:00 Uhr	21:00 bis 24:00 Uhr	Summe
Geplante Ursache	43,00 (11,15 %)	75,26 (19,52 %)	170,30 (44,17 %)	66,97 (17,37 %)	30,00 (7,78 %)	385,53 (100 %)
Ungeplante Ursache	78,93 (18,03 %)	114,73 (26,21 %)	111,35 (25,44 %)	78,56 (17,95 %)	54,16 (12,37 %)	437,73 (100 %)

Werte ohne die Betrachtung des Jahres 2019 (Einführungsphase) sowie ohne die Ausfallzeiten aufgrund der Arbeiten zur Erweiterung der Oberleitungsanlage.

Tabelle 20: Aufteilung der Ausfallzeiten (in Stunden) nach geplanter und ungeplanter Ausfallursache in Abhängigkeit der Betriebszeit für Fahrtrichtung Nord (eigene Darstellung).

Ausfallursache	00:00 bis 04:00 Uhr	04:00 bis 09:00 Uhr	09:00 bis 16:00 Uhr	16:00 bis 21:00 Uhr	21:00 bis 24:00 Uhr	Summe
Geplante Ursache	47,00 (11,60 %)	81,36 (20,09 %)	175,44 (43,31 %)	68,28 (16,86 %)	33,00 (8,15 %)	405,09 (100 %)
Ungeplante Ursache	106,93 (18,36 %)	147,34 (25,29 %)	147,64 (25,35 %)	105,42 (18,10 %)	75,16 (12,90 %)	582,49 (100 %)

Werte ohne die Betrachtung des Jahres 2019 (Einführungsphase) sowie ohne die Ausfallzeiten aufgrund der Arbeiten zur Erweiterung der Oberleitungsanlage.

Im nächsten Schritt werden die Ausfallursachen in Bezug auf die kritischen Betriebszeiten untersucht. Hierzu wird die Ausfallzeit der jeweiligen Ausfallursache über die Betriebszeiten¹⁵

¹⁵ Für diese Analyse wurden die Ausfallzeiten, welche im Anlagenbetriebstagebuch in der koordinierten Weltzeit UTC (Universal Time Coordinated) hinterlegt sind, in die mitteleuropäische Zeit (MEZ; Central European Time, CET) bzw. in die mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ, engl. CEST) überführt.

aufgeteilt (als Beispiel vgl. Tabelle 14 auf Seite 95) und ausgewertet. In Tabelle 19 und in Tabelle 20 sind die ermittelten Aufteilungen der jeweiligen Fahrtrichtungen dargestellt.

Auch wenn sich in Bezug auf die Anzahl und Ausfalldauer zwischen den geplanten und ungeplanten Ausfallursachen keine Unabhängigkeit aufzeigt, so sind deutliche Unterschiede zwischen der Verteilung der Ausfallzeiten in Bezug auf die Betriebszeit der Oberleitungsanlage ersichtlich. So entfiel fast die Hälfte aller Ausfallzeiten bei geplanten Abschaltungen (44,17 % bzw. 43,31 %) in den Zeitraum der Hauptverkehrszeit, hingegen bei den ungeplanten Abschaltungen eine gleichmäßigere Verteilung vorzufinden ist. Unter der Annahme, dass die geplanten Abschaltungen zwingend erforderlich sind und in Bezug auf die Dauer nicht verkürzt werden können, besteht zumindest das Potenzial, die Auswirkungen durch eine zeitliche Verlegung der geplanten Abschaltungen zu reduzieren.

Die Abschaltungszeiten der geplanten Abschaltungen in der Schwachverkehrszeit (21:00 Uhr bis 04:00 Uhr) basieren vollumfänglich aufgrund von Abschaltungen über einen Tageswechsel; somit fanden keine geplanten Abschaltungen statt, welche innerhalb der Schwachverkehrszeit starteten oder endeten. Die größten Auswirkungen (längste Ausfallzeiten) resultieren bei den geplanten Abschaltungen aufgrund von Serverarbeiten (etwa 95 Stunden), von sicherheitsbedingten Abschaltungen wegen einer Sturmwarnung (etwa 65 Stunden) und von Inspektionen und Wartungen der Anlage (mehrfache Abschaltungen im Betrachtungszeitraum mit insgesamt etwa 109 Stunden). Bei den ungeplanten Abschaltungen dominieren weitgehend die Abschaltungen aufgrund von Unfällen im Streckenbereich der Oberleitungsanlage und der Anforderungen zur Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden.

Kernaussagen zum Einfluss der geplanten Ausfallursachen

Geplante Ausfallursachen und ungeplante Ausfallursachen beeinflussen die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage. Zwar treten ungeplante Abschaltungen häufiger auf, jedoch besteht in Bezug auf die Ausfalldauer zwischen den geplanten und ungeplanten Ausfallursachen keine Unabhängigkeit. Signifikante Unterschiede zeigen sich hingegen in der Verteilung der Ausfallzeit.

Folgende Kernaussagen aus den Analysen zum Einfluss der geplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit lassen sich ableiten:

K7: Geplante Ausfallursachen treten seltener auf als ungeplante Ausfallursachen.

Im betrachteten Zeitraum von 2020 bis 2022 (Regelbetrieb) konnten insgesamt 35 geplante Abschaltungen und 48 ungeplante Abschaltungen in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) und 27 geplante Abschaltungen und 53 ungeplante Abschaltungen in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) identifiziert werden (insgesamt 112 Abschaltungen aufgrund von gleichzeitigen Abschaltungen in beide Fahrtrichtungen). Maßgebender Grund hierbei ist die hohe Anzahl an Abschaltungen aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden (41 von 112 Abschaltungen; ungeplante Abschaltungen). Zusätzlich fallen im Betrachtungszeitraum 11 geplante Abschaltungen aufgrund der Erweiterung der Oberleitungsanlage an, so dass alleine fast die Hälfte aller Abschaltungen (58 von 101) nicht vorhersehbar auftraten.

K8: Die Auswirkungen von geplanten und ungeplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage unterscheiden sich nicht signifikant.

Die Ausfalldauern (Auswirkungen) der betrachteten Abschaltungen im Regelbetrieb (ohne Betrachtung der unerwarteten Ausfallursachen) variieren von wenigen Minuten bis maximal etwa 95 Stunden. Bei der Verteilung der jeweiligen Ausfalldauern nach dem Störungstyp (geplant und ungeplant) zeigt sich kein signifikanter Unterschied aus. Dies bedeutet, dass sowohl geplante Ausfallursachen mit längerer und kürzerer Ausfalldauer aufgetreten sind. Maßgebender Grund für lange Ausfalldauern bei den ungeplanten Abschaltungen sind die Abschaltungen aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden, welche teilweise aus einer verspäteten Wiedereinschaltung (am nächsten Tag oder nach einem Wochenende) resultieren.

K9: Geplante Ausfallursachen finden hauptsächlich während der Hauptverkehrszeit im Betrieb einer Oberleitungsanlage statt.

Über 40 % der Ausfallzeiten liegen bei den geplanten Abschaltungen innerhalb der Hauptverkehrszeit der Oberleitungsanlage, lediglich etwa 20 % in der Schwachverkehrszeit. Damit unterscheidet sich die Verteilung der Ausfallzeit der geplanten und ungeplanten Abschaltungen signifikant voneinander. So liegen die Ausfallzeiten bei den ungeplanten Abschaltungen zu etwa 25 % in der Hauptverkehrszeit und etwa 30 % in der Schwachverkehrszeit. Die Auswirkungen der Ausfallzeiten aufgrund geplanter Ausfallursachen sind somit kritischer zu betrachten und die Umsetzungsmöglichkeit der geplanten Abschaltungen außerhalb der Hauptverkehrszeit zu prüfen.

K10: Durch geeignete Maßnahmen lassen sich die Ausfallzeiten ungeplanter sowie die negativen Auswirkungen geplanter Ausfallursachen reduzieren.

Bei der Betrachtung der Ausfallzeiten zeigt sich, dass beim Auftreten von ungeplanten Ausfallursachen in der Nachtzeit oder am Wochenende eine Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage teilweise erst am darauffolgenden Arbeitstag durchgeführt wird, hingegen bei den geplanten Abschaltungen der Schwerpunkt der Ausfallzeit innerhalb der Hauptverkehrszeit liegt. Eine Steigerung der Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage sowie eine Reduzierung der negativen Auswirkungen kann durch entsprechende Störfallprogramme (Strategien) erreicht werden. Gegebenenfalls bietet sich auch die Bündelung planbarer Ausfallursachen, wie bspw. die Durchführung von Arbeiten des Straßenbetriebsdienstes, die Wartungen der Energieversorgungsunternehmen und die regelmäßige Wartung und Instandhaltung der Oberleitungsanlage, an, um Ausfallzeiten zu reduzieren.

Die Kernaussagen zum Einfluss der geplanten Ausfallursachen werden in Kapitel 7 mit Hilfe von Expertenbefragungen validiert und dienen im Weiteren als Grundlage zur Ableitung der Empfehlungen zum Ausbau und Betrieb einer Oberleitungsanlage in Kapitel 8.

6.3.4 Einfluss der Gefahrenabwehrbehörden

Einleitung

Wie bereits in den Abschnitten 6.1 und 6.3.3 aufgezeigt, weisen die Abschaltungen aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden einen erheblichen Anteil an den Häufigkeiten der Abschaltungen und an den Ausfallzeiten auf. Dabei ist zu beachten, dass die Abschaltungen unplanmäßig sind und ein auslösendes Ereignis über den gesamten Tagesablauf auftreten kann, gleichwohl ein Zusammenhang des Eintretens mit den vorherrschenden Verkehrs- und Witterungsbedingungen unterstellt werden kann. Dementsprechend wird in diesem Abschnitt der Einfluss der Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage gesondert fokussiert.

Im Folgenden werden das methodische Vorgehen beschrieben und die Ergebnisse und Erkenntnisse dargestellt sowie die ersten Aussagen abgeleitet.

Methodisches Vorgehen

Die Analyse des Einflusses der Abschaltungen aufgrund der Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden auf die Verfügbarkeit gliedert sich in drei Stufen. Dabei umfasst die erste Stufe die Auswertung der Einsätze der Gefahrenabwehrbehörden im Streckenbereich der ELISA-Teststrecke zur Darstellung der potenziellen, auslösenden Störungsereignisse. Als Grundlage dienen die Daten zum Unfallgeschehen im Streckenbereich. Um Verzerrungen in der Analyse zu vermeiden, werden die Abschaltungen im Jahr 2019 (Einführungsphase) nicht betrachtet. In der zweiten Stufe werden die erfassten potenziellen, auslösenden Störungsereignisse mit den im operativen Anlagenbetrieb aufgetretenen Abschaltungen verglichen, um zum einen den Zusammenhang der Daten aufzuzeigen, sowie zum anderen aber auch Einsätze zu identifizieren, die nicht zu einer Abschaltung der Anlage geführt haben. Im letzten Schritt der Analyse werden die Einsätze der Gefahrenabwehrbehörden bzw. die hieraus resultierenden Abschaltungen in Bezug auf die Verteilung in den Abschaltungszeiten während der Betriebszeit bewertet.

Ergebnisse und Diskussion

Die Unfalldaten im Betrachtungszeitraum wurden seitens der Autobahn GmbH des Bundes bereitgestellt und umfassen alle gemeldeten Verkehrsunfälle entlang der Bundesautobahn BAB 5. Die für die Auswertung relevanten Informationen aus den Daten sind das Datum und die Uhrzeit des jeweiligen Verkehrsunfalls sowie die Lage (beschrieben als GPS-Koordinaten). Informationen zum Unfallhergang oder zur Unfallschwere sind nicht von Bedeutung.

Tabelle 21: Darstellung und Ermittlung der relevanten Auswertungsfälle aus den Unfalldaten (eigene Darstellung).

Betrachtungsjahr	Anzahl gemeldeter Unfälle (BAB 5)	Unfälle im Bereich der Teststrecke		
		Unfälle im Bereich der Teststrecke	Davon auf der Fahrbahn	Davon abseits der Fahrbahn
2020	2377	62	42	20
2021	2866	57	27	30
2022	3371	89	65	24

Die für die Auswertung relevanten Fälle wurden anhand der hinterlegten GPS-Koordinaten ermittelt, indem im ersten Schritt die Datensätze im Bereich der Teststrecke mittels der GPS-Koordinaten gefiltert und im zweiten Schritt jeder identifizierte Eintrag im Bereich der Teststrecke auf die genaue Lage hin visuell bewertet wurde (Abbildung 39). Dabei wurde berücksichtigt, ob sich der Verkehrsunfall auf der Fahrbahn oder abseits der Fahrbahn ereignete, da Verkehrsunfälle abseits der Fahrbahn für gewöhnlich keine Abschaltung der Oberleitungsanlage erfordern.

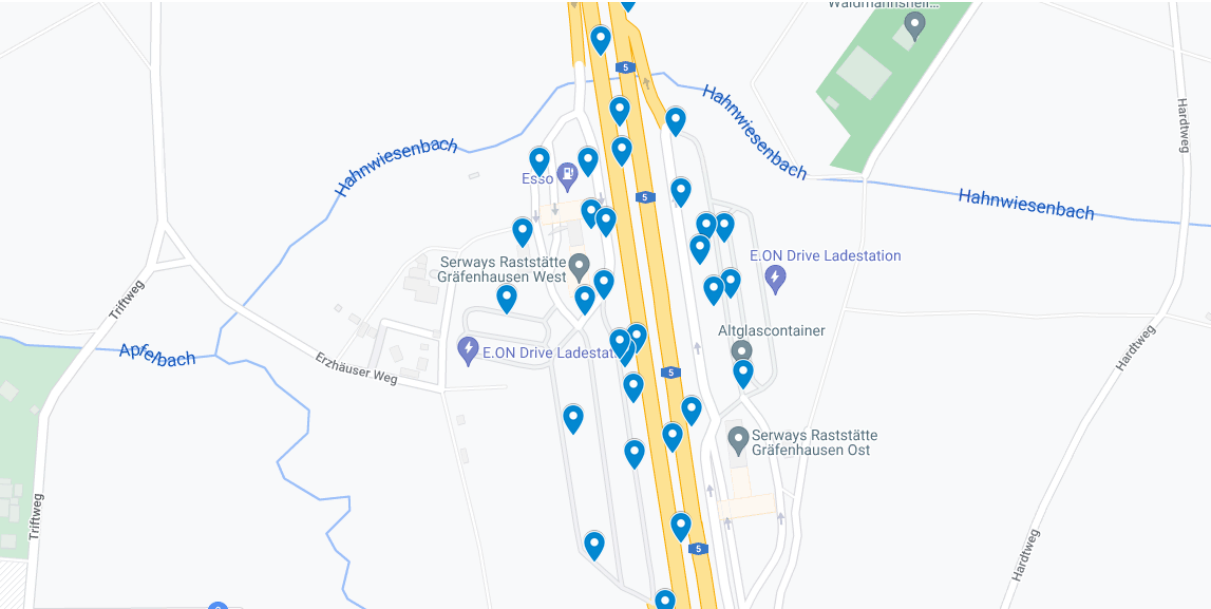


Abbildung 39: Visuelle Bewertung der Lage der Verkehrsunfälle entlang der Autobahn (eigene Darstellung; erstellt mit: Google My Maps, 2024).

Die Anzahl der im Streckenbereich der ELISA-Teststrecke aufgetretenen Verkehrsunfälle (potenzielle Störungsereignisse) liegt unterhalb der Anzahl der im Anlagenbetrieb identifizieren Abschaltungen aufgrund der Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden. Hier wurden im Betrachtungszeitraum 43 Abschaltungen registriert, wobei zu beachten ist, dass eine Abschaltung nur notwendig ist, wenn die Oberleitungsanlage im Betrieb ist. Insgesamt wurden hingegen 134 potenzielle Störungsereignisse identifiziert, wobei 25 Abschaltungen direkt in Verbindung mit einer Abschaltung der Oberleitungsanlage gebracht werden können.

Tabelle 22: Analyse der potenziellen Störungsereignisse zur Ermittlung des Anteils der Anzahl Abschaltungen im operativen Betrieb im Verhältnis der relevanten Störungsereignisse (eigene Darstellung).

Jahr	potenzielle Störungsereignisse	Anlage nicht im Betrieb	Anlage im Betrieb	Abschaltung der Anlage	Anteil der Abschaltungen
2020	42	5	37	12	32,4 %
2021	27	8	19	6	31,6 %
2022	65	4	61	7	11,5 %

Im Jahr 2020 konnten insgesamt 42 Unfallereignisse erfasst werden, welche auf der Fahrbahn eingetreten sind. Über den Vergleich des Anlagenbetriebs konnte festgestellt werden, dass bei fünf Unfallereignissen die Oberleitungsanlage bereits ausgeschaltet war und somit 37

Unfallereignisse als relevante Störungsereignisse betrachtet werden können. Bei 12 der 37 relevanten Unfallereignisse erfolgte eine Abschaltung der Oberleitungsanlage, so dass der Anteil der Abschaltungen für das Jahr 2020 etwa 32,4 % beträgt (vgl. Tabelle 22). In den folgenden Jahren 2021 und 2022 reduzierte sich dieser Anteil über 31,6 % auf lediglich 11,5 %. Es ist anzunehmen, dass die Gefahrenabwehrbehörden insbesondere zu Beginn des Feldversuchs eine größere Anzahl von Anforderungen zur Abschaltung der Oberleitungsanlage tätigten. Durch die steigende Vertrautheit mit dem System sinkt die Anzahl an angeforderten Abschaltungen entsprechend.

Im letzten Schritt der Analyse des Einflusses der angeforderten Abschaltungen durch die Gefahrenabwehrbehörden auf die Verfügbarkeit werden diese in Bezug auf die Abschaltungsdauer und Verteilung innerhalb der Betriebszeit betrachtet und bewertet. Insgesamt lassen sich 43 Abschaltungen auf eine Anforderung durch die Gefahrenabwehrbehörden zurückführen, wobei diese teilweise nur eine Fahrtrichtung betreffen, da die andere Fahrtrichtung bereits wegen eines vorausgegangenen Abschaltungsgrunds nicht in Betrieb war (halbseitiger Betrieb). Um dennoch eine Aussage zu den Abschaltungsdauern und der Verteilung zu treffen, und insbesondere aus dem Grund, dass bei dieser Art von Abschaltungen unabhängig der Lage des Störungsereignisses stets beide Fahrtrichtungen abgeschaltet werden, werden im Weiteren die Abschaltungen im Gesamten betrachtet. Eine Aussage zur Abschaltungsdauer der einzelnen Fahrtrichtungen kann (und soll) aus diesen Analysen nicht abgeleitet werden. Tabelle 23 zeigt die Ergebnisse der deskriptiven Auswertung.

Tabelle 23: Ergebnisse der deskriptiven Auswertung zum Einfluss der Gefahrenabwehrbehörden auf die Verfügbarkeit (eigene Darstellung).

Ausfallursache	Ursache	Ausfalldauer (Stunden)	Anzahl (n)	Mittelwert (Stunden)	Median (Stunden)	Standardabweichung (Stunden)
Anforderung Gefahrenabwehr- behörden	ungeplant	482,31	43	11,22	5,07	14,48

Hinweis: Gemeinsame Betrachtung beider Fahrtrichtungen ohne Aufsummierung der Ausfalldauer.

Insgesamt konnte im Betrachtungszeitraum eine Ausfalldauer von 482,31 Stunden ermittelt werden, wobei dieser Wert nicht den gesamten Betrachtungszeitraum widerspiegelt, da jene Einsätze der Gefahrenabwehrbehörden nicht erfasst werden, wenn beide Fahrtrichtungen bereits abgeschaltet waren. Dementsprechend wird der Einfluss der Gefahrenabwehrbehörden relativ zu den einzelnen Ereignissen ($n = 43$) betrachtet. Hier zeigt sich, dass im Mittel eine Abschaltung etwa 11,22 Stunden betrug, die Abweichung zum Median mit 5,07 Stunden verdeutlicht gleichsam, dass einzelne Ereignisse als Extremwerte in Bezug auf die Ausfalldauer aufgetreten sind. Die Ereignisse mit den größten Ausfalldauern (> 24 Stunden) sind dabei:

- 14.03.2020 bis 17.03.2020: Das Störungsereignis ereignete sich an einem Samstagabend gegen 18:56 Uhr. Die Inbetriebnahme erfolgte erst am Dienstag nach der Prüfung auf Beschädigung am 17.03.2020 um 08:01 Uhr. Die Ausfalldauer betrug 61,09 Stunden.
- 20.03.2020 bis 23.03.2020: Das Störungsereignis ereignete sich an einem Freitagabend gegen 19:45 Uhr. Die Inbetriebnahme erfolgte erst am Montag nach der Prüfung auf Beschädigung am 23.03.2020 um 09:12 Uhr. Die Ausfalldauer betrug 61,45 Stunden.

- 20.03.2022 bis 21.03.2022: Das Störungsereignis ereignete sich an einem Sonntag gegen 06:42 Uhr. Die Inbetriebnahme erfolgte am darauffolgenden Montag um 12:34 Uhr. Die Ausfalldauer betrug 29,90 Stunden.
- 02.07.2022 bis 04.07.2022: Das Störungsereignis ereignete sich in der Nacht von Samstag auf Sonntag gegen 00:32 Uhr. Die Inbetriebnahme erfolgte am darauffolgenden Montag nach der Prüfung auf Beschädigung um 16:45 Uhr. Die Ausfalldauer betrug 40,22 Stunden.
- 26.12.2022 bis 27.12.2022: Das Störungsereignis ereignete sich an einem Montag (Feiertag) gegen 07:29 Uhr. Die Inbetriebnahme erfolgte am darauffolgenden Dienstag um 07:30 Uhr. Die Ausfalldauer betrug 24,00 Stunden.
- 30.12.2022 bis 31.12.2022: Das Störungsereignis ereignete sich an einem Freitag gegen 17:59 Uhr. Die Inbetriebnahme erfolgte am darauffolgenden Montag um 14:40 Uhr. Da der Betrachtungszeitraum auf den 31.12.2022 begrenzt ist, beträgt die berücksichtigte Ausfalldauer lediglich 31,00 Stunden¹⁶.

Die Betrachtung der einzelnen Ereignisse zeigt den Grund der langen Abschaltung und der Differenz zwischen dem Median und dem Mittelwert eindrucksvoll auf. In allen Fällen kam es kurz vor oder während eines Wochenendes (oder eines Feiertags) zu einer Anforderung der Gefahrenabwehrbehörden. Da die Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage nur einem eingeschränkten Kreis an Personen vorbehalten ist, welche nicht zu jeder Tages- und Nachtzeit im Dienst sind, kam es zu einer langen Ausfalldauer (vgl. Kap 6.3.8). Die Dauer der Abschaltung ist demnach sowohl vom Tag, aber auch von dem Zeitpunkt des Eintretens abhängig.

Tabelle 24: Deskriptive Auswertung bzgl. des Tages des Eintretens des Störungsereignisses und der Ausfalldauer (eigene Darstellung).

Wochentag des Eintretens	Anzahl Abschaltungen (n)	Ausfalldauer (Stunden)	Mittelwert (Stunden)	Median (Stunden)	Minimum (Stunden)	Maximum (Stunden)
Montag	9	74,64	8,29	7,59	1,51	24,00
Dienstag	3	32,83	10,94	14,45	3,60	14,79
Mittwoch	10	40,64	4,06	2,61	0,30	15,81
Donnerstag	5	16,51	3,30	2,30	1,44	6,53
Freitag	8	121,90	15,24	3,99	1,93	61,45
Samstag	4	123,98	30,99	28,94	5,01	61,09
Sonntag	4	71,82	17,96	15,42	11,11	29,88

Hinweis: Gemeinsame Betrachtung beider Fahrtrichtungen ohne Aufsummierung der Ausfalldauer. Die Zuordnung eines Ereignisses zum Tag des Eintretens auf Basis MEZ.

In Tabelle 24 sind die Werte zur gesamten Ausfalldauer sowie die statistischen Parameter zur Ausfalldauer in Abhängigkeit vom Wochentag des Eintretens des Störungsereignisses dargestellt. Wie sich bereits aus den oben aufgeführten Ereignissen ableiten lässt, zeigen der Freitag sowie der Samstag und Sonntag die längste mittleren Ausfalldauern (15,24 bis 30,99 Stunden) auf. Der geringe Median für den Freitag verdeutlicht indes, dass auch eine größere

¹⁶ An dieser Stelle errechnet sich die Ausfalldauer über die UTC Zeit, dies bedeutet, dass das Ereignis bereits um 16:59 Uhr (UTC) eingetreten ist, weshalb eine Ausfallzeit von 31 Stunden angegeben wird. Für die Beschreibung der Ausfälle wurden die Werte auf die MEZ bzw. MESZ umgerechnet.

Anzahl an kürzeren Abschaltungen, insbesondere in der Morgen- und Mittagszeit, vorgefallen sind.

Tabelle 25: Deskriptive Auswertung bzgl. der Tageszeit des Eintretens des Störungsereignisses und der Ausfalldauer (eigene Darstellung).

Tageszeit des Eintretens	Anzahl Abschaltungen (n)	Ausfalldauer (Stunden)	Mittelwert (Stunden)	Median (Stunden)	Minimum (Stunden)	Maximum (Stunden)
0:00 Uhr bis 05:59 Uhr	7	79,89	11,41	6,61	4,75	40,22
06:00 Uhr bis 11:59 Uhr	11	91,62	8,33	4,15	1,41	29,88
12:00 Uhr bis 17:59 Uhr	15	84,00	5,60	2,30	0,30	16,82
18:00 Uhr bis 23:59 Uhr	10	226,80	22,68	14,11	2,33	61,45

Hinweis: Gemeinsame Betrachtung beider Fahrtrichtungen (jedoch einfache Werte). Die Zuordnung eines Ereignisses zur Tageszeit des Eintretens auf Basis MEZ.

Die Abhängigkeit der Tageszeit des Eintretens eines Störungsereignisses und der Ausfalldauer ist in Tabelle 25 dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass insbesondere jene Tageszeit mit einer hohen Ausfalldauer einhergeht, welche in den frühen Morgenstunden (zwischen 0 Uhr und 6 Uhr) oder in den Abendstunden (zwischen 18 Uhr und 24 Uhr) liegt. In diesen Zeiträumen liegen die Mittelwerte und der Median deutlich über den Werten der Tageszeiträume zwischen 6 Uhr und 18 Uhr.

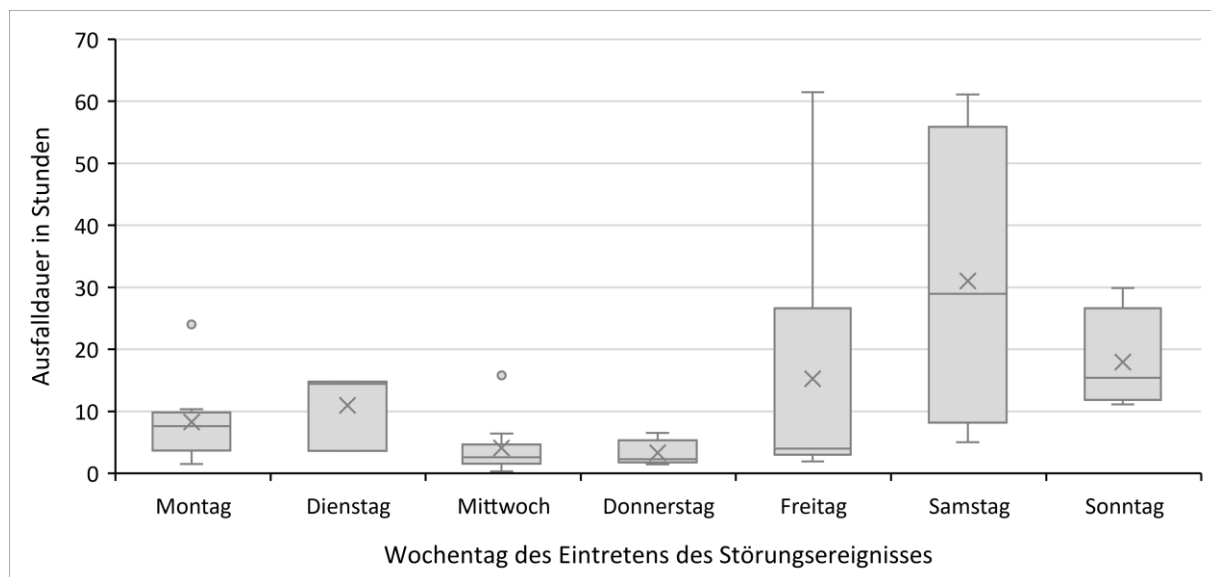


Abbildung 40: Boxplots der Zusammenhänge zwischen der Ausfalldauer in Stunden und dem Wochentag des Eintretens des Störungsereignisses.

Die detektierten Zusammenhänge lassen sich als Boxplots visualisieren und verdeutlichen die Abhängigkeit bzw. die Verzerrung in Bezug auf den Einfluss der Gefahrenabwehrbehörden auf die Verfügbarkeit aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten zur Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage. Betrachtet man lediglich die Tage Montag bis Donnerstag und die Tageszeiträume zwischen 6 Uhr und 18 Uhr (reduzierte Betrachtung), so ergibt sich eine mittlere Ausfalldauer von 5,45 Stunden und ein Median von 2,64 Stunden.

Im letzten Schritt werden die Ausfallzeiten in Abhängigkeit der Betriebszeit analysiert, wobei zwischen der gesamten Betrachtung und der reduzierten Betrachtung differenziert wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 26 aufgeführt.

Tabelle 26: Aufteilung der Ausfallzeiten (in Stunden) aufgrund der Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden (gesamte und reduzierte Betrachtung) in Abhängigkeit der Betriebszeit für beide Fahrtrichtungen (eigene Darstellung).

Ausfallursache	00:00 bis 04:00 Uhr	04:00 bis 09:00 Uhr	09:00 bis 16:00 Uhr	16:00 bis 21:00 Uhr	21:00 bis 24:00 Uhr	Summe
Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden (gesamt)	90,93 (18,85 %)	125,10 (25,94 %)	116,91 (24,24 %)	86,20 (17,87 %)	63,17 (13,10 %)	482,31 (100 %)
Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden (reduziert)	12,00 (11,58 %)	17,61 (16,99 %)	41,15 (39,70 %)	22,99 (22,18 %)	9,91 (9,56 %)	103,66 (100 %)

Reduzierte Werte umfassen nur den Eintritt des Ereignisses an den Wochentagen Montag bis Donnerstag sowie in den Tageszeiträumen zwischen 6 Uhr und 18 Uhr.

Die Ausfallzeiten verteilen sich in Bezug auf die gesamte Betrachtung aller Ereignisse über den gesamten Tageszeitraum, wobei sich die anteilig meisten Ausfallzeiten im Bereich der Neben- und Hauptverkehrszeit befinden. Dies ist letztlich der erhöhten Verkehrsmenge und der damit einhergehenden erhöhten Anzahl an Verkehrsunfällen geschuldet. Auch in Bezug auf die reduzierte Betrachtung zeigen sich in diesem Zeitfenster die ausgeprägten Spitzen, welche jedoch unter der Berücksichtigung der Beschränkung auf die Tageszeiträumen zwischen 6 Uhr und 18 Uhr zu erwarten sind.

Kernaussagen zum Einfluss der Gefahrenabwehrbehörden

Die Abschaltungen aufgrund der Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden haben einen direkten Einfluss auf die Verfügbarkeit, nicht nur aufgrund der Dauer des Einsatzes der Gefahrenabwehrbehörden, sondern insbesondere auch aufgrund des kurzfristig notwendigen Abschaltens. Folgende Kernaussagen aus den Analysen zum Einfluss der geplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit lassen sich ableiten:

K11: Nicht jedes Störungsereignis bedarf einer Abschaltung der Oberleitungsanlage.

Innerhalb der Analyse der Unfalldaten konnten für den Zeitraum 2020 bis 2022 insgesamt 134 potenzielle Störungsereignisse identifiziert werden, welche einen Einfluss auf die Verfügbarkeit aufweisen könnten. Es zeigt sich weiterhin, dass bei 17 Ereignissen die Oberleitungsanlage nicht in Betrieb war und somit keine Abschaltung hätte erfolgen können. Bei den übrigen Ereignissen variiert der Anteil der Abschaltungen zwischen 11,5 % und 32,4 %. Bei einem Großteil der Einsätze der Gefahrenabwehrbehörden finden somit keine Abschaltungen der Oberleitungsanlage statt bzw. erfolgt keine Anforderung zur Abschaltung.

K12: Der Anteil der Abschaltungen in Bezug auf die potenziellen Störungsereignisse sinkt mit der Dauer des Betriebs.

Während im Jahr 2020 noch fast jedes dritte Störungsereignis zu einer Abschaltung der Oberleitungsanlage führte, reduzierte sich der Wert auf lediglich 11,5 % im Jahr

2022, so dass tendenziell von einer Reduktion des Anteils ausgegangen werden kann. Der geringe Anteil der relevanten Störungsereignisse ist hingegen darauf zurückzuführen, dass der Großteil der Einsätze der Gefahrenabwehrbehörden kleinere Verkehrsunfälle umfasst, welche keiner Bergungsarbeiten bedürfen.

K13: Die alleinige Abschaltung der betroffenen Fahrtrichtung würde die Verfügbarkeit erheblich erhöhen.

Auch wenn die Anzahl der relevanten Störungsereignisse weitaus geringer ist als die Anzahl der potenziellen Störungsereignisse, so bilden die Abschaltungen aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden den größten Anteil aller Abschaltungen im Jahr. Durch eine richtungsbezogene Abschaltung (halbseitiger Betrieb) lässt sich die Anzahl der Ereignisse halbieren, wodurch die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage gesteigert werden kann. Im Falle einer anschließenden Prüfung auf Beschädigung oder einer gegebenenfalls notwendigen Reparatur der Oberleitungsanlage wirkt sich die Durchführung des halbseitigen Betriebs zusätzlich auf die nachgelagerten Prozesse aus.

K14: Der Einsatz von Personal mit Befugnis zur Wiedereinschaltung zu allen Tages- und Nachtzeiten würde die Verfügbarkeit erheblich erhöhen.

Über die Auswertungen konnte festgestellt werden, dass die Abschaltungen aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden insbesondere am Wochenende oder in der Nachtzeit erhebliche Auswirkungen auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage aufweisen. Dies ist bedingt durch die eingeschränkte Personalverfügbarkeit mit Befugnis zur Wiedereinschaltung. Eine Ausweitung des Personenkreises, bspw. auf die Operatoren in der Verkehrsmanagementzentrale würde daher zu einer erheblichen Steigerung der Anlagenverfügbarkeit beitragen können.

Die Kernaussagen zum Einfluss der Gefahrenabwehrbehörden werden in Kapitel 7 mit Hilfe von Expertenbefragungen validiert und dienen im Weiteren als Grundlage zur Ableitung der Empfehlungen zum Ausbau und Betrieb einer Oberleitungsanlage in Kapitel 8.

6.3.5 Einfluss der Witterung

Einleitung

Im Betrachtungszeitraum des Anlagenbetriebs konnten Zusammenhänge zwischen der Verfügbarkeit und den vorherrschenden Witterungsbedingungen identifiziert werden. So wurde am 25.07.2019 und am 26.07.2019 der operative Betrieb aufgrund einer Warnmeldung im Unterwerk bzgl. des Erreichens einer kritischen Raumtemperatur, welche auf eine erhöhte Außentemperatur zurückzuführen war, vorzeitig eingestellt. Bereits einen Monat später, am 18.08.2019, kam es zu einem Sturmschaden an der Oberleitung, welcher zu einer zweiwöchigen Abschaltung führte. Weiterhin kam es Ende November 2020 aufgrund einer Vereisung der Oberleitung in den Nachtstunden zur Funkenbildung beim Anbügeln der O-Lkw an die Oberleitungsanlage, wodurch ein Fahren im angebügelten Zustand teilweise nicht realisiert werden konnte. Zusätzliche Schwierigkeiten beim Anbügeln an die Oberleitung durch die O-Lkw entstehen zum Teil auch bei schlechten Witterungsverhältnissen, wie bspw. Starkregen und hohe Windgeschwindigkeiten. In den Jahren 2020 und 2021 waren bezogen

auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage keine witterungsbedingten Abschaltungen festzustellen. Im Jahr 2022 wurde die Oberleitungsanlage im Zeitraum vom 18.02.2022 bis zum 21.02.2022 in beide Fahrtrichtungen vorsorglich abgeschaltet, da seitens des Deutschen Wetterdienstes eine Unwetterwarnung der Stufe 3 ausgesprochen wurde.

Insgesamt zeigt sich, dass zwar einzelne witterungsbedingte Ereignisse eine Abschaltung begründen, der Einfluss auf die Verfügbarkeit, mit Ausnahme der Beschädigung der Anlage aufgrund eines Sturmereignisses in 2019, jedoch gering ist. In diesem Abschnitt werden die einzelnen Ereignisse in Bezug auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage analysiert. Zusätzlich wird neben der Verfügbarkeit auch die Leistungsfähigkeit der Oberleitungsanlage bei unterschiedlichen Witterungsverhältnissen betrachtet, um umfassende Aussagen zum Zusammenhang treffen zu können. Im Folgenden werden das methodische Vorgehen beschrieben und die Ergebnisse und Erkenntnisse dargestellt sowie die ersten Aussagen zum Einfluss der Witterung abgeleitet.

Methodisches Vorgehen

Die Untersuchungen zum Einfluss der Witterung auf die Anlagenverfügbarkeit gliedert sich in zwei Teilbereiche. Im ersten Teilbereich werden die jeweiligen witterungsbedingten Ausfallursachen erläutert und die Auswirkungen in Bezug auf die Verfügbarkeit beschrieben. Der zweite Teilbereich hingegen analysiert zusätzlich die Leistungsfähigkeit der Anlage, da diese durch die unterschiedlichen Witterungsbedingungen eingeschränkt werden kann. Hierzu wird die Energiemenge betrachtet, welche von der Oberleitungsanlage am Standort Bornbruch an die strombeziehenden O-Lkw übertragen wurde. Als Datengrundlage der Untersuchungen dienen das Anlagenbetriebstagebuch, die in der Anlage erfassten Strombezüge sowie die Daten zur Witterung des Deutschen Wetterdienstes.

Ergebnisse und Diskussion

Für die Analyse zum **ersten Teilbereich** werden zunächst die relevanten witterungsbedingten Ausfallursachen aufgezeigt und beschrieben. Während in den Jahren 2020 und 2021 keine witterungsbedingten Abschaltungen der Oberleitungsanlage erfolgten, zeigen die Werte für das Jahr 2019 mit etwa 31,7 % und im Jahr 2022 mit 7,6 % bzw. 16,0 % einen Einfluss auf die Verfügbarkeit (vgl. Tabelle 27).

Tabelle 27: Ausfalldauern und Anteil der witterungsbedingten Ausfallursachen im Vergleich zur gesamten Dauer an Betriebsunterbrechungen (eigene Darstellung).

Jahr	2019		2020		2021		2022	
Fahrtrichtung	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord
Gesamte Ausfallzeit [h]	320,4	320,5	2703,6	934,5	1748,0	1634,6	852,4	406,5
Witterungsbedingte Ausfallursachen [h]	98,5	98,5	0,0	0,0	0,0	0,0	64,9	64,9
Witterungsbedingte Ausfallursachen [%]	31,7	31,7	0,0	0,0	0,0	0,0	7,6	16,0

Im Folgenden werden die witterungsbedingten Abschaltungen beschrieben, welche im Betrachtungszeitraum aufgetreten sind:

#1 Kritische Temperatur im Unterwerk

Deutschland wurde im Zeitraum vom 24.07.2019 bis 26.07.2019 von einer außergewöhnlichen Hitzewelle erfasst, welche den historischen Höchstwert der erfassten maximalen Temperaturen übertraf aber auch in der Dauer der Intensität, an drei aufeinanderfolgenden Tagen über 40 °C, bis dahin einmalig war (DWD, 2019a, S. 1f.). Bei einem der zwei im ELISA-Feldversuch installierten Unterwerke zur energetischen Versorgung der Teststrecke wurde eine Lage ausgewählt, welche tagsüber kaum Beschattung erreicht (Unterwerk Bornbruch). Infolge der direkten Exposition der Sonneneinstrahlung heizte sich das Unterwerk auf, so dass eine kritische Raumtemperatur im Unterwerk erreicht wurde und eine entsprechende Meldung an den Anlagenbetreiber generiert wurde. Die Oberleitungsanlage wurde aus Sicherheitsgründen am 25.07.2019 und am 26.07.2019 nach kurzer Betriebszeit, bis zum Erreichen der kritischen Raumtemperatur, abgeschaltet. Insgesamt betrug die Ausfalldauer für beide Tage 11,12 Stunden von 16 Stunden geplanter Betriebszeit (Einführungsbetrieb).

#2 Sturmschaden an der Oberleitung

Am Sonntag, dem 18.08.2019, bildete sich im süddeutschen Raum eine schwere Gewitterlage, welche sich zu einer sogenannten Superzelle ausbildete und in den Abendstunden über das Rhein-Main-Gebiet zog und dabei teils verheerende Schäden, insbesondere im Umkreis der ELISA-Teststrecke, anrichtete (DWD, 2019b; Spiegel Online, 2019). Dabei wurde auch die Oberleitung der Teststrecke durch Abriss des Fahrdrachts beschädigt. Ein derartiger Schaden war zu einem so frühen Beginn des Pilotbetriebs (etwa 3,5 Monate nach Inbetriebnahme) seitens des Anlagenbetreibers und des Anlagenerrichters nicht erwartet und so erheblich, dass die Reparaturprozesse einen längeren Zeitbedarf in Anspruch nahmen. Insgesamt fiel die Oberleitungsanlage für zwei Wochen im Einführungsbetrieb aus und konnte erst am 02.09.2019 wieder in Betrieb genommen werden (etwa 87,36 Stunden Ausfalldauer je Fahrtrichtung).

#3 Sturmwarnung mit Abschaltung der Oberleitungsanlage

Aufgrund einer Sturmwarnung der Stufe 3 des DWD für den 18.02.2022 und 19.02.2022 (DWD, 2022) wurde die Oberleitungsanlage aus Sicherheitsgründen planmäßig abgeschaltet. Trotz schwerer Gewitterlage kam es zu keiner Beschädigung an der Anlage, dennoch erfolgte die Wiedereinschaltung erst am darauffolgenden Montag, den 21.02.2022. Die verspätete Einschaltung basiert auf dem Sachverhalt, dass eine Einschaltung der Oberleitungsanlage nur durch befugtes Personal erfolgen kann. Die Ausfalldauer aufgrund der Sturmwarnung betrug 64,94 Stunden je Fahrtrichtung.

Insgesamt lassen sich somit drei Ereignisse im Betrachtungszeitraum identifizieren, welche aufgrund witterungsbedingter Ursachen zu einer Abschaltung der Oberleitungsanlage führten. Auch wenn die gesamte Abschaltdauer mit 326,84 Stunden (gemeinsame Betrachtung für beide Fahrtrichtungen) im Vergleich zur gesamten Ausfalldauer mit 8920,35 Stunden gering ausfällt, ist zu beachten, dass die Abschaltungen aufgrund der Witterungsereignisse zu den externalen und unvorhersehbaren Ereignissen zählen, welche beinahe zufällig und nicht verhinderbar auftreten können. Um jedoch mindestens die Auswirkungen reduzieren zu können, müssen

entsprechende Prozesse entwickelt werden. So lässt sich an den Beispielen aufzeigen, dass eine effiziente Problemidentifikation und Reparatur sowie eine schnelle Wiedereinschaltung bedeutend für eine hohe Verfügbarkeit sind. Es ist beinahe selbsterklärend, dass bei der weiteren Fortsetzung der klimatischen Veränderungen die witterungsbedingten Ausfallursachen aufgrund von Extremwetterereignissen an zusätzlicher Relevanz gewinnen werden.

Witterungsereignisse können im Besonderen nicht nur zu einer Abschaltung führen, sondern sich auch auf die Qualität der Energieversorgung auswirken. Dieser zusätzliche Einfluss wird im **zweiten Teilbereich** anhand der Strombezugsfahrten analysiert, welche aus den Anlagendaten ermittelt werden (vgl. hierzu auch Abschnitt 6.2). Hierzu werden die Fahrten mit Strombezug aus den vorhandenen Anlagendaten extrahiert und mit den Daten zu jeweils vorherrschenden Witterungsbedingungen (gemessene stündliche mittlere Temperatur, stündliche Niederschlagsmenge und maximale stündliche Windstärke) kombiniert. Um mögliche tagesabhängige Verzerrungen in der Auswertung zu verhindern, wird für die Analyse nur der Zeitraum vom 01.01.2020 bis 31.12.2022 betrachtet, da die Anlage über diesen Zeitraum im Regelbetrieb – zu Tag- und Nachtzeiten – betrieben wurde.

Über den Untersuchungszeitraum konnten insgesamt 14.802 Strombezugsfahrten identifiziert werden, wovon jedoch 1.049 Fahrten (7,1 %) ohne einen gemessenen Strombezug sind, bspw. aufgrund eines direkten Abbügelns nach dem Anbügelvorgang aufgrund einer Fehlermeldung im Fahrzeug oder eines Fahrmanövers. Die längste Strombezugsfahrt beträgt 2032,54 Sekunden (ca. 34 Minuten). Diese Strombezugsfahrt wurde innerhalb einer Forschungsfahrt erzeugt, indem die O-Lkw gestaffelt nacheinander an der Oberleitung angebügelt wurden (Dauerbelastungsfahrt).

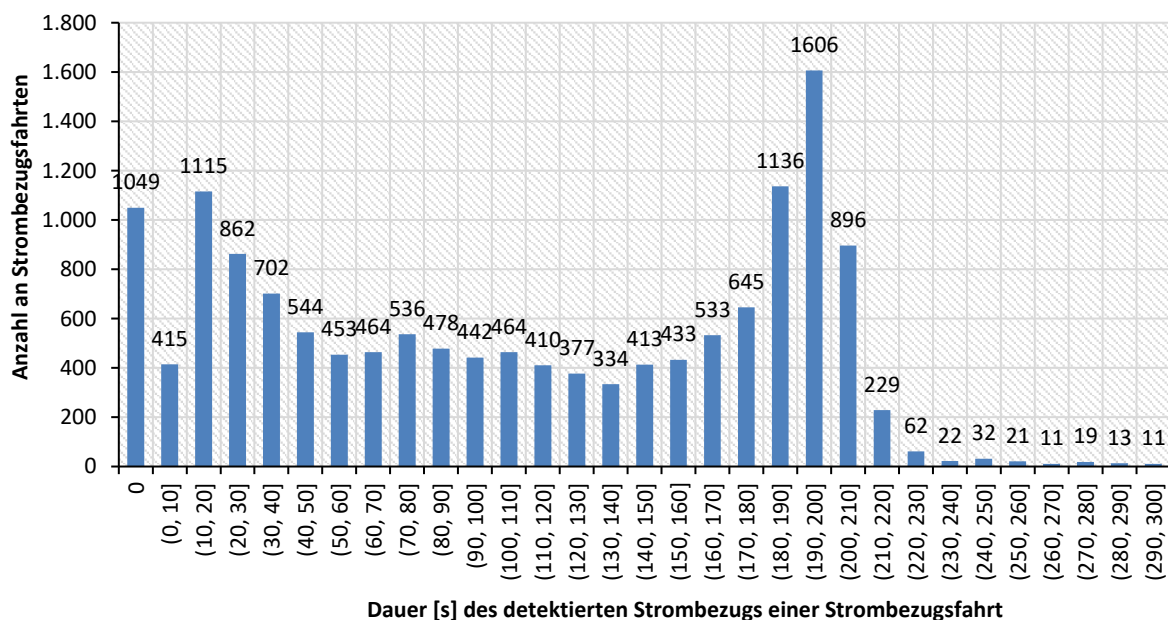


Abbildung 41: Verteilung der Strombezugsfahrten nach der Anzahl über die Intervallbereiche der Dauer des Strombezugs (eigene Darstellung).

Abbildung 41 zeigt die Verteilung der detektierten Strombezugsfahrten am Unterwerk Bornbruch über den Betrachtungszeitraum auf. Aufgrund der Streckenlänge von etwa 5 km (ca. 4,8 km maximale nutzbare Streckenlänge) und einer Fahrtgeschwindigkeit der O-Lkw zwischen

80 km/h und 90 km/h liegen die meisten Strombezugsfahrten im Bereich zwischen 180 und 220 Sekunden ($n = 3.867$ Strombezugsfahrten)¹⁷. Diese Fahrten repräsentieren eine Strombezugsfahrt ohne Störungen oder sonstige Fahrmanöver bei einer (annähernd) vollen Ausnutzung der vorhandenen Oberleitungsstrecke. Der hohe Anteil der Strombezugsdauern in den Bereichen mit weniger als 50 Sekunden fallen bspw. auf eine Nutzung der vorhandenen Parkplätze und Raststätten im Bereich der ELISA-Teststrecke zurück. Strombezugsfahrten mit einer Dauer zwischen 50 und 180 Sekunden können vielseitige Gründe aufweisen, teilweise handelt es sich bei den Strombezugsfahrten auch um Fahrten einer identischen Durchfahrt eines O-Lkw, bspw. wenn ein O-Lkw einen langsameren vorausfahrenden Lkw im Bereich der ELISA-Teststrecke überholt. Es ist ferner nicht auszuschließen, dass eine Strombezugsfahrt durch mehrere gleichzeitige Durchfahrten angebugelter O-Lkw erzeugt wird, wie im Extremfall das Beispiel aus der Forschungsfahrt zeigt. Insgesamt lassen sich 266 Strombezugsfahrten mit einer Strombezugsdauer von mehr als 220 Sekunden erfassen (vgl. Anhang A.VIII).

Da für die Analyse des Einflusses der Witterungsbedingungen möglichst nur Fahrten betrachtet werden sollen, bei welchen nur ein strombeziehender O-Lkw den Energiebezug repräsentiert, werden die identifizierten Strombezugsfahrten anhand der Dauer des Strombezugs eingegrenzt. Unter Beachtung der Fahrgeschwindigkeit und der nutzbaren elektrifizierten Streckenlänge werden für die Analyse nur Strombezugsfahrten verwendet, welche eine Dauer zwischen 180 Sekunden und 220 Sekunden aufweisen ($N = 3.867$). Die ausgewählten Strombezugsfahrten wurden im Weiteren auf Unregelmäßigkeiten in Bezug unterschiedlicher Temperaturen ($n = 3.867$), unterschiedlicher Niederschlagsintensitäten ($n = 3.859$) und unterschiedlicher Windgeschwindigkeiten ($n = 3.831$) während der Strombezugsfahrt analysiert, wobei für einzelne Fahrten keine Witterungsdaten vorliegen ($n < 3.867$).

Für die Analyse werden folgende Unterteilungen vorgenommen:

- **Niederschlagsintensität:** Vergleich der Strombezugsfahrten bei keinem Niederschlag (Niederschlagshöhe $< 0,1$ mm in 60 Minuten), bei leichtem Niederschlag (Niederschlagshöhe $\geq 0,1$ mm bis $< 2,5$ mm in 60 Minuten) und bei mäßigem bis starkem Niederschlag (Niederschlagshöhe $\geq 2,5$ mm in 60 Minuten). (DWD, 2024e)
- **Lufttemperatur:** Vergleich der Strombezugsfahrten bei Frost (Lufttemperatur < 0 °C), normalen Temperaturbedingungen (Lufttemperatur ≥ 0 °C und < 25 °C) und warmen Temperaturbedingungen (Lufttemperatur ≥ 25 °C und < 30 °C) und Hitze (Lufttemperatur ≥ 30 °C). (DWD, 2024c, 2024d)
- **Windgeschwindigkeit:** Vergleich der Strombezugsfahrten bei schwacher bis mäßiger Windstärke (Windgeschwindigkeit $< 10,8$ m/s) und starker bis stürmischer Windstärke (Windgeschwindigkeit $\geq 10,8$ m/s) gemäß Beaufort-Skala. (DWD, 2024a)

Als Kenngröße zur Analyse des Einflusses der Witterungsbedingungen auf die Qualität der Energieversorgung wird die übertragene Energiemenge pro Zeit (Stunde) pro Strombezugsfahrt herangezogen. Dieser Wert lässt sich rechnerisch als eine fiktive mittlere Übertragungsleistung beschreiben. Es ist bspw. davon auszugehen, dass im Falle erhöhter Windgeschwindigkeiten es

¹⁷ Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen für Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 3,5 Tonnen 80 km/h beträgt, jedoch meist nicht abgeregelt ist, da außerhalb der Bundesrepublik Deutschland teilweise auch höhere Höchstgeschwindigkeiten zulässig sind. Dementsprechend liegen die gefahrenen Geschwindigkeiten meist deutlich über der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Pumberger et al., 2011).

durch die Schwingungen des Fahrdrabtes zu einer verschlechterten Energieübertragung kommt, oder diese durch starke Regenereignisse oder extremen Temperaturen beeinträchtigt wird. Die statistische Werte nach ermitteln sich zunächst über alle betrachteten Strombezugsfahrten (vgl. Tabelle 28).

Tabelle 28: Statistische Werte bzgl. Strombezugsdauer und Energiemenge der betrachteten Strombezugsfahrten (n = 3.867).

	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standard- abweichung
Dauer [Sekunden]	3.867	180,11	210,43	190,80	190,24	8,72
Energiemenge [kWh]	3.867	1,31	13,00	3,46	3,38	0,77
Mittlere Übertragungs- leistung [kWh/h]	3.867	0,44	3,71	1,09	1,06	0,23

Gefilterte Werte zu den Strombezugsfahrten mit einer Strombezugsdauer von 180 bis 220 Sekunden.

Für die Analyse der Zusammenhänge werden die Abhängigkeiten zwischen den jeweiligen Witterungseinflüssen und der mittleren Übertragungsleistungen analysiert. Dazu wird die mittlere Übertragungsleistung anhand des Median-Wertes kategorisiert in:

- **Übertragungsleistung:** Einteilung der Übertragungsleistung in schlechte bis mäßige Übertragungsleistung (mittlere Übertragungsleistung < 1,06 kWh/h) und gute bis sehr gute Übertragungsleistung (mittlere Übertragungsleistung ≥ 1,06 kWh/h).

Je nach Auswertungsgegenstand liegt demnach eine 2x2-(Windgeschwindigkeit), eine 2x3-(Niederschlagsintensität) und eine 2x4-Auswertungsmatrix (Lufttemperatur) vor. Mit Hilfe des Chi²-Tests werden die nun kategorial vorliegenden Merkmale ausgewertet.

Tabelle 29: Kreuztabelle zur Untersuchung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen dem Einfluss der Niederschlagsintensität und der mittleren Übertragungsleistung (eigene Darstellung).

		kein Niederschlag	leichter Niederschlag	mäßiger bis starker Niederschlag	Gesamt
schlechte bis mäßige Übertragungsleistung	Beobachtet	1856	81	5	1942
	Erwartet	1837,8,2	97,1	7,1	
gute bis sehr gute Übertragungsleistung	Beobachtet	1796	112	9	1917
	Erwartet	1814,2	95,9	7,0	
Gesamt	Anzahl	3652	193	14	3859

Hinweis: Für die Auswertungen zum Chi²-Test wurden die Werte kategorisiert (gruppiert).

Tabelle 29 zeigt die Kreuztabelle zur Ermittlung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen dem Einfluss der Niederschlagsintensität und der mittleren Übertragungsleistung. Es lässt sich hierbei ein Zusammenhang aufzeigen, indem die mittlere Übertragungsleistung mit steigender Niederschlagsintensität (kategorial) steigt. Beim Vergleich der Mittelwerte der mittleren Übertragungsleistung ergeben sich für die einzelnen Kategorien folgende Werte: 1,085 (kein Niederschlag), 1,116 (leichter Niederschlag), 1,046 (mäßiger bis starker Niederschlag). Es ist anzunehmen, dass eine Verbesserung der Übertragungsleistung aus der vorhandenen Feuchtigkeit resultiert, da sich der Kontakt zwischen dem Stromabnehmer und der Oberleitung verbessert. Dies kann zu einer gleichmäßigeren Stromübertragung führen. Gleichzeitig können

mit höheren Niederschlagsintensitäten auch größere Windgeschwindigkeiten einhergehen, so dass der (geringe) Zusammenhang nicht abschließend begründet werden kann. Da die Abweichung der Mittelwerte nur gering ist, ist auch der Einfluss der Niederschlagsintensität auf die Qualität der Energieversorgung kaum merklich. Die Auswertung des Chi²-Tests deutet lediglich auf eine signifikante Abhängigkeit ($p = 0,031$) und eine vernachlässigbare Effektstärke ($C = 0,06$) hin.

Analoge Berechnungen wurden auch mit den Merkmalen zur Windgeschwindigkeit (vgl. Tabelle 30) und zur Lufttemperatur (vgl. Tabelle 31) durchgeführt.

Tabelle 30: Kreuztabelle zur Untersuchung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen dem Einfluss der Windgeschwindigkeit und der mittleren Übertragungsleistung (eigene Darstellung).

		schwache bis mäßige Windstärke	starke bis stürmische Windstärke	Gesamt
schlechte bis mäßige Übertragungsleistung	Beobachtet	1909	15	1924
	Erwartet	1903,9	20,1	
gute bis sehr gute Übertragungsleistung	Beobachtet	1882	25	1907
	Erwartet	1887,1	19,9	
Gesamt	Anzahl	3791	40	3831

Hinweis: Für die Auswertungen zum Chi²-Test wurden die Werte kategorisiert (gruppiert).

In Bezug auf die Windgeschwindigkeit (auch Windstärke bezeichnet) liegen nur vereinzelt Daten zu Strombezugsfahrten bei starken bis stürmischen Windstärken ($n = 40$) vor. Innerhalb der Kreuztabelle wird bereits ersichtlich, dass nur eine sehr geringe Ausprägung abgeleitet werden kann. Eine signifikante Abhängigkeit beider Merkmale lässt sich mit Hilfe des Chi²-Tests mit einem p -Wert von 0,106 nicht aufzeigen, gleichzeitig deutet die Effektstärke mit $C = 0,04$ auf keinen merkbaren Effekt hin. Ein Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Qualität der Energieversorgung kann entsprechend nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 31: Kreuztabelle zur Untersuchung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen dem Einfluss der Lufttemperatur und der mittleren Übertragungsleistung (eigene Darstellung).

		Frost	normale Temperatur- bedingungen	warme Temperatur- bedingungen	Hitze	Gesamt
schlechte bis mäßige Übertragungsleistung	Beobachtet	32	1688	180	44	1944
	Erwartet	53,8	1731,9	132,2	26,1	
gute bis sehr gute Übertragungsleistung	Beobachtet	75	1757	83	8	1923
	Erwartet	53,2	1713,2	130,8	25,9	
Gesamt	Anzahl	107	3445	263	52	3867

Hinweis: Für die Auswertungen zum Chi²-Test wurden die Werte kategorisiert (gruppiert).

Die Auswertungen der stochastischen Unabhängigkeit zwischen dem Einfluss der Lufttemperatur und der mittleren Übertragungsleistung zeigt eine höchst signifikante Abhängigkeit ($p < 0,001$) mit einer geringen Effektstärke ($C = 0,2$) auf. Dieser Zusammenhang wird durch die entsprechende Kreuztabelle visualisiert. Während bei den normalen Temperaturbedingungen (0 °C bis $< 25\text{ °C}$) die beobachteten Werte bezüglich des Merkmals gute bis sehr gute Übertragungsleistung größer sind als die erwarteten Werte, dreht sich das Verhältnis bei den warmen Temperaturbedingungen und bei Hitze um. Auch bei Frost zeigen die Werte auf, dass sich mit zunehmender Kälte die Übertragungsleistung erhöht. Dieser Effekt

basiert auf der Veränderung des elektrischen Widerstands in metallischen Leitern, welcher mit steigenden Temperaturen ebenfalls steigt und sich somit negativ auf die Qualität der Energieversorgung auswirkt. Die Mittelwerte der mittleren Übertragungsleistungen zeigen die Veränderung eindrucksvoll auf und variieren von 1,17 kWh/h (Frost), 1,09 kWh/h (normale Temperaturbedingungen), 1,02 kWh (warme Temperaturbedingungen) bis 0,96 kWh/h (Hitze).

Es ist anzumerken, dass die Werte der Übertragungsleistung jedoch maßgebend von der Auslegung der Oberleitungsanlage und der Fahrzeugausstattung sowie der Energienachfrage der O-Lkw bestimmt wird. Im Betrachtungszeitraum verkehrten jedoch nur O-Lkw der ersten Fahrzeuggeneration, so dass die Werte in diesem Zeitraum kumuliert ausgewertet werden können. Mit Betriebsaufnahme der zweiten Fahrzeuggeneration in 2023 zeigt sich eine stark ansteigende mittlere Übertragungsleistung, da die neue Fahrzeuggeneration größere Energiemengen beziehen kann.

Kernaussagen zum Einfluss der Witterungsbedingungen

Vorherrschende Witterungsbedingungen weisen in Bezug auf die Niederschlagsintensität und die Windgeschwindigkeit keinen merklichen Einfluss auf die Qualität der Energieversorgung auf, in Bezug auf die Lufttemperatur zeigt sich ein Zusammenhang aufgrund des physikalisch erklärbaren Verhaltens des elektrischen Widerstands. Dennoch können hohe Windgeschwindigkeiten zu einer Beschädigung der Oberleitungsanlage führen und somit die Verfügbarkeit beeinträchtigen.

Folgende Kernaussagen aus den Analysen zum Einfluss der Witterungsbedingungen auf die Verfügbarkeit lassen sich ableiten:

K15: Hohe Windstärken können zu einer Beschädigung der Oberleitungsanlage führen und die Verfügbarkeit beeinträchtigen.

Sturmereignisse mit hohen Windstärken führen nicht nur dazu, dass eine Beschädigung des Fahrdrahtes aufgrund der Schwingungen auftreten kann, sondern auch, dass Gegenstände in den Fahrdraht geweht werden, welche zu einer Beschädigung führen können. Ein solches Ereignis konnte auch in den witterungsbedingten Ausfallursachen festgestellt werden. Im Falle einer Ankündigung einer schweren Gewitterlage, bspw. durch eine Warnmeldung des DWD, sollte die Oberleitungsanlage aus Sicherheitsgründen stromlos geschaltet werden, wodurch die Anlagenverfügbarkeit beeinträchtigt wird.

K16: Die Qualität der Energieversorgung wird durch hohe Lufttemperaturen reduziert.

Die Qualität der Energieversorgung steht im direkten Zusammenhang mit den vorherrschenden Lufttemperaturen. Es ließ sich aufzeigen, dass eine hohe Lufttemperatur die Energieübertragung (in kWh/h) negativ beeinflusst. Dabei konnte eine Reduktion von 1,09 kWh/h (normale Temperaturbedingungen) über 1,02 kWh (warme Temperaturbedingungen) bis zu 0,96 kWh/h (Hitze) ermittelt werden. Bei Frost liegt der Wert der Energieübertragung bei 1,17 kWh/h.

K17: Die Zunahme von Extremwetterereignissen ist bei der Auslegung eines Oberleitungssystems zu berücksichtigen.

Es ist davon auszugehen, dass sich die Häufigkeit der Extremwetterereignisse erhöhen wird. Die Folge wären entsprechende Wetterereignisse mit hohen Windstärken oder Hitzeperioden, welche die Anlagenverfügbarkeit aber auch die Qualität der Energieversorgung beeinträchtigen können. In Bezug auf die Anlagenverfügbarkeit sind entsprechende Strategien bzw. Störfallprogramme zu entwickeln, welche eine schnelle Rückführung in den geplanten operativen Betrieb begünstigen. Die Beeinträchtigung der Qualität der Energieversorgung ist gegebenenfalls durch die Schaffung von Redundanzen auszugleichen, bspw. indem ein längerer Oberleitungsabschnitt als zwingend erforderlich ausgebaut wird.

K18: Um die Ausfallzeiten nach einer Beschädigung zu verkürzen, sind Strategien für den Betrieb einer Oberleitungsanlage zu entwickeln.

Abschaltungen aufgrund witterungsbedingter Ausfallursachen zählen zu den unplanbaren und externalen Ausfallursachen. Um dennoch vorbereitet die relevanten Prozesse von einer gegebenenfalls erforderlichen Abschaltung bis zur Wiedereinschaltung durchführen zu können, sind Strategien für den Betrieb einer Oberleitungsanlage zu entwickeln, so dass die einzelnen Umsetzungsschritte strukturiert und effizient durchlaufen werden können. Durch eine schnellere Rückkehr in den geplanten operativen Betrieb wirkt sich das Umsetzen einer Strategie entsprechend positiv auf die Anlagenverfügbarkeit aus.

Die Kernaussagen zum Einfluss der Witterungsbedingungen werden in Kapitel 7 mit Hilfe von Expertenbefragungen validiert und dienen im Weiteren als Grundlage zur Ableitung der Empfehlungen zum Ausbau und Betrieb einer Oberleitungsanlage in Kapitel 8.

6.3.6 Einfluss der Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten

Einleitung

Bei dem Einfluss von Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage handelt es sich um eine Querschnittsbetrachtung, da keine direkte Ausfallursache angesprochen wird, sondern diese in einem Kontext betrachtet wird. Infolgedessen werden basierend auf den bereits beschriebenen Untersuchungen in den Abschnitten 6.3.1 bis 6.3.5 neue Erkenntnisse abgeleitet. Im Folgenden werden das methodische Vorgehen beschrieben und die Ergebnisse und Erkenntnisse dargestellt sowie die ersten Aussagen in Bezug auf den Einfluss der Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten abgeleitet.

Methodisches Vorgehen

Für die Analyse des Einflusses der Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten auf die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage werden zunächst jene Abschaltungen identifiziert, welche nachweislich eine Instandsetzung bzw. Reparatur der Oberleitungsanlage erforderten. Anschließend werden die Auswirkungen dieser Ausfallursachen in Bezug auf die Ausfalldauer dargestellt und die Erkenntnisse zu diesem Einfluss abgeleitet und die Kernaussagen formuliert.

Ergebnisse und Diskussion

Im Betrachtungszeitraum traten vereinzelt Ereignisse mit der Folge einer Abschaltung der Oberleitungsanlage auf, welche mit einer tatsächlichen oder einer vermeintlichen Beschädigung

einhergingen. Die Ausfallursachen sind dabei unterschiedlich und basieren nicht nur auf externalen, sondern auch auf internalen Einflüssen. Folgende Abschaltungen lassen sich identifizieren:

#1 Sturmschaden an der Oberleitung

Der Sturmschaden am 19.08.2019 wurde bereits in 6.3.5 beschrieben. Aufgrund der notwendigen Reparaturarbeiten konnte die Oberleitungsanlage für zwei Wochen nicht betrieben werden. Die Ausfalldauer belief sich auf etwa 87,36 Stunden je Fahrtrichtung.

#2 Unfall mit Beschädigung während der COVID-19-Pandemie

Am 24. Januar 2020 führte ein Unfallereignis zum Abriss eines Fahrdrachts (vgl. Abschnitt 5.4 und Abschnitt 6.3.2). Die Reparaturarbeiten waren durch die Maßnahmen zur Eindämmung der COVID-19-Pandemie erschwert. Insgesamt führte das Ergebnis zu einer Ausfalldauer von 2476,90 Stunden in Fahrtrichtung Süd und 568,28 Stunden in Fahrtrichtung Nord.

#3 Isolatoren-Problematik

Aufgrund festgestellter Mängel an den Isolatoren am 15.03.2021 kam es zu erheblichen Ausfällen der Oberleitungsanlage, welche zunächst die Identifikation des Problems und den Austausch der betroffenen Isolatoren, im späteren Verlauf die zusätzliche Abschaltung zum Austausch aller übrigen Isolatoren zur Folge hatte (vgl. Abschnitt 5.4 und Abschnitt 6.3.2). Die erste Abschaltung ging mit einer Ausfalldauer von 591,98 Stunden je Fahrtrichtung einher. Im Zuge des Austausches aller übrigen Isolatoren musste die Oberleitungsanlage in südlicher Fahrtrichtung für 527,73 Stunden und in nördlicher Fahrtrichtung für 420,78 Stunden abgeschaltet werden.

#4 Brand an der Tank- und Rastanlage Gräfenhausen Ost

Aufgrund eines Unfallereignisses an der T+R Gräfenhausen Ost am 09.08.2021 kam es zu einem Großbrand im direkten Umfeld der Oberleitungsanlage. Aus Sicherheitsgründen wurde die Oberleitungsanlage stromlos geschaltet und im Anschluss der Löscharbeiten auf Beschädigung überprüft, bevor diese wieder in Betrieb genommen wurde. Insgesamt war die Oberleitungsanlage aufgrund dieses Ereignisses für 55,08 Stunden je Fahrtrichtung abgeschaltet.

Neben den aufgeführten Ereignissen wurde die Oberleitungsanlage in den Jahren 2019, 2020 und 2022 für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten zwischenzeitlich planmäßig abgeschaltet. Über den Betrachtungszeitraum wurden dabei Ausfalldauern von 141,63 Stunden für die südliche Fahrtrichtung (Darmstadt) und 131,10 Stunden für die nördliche Fahrtrichtung (Frankfurt) festgestellt. Die Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten im Jahr 2021 wurden parallel zum Austausch der Isolatoren durchgeführt.

Es ist zusätzlich festzuhalten, dass zwischen der Abschaltung aufgrund der Anforderung durch die Gefahrenabwehrbehörden und der Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage ebenfalls eine kurze Prüfung der Anlage auf Beschädigung erfolgt (vgl. Abschnitt 6.3.4). Ebenso wurde die Anlage nach der schweren Gewitterlage am 18.02.2022, bei welcher eine Abschaltung aus

Sicherheitsgründen erfolgte, vor Wiedereinschaltung auf eventuelle Schäden begutachtet (vgl. Abschnitt 6.3.5).

Im Gesamten ergibt sich für die vier aufgezeigten Ereignisse eine Ausfalldauer von etwa 3739,05 Stunden für die Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) und etwa 1723,48 Stunden für die Fahrtrichtung Nord (Frankfurt). Bezogen auf die gesamte Ausfallzeit im Betrachtungszeitraum entfallen somit allein 66,48 % der Ausfallzeit auf die aufgeführten Ereignisse in Fahrtrichtung Süd (von 5624,40 Stunden) und 52,29 % (von 3295,95 Stunden) in Fahrtrichtung Nord (vgl. Tabelle 4 auf Seite 63).

Kernaussagen zum Einfluss der Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten

Der Prozess der Instandsetzung und Reparatur hat im untersuchten Betrachtungszeitraum, maßgebend an vier Ereignissen, einen hohen Anteil an der Ausfallzeit und entsprechend einen hohen Einfluss auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage. Folgende Kernaussagen aus den Analysen lassen sich ableiten:

K19: Ausreichendes Material zur Instandsetzung und zur Reparatur ist an geeigneter Stelle vorzuhalten.

Eine Beschädigung der Oberleitungsanlage, zum Beispiel aufgrund eines Verkehrsunfalls oder durch Witterungseinflüsse, ist ein erwartbares Störfallereignis, welches jedoch nicht planbar auftritt. Die Analyse der Störfallereignisse im Betrachtungszeitraum zeigt auf, dass teilweise die Instandsetzung und Reparatur der Oberleitungsanlage nur verzögert stattfinden konnte, da das notwendige Material nicht ausreichend vorgehalten wurde. Um den Prozess der Reparatur zu beschleunigen und um die Anlagenverfügbarkeit möglichst wenig zu beeinträchtigen, sollte im Vorfeld eine Abschätzung des notwendigen Materials erfolgen und dieses an einer geeigneten Stelle vorgehalten werden.

K20: Es bedarf an situationsangepassten Routinen für die Durchführung einer effizienten Prüfung auf Beschädigung sowie einer nachgelagerten Instandsetzung und Reparatur.

Neben dem Vorhalten des Materials zur Instandsetzung und Reparatur tragen auch die vorgelagerten Prozesse zur Prüfung der Beschädigung und somit zur Identifikation der Problemsituation zur Ausfalldauer bei. Um diese Prozesse zu beschleunigen und somit den Wert der Anlagenverfügbarkeit positiv zu beeinflussen, bedarf es situationsangepassten Routinen, welche im Falle eines Störfallereignisses durchlaufen werden können.

Die Kernaussagen zum Einfluss der Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten werden in Kapitel 7 mit Hilfe von Expertenbefragungen validiert und dienen im Weiteren als Grundlage zur Ableitung der Empfehlungen zum Ausbau und Betrieb einer Oberleitungsanlage in Kapitel 8.

6.3.7 Einfluss der Personalverfügbarkeit

Einleitung

Bei dem Einfluss der Personalverfügbarkeit auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage handelt es sich um eine Querschnittsbetrachtung, da keine direkte Ausfallursache angesprochen

wird, sondern diese in einem Kontext betrachtet wird. Infolgedessen werden basierend auf den bereits beschriebenen Untersuchungen in den Abschnitten 6.3.1 bis 6.3.5 neue Erkenntnisse abgeleitet.

Neben der Instandsetzung und Reparatur (vgl. Abschnitt 6.3.6) ist auf der organisatorischen Ebene insbesondere die Verfügbarkeit von Personal für die Durchführung der Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten, aber auch für die Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage entscheidend. In den vorausgegangenen Analysen wurde ersichtlich, dass teilweise die Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit von befugtem Personal verzögert war. Der Zusammenhang auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage wird in diesem Abschnitt zentral fokussiert. Im Folgenden werden das methodische Vorgehen beschrieben und die Ergebnisse und Erkenntnisse dargestellt sowie die ersten Aussagen zum Einfluss der Personalverfügbarkeit abgeleitet.

Methodisches Vorgehen

Um den Einfluss der Personalverfügbarkeit auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage zu analysieren, werden zunächst die identifizierten Abschaltungen beschrieben, welche nachweislich aufgrund nicht ausreichender Besetzung an befugtem Personal eine verspätete Wiedereinschaltung aufweisen. Anschließend werden die Einschaltungszeiten der Oberleitungsanlage in Abhängigkeit geplanter und ungeplanter Ereignisse aufgezeigt, um den Einfluss der Personalverfügbarkeit über alle Ausfallursachen hinweg darzustellen. Dabei wird erwartet, dass bei geplanten Ereignissen eine Wiedereinschaltung möglichst vor dem Wochenende realisiert wird, um die Ausfalldauer möglichst gering zu halten. Weiterhin wird auch die Aufteilung der Ausfallzeiten in Abhängigkeit der Betriebszeit für Ereignisse mit kürzerer Ausfalldauer analysiert, um weitere Erkenntnisse in Bezug auf die kritischen Betriebszeiten ableiten zu können.

Ergebnisse und Diskussion

Die im ELISA-Feldversuch eingeschränkte Personalverfügbarkeit zeigt sich insbesondere bei den ungeplanten und externalen Ausfallursachen, wie bspw. bei den Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden (vgl. Abschnitt 6.3.4) und bei den Abschaltungen aufgrund der Witterungsverhältnisse (vgl. Abschnitt 6.3.5). In Bezug auf die Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden konnte bereits aufgezeigt werden, dass bei Ereignissen mit längeren Ausfalldauern (> 24 Stunden) die Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage erst nach einem Wochenende erfolgte. Weiterhin zeigte sich, dass bei Abschaltungen in den Abend- und Morgenstunden der Betrieb der Anlage erst gegen 8 Uhr morgens wieder aufgenommen werden konnte. Auch bei der geplanten Abschaltung aufgrund eines Sturmereignisses wurde die Anlage erst am darauffolgenden Montag eingeschaltet, gleichwohl eine Einschaltung bereits früher, nach Beendigung der schweren Gewitterlage, möglich gewesen wäre. Nicht zuletzt weist auch die COVID-19-Pandemie einen Einfluss auf die Personalverfügbarkeit auf (vgl. Abschnitt 6.3.2).

In Tabelle 32 ist die Kreuztabelle zur Analyse der stochastischen Unabhängigkeit zur Anwendung des χ^2 -Tests dargestellt. Anhand der Verteilung der Einschalttage in Abhängigkeit des Störungstyps (geplante oder ungeplante Ausfallursache) lässt sich über die Kreuztabelle zunächst keine Unabhängigkeit beider Stichproben ziehen. Betrachtet wurden dabei nur jene Ereignisse, welche eine Ausfalldauer von mehr als einer halben Stunde aufweisen, um eine Verzerrung durch kurze Zwischenschaltungen zu verhindern. Auch der p-Wert deutet mit $p = 0,749$ auf keine Abhängigkeit beider Stichproben hin.

Tabelle 32: Kreuztabelle zur Untersuchung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen dem Einschalttag und des Störungstyps für beide Fahrtrichtungen (eigene Darstellung).

		Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Gesamt
Geplante Ursache	Beobachtet	17	7	15	11	11	3	1	65
	Erwartet	14,84	6,65	13,31	13,82	10,75	4,61	1,02	
Ungeplante Ursache	Beobachtet	12	6	11	16	10	6	1	62
	Erwartet	14,16	6,35	12,69	13,18	10,25	4,39	0,98	
Gesamt	Anzahl	29	13	26	27	21	9	2	127

Hinweis: Betrachtung beschränkt auf Ereignisse mit einer Ausfalldauer > 0,5 Stunden (n = 127).

Setzt man im weiteren Schritt die relativen Werte der Einschalttage, jeweils bezogen auf die gesamte Anzahl je Störungstyp, ins Verhältnis, so lässt sich eine Tendenz erkennen (vgl. Abbildung 42). Hier zeigen die ungeplanten Ausfallursachen einen erhöhten Anteil für Einschaltungen im Bereich von Montag bis Mittwoch, hingegen die geplanten Ausfallursachen bei den Tagen Donnerstag und Samstag dominieren. Der erwartete Zusammenhang, dass sich die eingeschränkte Personalverfügbarkeit zwischen der Betrachtung der geplanten und ungeplanten Abschaltungen anhand der Einschaltungstage aufzeigen lässt, kann indes zwar nicht statistisch belegt werden, dennoch sind deutliche Unterschiede zwischen den beiden Störungstypen ableitbar.

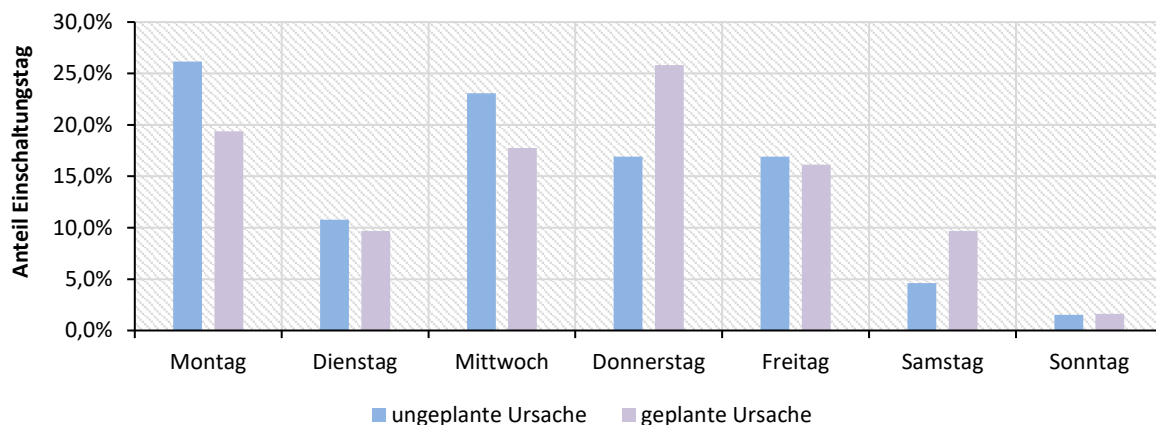


Abbildung 42: Vergleich des Anteils des jeweiligen Einschaltungstags gegenüber allen Einschalttagen zwischen den geplanten und ungeplanten Ausfallursachen bei einer Ausfalldauer > 0,5 Stunden (eigene Darstellung).

Abschließend werden die Ausfalldauern in Bezug auf die Aufteilung der Ausfallzeiten nach geplanter und ungeplanter Ausfallursache in Abhängigkeit der Betriebszeit betrachtet, wobei erneut nur jene Ereignisse betrachtet werden, welche eine Ausfallzeit von mindestens einer halben Stunde (> 30 Minuten) aufweisen. Die Ergebnisse zur Verteilung sind in Tabelle 33 dargestellt.

Tabelle 33: Aufteilung der Ausfallzeiten (in Stunden) nach geplanter und ungeplanter Ausfallursache in Abhängigkeit der Betriebszeit für beide Fahrtrichtungen (eigene Darstellung).

Ausfallursache	00:00 bis 04:00 Uhr	04:00 bis 09:00 Uhr	09:00 bis 16:00 Uhr	16:00 bis 21:00 Uhr	21:00 bis 24:00 Uhr	Summe
Geplante Ursache	47,00 (8,38 %)	101,87 (18,16 %)	306,19 (54,57 %)	72,99 (13,01 %)	33,00 (5,88 %)	561,05 (100 %)
Ungeplante Ursache	106,93 (14,46 %)	168,87 (22,84 %)	283,37 (38,33 %)	105,42 (14,21 %)	75,16 (10,17 %)	739,37 (100 %)

Hinweis: Betrachtung beschränkt auf Ereignisse mit einer Ausfalldauer > 0,5 Stunden und ohne die Betrachtung der Abschaltungen aufgrund unerwarteter Ausfallursachen sowie der Abschaltungen aufgrund der Erweiterung der Teststrecke (n = 103).

Über die Hälfte (54,57 %) der Ausfallzeit aller geplanten Ausfallursachen (mit einer Ausfalldauer von mehr als 30 Minuten) liegen im Zeitraum der Hauptverkehrszeit; etwa 85 % im Zeitraum der Haupt- und Nebenverkehrszeit. Geplante Abschaltungen werden entsprechend zur gängigen Arbeitszeit durchgeführt. Geplante Abschaltungen über einen Tageswechsel traten im Betrachtungszeitraum insgesamt sechs Mal auf und zwar aufgrund einer urlaubsbedingten Abschaltung, umfangreicher Serverarbeiten, Inspektion und Wartung (zwei Mal), einer witterungsbedingten Abschaltung (Sturmwarnung) und aufgrund von Arbeiten zur Brückenprüfung. Demgegenüber weisen die ungeplanten Abschaltungen insgesamt 21 Ereignisse auf, welche über einen Tageswechsel stattfanden und den hohen Anteil der Ausfallzeit in der Schwachverkehrszeit begründen.

Zwar lässt sich der Wirkungszusammenhang zwischen dem Einfluss der Personalverfügbarkeit und der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage nicht direkt aufzeigen, indirekt zeigen die Untersuchungen jedoch, dass bei Ausweitung des Personenkreises an befugtem Personal zur Wiedereinschaltung einer Oberleitungsanlage kürzere Ausfallzeiten erreicht werden können. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass bei einem Pilotbetrieb, so wie der vorliegende Betrieb der ELISA-Teststrecke, die Ausweitung des Personenkreises nicht zwingend notwendig ist, um die jeweiligen Projektziele zu erreichen und die hier aufgeführten Zusammenhänge nicht der Diskreditierung des ELISA-Projekts gelten.

Kernaussagen zum Einfluss der Personalverfügbarkeit

Ein Zusammenhang zwischen der Personalverfügbarkeit und der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage konnte basierend auf der Analyse bzgl. des Eintretens und der Dauer sowie der Beendigung einer Abschaltung indirekt aufgezeigt werden. Einzelne relevante Ereignisse wurden bereits in den vorausgegangenen Abschnitten identifiziert und unterstützen die Aussagekraft der jeweiligen Ergebnisse. Folgende Kernaussagen lassen sich ableiten:

K21: Der Anteil an berechtigten Personen zur Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage wirkt sich auf die Verfügbarkeit aus.

Für den Prozess der Wiedereinschaltung einer Oberleitungsanlage bedarf es der Verfügbarkeit an Personal, welche für die Umsetzung der Inbetriebnahme berechtigt sind. Im Feldversuch ELISA ist dieser Personenkreis aufgrund des Charakters des Projekts als Feldversuch relativ gering. Dies spiegelt sich in längeren Ausfallzeiten wider, da bspw. eine Einschaltung erst nach einem Wochenende durchgeführt werden konnte. Dies drückt sich bspw. anhand der Verteilung der Einschaltungstage aus, welche bei ungeplanten Ausfallursachen vermehrt in den

ersten drei Arbeitstagen einer Woche vorzufinden sind, oder in der Verteilung der Ausfallzeiten über die Tageszeiten, da insbesondere in den Nachtstunden aufgrund ungeplanter Ausfallursachen keine Wiedereinschaltung erfolgt.

K22: Eine geringe Verfügbarkeit an berechtigten Personen zur Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage kann sich insbesondere bei ungeplanten und externalen Ausfallursachen negativ auf den Prozess zur Inbetriebnahme auswirken.

Planbare Ereignisse können in der Durchführung teilweise flexibel geplant und umgesetzt werden, so dass bspw. die Wiedereinschaltung vor dem Wochenende oder vor den Abend- bzw. Nachtstunden durchgeführt werden kann. Bei den ungeplanten und externalen Ausfallursachen lässt sich die Wiedereinschaltung nicht derart planen, wodurch diese sich negativ auf den Prozess der Inbetriebnahme auswirken können. Die Ausweitung des Personenkreises der befugten Personen zur Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage bspw. auf die Operatoren kann daher zu einer Steigerung der Anlagenverfügbarkeit beitragen.

Die Kernaussagen zum Einfluss der Personalverfügbarkeit werden in Kapitel 7 mit Hilfe von Expertenbefragungen validiert und dienen im Weiteren als Grundlage zur Ableitung der Empfehlungen zum Ausbau und Betrieb einer Oberleitungsanlage in Kapitel 8.

6.3.8 Einfluss der Segmentlänge

Einleitung

Bei dem Einfluss der Segmentlänge eines elektrifizierten Streckenabschnitts auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage handelt es sich um eine Querschnittsbetrachtung, da keine direkte Ausfallursache angesprochen wird, sondern diese in einem Kontext betrachtet wird. Infolgedessen werden basierend auf den bereits beschriebenen Untersuchungen in den Abschnitten 6.3.1 bis 6.3.5 neue Erkenntnisse abgeleitet.

Methodisches Vorgehen

Für die Analyse zum Einfluss der Segmentlänge auf die Verfügbarkeit werden jene Untersuchungen im Kontext der Segmentlänge betrachtet, welche in Abhängigkeit der Streckenlänge variierende Ergebnisse aufzeigen. Dies umfasst die Abschaltungen aufgrund arbeitsstättenbedingter Ausfallursachen, unfallbedingter Ausfallursachen und wartungsbedingter Ausfallursachen. Im Folgenden werden diese Ausfallursachen in Bezug auf einer verlängerten elektrifizierten Strecke und somit im Kontext einer größeren Segmentlänge diskutiert und die Ergebnisse dargelegt.

Ergebnisse und Diskussion

Arbeitsstättenbedingte Abschaltungen einer Oberleitungsanlage treten richtungsbezogen auf und stehen in Abhängigkeit zu vorhandenen Bauwerken, notwendigen Arbeiten des Straßenbetriebsdienstes oder sonstigen Bauarbeiten im Streckenbereich, bspw. der Durchführung einer Fahrbahnerneuerung. Je nach vorhandener Streckenlänge variiert der zeitliche Bedarf der Abschaltung. Bei den unfallbedingten Ausfallursachen sind weitgehend die Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden relevant, welche ebenfalls richtungsbezogen auftreten. Im ELISA-Projekt wurde dabei der Richtungsbezug aus

Sicherheitsgründen nicht betrachtet, sondern immer eine beidseitige Abschaltung der Oberleitungsanlage für die Tätigkeiten der Gefahrenabwehrbehörden durchgeführt. Wartungsbedingte Abschaltungen umfassen die notwendigen Abschaltungen zur Wartung und Instandhaltung der Oberleitungsanlage. Diese können sowohl richtungsbezogen, für die Ausbesserung von Schäden oder den Austausch von Material am Fahrdrabt, auftreten, aber auch beide Fahrtrichtungen gleichermaßen betreffen, bspw. bei der Durchführung von Tätigkeiten am Unterwerk selbst.

Der Einfluss der Segmentlänge lässt sich für die aufgeführten Ausfallursachen theoretisch ableiten. Nimmt man als Bezugsgröße das Jahr 2022, ergeben sich für den fünf Kilometer langen Streckenbereich eine Anzahl von 16 erfassten Abschaltungen aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden. Dies entspricht einer streckenbezogenen Unfallhäufigkeit von 3,2 relevanten Verkehrsunfällen pro Kilometer im Jahr und bezogen auf beide Fahrtrichtungen. Die identifizierten arbeitsstättenbedingten Abschaltungen variierten im Betrachtungszeitraum aufgrund der Erweiterung der Oberleitungsanlage erheblich. Ohne Beachtung der Arbeitsstätten zur Erweiterung der Anlage lassen sich die Abschaltungen aufgrund der Wartung und Inspektion von Bauwerken, aber auch die Abschaltungen für die Durchführung der Arbeiten des Straßenbetriebsdienstes mit jeweils einer Anzahl von zwei Abschaltungen pro Jahr identifizieren (insgesamt vier Abschaltungen pro Jahr). Dies entspricht einer (theoretischen und rechnerischen) streckenbezogenen Abschaltungshäufigkeit von 0,8 relevanten Abschaltungen pro Kilometer im Jahr. Für die Durchführung der Inspektion und Wartung der Oberleitungsanlage lassen sich ferner ebenfalls zwei Abschaltungstage pro Jahr aufzeigen (0,4 relevante Abschaltungen pro Kilometer). Ohne die Betrachtung der Abschaltungen durch die Witterungseinflüsse, Störungen an der Anlage selbst oder aufgrund betriebs- oder systembedingter Ausfallursachen lässt sich die Veränderung der Ausfallzeit in Abhängigkeit der Streckenlänge auf Grundlage der mittleren Ausfalldauer aus Abschnitt 6.1 bestimmen.

Tabelle 34: Hochrechnung der Ausfalldauer im Jahr ausgewählter Ausfallursachen auf eine um zwei auf sieben Kilometer verlängerte Segmentlänge (eigene Darstellung).

Ausfallursache	Häufigkeit pro Kilometer	Mittlere Ausfall- dauer [h]	Streckenlänge 5km		Streckenlänge 7km	
			Ausfall- dauer [h]	Gesamt [h]	Ausfall- dauer [h]	Gesamt [h]
unfallbedingt*	3,2	18,92	302,72		423,81	
arbeitsstätten- bedingt**	0,8	12,48	49,92	410,32	69,89	574,45
wartungs- bedingt***	0,4	28,84	57,68		80,75	

*Wert umfasst alle Abschaltungen im Betrachtungszeitraum aufgrund der Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden nach Abschnitt 6.1 **Wert setzt sich zusammen aus der mittleren Ausfallzeit für den Straßenbetriebsdienst (12,30 Stunden) und der mittleren Ausfallzeit für die Wartung von Bauwerken im Streckenbereich (12,65 Stunden) nach Abschnitt 6.1 *** Wert umfasst alle Abschaltungen im Betrachtungszeitraum für Inspektion und Wartung nach Abschnitt 6.1.

Tabelle 34 veranschaulicht die beispielhafte Hochrechnung und somit Abschätzung der Ausfalldauer bei einer Segmentlänge von fünf auf sieben Kilometer aufgrund von

arbeitsstättenbedingten, unfallbedingten und wartungsbedingten Ausfallursachen, wobei der Zusammenhang in diesem Beispiel linear ist, da keine fixen Anteile (bspw. Ausfälle aufgrund der Witterungsereignisse) berücksichtigt werden. Die Anlagenverfügbarkeit, ermittelt über die jährliche maximale Betriebszeit von 8760 Stunden, reduziert sich dabei von 95,3 % (bei einer Segmentlänge von 5 km) auf 93,4 % (Segmentlänge von 7 km) um 1,9 %. Die rechnerische Grenze einer Segmentlänge lässt sich mit 106,7 km ermitteln, bildet jedoch nur einen theoretischen Rahmen.

Die durchgeführte Hochrechnung verdeutlicht, dass die Anlagenverfügbarkeit im hohen Maße von der Segmentlänge abhängen kann. Zwar handelt es sich bei den eingesetzten Werten um jene aus dem Pilotbetrieb der ELISA-Teststrecke, welche zunächst nicht belastbar eine Skalierung des Systems repräsentieren können, dennoch zeigt sich, dass die einzelnen Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage zur Planung der elektrifizierten Teilstrecken und somit der Segmentlänge im Vorfeld gut abgeschätzt werden müssen. Risikobereiche, bspw. unfallgefährdete Streckenbereiche wie Zufahrten von Rastanlagen, sollten gegebenenfalls nicht elektrifiziert werden, um die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage langfristig zu steigern. Die Realisierung einer fahrstreifenbezogenen Abschaltung auch bei den Einsätzen der Gefahrenabwehrbehörden trägt zudem zu einer erheblichen Steigerung der Anlagenverfügbarkeit bei. Nicht zuletzt wird die Festlegung der Segmentlängen auch durch die baulichen Einschränkungen und die Möglichkeiten zur Platzierung der Unterwerke beeinflusst.

Kernaussagen zum Einfluss der Segmentlänge

Der Zusammenhang zwischen der Segmentlänge und der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage wurde anhand einer beispielhaften Hochrechnung ausgewählter Ausfallursachen auf Grundlage der Ausfallhäufigkeiten und mittleren Ausfalldauern dargestellt. Folgende Kernaussagen lassen sich ableiten:

K23: Die Anlagenverfügbarkeit wird durch die Festlegung der Segmentlänge maßgeblich beeinflusst.

Die Häufigkeit der Abschaltungen aufgrund von unfallbedingten, arbeitsstättenbedingten und wartungsbedingten Ausfallursachen ist abhängig von der Segmentlänge. Je größer das Segment, desto wahrscheinlicher ist es, dass bspw. ein Verkehrsunfall in diesem Segment auftritt oder eine Arbeitsstätte eingerichtet werden muss. In Bezug auf die Inspektion und Wartung der Oberleitungsanlage ist festzuhalten, dass der Aufwand der Durchführung mit steigender Segmentlänge zunimmt. Somit steht die Segmentlänge im direkten Zusammenhang der Anlagenverfügbarkeit. Dieser Zusammenhang wurde beispielhaft anhand der aufgeführten Ausfallursachen betrachtet und zeigt sich in einer Reduktion der Anlagenverfügbarkeit um 1,9 % bei einer Vergrößerung der Segmentlänge von 5 Kilometer auf 7 Kilometer.

K24: Eine hohe Anlagenverfügbarkeit setzt eine richtungsbezogene Abschaltung der Oberleitungsanlage voraus.

Eine Vielzahl an Ausfallursachen wirkt richtungsbezogen, da diese auf nur einem der Fahrstreifen auftreten. Während bei den planbaren Ereignissen bereits eine richtungsbezogene Abschaltung vorgenommen wird, findet insbesondere bei den

unfallbedingten Abschaltungen stets eine beidseitige Abschaltung der Oberleitungsanlage statt. Um eine hohe Anlagenverfügbarkeit zu erreichen, sollte die Umsetzung des halbseitigen Betriebs auf alle Ausfallursachen ausgeweitet werden, welche eine richtungsbezogene Abschaltung ermöglichen. Witterungsbedingte Abschaltungen aufgrund einer Sturmwarnung oder aufgrund eines aufgetretenen Extremwetterereignis wirken hingegen in beide Fahrtrichtungen gleichermaßen und bedürfen stets die sicherheitsbedingte beidseitige Abschaltung der Oberleitungsanlage.

Die Kernaussagen zum Einfluss der Segmentlänge werden in Kapitel 7 mit Hilfe von Expertenbefragungen validiert und dienen im Weiteren als Grundlage zur Ableitung der Empfehlungen zum Ausbau und Betrieb einer Oberleitungsanlage in Kapitel 8.

6.4 Zwischenfazit

Für die Analyse der Wirkungszusammenhänge wurden zunächst die limitierenden Ausfallursachen identifiziert und die kritischen Betriebszeiten einer Oberleitungsanlage ermittelt. Anschließend wurden die Einflüsse auf die Anlagenverfügbarkeit analysiert und die Ergebnisse der Untersuchungen in insgesamt 24 Kernaussagen zusammengefasst. Durch die Analysen und die beschriebenen Kernaussagen lässt sich im weiteren Schritt die potenzielle Anlagenverfügbarkeit für eine (zukünftig betriebene) Oberleitungsanlage ermitteln. Ferner bilden diese die Grundlagen, um die in Abschnitt 4.1.2 aufgestellten Forschungsfragen zu beantworten. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 7.3 mittels der Durchführung und Auswertung einer Expertenbefragung validiert und abschließend als Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb einer Oberleitungsanlage beschrieben.

7 Bewertung der potenziellen Verfügbarkeit

7.1 Szenariobasierte Analyse der potenziellen Anlagenverfügbarkeit

Die mit den Daten aus dem ELISA-Feldversuch in Abschnitt 6.3 ermittelten Wirkungszusammenhänge zwischen den jeweiligen Einflüssen in Form der Ausfallursachen und der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage (Ursache-Wirkung-Beziehung, auch Kausalität bezeichnet) legen die Grundlage zur Durchführung einer szenariobasierten Ermittlung der zukünftig möglichen bzw. erreichbaren (potenziellen) Verfügbarkeit. Die potenzielle Verfügbarkeit ist eine wesentliche Kenngröße, um ein System vor seiner (in diesem Fall flächendeckenden) Umsetzung zu bewerten, da bei einer zu geringen Verfügbarkeit entsprechende Rückfallebenen zu implementieren sind, wie bspw. in Bezug auf die Oberleitungstechnologie zusätzliche elektrifizierte Streckenabschnitte oder alternative Lademöglichkeiten, wie stationäre Ladesysteme.

Für die szenariobasierte Ermittlung der potenziellen Anlagenverfügbarkeit werden die für eine Skalierung relevanten Ausfallursachen zusammengestellt und die Ausfallhäufigkeit und die mittlere Ausfalldauer herangezogen. Dabei wird für die mittlere Ausfalldauer kein gezielter Wert verwendet, sondern auf Basis der durchgeführten Auswertungen Wertebereiche, in Form von Extremwerten und Mittelwerten, gebildet, so dass sich letztlich ein Best-Case-Szenario und ein Worst-Case-Szenario über die Extremwerte abbilden lässt sowie ein sogenanntes Trendszenario, welches sich innerhalb der Grenzen der Extrembetrachtung wiederfindet (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Als Grundlage zur Darstellung der relevanten Ausfallursachen dient die Unterteilung der Ausfallursachen nach Abbildung 24 auf Seite 67, da diese nicht nur die unterschiedlichen Kategorien übersichtlich darstellt, sondern ferner auch die Prozesse zur Reparatur und Instandsetzung, Bergung und Freigabe sowie zur Wiedereinschaltung umfasst. Folgende Ausfallursachen wurden im Betrachtungszeitraum innerhalb dieser Arbeit identifiziert und werden zur Szenarioanalyse herangezogen:

- **Organisatorische und betriebliche Ursachen:** Innerhalb der Szenarien werden die Ursachen bzgl. der Inspektion und Wartung, der Anforderungen durch Dritte, der straßenbetrieblichen Aktivitäten und Arbeitsstätten berücksichtigt. Es wird angenommen, dass bei einer Skalierung des Oberleitungssystems und einem standardisierten und dauerhaften Betrieb sowie einem vertrauten Umgang keine innerbetrieblich begründeten und betriebsnotwendigen Abschaltungen auftreten und ein Ausfall der Kommunikation zwischen dem Betreibenden und der Oberleitungsanlage durch sekundäre Rückfallebenen verhindert wird.
- **Witterungsbedingte Ursachen:** Im Feldversuch kam es bereits zu witterungsbedingten Abschaltungen. Es wird davon ausgegangen, dass die Extremwetterlagen weiter zunehmen werden und eine Sicherheitsabschaltung auch zukünftig erforderlich sein wird. Inwieweit es zu einer Beschädigung aufgrund einer schweren Wetterlage kommen kann, lässt sich dabei jedoch nicht abschätzen und wird in der Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit nicht betrachtet.
- **Menschliche Ursachen:** Die Unfallereignisse mit oder ohne eine Beschädigung der Oberleitungsanlage spiegeln die Einsätze bzw. letztlich die Anforderungen zur Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden wider. Ein unerlaubter Zutritt von Dritten oder Vandalismus, welcher zu einer Abschaltung der Oberleitungsanlage führt,

trat im Betrachtungszeitraum nicht auf und wird auch in der szenariobasierten Ermittlung nicht betrachtet.

- **Mechanische Ursachen:** Auch aufgrund des relativ kurzzeitigen Betrachtungszeitraums von etwa 3,5 Jahren konnten keine mechanischen Ursachen als Abschaltungsgrund der Oberleitungsanlage identifiziert werden. Es wird für die weitere Analyse davon ausgegangen, dass durch die regelmäßige Durchführung von Inspektion- und Instandhaltungsarbeiten auch zukünftig keine nennenswerten mechanischen Ausfallursachen auftreten.
- **Elektrotechnische Ursachen:** Die Durchführung des ELISA-Feldversuchs hat gezeigt, dass elektrotechnische Ursachen in Bezug auf die potenzielle Verfügbarkeit (zunächst) keine Relevanz aufweisen. Zwar sind die Abschaltungen aufgrund der Korrosion der Isolatoren auf eine elektrotechnische Ursache zurückzuführen, dennoch wurde das Problem durch den Austausch der Isolatoren gelöst, so dass für die Analyse diese Ursachenkategorie nicht betrachtet wird.

Eine zusätzliche Variation innerhalb der szenariobasierten Analyse ergibt sich durch die Berücksichtigung des halbseitigen Betriebs der Oberleitungsanlage. Dieser wurde im Jahr 2020 nachträglich im ELISA-Feldversuch implementiert und bei planmäßigen Abschaltungen genutzt. Bei den Abschaltungen aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden werden bisher stets beide Fahrtrichtungen stromlos geschaltet. Es ist davon auszugehen, dass bei einem Ausbau des Systems der halbseitige Betrieb auch für diese Ausfallursache umgesetzt wird.

Bei der Ermittlung der Werte für die Ausfalldauer zur Anwendung in der Szenarioanalyse sind ferner auch die Einflüsse der Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten sowie der Personalverfügbarkeit zu berücksichtigen. Dies kann durch eine begründete Auswahl der Werte gewährleistet werden, da der Einfluss sich in der Ausprägung dieser Werte widerspiegelt. Die Mittelwerte werden auf Basis der Daten aus dem ELISA-Feldversuch bestimmt:

- **Inspektion und Wartung:** Im Betrachtungszeitraum wurden insgesamt sieben Abschaltungen aufgrund von Inspektion und Wartung festgestellt, mit einer gesamten Ausfalldauer von 124,93 Stunden (je Fahrtrichtung), so dass die mittlere Ausfalldauer 17,85 Stunden beträgt. Die kürzeste Abschaltung dauerte dabei nur 9,92 Stunden, der Median liegt bei 10,68 Stunden. Die längste Abschaltung hingegen betrug 34,10 Stunden. Innerhalb der Szenarioanalyse werden zwei Abschaltungen pro Jahr und Fahrtrichtung berücksichtigt.
- **Anforderungen durch Dritte:** Die Anforderungen durch Dritte umschließen in dieser Betrachtung nicht die Abschaltungen durch die Gefahrenabwehrbehörden, da diese gesondert ausgewiesen werden. Dementsprechend werden lediglich die insgesamt drei Abschaltungen aufgrund von Wartungsarbeiten des Energieversorgungsnetzbetreibers bzw. Arbeiten am Energieversorgungsnetz betrachtet, welche im Mittel eine Ausfalldauer von 7,33 Stunden aufwiesen. Die kürzeste Abschaltung betrug 5,31 Stunden, die längste hingegen 10,57 Stunden. Ein Ereignis erforderte nur die Abschaltung einer Fahrtrichtung (halbseitiger Betrieb). Es wird von einer Abschaltung im Jahr für die Szenarioanalyse ausgegangen.
- **Straßenbetrieblichen Aktivitäten:** Die Abschaltungen aufgrund der Arbeiten des Straßenbetriebsdienstes umfassen in erster Linie die Mäharbeiten sowie die Reinigung der Straße bzw. Straßenelemente. Insgesamt konnten vier Abschaltungen festgestellt werden, wobei bei zwei Abschaltungen ein halbseitiger Betrieb der Oberleitungsanlage

umgesetzt wurde, so dass im Mittel von einer Abschaltung pro Jahr und Fahrtrichtung ausgegangen wird. Die mittlere Ausfalldauer betrug 8,19 Stunden, die kürzeste 7,84 Stunden und die längste Ausfalldauer 8,62 Stunden.

- **Arbeitsstätten:** Arbeiten im Straßenraum waren aus unterschiedlichen Gründen erforderlich, bspw. aufgrund der Reparaturarbeiten des Straßenbelags, der Anbringung von Beschilderung, der Ausbesserungs-, Instandhaltungs- und Inspektionsarbeiten an Brücken und anderen Bauwerken sowie aufgrund der Durchführung von Brückenprüfungen. Insgesamt wurden neun Abschaltungen im Betrachtungszeitraum identifiziert, welche zu einer mittleren Abschaltungsdauer von 6,26 Stunden führten. Die jeweiligen Ausfalldauern variierten dabei zwischen 1,10 Stunden und 19,58 Stunden. Nur zwei der neun Ereignisse erforderten eine Abschaltung beider Fahrtrichtungen, so dass eine mittlere Häufigkeit von zwei Abschaltungen je Fahrtrichtung und Jahr angesetzt wird.
- **Extremwetterlagen:** Zur Ermittlung der Kennwerte werden die zwei relevanten Ereignisse, die Abschaltung aufgrund einer Sturmwarnung und die Abschaltung infolge einer Beschädigung aufgrund einer schweren Wetterlage, herangezogen. Der Mittelwert der Abschaltungsdauer liegt bei 76,15 Stunden. Dieser wird als Höchstwert angesetzt, da die Abschaltungen bei beiden Ereignissen den Einflüssen der Instandsetzung- und Reparaturarbeiten sowie der Personalverfügbarkeit unterliegen. Für den Minimalwert wird ebenfalls die theoretische frühere Einschaltungszeit von einem Tag berücksichtigt, so dass 40,94 Stunden anstelle von 64,94 Stunden angesetzt werden. Für den Mittelwert wird bei den Extremwetterlagen der mittlere Wert zwischen Minimalwert und Maximalwert verwendet. Innerhalb der Szenarioanalyse wird eine Abschaltung pro Jahr und Fahrtrichtung berücksichtigt.
- **Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden:** Insgesamt 43 Abschaltungen ließen sich aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden im Betrachtungszeitraum identifizieren. Unter der Berücksichtigung, dass eine Abschaltung nur dann erfolgt, wenn kein vorheriges Ereignis eine Abschaltung ausgelöst hat, liegt der beobachtete Wert unterhalb des tatsächlichen Wertes. Die meisten Abschaltungen traten in den Jahren 2020 und 2022 auf (jeweils 16 Abschaltungen). Beide Jahre weisen ebenfalls eine hohe Verfügbarkeit von 89,4 % (2020) bzw. 95,4 % (2022) auf. Dementsprechend wird für die szenariobasierte Analyse von einem höheren Wert, von 18 Abschaltungen (entspricht 16 / 0,9) ausgegangen. Für den Minimalwert wird der Median mit 5,07 Stunden und für den Maximalwert der Wert des dritten Quartils mit 14,24 Stunden verwendet. Der Mittelwert beträgt 11,22 Stunden. Es ist zu beachten, dass die 18 Abschaltungen unabhängig der Fahrtrichtung (Summe beider Fahrtrichtungen) zu betrachten sind.

Die beschriebenen Werte der jeweiligen Ausfallursachen für die szenariobasierte Analyse der potenziellen Verfügbarkeit sind in Tabelle 35 übersichtlich dargestellt.

Tabelle 35: Ausgangswerte für die szenariobasierte Analyse der potenziellen Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage (eigene Darstellung).

Ausfallursache	Häufigkeit [Anzahl/Jahr]	Minimalwert [h/Anzahl]	Mittelwert [h/Anzahl]	Maximalwert [h/Anzahl]
Inspektion und Wartung	2	9,92	17,85	34,10
Anforderungen durch Dritte	1	5,31	7,33	10,57
straßenbetriebliche Aktivitäten	1	7,84	8,19	8,62
Arbeitsstätten	2	1,10	6,26	19,58
Extremwetterereignisse	1	40,94	58,55	76,15
Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden	18	5,07	11,22	14,24

Die angegebenen Werte beziehen sich auf die Betrachtung der Ausfallzeit eines Fahrstreifens, wobei bei der Häufigkeit der Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden das Ereignis auch auf dem entgegengesetzten Fahrstreifen erfolgt sein kann.

Mit Hilfe der definierten Werte lassen sich im Weiteren die potenziellen Verfügbarkeiten einer Oberleitungsanlage bestimmen. Dabei bilden die Minimalwerte das Best-Case-Szenario, die Mittelwerte das Trendszenario und die Maximalwerte das Worst-Case-Szenario ab.

Tabelle 36: Ermittlung der Szenarien der potenziellen Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage über die Ausfalldauer der Ausfallursachen über die Ausgangswerte (Werte in Stunden, eigene Darstellung).

Ausfallursache	Best-Case-Szenario [h]	Trendszenario [h]	Worst-Case-Szenario [h]
Inspektion und Wartung	19,84	35,70	68,20
Anforderungen durch Dritte	5,31	7,33	10,57
straßenbetriebliche Aktivitäten	7,84	8,19	8,62
Arbeitsstätten	2,20	12,52	39,16
Extremwetterlagen	40,94	58,55	76,15
Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden	91,26 (45,63)	201,96 (100,98)	256,32 (128,16)
Summe der Ausfallzeit	167,39 (121,76)	324,25 (223,27)	459,02 (330,86)
Anlagenverfügbarkeit	98,1 % (98,6 %)	96,3 % (97,5 %)	94,8 % (96,2 %)

Berechnung der Ausfallzeiten in Stunden basierend auf der Ausgangswerte nach Tabelle 35. Die angegebenen Werte innerhalb der Klammern beziehen sich auf einen halbseitigen Betrieb.

Anhand der durchgeführten Berechnungen zeigt sich, dass von einer potenziellen Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen von 94,8 % bis 98,6 % ausgegangen werden kann.

Die Eingangsdaten basieren dabei auf den erfassten Daten im ELISA-Feldversuch für einen fünf Kilometer langen elektrifizierten Streckenabschnitt. Die Umsetzung des halbseitigen Betriebs auch für Abschaltungen aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden führt zu einer signifikanten Steigerung der Verfügbarkeit. Zu beachten ist, dass einem erheblichen Anteil an der gesamten Ausfallzeit durch Extremwetterereignisse ausgegangen worden ist. Eine Abschätzung ist in diesem Fall wegen den sich stetig verändernden klimatischen Bedingungen nur unter Vorbehalt möglich.

Mit der Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit wurden die in Kapitel 6 beschriebenen Wirkungszusammenhänge erstmals quantitativ angewendet. Die bereits bei den jeweiligen Analysen aufgestellten Kernaussagen lassen sich mit Bezug auf die dargestellten Berechnungen zur Anlagenverfügbarkeit wie folgt erweitern:

K25: Die potenzielle Verfügbarkeit einer 5 km langen Oberleitungsanlage kann einen Wert von über 98 % erreichen.

Die durchgeführte szenariobasierte Analyse zur potenziellen Verfügbarkeit zeigt eine Anlagenverfügbarkeit von über 98 % für das Best-Case-Szenario auf. Dieser Wert ist grundsätzlich von der Länge der elektrifizierten Strecke abhängig. Da die Daten zur Hochrechnung über den Feldversuch ELISA gewonnen wurden, stützen sich die Ergebnisse auf eine Länge der Oberleitungsanlage von 5 Kilometern. Weiterhin ist der Wert der Verfügbarkeit insbesondere von den klimatischen Veränderungen abhängig, welche sich in Zukunft negativ verändern könnten. Die ermittelten Werte sind im Weiteren auch lokal begrenzt. So ist die Anzahl an Abschaltungen aufgrund der Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden eng verzahnt mit der Verkehrsmenge auf dem elektrifizierten Streckenabschnitt. Es ist davon auszugehen, dass die Häufigkeit der Abschaltungen aufgrund dieser Ausfallursache auf anderen Streckenabschnitten deutlich geringer ist.

K26: Die klimatischen Veränderungen können sich zukünftig signifikant auf die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auswirken.

Im Betrachtungszeitraum wurden witterungsbedingte Ausfallursachen identifiziert und deren Wirkungszusammenhänge beschrieben. Bei der Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit wurden diese Wirkungen berücksichtigt und zeigen bereits an dieser Stelle auf, dass der Einfluss der Extremwetterereignisse einen entscheidenden Anteil der Ausfallzeit einer Oberleitungsanlage einnehmen kann. Sofern die klimatischen Veränderungen zukünftig die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von orkanartigen Gewitterlagen erhöht, wird es zukünftig aus Sicherheitsgründen auch vermehrte Abschaltungen geben. Dabei ist zu beachten, dass die Dauer der Gewitterlage die Dauer der Abschaltung bestimmt.

Die Kernaussagen zur potenziellen Anlagenverfügbarkeit werden in Kapitel 7 mit Hilfe von Expertenbefragungen validiert und dienen im Weiteren als Grundlage zur Ableitung der Empfehlungen zum Ausbau und Betrieb einer Oberleitungsanlage in Kapitel 8.

7.2 Durchführung von Expertenbefragungen

7.2.1 Zielstellung und Festlegung der Art der Expertenbefragungen

In den vorangegangenen Kapiteln 5 und 6 wurden die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage ermittelt sowie die Ausfallursachen identifiziert und im Abschnitt 7.1 die zukünftige potenzielle Anlagenverfügbarkeit auf Grundlage der Wirkungszusammenhänge abgeschätzt. Hierzu wurden die Daten zum Anlagenbetrieb aus dem ELISA-Feldversuch verwendet.

Für die Ableitung der Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb der Oberleitungsanlage sollen die Erkenntnisse und Ergebnisse mittels einer Expertenbefragung validiert werden. Dabei nehmen die Anlagenbetreibenden als Experten eine zentrale Rolle ein, da diese die Abschaltungen begleiten und die Wiedereinschaltung durchgeführt haben und somit mit allen Prozessen zum Anlagenbetrieb vertraut sind. Ein weiterer wichtiger Akteur ist der Anlagenerrichter, da dieser die Funktionalität der Oberleitungsanlage im Rahmen des ELISA-Feldversuchs kontinuierlich überwachte. Die Experten sollen dementsprechend diesen Akteuren zugeordnet sein (**Zielgruppe**).

Die Erhebung von Daten zur Beantwortung aufgestellter Theorien und Hypothesen ist eine weitangewendete Methode der **empirischen Sozialforschung**. Dabei werden sechs unterschiedliche Möglichkeiten differenziert: Beobachtung, Interview, Fragebogenmethode, psychologischer Test, physiologische Messung und Dokumentenanalyse (Döring & Bortz, 2016, S. 321ff.). Die Durchführung einer Expertenbefragung kann dabei generell als ein Interview oder über einen Fragebogen erfolgen. Während bei einem Interview vordefinierte Fragen im Dialog und somit offen beantwortet werden, kann mittels eines Fragebogens eine formalisierte Durchführung gewährleistet werden, wobei ebenfalls offene Fragen in einem Fragebogen integriert werden können. Der Vorteil eines Fragebogens ergibt sich darin, dass die Beantwortung der Fragen allein durch den Befragten (in diesem Fall die Experten) vorgenommen wird und der Aufwand in der Durchführung dadurch erheblich reduziert wird. Demgegenüber bedarf die Erstellung des Fragebogens einen erheblichen Mehraufwand, da die Fragen ohne Hilfe durch die Befragten verstanden werden müssen und die (gewünschte) Auswertung durch die gegebenen Antwortmöglichkeiten möglich sein muss. Die Durchführung eines Interviews eignet sich bspw. dann, wenn Theorien und Hypothesen im Zuge des Interviews entwickelt oder neue Zusammenhänge identifiziert werden sollen.

Da innerhalb dieser Arbeit bereits durch die Analyse der Wirkungszusammenhänge die Zusammenhänge weitgehend erfasst sind, und die im Feldversuch realisierte Verfügbarkeit berechnet sowie die potenzielle Verfügbarkeit abgeleitet wurde, ist das primäre Ziel der Befragung eine Überprüfung der erlangten Erkenntnisse (Validierung der Aussagen). Insofern wird auf die Fragebogenmethode zurückgegriffen. Ziel ist es, eine standardisierte Befragung durchzuführen, um möglichst quantitative Aussagen der Experten zu erhalten, gleichzeitig soll innerhalb der Befragung Raum geschaffen werden, um zusätzliche Impulse und Aussagen der Experten, bspw. durch offene Fragen, einfangen zu können. Folgende Aspekte sollen über die Befragung abgedeckt werden:

- **Erfahrungswert der Experten:** Voraussetzung zur Leistung valider Aussagen ist eine ausreichende Erfahrung und Vertrautheit mit dem Betrieb des Oberleitungssystems. Die Erfahrung der Experten muss demnach innerhalb der Befragung quantitativ erfasst werden.

- **Einschätzung bzgl. des Risikos von Ausfallursachen:** Die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Auswirkungen von Ausfallursachen wurden in Abschnitt 6.1 umfassend untersucht. Durch eine zusätzliche Abschätzung der Experten sollen die Ergebnisse validiert werden.
- **Validierung der Kernaussagen:** Insgesamt wurden im Rahmen der Untersuchungen 26 Kernaussagen aufgestellt. Diese Kernaussagen sollen durch die Experten in Bezug auf die Richtigkeit eingeschätzt werden.
- **Validierung der Ergebnisse zur potenziellen Verfügbarkeit:** In Abschnitt 7.1 wurde die potenzielle Verfügbarkeit szenariobasiert ermittelt. Die zugrunde gelegten Ausfallursachen sollen durch die Experten in Bezug auf den Beitrag zur Reduktion der Verfügbarkeit bewertet werden, so dass eine vergleichende Betrachtung durchgeführt werden kann.
- **Bewertung der Anlagenverfügbarkeit:** Um die ermittelte Anlagenverfügbarkeit bewerten zu können, bedarf es einem Vergleichswert. Dieser soll mit Hilfe der Aussagen der Experten abgeschätzt werden.
- **Erfassung der Haltung gegenüber der Oberleitungstechnologie:** Die Einstellung bzw. Haltung einer Person gegenüber dem Oberleitungssystem beeinflusst gegebenenfalls die Beantwortung der Fragen. Dementsprechend wird diese innerhalb der Befragung erfasst. Da die Befragung sich jedoch ausschließlich auf eine kleine Gruppe an Experten bezieht, lassen sich mit der Beantwortung keine Signifikanzen aufzeigen.

Die große Herausforderung innerhalb der standardisierten Befragung ist es, dass die aufgestellten Fragen nicht nur die Möglichkeit zur Evaluation der aufgeführten Aspekte ermöglichen, sondern vielmehr, dass diese Fragen durch die Experten eindeutig verstanden werden. Dementsprechend wird die Entwicklung der Befragungssitems im folgenden Abschnitt beschrieben.

7.2.2 Entwicklung der Befragungssitems

Grundsätzlich werden die jeweiligen Fragen den in Abschnitt 7.2.1 aufgeführten Aspekten zugeordnet, wodurch diese strukturiert in Themenbereiche zusammengefasst werden können. Die entwickelten Fragen werden an dieser Stelle basierend nach Themenbereich dargestellt und erläutert. Der gesamte Fragebogen ist in Anlage A.IX dargestellt.

Erfassung der Erfahrungswerte der Experten

Der erste Themenbereich der Fragen im Fragebogen dient dazu, das Wissen und die Erfahrung der Experten und somit die Fähigkeit zur qualitativen Beantwortung der Fragen abzuleiten. Wie bereits aufgeführt, bilden die Personen des Anlagenbetreibers und des Anlagenerrichters die Zielgruppe der Erhebung ab, da diese weitreichende Einblicke in die Funktionalität der Oberleitungsanlage im Feldversuch ELISA aufweisen und die Einflüsse auf die Verfügbarkeit bzw. die Wirkungszusammenhänge am besten nachvollziehen können. Der Themenbereich umfasst letztlich zwei geschlossene Fragen.

Frage 1: Bitte ordnen Sie sich einem Akteur aus dem Feldversuch ELISA zu.

Durch die Einordnung des Befragten zu den Akteuren im Feldversuch ELISA lässt sich direkt auf die Zielgruppe der Befragung schließen.

Frage 2: Wie lange arbeiten Sie schon im Kontext des dynamischen Ladens mit dem eHighway-System?

Durch die Kombination der Frage 1 mit der Frage 2 lässt sich die Erfahrung und das Wissen des Befragten abschätzen. Die Voraussetzung zur Klassifizierung des Befragten als ein Experte bzw. eine Expertin ist eine mindestens dreijährige Tätigkeit im Kontext des dynamischen Ladens.

Einschätzung bzgl. des Risikos von Ausfallursachen

Ein Risiko beschreibt sich über eine Eintrittswahrscheinlichkeit in Verbindung mit einem Schadensausmaß (vgl. Abschnitt 4.2.3), wobei im vorliegenden Fall das Schadensausmaß die Abschaltung bzw. die Dauer der Abschaltung der Oberleitungsanlage ist. Diese Abschaltungsdauer (bzw. Ausfalldauer) wird auch als Auswirkung der Ausfallursache bezeichnet und stellt den Wirkungszusammenhang als Ursache-Wirkung-Beziehung dar. In Abschnitt 6.1 wurden basierend auf der Häufigkeit des Auftretens und der mittleren Ausfalldauer die limitierenden Ausfallursachen identifiziert und die Kategorien der Ausfallursachen vergleichend gegenübergestellt (vgl. Abbildung 29 auf Seite 80). Die Experten sollen auf Grundlage ihrer Erfahrung eine vergleichbare Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Auswirkungen vornehmen, um zum einen die Aussagen zu den limitierenden Ausfallursachen zu validieren, zum anderen lässt sich durch den Vergleich auch die Fähigkeit zur qualitativen Beantwortung der Experten aufzeigen. Folgende zwei Fragen sind im zweiten Themenbereich formuliert.

Frage 3: Bitte schätzen Sie die Eintrittswahrscheinlichkeit der jeweiligen Ursachenkategorie ab, welche zur Abschaltung der Oberleitungsanlage auf der A5 führte.

Die Abschätzung innerhalb der dritten Frage ist in Form einer fünf-stufigen Likert-Skala von „sehr selten“ bis „sehr hoch“ durchzuführen, wobei alle sechs Ursachenkategorien nach Abschnitt 5.5 zu bewerten sind. Die Möglichkeit der Nichtbeantwortung durch die Auswahl „keine Angabe“ wird gegeben.

Frage 4: Bitte schätzen Sie die Auswirkungen (mittlere Ausfalldauer) der jeweiligen Ursachenkategorie ein.

Wie bei Frage 3 ist auch bei der vierten Frage diese in Form einer fünf-stufigen Likert-Skala, jedoch von „sehr gering“ bis „sehr hoch“ über die sechs Ursachenkategorien, zu beantworten. Auch in diesem Fall ist die Möglichkeit der Nichtbeantwortung durch die Auswahl „keine Angabe“ gegeben.

Validierung der Kernaussagen

Die insgesamt 26 Kernaussagen wurden in den Abschnitten 6.3 und 7.1 aufgestellt und umfassen Aussagen zu den Wirkungszusammenhängen und zur Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit. Somit beziehen sich die Fragen zum einen auf die Auswertung der erfassten Daten des Feldversuchs sowie zum anderen auf zukünftig zu erwartende Zusammenhänge. Die Kernaussagen sind dabei soweit formuliert, dass aus diesen der Fokus der Betrachtung ersichtlich wird. Folgende Frage bildet diesen Themenbereich ab:

Frage 5: Bitte schätzen Sie die folgenden Aussagen ein.

Die Kernaussagen werden in einer fünf-stufigen Likert-Skala von „[ich] stimme nicht zu“ bis „[ich] stimme zu“ abgefragt. Eine Enthaltung ist durch „keine Angabe“ möglich.

Um die Beantwortung der Frage bzw. die Einschätzung der jeweiligen Kernaussagen zu unterstützen, werden wichtige Begriffe, welche innerhalb der Formulierung der Kernaussagen verwendet werden, im Vorfeld der Frage 5 erläutert. Zu diesen Begriffen zählen die Formen der Betriebsstrategie (zeitweiser Betrieb und dauerhafter Betrieb), die geplante Betriebszeit sowie die Erläuterungen zu unerwarteten und externalen Ausfallursachen.

Validierung des Ergebnisses zur potenziellen Verfügbarkeit und Bewertung der Anlagenverfügbarkeit

Für die Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit wurden in Abschnitt 7.1 die entsprechenden Werte für die Häufigkeit des Eintretens der relevanten Ausfallursachen sowie die mittlere Ausfalldauer auf Grundlage der Analysen zu den Wirkungszusammenhängen abgeschätzt, wobei drei unterschiedliche Szenarien betrachtet wurden. Um die abgeschätzten Werte zu validieren, sollen die Experten eine eigene Einschätzung vornehmen, wobei diese jedoch nicht getrennt nach Häufigkeit und mittlerer Ausfalldauer befragt werden, sondern einen absoluten jährlichen Betrag für die zu erwartende Ausfalldauer angeben sollen. Anschließend wird mit Hilfe von offenen Fragen nach weiteren Ursachen sowie nach möglichen Maßnahmen zur Reduzierung der gesamten Ausfalldauer gefragt, um zusätzliche Impulse der Experten aufnehmen zu können. Zusätzlich wird in diesem Themenbereich auch die minimal zu erreichende Anlagenverfügbarkeit abgefragt, um die ermittelte potenzielle Verfügbarkeit bewerten zu können.

Frage 6: Bitte schätzen Sie die (voraussichtlich zukünftigen) Auswirkungen (Ausfalltage pro Jahr) ausgewählter Ausfallursachen ein. Gehen Sie von einer 5 km langen elektrischen Strecke aus.

Die sechste Frage zielt auf eine Erfassung einer zukünftigen und entsprechend potenziellen Anlagenverfügbarkeit ab und gibt die Ausfallursachen, welche dabei betrachtet werden, vor. Die Auswirkungen, in diesem Fall „Ausfalltage pro Jahr“, werden über eine sechs-stufige Skala abgebildet, wobei die Möglichkeit der Nichtbeantwortung durch die Auswahl „keine Angabe“ vorhanden ist.

Frage 7: Was sind Ihrer Meinung nach die Ursachen mit den größten Auswirkungen auf die Verfügbarkeit?

Über die offene siebte Frage soll zusätzliches Feedback eingeholt werden, um bspw. weitere Ursachen zu identifizieren, welche bisher nicht innerhalb der potenziellen Verfügbarkeit betrachtet wurden. Diese Frage ist keine Pflichtfrage und muss entsprechend nicht beantwortet werden, um die Befragung abzuschließen.

Frage 8: Welche Anlagenverfügbarkeit (im Jahr) sollte Ihrer Meinung nach im dauerhaften Betrieb (24/7) mindestens erreicht werden?

Bisher wurde die Anlagenverfügbarkeit für die unterschiedlichen Jahren im Betrachtungszeitraum (vgl. Abschnitt 5.3) und szenariobasiert für zukünftige Jahre (vgl. Abschnitt 7.1) ermittelt und miteinander verglichen. Welcher Wert der Anlagenverfügbarkeit eine zufriedenstellende Verfügbarkeit ausdrückt, konnte dabei nicht ausgesagt werden.

Dementsprechend soll dieser Wert mit Hilfe der Angaben der Befragten ermittelt werden, indem diese über die Frage 8 eine persönliche Einschätzung vornehmen.

Frage 9: Welche Maßnahmen können dazu beitragen, um in Zukunft die Verfügbarkeit weiter zu erhöhen?

Vergleichend zu Frage 7 werden in der neunten Frage die möglichen Maßnahmen identifiziert, um die Anlagenverfügbarkeit in Zukunft steigern zu können. Auch in diesem Fall liegt das primäre Ziel dieser Frage darin, zusätzliche Impulse zu erhalten, um diese im Weiteren im Kontext der aufgestellten Kernaussagen zu verarbeiten. Die neunte Frage ist keine Pflichtfrage und muss entsprechend nicht beantwortet werden, um die Befragung abzuschließen.

Erfassung der Haltung gegenüber der Oberleitungstechnologie

Um die Akzeptanz der Befragten bzgl. der Oberleitungstechnologie zu erfassen, werden die Experten zu ihrer Haltung im Allgemeinen gegenüber der eHighway-Teststrecke sowie zum Ausbau der Technologie befragt.

Frage 10: Was trifft bezüglich Ihrer Haltung gegenüber der eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 in Hessen am ehesten zu?

Die Haltung gegenüber der eHighway-Teststrecke wird in insgesamt sieben Stufen erfasst und reicht von einem aktiven Engagement für die Teststrecke bis hin zu einem aktiven Engagement gegen die Teststrecke. Ähnliche Untersuchungen wurden auch in anderen Akzeptanzbefragungen durchgeführt und können vergleichend betrachtet werden (Hein et al., 2023).

Frage 11: Möchten Sie, dass das eHighway-System in Zukunft ausgebaut wird?

Mit dieser Frage kann die Haltung gegenüber der Oberleitungstechnologie abschließend bewertet werden. Die Frage zwingt die Befragten zu einer direkten Antwort, eine Enthaltung durch die Möglichkeit der Nichtbeantwortung durch die Auswahl „weiß nicht“ ist jedoch möglich.

Zusätzliche Angaben der Befragten

Mit den vorausgestellten elf Fragen schließt der offizielle Teil der Befragung ab. Da nur zwei der elf Fragestellungen offene Fragen umfassen, wird zum Abschluss der Befragung den Befragten die Möglichkeit eingeräumt, zusätzliche Hinweise, Anregungen und Impulse für die weitere Bearbeitung mitzugeben.

Frage 12: Feedback zur Befragung

Die 12. Frage ist eine offene Frage und kann durch Experten weitgehend frei beantwortet werden. Da diese Frage keine Pflichtfrage ist, muss diese entsprechend nicht beantwortet werden, um die Befragung endgültig abzuschließen.

7.2.3 Organisation und Durchführung der Expertenbefragungen

Die in Abschnitt 7.2.2 vorgestellten Fragen wurden in einen Fragebogen überführt. Da der Umfang mit insgesamt 12 Fragen vergleichsweise übersichtlich ist und keine komplexen Fragetypen oder Filterkriterien benötigt werden, konnte auf eine schlanke Software für die

Erstellung der Online-Umfrage zurückgegriffen werden. Dazu wurde das Online-Umfrage-Tool der DATAtab e. U.¹⁸ verwendet. Neben der Erstellung des Fragebogens und des digitalen Bereitstellens als Online-Link (vgl. Abbildung 43) lassen sich bei diesem Tool die erhobenen Daten direkt in ein ebenfalls zur Verfügung gestelltes Statistik-Programm überführen.



Befragung zur Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs

Liebe Expertinnen und Experten,

diese Umfrage dient zur Erhebung relevanter Daten, um meine Ergebnisse und abgeleiteten Aussagen zur Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs zu validieren. Bitte beantworten Sie die Fragen soweit es Ihnen möglich ist. Bei Unsicherheit lassen Sie die Frage unbeantwortet oder nutzen Sie gerne die entsprechende Ausweichoption.

Die Umfrage wird etwa 20 Minuten Zeit in Anspruch nehmen, stellt aber einen wichtigen Teil in meinen Analysen dar. Ich freue mich daher auch über zusätzliches Feedback in den dafür vorgesehenen Freitextfeldern.

Datenschutzhinweis und Einwilligung gemäß DSGVO

Abbildung 43: Ausschnitt der Eingangsseite zur Befragung zur Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs als Grundlage zur Validierung der Ergebnisse.

Die Erstellung des Fragebogens und die Durchführung der Pretests erfolgten über einen Zeitraum von vier Wochen vom 29.07.2024 bis zum 23.08.2024, wobei insbesondere die Formulierungen zu den Kernaussagen mehrfach angepasst werden mussten, um diese im Fragebogen leicht verständlich wiedergeben zu können. Im selbigen Zeitraum wurden die Personen, welche an der Befragung teilnehmen sollten, identifiziert und die Zustimmung zur Teilnahme eingeholt. Insgesamt wurde der Fragebogen an fünf Personen versendet, welche jeweils aufgrund der Zugehörigkeit zum Projekt, eine hohe Expertise in Bezug auf den Betrieb der Oberleitungsanlage aufweisen. Zu diesen Personen zählt zum einen das Personal, welches im Zeitraum der Durchführung des ELISA Projekts für den operativen Betrieb der Anlage auf seiten des Anlagenbetreibers zuständig sind, zum anderen jenes Personal auf Seiten des Anlagenerrichters, welches umfassende Einblicke in die Funktionalität der Oberleitungsanlage aufweist. Zusätzlich wurde ein Experte aus dem Akteursbereich der Energieversorger angeschrieben, da dieser Experte vergleichbare Einblicke in die Anlagenverfügbarkeit aufweist.

Aufgrund des eingeschränkten Personenkreises wurde für die Durchführung der Befragung ein relativ langer Erhebungszeitraum benötigt, welcher letztlich sechs Wochen umfasste und vom 09.09.2024 bis zum 18.10.2024 andauerte. Die erhobenen Daten wurden mittels einfacher Statistikprogramme ausgewertet und werden im nachfolgenden Abschnitt deskriptiv ausgewertet.

¹⁸ DATAtab: Online Statistics Calculator. DATAtab e.U. Graz, Austria. URL <https://datatab.de>

7.2.4 Deskriptive Auswertung der Expertenbefragungen

Insgesamt nahmen alle fünf Experten an der Befragung teil. Alle Experten sind seit über fünf Jahren im Kontext des dynamischen Ladens mit dem eHighway-System tätig (zweite Frage) und sind dem Anlagenbetreiber (zwei Experten), dem Anlagenerrichter (zwei Experten) und dem Energieversorger (ein Experte) zuzuordnen (erste Frage). Die befragten Personen eignen sich entsprechend für die Beantwortung der Fragen des Fragebogens.

Im Folgenden werden die Antworten der Befragten deskriptiv ausgewertet und beschrieben.

Einschätzung bzgl. des Risikos von Ausfallursachen

Über die dritte und vierte Frage wurden die Einschätzungen zur Eintrittswahrscheinlichkeit und der jeweiligen Auswirkungen der Ausfallursachen erfasst. Diese wurden im Zuge der Bearbeitung auch aus den Daten ermittelt und sind vergleichbar in Abbildung 29 (Seite 80) dargestellt.

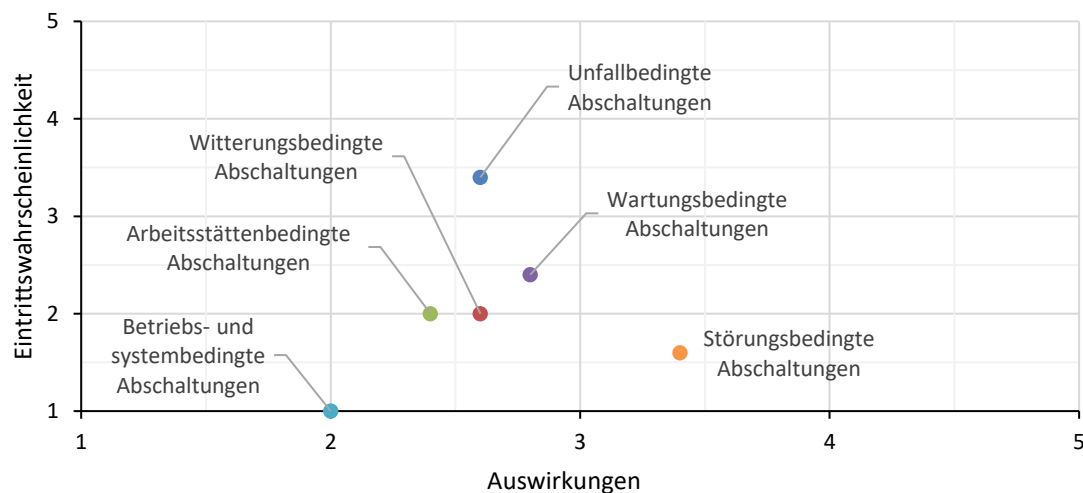


Abbildung 44: Einschätzung der Auswirkungen (1 = sehr gering bis 5 = sehr hoch) und der Eintrittswahrscheinlichkeit (1 = sehr selten bis 5 = sehr häufig) der Ausfallursachen (Mittelwerte) durch die Befragten (n = 5), eigene Darstellung.

Die Einschätzungen zur Eintrittswahrscheinlichkeit und der Auswirkungen sind in Abbildung 44 in Form einer Risikomatrix aufgeführt. Während die Experten den unfallbedingten Abschaltungen die höchste Eintrittswahrscheinlichkeit zuweisen, werden die störungsbedingten Abschaltungen als jene gesehen, welche die größten Auswirkungen auf die Verfügbarkeit im Betrieb aufweisen. Betriebs- und systembedingte Abschaltungen werden als sehr selten in der Häufigkeit des Auftretens und eher gering in Bezug auf die Auswirkungen bewertet. Besonders hervorzuheben ist, dass die wartungsbedingten Abschaltungen nach Angaben der Experten (Mittelwert) neben den unfallbedingten Abschaltungen am häufigsten auftreten.

Validierung der Kernaussagen

Schwerpunkt der Befragung bildete die Einschätzung und somit die Bewertung der insgesamt 26 Kernaussagen (Frage 5) durch die Experten. Zur Darstellung der Ergebnisse der Befragung wurden die Mittelwerte der Antworten der Experten gebildet.

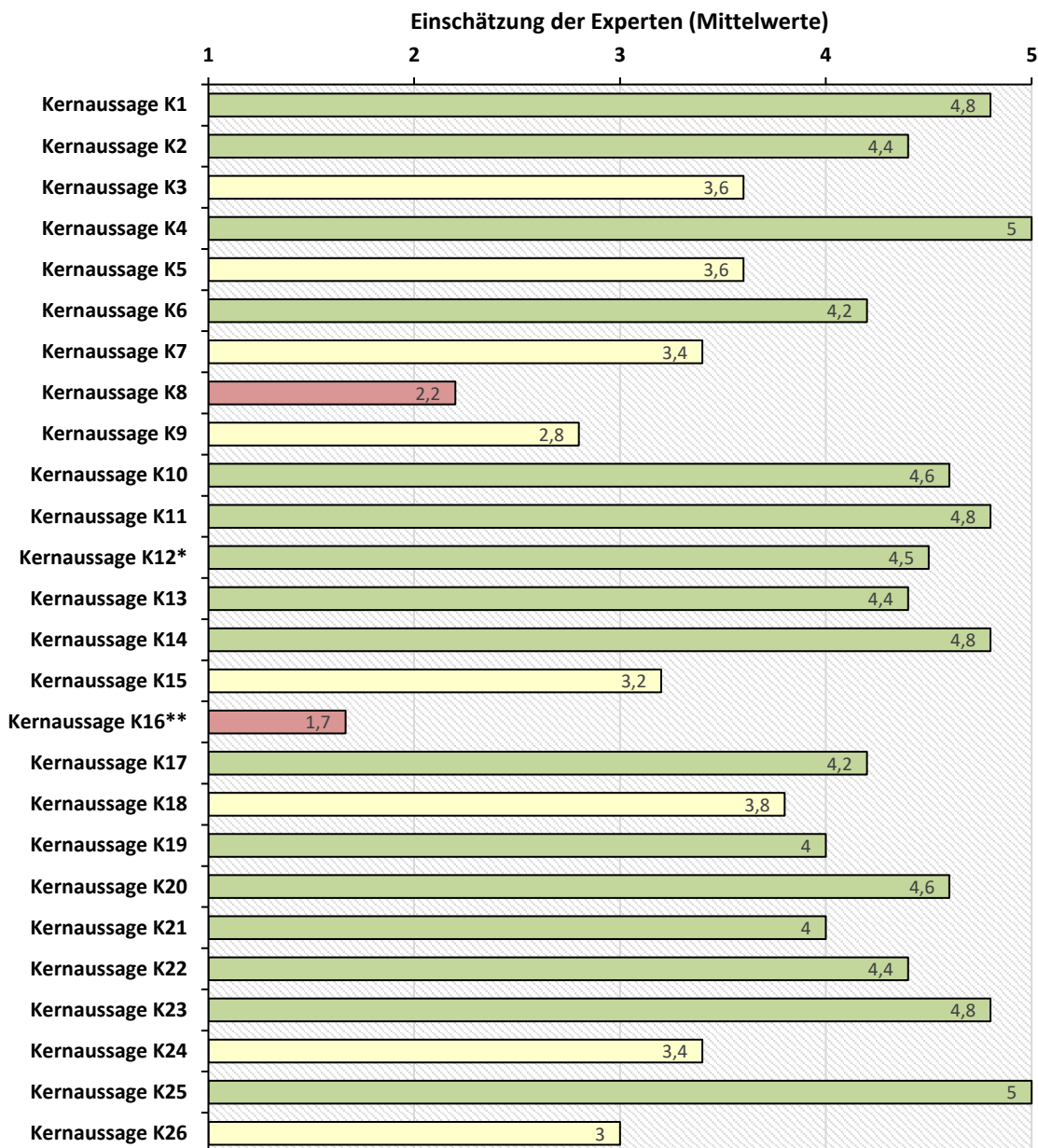


Abbildung 45: Einschätzung der Kernaussagen (1 = „stimme nicht zu“ bis 5 = „stimme zu“; Mittelwerte) durch die Experten (n = 5 bzw. *n = 4; **n = 3), eigene Darstellung.

Abbildung 45 zeigt die Mittelwerte zur Einschätzung der Kernaussagen auf, wobei diese in Abhängigkeit des Wertes farblich hinterlegt dargestellt werden (1 bis $\leq 2,5$ = rot; $> 2,5$ bis < 4 = gelb und ≥ 4 = grün). Bei 16 von 26 Kernaussagen stimmen die Befragten im Mittel mindestens überwiegend zu, bei 8 Kernaussagen sind sich die Befragten eher unsicher und bei zwei Kernaussagen (K8 und K16) stimmen die Befragten den Aussagen überwiegend nicht zu. Bei den Fragen zu den Kernaussagen K12 und K16 konnte überdies jeweils nur eine geringere Anzahl ausgewertet werden, da jeweils mindestens ein Experte die Ausweichoption „keine Angabe“ nutzte.

Validierung der Ergebnisse zur potenziellen Verfügbarkeit und Bewertung der Anlagenverfügbarkeit

Dieser Teil der Befragung umfasst insgesamt vier Fragestellungen (Fragen Nr. 6 bis 9). Hierbei umfasst Frage 6 eine Einschätzung der potenziellen Ausfalldauer eines zukünftigen operativen Betriebs einer Oberleitungsanlage. Die Befragten mussten in diesem Fall die Ausfalldauer anhand vorgegebener Antwortmöglichkeiten einschätzen.

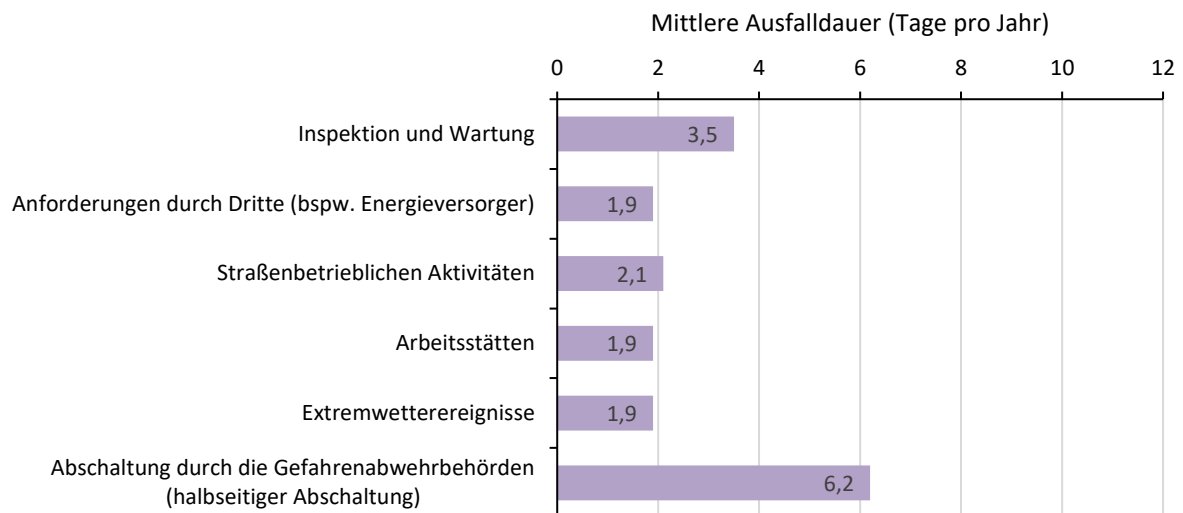


Abbildung 46: Einschätzung der potenziellen Ausfalldauer eines zukünftigen operativen Betriebs einer Oberleitungsanlage auf Grundlage der Angaben der Befragten (n = 5), eigene Darstellung.

In Abbildung 46 ist eine Auswertung über die Angaben der Befragten zu Frage 6 dargestellt. Die Berechnungen der dargestellten mittleren Ausfalldauer basieren dabei auf der Klassenmitte der Antwortmöglichkeiten (bspw. 3,5 Tage bei der Auswahl „2 bis < 5 Tage im Jahr“) und stellen zusätzlich die Mittelwerte der getätigten Antworten dar. Die Abschaltungen durch die Gefahrenabwehrbehörden zeigen in dieser Frage mit 6,2 Tagen im Jahr den größten Einfluss auf die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auf. Die Dauer der Abschaltungen für die Inspektion und Wartung wird im Mittel mit 3,5 Tagen angegeben. Berechnet man die gesamte Dauer der Abschaltungen über alle sechs aufgezeigten Ausfallursachen, so ergibt sich ein Wert von 17,5 Tagen (entspricht 420 Stunden) im Jahr. Dies entspricht einer potenziellen Anlagenverfügbarkeit von etwa 95,2 %.

Die Ergebnisse nach Abbildung 46 spiegeln sich in den Antworten der siebten Frage wider. Die befragten Experten benennen hier die Anforderungen und Einsätze der Gefahrenabwehrbehörden bzw. die Unfälle mit Auswirkungen auf die Oberleitungsanlage (n= 4) sowie den Austausch von Verschleißteilen bzw. den zeitlichen Aufwand der Problemidentifikation (n = 2) als Ursachen mit den größten Auswirkungen auf die Verfügbarkeit.

Die achte Frage dient im weiteren Verlauf, zusammen mit den eigenen Berechnungen und der Aussagen innerhalb der sechsten Frage, als Grundlage zur Bestimmung eines Wertes zur Bewertung der jährlichen Anlagenverfügbarkeit. Hier tätigten die Befragten teils sehr unterschiedliche Einschätzungen, welche eine Spannweite von 90 % bis 99 % umfassen. Im Mittel wird die mindestens zu erreichende Anlagenverfügbarkeit im dauerhaften Betrieb (24/7-Betrieb) mit 96,0 % angegeben.

Um eine Steigerung der Anlagenverfügbarkeit zu erreichen, wurde über die neunte Frage aufgenommen, welche Maßnahmen dazu zukünftig beitragen können. Hier gaben die Experten folgende Antworten:

- Gemeinsame Durchführung (Bündelung) der Arbeiten zur Inspektion und Wartung der Oberleitungsanlage, der straßenbetrieblichen Aktivitäten und der Einrichtung von Arbeitsstätten (n = 1)
- Erhöhung des Intervalls für die regelmäßige Durchführung der Inspektion und Wartung der Oberleitungsanlage (n = 1)
- Festlegung geeigneter Segmentlängen (n = 1)
- Ausbildung der Operatoren in der Verkehrsmanagementzentrale zu elektrotechnisch unterwiesenen Personen mit Schaltberechtigung, auch zur Erhöhung der Personalressourcen (n = 2)
- Ausweitung des Feldversuchs zur Erweiterung des Wissenstands (n = 2)
- Standardisierung der Vorgehensweisen bei ungeplanten Abschaltungen (n = 1)
- Vorhaltung von Ersatzteilen (n = 1)
- Vereinbarung von Wartungsverträgen mit festgelegten Reaktions- und Fehlerbehebungszeiten (n = 1)

Auffällig ist, dass sich die genannten Maßnahmen größtenteils auf die Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten, die Personalverfügbarkeit und die Segmentlängen beziehen und entsprechend an die analysierten Querschnittsthemen adressiert sind. Insbesondere die Vorhaltung von Ersatzteilen, die Anforderungen an die Wartungsverträge sowie die Thematisierung der Intervalle für die Inspektion und Wartung verdeutlichen, dass die Experten großes Potenzial bzgl. der Optimierung der Prozesse der Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten sehen.

Erfassung der Haltung gegenüber der Oberleitungstechnologie

Alle befragten Experten haben angegeben, dass diese sich aktiv für die eHighway-Teststrecke engagieren würden bzw. sich bereits aktiv engagieren. Weiterhin sind alle befragten Experten für einen weiteren Ausbau des eHighway-Systems.

Zusätzliche Angaben der Befragten wurden innerhalb der Befragung nicht getätigt.

7.3 Validierung der Forschungsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Aussagen und Ergebnisse der Befragung im Zusammenhang mit den erlangten Erkenntnissen aus den Analysen zu den Wirkungszusammenhängen und der potenziellen Anlagenverfügbarkeit beschrieben. Dazu werden im ersten Schritt die Kernaussagen betrachtet und im zweiten Schritt die Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage.

7.3.1 Validierung der Kernaussagen

Wie bereits in Abschnitt 7.2.4 aufgezeigt, wurden 16 der 26 Kernaussagen von den Befragten zustimmend bewertet. Bei acht Kernaussagen lässt sich keine eindeutige Einschätzung aufzeigen und bei zwei Kernaussagen stimmen die Experten den Aussagen nicht zu. Nachfolgend werden zunächst die beiden kritischen Kernaussagen und anschließend die acht nicht eindeutigen Kernaussagen diskutiert:

K8: Die Auswirkungen von geplanten und ungeplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage unterscheiden sich nicht signifikant.

Die Kernaussage K8 wurde als Ergebnis der Analysen zum Einfluss geplanter Ausfallursachen in Abschnitt 6.3.3 aufgestellt. In diesen Analysen wurden die geplanten und ungeplanten Ausfallursachen gegenübergestellt, wobei die Ausfalldauer im Gesamten sowie die mittlere Ausfalldauer vergleichend untersucht wurden. Dabei wurden die unerwarteten Ausfallursachen aus der Betrachtung ausgeschlossen. Die Analysen zeigen, dass zwar ein (teils deutlicher) Unterschied zwischen der mittleren Ausfalldauer der geplanten und ungeplanten Ausfallursachen vorhanden ist, jedoch dieser statistisch nicht nachweislich als ein signifikanter Zusammenhang beschrieben werden kann. Es zeigt sich im Weiteren, dass deutliche Unterschiede zwischen der Verteilung der Ausfallzeiten in Bezug auf die Betriebszeit der Oberleitungsanlage vorhanden sind (Kernaussage K9). Die Einschätzung der Experten ist somit nachvollziehbar und begründbar und wird entsprechend bei der Aufstellung der Empfehlungen berücksichtigt.

K16: Die Qualität der Energieversorgung (Übertragungsleistung von OL-Anlage zu O-Lkw) wird durch hohe Lufttemperaturen reduziert.

Die Kernaussage K16 wurde nur durch drei Experten eingeschätzt. Diese Kernaussage wurde als Ergebnis der Analysen zum Einfluss der Witterung in Abschnitt 6.3.5 aufgestellt. In diesen Analysen wurden die Übertragungsleistungen ermittelt und die Werte in Bezug auf die vorhandene Lufttemperatur bewertet. Die Rückhaltung bei der Einschätzung der Kernaussage zeigt bereits, dass eine Einschätzung aufgrund dem nach außen kaum ersichtlichen Sachverhalt schwierig ist. Die untersuchten Strombezugsfahrten zeigen jedoch einen deutlichen Zusammenhang auf, gleichwohl festzuhalten ist, dass die Werte der mittleren Übertragungsleistung zwischen den normalen und den warmen Temperaturbedingungen nur in einem geringen Umfang (von 1,09 kWh/h bis 1,02 kWh/h) variieren und Extremtemperaturen (Frost und Hitze) nur vereinzelt aufgetreten sind. Ohne einen direkten Bezug zur Auswertung ist die Einschätzung dieser Kernaussage eher schwierig und die Aussage der Experten nachvollziehbar und wird entsprechend bei der Aufstellung der Empfehlungen berücksichtigt.

K3: Im Regelbetrieb liegt ein großer Anteil der Ausfallzeiten innerhalb der Hauptverkehrszeit.

Die Hauptverkehrszeit umfasst jenen Zeitraum der Tageszeit, in welchem eine verhältnismäßig hohe Anzahl an Schwerverkehren (potenzielle Nutzer) den betrachteten Streckenabschnitt befahren. Die Analysen zur Hauptverkehrszeit zeigen, dass etwa 34 % aller Ausfallzeiten innerhalb dieser Verkehrszeit liegen, insbesondere bedingt durch die unfallbedingten Ausfallursachen und geplanten Abschaltungen. Dabei ist festzuhalten, dass die Hauptverkehrszeit nur einen zeitlichen Anteil von sieben Stunden umfasst, die Nebenverkehrszeit hingegen zehn Stunden und die Schwachverkehrszeit ebenfalls sieben Stunden. Etwa 41 % der Ausfallzeiten entfallen auf die Nebenverkehrszeit sowie die restlichen 25 % auf die Schwachverkehrszeit. Bei den Antworten der Experten zeigt sich, dass drei Experten grundsätzlich der Kernaussage zustimmen, ein Experte weder zustimmt noch nicht zustimmt und lediglich ein Experte überwiegend nicht zustimmt. Zwar weist die Hauptverkehrszeit somit rechnerisch den verhältnismäßig größten Anteil auf (4,86 % pro Stunde in der HVZ ggb. 4,10 % pro Stunde in der NVZ und 3,57 % pro Stunde in der SVZ),

dieser ist jedoch ohne Kenntnis der tatsächlichen Betriebszeiten der Oberleitungsanlage nur bedingt abzuschätzen.

K5: Unerwartete Ausfallursachen treten selten auf, führen jedoch zu erheblichen Auswirkungen im operativen Betrieb.

Der Kernaussage K5 wurde von drei Experten grundsätzlich zugestimmt, ein Experte stimmte weder zu noch nicht zu und ein Experte stimmte hingegen überwiegend nicht zu. Die Analysen zeigen, dass die unerwarteten Ausfallursachen zu den längsten Abschaltungen im operativen Betrieb der Oberleitungsanlage führten. Jedoch ist festzuhalten, dass dies zukünftig nicht zwangsweise der Fall sein muss. Ferner dient die Durchführung eines Testbetriebs auch dazu, unerwartete Ausfallursachen zu identifizieren. Insofern muss der Inhalt der Kernaussage relativiert werden.

K7: Geplante Ausfallursachen treten seltener auf als ungeplante Ausfallursachen.

Drei der fünf Experten stimmten der Kernaussage K7 überwiegend zu. Die restlichen zwei Experten stimmten weder zu noch nicht zu bzw. stimmten überwiegend nicht zu. Bei den Analysen zu den geplanten und ungeplanten Ausfallursachen in Abschnitt 6.3.3 wurden die unerwarteten Ausfallursachen sowie die Abschaltungen in der Einführungsphase nicht in die Betrachtung eingeschlossen, so dass letztlich 112 Abschaltungen (von 151 Abschaltungen) untersucht wurden. Hierbei zeigt sich, dass 53 von 101 Abschaltungen (52,5 %) ungeplant aufgetreten sind. Rechnerisch traten die ungeplanten Ausfallursachen somit seltener auf. Dies wird bei einem zukünftigen Betrieb der Oberleitungsanlage ebenfalls erwartet. Die Einschätzungen der Experten sind aufgrund des geringen Unterschieds zwischen dem Anteil der geplanten und ungeplanten Abschaltungen in Bezug auf die gesamte Anzahl an Abschaltungen jedoch nachvollziehbar und werden entsprechend bei der Aufstellung der Empfehlungen berücksichtigt.

K9: Geplante Ausfallursachen finden hauptsächlich während der Hauptverkehrszeit (09:00 bis 16:00 Uhr) im Betrieb einer Oberleitungsanlage statt.

Bei der Kernaussage K9 zeigen die Einschätzungen der Experten ein differenziertes Bild. Während ein Experte der Aussage zustimmte, stimmten drei Experten dieser überwiegend nicht zu. Der fünfte Experte zeigte sich unentschlossen. In den durchgeführten Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass bei Abschaltungen aufgrund geplanter Ausfallursachen diese maßgeblich in der Hauptverkehrszeit liegen (über 40 %). Demgegenüber liegen die ungeplanten Ausfallursachen nur mit 25 % in dieser Verkehrszeit. Die Auswirkungen der Ausfallzeiten aufgrund geplanter Ausfallursachen sind somit kritischer zu betrachten, weshalb die Umsetzungsmöglichkeit der geplanten Abschaltungen außerhalb der Hauptverkehrszeit zu prüfen ist.

K15: Hohe Windstärken können zu einer Beschädigung der Oberleitungsanlage führen und die Verfügbarkeit beeinträchtigen.

Die Antworten der Experten reichen von zustimmend bis überwiegend nicht zustimmend. Vereinzelt sind Abschaltungen im operativen Betrieb der Oberleitungsanlage aufgrund von hohen Windstärken aufgetreten. Im Jahr 2019 führte sogar ein Sturmereignis zur Beschädigung und somit zu einem längeren Ausfall der Oberleitungsanlage. Der Zusammenhang zwischen den Witterungsereignissen mit hohen Windstärken und der Verfügbarkeit sind somit nicht nur

theoretisch, sondern auch im Probebetrieb aufgetreten, weshalb die formulierte Kernaussage einen korrekten Sachverhalt darlegt. Durch geeignete und vorab definierte Maßnahmen lassen sich mögliche Schäden an der Oberleitungsanlage schneller beheben und die Ausfallzeiten reduzieren, wobei eine Beschädigung in jedem Fall zu einer (bestenfalls auch nur kurzzeitigen) Beeinträchtigung der Verfügbarkeit führt.

K18: Um die Ausfallzeiten nach einer Beschädigung zu verkürzen, sind Strategien für die Wiedereinschaltung einer Oberleitungsanlage zu entwickeln.

Strategien helfen, um in einer aufgetretenen Störfallsituation schnell und strukturiert reagieren zu können. Nicht für alle Abschaltungen ist eine Strategie erforderlich. So sind bspw. insbesondere die geplanten Abschaltungen jene, bei welchen keine Strategie notwendig ist, da hier keine Reaktion auf eine plötzliche Störfallsituation stattfindet, sondern die Wiedereinschaltung bereits im Vorfeld Teil des Umsetzungskonzepts und somit ebenfalls geplant ist. Bei der Formulierung der Empfehlungen wird dies entsprechend berücksichtigt.

K24: Eine hohe Anlagenverfügbarkeit setzt eine richtungsbezogene Abschaltung der Oberleitungsanlage voraus.

Eine hohe Anlagenverfügbarkeit kann dann erreicht werden, wenn hohe Ausfallzeiten vermieden oder die Häufigkeiten reduziert werden. Die Steigerung der Verfügbarkeit durch die Umsetzung eines halbseitigen Betriebs bei den Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden wurde in Abschnitt 7.1 untersucht und zeigt für das Best-Case-Szenario eine Verbesserung der Anlagenverfügbarkeit von 98,1 % auf 98,6 % auf. Somit bietet die Möglichkeit der richtungsbezogenen Abschaltung der Oberleitungsanlage eine messbare Verbesserung, dennoch ist es vor allem von größter Bedeutung, dass die grundlegenden Werte der Ausfalldauer der jeweiligen Ursachen im Best-Case-Szenario erreicht werden. Bei der Formulierung der Empfehlungen wird dieser Zusammenhang noch einmal deutlich dargestellt.

K26: Die klimatischen Veränderungen können sich zukünftig signifikant auf die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auswirken.

Die Abschätzung der klimatischen Veränderungen und die damit einhergehenden Auswirkungen auf den Betrieb einer Oberleitungsanlage ist schwierig. Dies zeigt sich auch in den Antworten der Experten, welche zwischen neutral und zustimmend liegen. In jedem Fall konnte ein Zusammenhang zwischen den Witterungsverhältnissen im Feldversuch und der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage aufgezeigt werden. Inwieweit sich die klimatischen Veränderungen auswirken werden, wird in den Empfehlungen abschließend diskutiert.

7.3.2 Validierung der potenziellen Verfügbarkeit

In Tabelle 36 (Seite 133) wurden die Ausfallzeiten zur Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage auf Grundlage der Daten aus dem Feldversuch ermittelt. Abbildung 46 (Seite 143) zeigt die Einschätzung der mittleren Ausfalldauern durch die Experten auf. Vergleicht man die jeweiligen Angaben der Experten mit dem Wertebereich der potenziellen Verfügbarkeit der Szenarien, so ergibt sich ein Lagebild nach Abbildung 47.

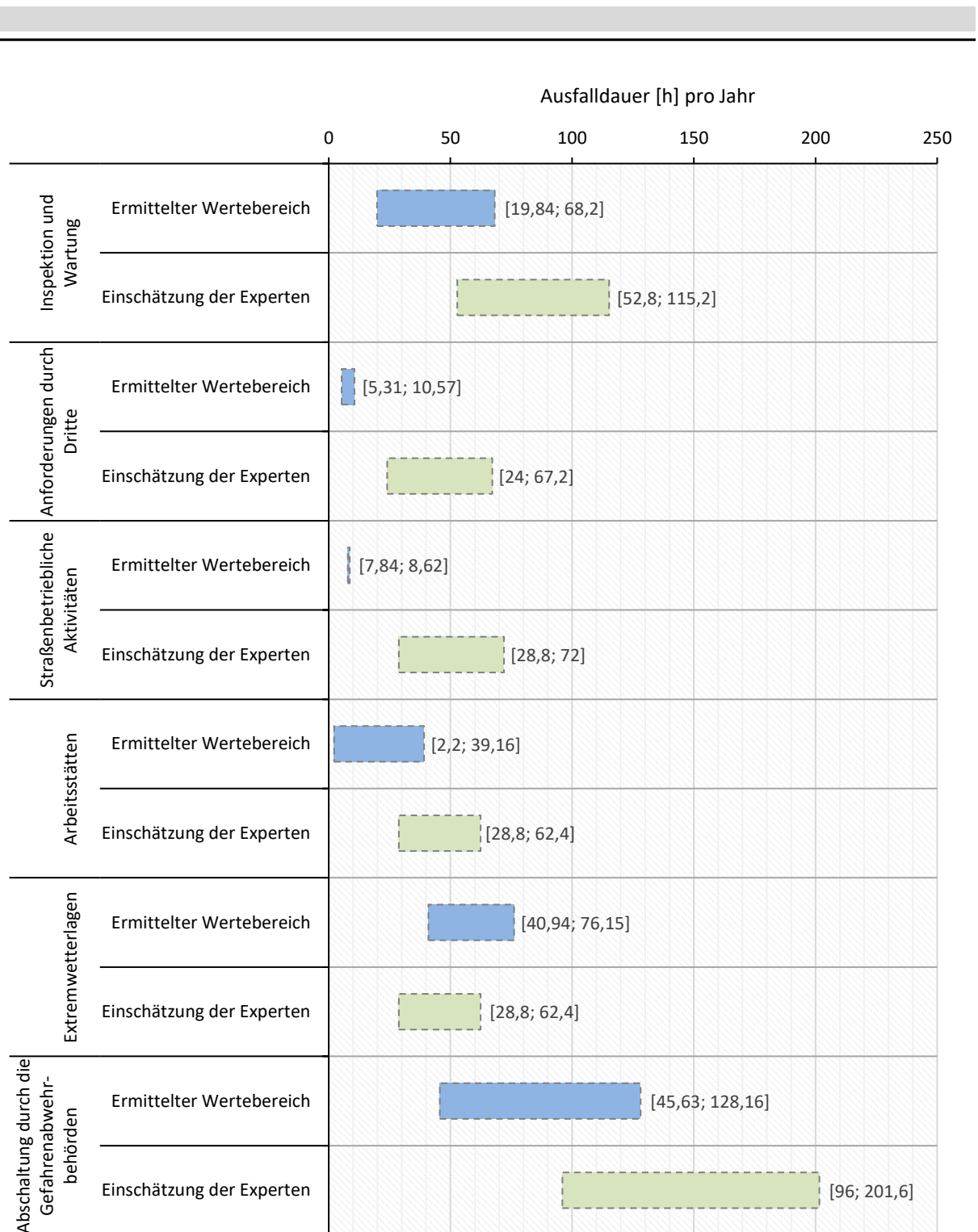


Abbildung 47: Vergleich der angegebenen Werte zur Ausfalldauer (Mittelwerte) der Ausfallursachen durch die Experten (Einschätzung) zu den ermittelten Werten innerhalb der Szenarien (eigene Darstellung).

Bei den beiden Ausfallursachen bzgl. der Anforderungen durch Dritte und den straßenbetrieblichen Aktivitäten liegen die angegebenen Werte der Experten deutlich über den ermittelten Wertebereichen. Bei allen anderen Ausfallursachen liegen die Einschätzungen der Experten zumindest teilweise innerhalb des ermittelten Wertebereichs. Außer in Bezug auf die jährliche Ausfalldauer durch die Extremwetterlagen weisen die Einschätzungen der Experten stets höhere jährliche Ausfalldauern auf. Die Berechnung des Wertebereichs bzgl. der

Einschätzung durch die Experten basiert dabei auf der Bildung des Mittelwerts über die getätigten Angaben, wobei die Mittelwerte über die jeweiligen Klassenränder bestimmt wurden.

Aufgrund der Abweichungen der Wertebereiche bei den Anforderungen durch Dritte und den straßenbetrieblichen Aktivitäten wird die szenariobasierte Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit gemäß Tabelle 36 (Seite 133) zur Validierung angepasst:

- Erhöhung der Anzahl an Abschaltungen bei den Anforderungen durch Dritte von 1 auf 3 im Jahr
- Erhöhung der Anzahl an Abschaltungen bei straßenbetrieblichen Aktivitäten von 1 auf 2 im Jahr
- Erhöhung der Anzahl an Abschaltungen aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden von 18 auf 20 im Jahr

Die korrigierten Werte sind in Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Korrigierte Werte für die szenariobasierte Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage (eigene Darstellung).

Ausfallursache	Häufigkeit [Anzahl/Jahr]	Minimalwert [h/Anzahl]	Mittelwert [h/Anzahl]	Maximalwert [h/Anzahl]
Inspektion und Wartung	2	9,92	17,85	34,10
Anforderungen durch Dritte	3	5,31	7,33	10,57
straßenbetriebliche Aktivitäten	2	7,84	8,19	8,62
Arbeitsstätten	3	1,10	6,26	19,58
Extremwetterereignisse	1	40,94	58,55	76,15
Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden	20	5,07	11,22	14,24

Die angegebenen Werte beziehen sich auf die Betrachtung der Ausfallzeit eines Fahrstreifens, wobei bei der Häufigkeit der Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden das Ereignis auch auf dem entgegengesetzten Fahrstreifen erfolgt sein kann.

Mit Hilfe der Werte aus Tabelle 37 lässt sich die Anlagenverfügbarkeit innerhalb der jeweiligen Szenarien neu bestimmen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 38 aufgeführt.

Tabelle 38: Ermittlung der Szenarien der Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage über die Ausfallzeit der Ausfallursachen über die korrigierten Werte (Werte in Stunden, eigene Darstellung).

Ausfallursache	Best-Case-Szenario [h]	Trendszenario [h]	Worst-Case-Szenario [h]
Inspektion und Wartung	19,84	35,70	68,20
Anforderungen durch Dritte	15,93	21,99	31,71
straßenbetriebliche Aktivitäten	15,68	16,38	17,24
Arbeitsstätten	3,30	18,78	58,74
Extremwetterlagen	40,94	58,55	76,15
Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden	101,40 (50,70)	224,40 (112,20)	284,8 (142,40)
Summe der Ausfallzeit	197,09 (146,39)	375,80 (263,60)	536,94 (394,44)
Anlagenverfügbarkeit	97,8 % (98,3 %)	95,7 % (97,0 %)	93,9 % (95,5 %)

Berechnung der Ausfallzeiten in Stunden basierend auf den korrigierten Werten nach Tabelle 37. Die angegebenen Werte innerhalb der Klammern beziehen sich auf einen halbseitigen Betrieb.

Die angepasste Ermittlung der Anlagenverfügbarkeit führt zu einem Ergebnisraum von 93,9 % (Worst-Case-Szenario) bis zu 98,3 % (Best-Case-Szenario), so dass im Gesamten nur eine Schwankung von 4,4 % besteht. Die größten Anteile sind auf die Abschaltungen aufgrund der Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden, der Extremwetterlagen und aufgrund von Inspektion und Wartung zurückzuführen. Im Worst-Case-Szenario ist auch der Anteil durch die Abschaltungen aufgrund von Arbeitsstätten maßgebend.

Die hier vorgestellten Werte gelten für einen zukünftigen, weitestgehend ungestörten Anlagenbetrieb. So sind bspw. bei der Durchführung größerer Arbeiten im Streckenbereich, welche mehrere Wochen beanspruchen können, oder beim Auftreten unerwarteter Ausfallursachen sowie bei einer umfangreichen Beschädigung der Oberleitungsanlage durch eine orkanartige Gewitterlage erhebliche Auswirkungen auf die Anlagenverfügbarkeit zu erwarten. Die Anlagenverfügbarkeit ist in solchen Jahren geringer.

Die von den Experten angegebene Anlagenverfügbarkeit, welche mindestens erreicht werden soll, beträgt 90 % bzw. 99 % und liegt demnach außerhalb der ermittelten Werte bei den Szenarien. Bei Ermittlung der Anlagenverfügbarkeit über die Angaben der Experten zu den Ausfallzeiten der einzelnen Ausfallursachen im Fragebogen (vgl. bspw. Abbildung 47) ergibt sich eine gemittelte potenzielle Anlagenverfügbarkeit von etwa 93,2 %. Die Angaben der Experten sind somit zum einen sehr ambitioniert und zum anderen sehr wohlwollend ausgewählt.

Unter Berücksichtigung der Wirkungszusammenhänge nach Kapitel 6 und der erlangten Erkenntnisse bei Aufstellung und Validierung der Kernaussagen sowie der Berechnung der potenziellen Verfügbarkeit lassen sich folgende Werte zur Bewertung der Anlagenverfügbarkeit einer Oberleitungsanlage (A_{OL}) sowie die jeweilige Bewertungsstufe (Level of Service, LOS) ableiten:

- $A_{OL} \geq 99\%$ → ausgezeichnete Anlagenverfügbarkeit (LOS A)
- $A_{OL} \geq 98\%$ → sehr gute Anlagenverfügbarkeit (LOS B)
- $A_{OL} \geq 96\%$ → gute Anlagenverfügbarkeit (LOS C)
- $A_{OL} \geq 94\%$ → schlechte Anlagenverfügbarkeit (LOS D)
- $A_{OL} \geq 92\%$ → grenzwertige Anlagenverfügbarkeit (LOS E)
- $A_{OL} < 92\%$ → ungenügende Anlagenverfügbarkeit (LOS F)

Es ist zu beachten, dass ein Pilotbetrieb, wie der ELISA-Feldversuch, nicht anhand dieser Stufen bewertet werden kann, da eine Vielzahl an Ereignissen bzw. Ausfallursachen aufgetreten sind, welche in einem regulären Betrieb bei einem Ausbau des Systems nicht weiter zu erwarten sind. Dennoch wurde im Jahr 2022 eine Anlagenverfügbarkeit von 95,4 % in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) erreicht (LOS D, vgl. Tabelle 3 auf Seite 60). Generell gilt, dass ein LOS C mindestens angestrebt werden soll. Dies entspricht auch dem Trendszenario nach Tabelle 38.

7.4 Zwischenfazit

In Kapitel 7 wurde die Bewertung der potenziellen Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage in einem zukünftigen Betrieb vorgenommen, indem zunächst basierend auf den Wirkungszusammenhängen Szenarien durch Variation der Einflüsse auf die Verfügbarkeit gebildet und potenzielle Verfügbarkeitswerte berechnet wurden. Anschließend wurden die Werte auf Plausibilität durch eine Befragung von Experten geprüft und somit die Ergebnisse validiert und gegebenenfalls angepasst. Auf Grundlage der angepassten Werte konnte eine korrigierte Betrachtung der potenziellen Anlagenverfügbarkeit durchgeführt werden und eine zukünftige Methode zur Bewertung der Anlagenverfügbarkeit abgeleitet werden. Die erlangten Ergebnisse dienen im Weiteren zur Formulierung der Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb einer Oberleitungsanlage.

8 Ableitung der Empfehlungen zum Netzausbau und Betrieb

8.1 Zusammenfassende Ergebnisdarstellung

Die relevanten Ergebnisse zur Ableitung der Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb einer Oberleitungsanlage wurden im dritten Schwerpunktbereich (Analysen zur Verfügbarkeit und der Ausfallursachen einer Oberleitungsanlage) dieser Arbeit ausgearbeitet (vgl. Abschnitt 1.3) und umfassen die Analyse der Verfügbarkeit im Feldversuch und der aufgetretenen Ausfallursachen, die Erfassung der Wirkungszusammenhänge und die Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit (vgl. Kapitel 5 bis 7). Die wichtigsten Ergebnisse werden an dieser Stelle vorgestellt.

Im ersten Schritt wurde eine **Methode zur Erfassung und Bewertung der Verfügbarkeit** der Oberleitungsanlage, das sogenannte Anlagenbetriebstagebuch, entwickelt und vorgestellt (vgl. Abschnitte 5.2 bis 5.4). Dieses bildet die Möglichkeit einer umfassenden Darstellung des operativen Betriebs der Oberleitungsanlage und der strukturierten Erfassung der Ausfallursachen. Durch das Anlagenbetriebstagebuch können die Ausfallzeiten über zwei Wege bestimmt werden, zum einen über die Betriebszeiten der Oberleitungsanlage und zum anderen über die Summe der Ausfallzeiten, basierend auf den erfassten Ereignissen. Auf diese Weise findet bereits innerhalb der Dokumentation des Anlagenbetriebs eine Plausibilitätsprüfung der erfassten Daten statt. Die Anwendung der Methode auf den Feldversuch ELISA im Betrachtungszeitraum dieser Arbeit zeigt bereits die erreichten Verfügbarkeitswerte (vgl. Tabelle 3 auf Seite 60), aber auch die Ursachen für die Abschaltung der Anlage auf (vgl. Tabelle 4 auf Seite 63). Es konnte gezeigt werden, dass die fünf längsten Ausfallursachen etwa 62 % in Fahrtrichtung Nord (Frankfurt) und etwa 72 % in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) der gesamten Ausfallzeit im Betrachtungszeitraum umfassten (vgl. Tabelle 5 auf Seite 65). Eine umfangreiche Analyse der Ausfallursachen schloss sich in dem nachfolgenden Kapitel 6 an.

Im zweiten Schritt der Arbeit erfolgte eine **Kategorisierung der Ausfallursachen**. Dazu wurden zunächst alle möglichen Ausfallursachen identifiziert und strukturiert dargestellt, wobei auch die Prozesse zur Problemlösung und zur Wiedereinschaltung aufgezeigt wurden (vgl. Abbildung 24 auf Seite 67). Nachfolgend wurden die jeweiligen Ursachen für eine Abschaltung beschrieben und anhand vergleichbarer Merkmale (Planbarkeit und Wirkungsfeld) eine Kategorisierung der Ausfallursachen in sechs Kategorien vorgenommen. Auf Basis der kategorisierten Ausfallursachen konnten allgemeine Aussagen innerhalb der Analysen zu den Wirkungszusammenhängen (vgl. Abschnitt 6.3) und in Bezug auf die Verfügbarkeit (vgl. Abschnitt 6.1) abgeleitet werden.

In Kapitel 6 wurde im dritten Schritt eine umfassende Analyse der Wirkungszusammenhänge durchgeführt. Hierzu wurde zunächst basierend auf den Werten aus dem Feldversuch ELISA eine Risikobewertung der jeweiligen Ausfallursachen und der kategorisierten Ausfallursachen vorgenommen, indem die Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Ursache und die Auswirkungen in Form der mittleren Ausfalldauer betrachtet wurden. Anhand dieser Analyse konnten die sogenannten **limitierenden Ausfallursachen** identifiziert werden, jene, welche einen hohen Einfluss auf die Verfügbarkeit im Feldversuch aufweisen (vgl. Abschnitt 6.1). Neben dem Einfluss auf die Verfügbarkeit ist jedoch auch der Zeitraum der Abschaltung entscheidend, da sich über den Zeitraum auch die Auswirkungen über die Anzahl an betroffenen Nutzern der Oberleitungsanlage beschreiben lässt. Aus diesem Grund wurden neben den limitierenden Ausfallursachen auch die **kritischen Betriebszeiten** auf Grundlage des stundenscharfen

Schwerverkehrsaufkommen entlang der ELISA-Teststrecke ermittelt (vgl. Abschnitt 6.2). Die Betriebszeiten der Oberleitungsanlage konnten basierend auf der Analyse in Hauptverkehrszeit, Nebenverkehrszeit und Schwachverkehrszeit differenziert werden. In Abschnitt 6.3 wurde eine umfassende **Analyse der Wirkungszusammenhänge** durchgeführt, indem folgende Einflüsse auf die Verfügbarkeit untersucht wurden:

- der Einfluss der Betriebsstrategie,
- der Einfluss der unerwarteten Ausfallursachen,
- der Einfluss der geplanten Ausfallursachen,
- der Einfluss der Gefahrenabwehrbehörden,
- der Einfluss der Witterung,
- der Einfluss der Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten,
- der Einfluss der Personalverfügbarkeit und
- der Einfluss der Segmentlänge.

Alle Ergebnisse und Erkenntnisse zu den Wirkungszusammenhängen wurden in insgesamt 24 Kernaussagen zusammengefasst und bilden im weiteren Verlauf die Grundlage zur Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit.

Die Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit und die Validierung der Ergebnisse bilden den Schwerpunkt in Kapitel 7. Hierzu wurde basierend auf den Kernaussagen der Wirkungszusammenhänge eine **szenariobasierte Analyse der zukünftigen potenziellen Verfügbarkeit** einer Oberleitungsanlage durchgeführt. Die Ergebnisse münden nicht nur in einem Wert zur Anlagenverfügbarkeit, sondern werden auch in zwei zusätzlichen Kernaussagen beschrieben, so dass insgesamt 26 Kernaussagen aus den Analysen für die Ableitung der Empfehlungen vorliegen. Durch die Durchführung von **Expertenbefragungen** wird eine Validierung der Ergebnisse, in diesem Fall die Kernaussagen und die Werte der szenariobasierten Analyse, erreicht. Auf Grundlage der, unter Berücksichtigung der Rückmeldungen der Experten, angepassten Werte wurde eine korrigierte szenariobasierte Analyse der zukünftigen potenziellen Verfügbarkeit durchgeführt und abschließend eine Bewertungsmethode für die Anlagenverfügbarkeit einer Oberleitungsanlagen in Form von **Bewertungsstufen** aufgestellt.

Auf Basis der gesammelten Ergebnisse und Erkenntnisse werden im Weiteren die Forschungsfragen, welche im Abschnitt 4.1.2 aufgestellt wurden, beantwortet, die Ergebnisse abschließend diskutiert und die Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb einer Oberleitungsanlage ausgesprochen.

8.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit wurden in Abschnitt 4.1.2 entwickelt und bilden den grundsätzlichen Ansatz des Forschungsdesigns inkl. der Untersuchungsschritte (vgl. Abschnitt 4.2). In diesem Abschnitt werden die jeweiligen Forschungsfragen noch einmal wiederholt aufgeführt und umfassend beantwortet.

1. Forschungsfrage: Welche Faktoren limitieren die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen?

Die Faktoren, die sogenannten Ausfallursachen, welche die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen limitieren, sind vielseitig und umfassen neben kleineren

Ereignissen, wie bspw. einer Abschaltung für die Anbringung von Kameras im elektrifizierten Streckenbereich, auch größere Ereignisse, wie bspw. Verkehrsunfälle. Auf Basis der erfassten Ausfallursachen konnten mit Hilfe einer Risikomatrix (Gegenüberstellung der Häufigkeit des Auftretens und der Auswirkung in Form einer mittleren Ausfalldauer) die limitierenden Ausfallursachen ermittelt werden. Im Kontext dieser Arbeit ist eine limitierende Ausfallursache als solche zu verstehen, welche einen maßgeblichen Einfluss auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage aufweist, indem diese entweder zu einem längeren Ausfallzeitraum oder zu häufigen Abschaltungen führt.

Mit Bezug zum Feldversuch ELISA konnten dabei folgende Ausfallursachen als limitierende Ausfallursachen benannt werden, welche dabei insgesamt einen Anteil von 87,2 % an der gesamten Ausfallzeit der Oberleitungsanlage im Betrachtungszeitraum ausmachten:

- Abschaltungen aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden
- Abschaltungen ohne erkennbaren Grund (in der Einführungsphase)
- Verspätetes Einschalten oder verfrühtes Ausschalten (in der Einführungsphase)
- Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage
- Inspektion und Wartung
- Abschaltungen aufgrund von Feiertragen (in der Einführungsphase)
- Defekte Isolatoren – Störung an der Oberleitungsanlage
- Unfallbedingte Abschaltungen der Anlage
- Übergabe der Anlage an die Autobahn GmbH
- Defekte Isolatoren – Austausch der Isolatoren

Diese zehn (von insgesamt 32) Ausfallursachen (vgl. Tabelle 4 auf Seite 63) wurden entweder basierend auf der Häufigkeit des Auftretens oder aufgrund der zeitlichen Auswirkungen als limitierend eingestuft. Dabei ist zu beachten, dass besonders jene Ausfallursachen, welche in der Einführungsphase aufgetreten sind, bei einem dauerhaften Betrieb nicht weiter relevant sind, unerwartete Ausfallursachen nicht erneut mit einer solchen Auswirkung auftreten werden und die Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Oberleitungsanlage nur situationsbezogen aufgetreten sind.

Betrachtet man die Wirkungszusammenhänge, lassen sich die relevanten Einflussfaktoren, welche die Verfügbarkeit einer zukünftigen Oberleitungsanlage limitieren werden, auf folgende reduzieren:

- Inspektion und Wartung
- Anforderungen durch Dritte
- straßenbetriebliche Aktivitäten
- Arbeitsstätten
- Extremwetterereignisse
- Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden

Um die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage zu ermitteln, kann eine Abschätzung entsprechend über diese Faktoren durchgeführt werden.

2. Forschungsfrage: Wie lassen sich diese Faktoren beeinflussen, um eine höhere Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage zu erreichen?

Die Grundlage zur Steigerung der Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage umschließt in erster Linie eine optimierte Planung der planbaren Einflussfaktoren, wie bspw. die regelmäßig notwendige Inspektion und Wartung, die Durchführung der straßenbetrieblichen Aktivitäten und die erforderlichen Arbeitsstätten. Sofern Abschaltungen aufgrund der Anforderungen durch Dritte erforderlich sind, ist zu prüfen, inwieweit diese zeitlich derart eingeplant und umgesetzt werden können, um ebenfalls als planbares Ereignis in den Zeiträumen der bereits genannten Ausfallursachen eingeschlossen werden zu können.

Bei den erforderlichen Abschaltungen aufgrund der Extremwetterereignissen und der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden ist meist kein größerer zeitlicher Rahmen für eine planmäßige Abschaltung möglich. Zwar können Sturmwarnungen der Grund einer geplanten Abschaltung sein, inwieweit die Abschaltung letztlich erforderlich war, lässt sich jedoch erst nach dem Sturmereignis beurteilen. Um diese kurzfristigen und externalen Ursachen bestmöglich abzufangen und um die Funktionalität der Oberleitungsanlage und die Verfügbarkeit sicherzustellen, sollten Strategien (bzw. Störfallprogramme) für den operativen Betrieb der Oberleitungsanlage entwickelt werden, welche die erforderlichen Maßnahmen und Umsetzungsschritte von der Abschaltung bis zur Wiedereinschaltung abdecken. Diese Maßnahmen und Umsetzungsschritte umfassen bspw. die Durchführung der Abschaltung, die Prüfung auf Beschädigung der Oberleitungsanlage, bspw. aufgrund eines Fahrzeugbrandes im Streckenbereich oder nach einem Sturmereignis, die gegebenenfalls erforderliche Reparatur der Anlage, die Prüfung der Funktionalität und Wiedereinschaltungsmöglichkeiten und die eigentliche Wiederinbetriebnahme. Eine nachträgliche Bewertung und Optimierung der Maßnahmen und Umsetzungsschritte (Wirkungskontrolle) ist anzustreben.

Um den Prozess der Reparatur beschädigter Komponenten zu optimieren, ist das Vorhalten der erforderlichen Unterlagen der Oberleitungsanlage und eine Aktualisierung dieser Unterlagen zwingende Voraussetzung. Die für eine Reparatur notwendigen Komponenten sollten, wenn möglich, nahe des Einsatzortes gelagert oder kurzfristig geliefert werden können. Eine Schulung der Mitarbeitenden für die Durchführung der Reparaturarbeiten bietet sich an, um diesen Prozess schnellstmöglich abschließen zu können. Es ist zu beachten, dass Beschädigungen an der Oberleitungsanlage auch in der Schwachverkehrszeit und somit in den Nachtstunden auftreten können. Um die Kosten und den Aufwand bei einer Reparatur zu diesen Tageszeiten zu reduzieren, sollte im Vorfeld definiert werden, welche Reparaturen durch ein geringes Personal und relativ einfach und schnell durchgeführt werden können (bspw. der Austausch von Sicherungen im Unterwerk) und welche Reparaturen umfangreiche Tätigkeiten und gegebenenfalls sogar eine Fahrstreifensperrung benötigen (bspw. Reparatur des Fahrdrachts).

Auch der Prozess der Wiedereinschaltung trägt zur Erreichung einer hohen Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage bei. Im Feldversuch ELISA sind nur wenige Personen befugt, die Wiedereinschaltung vornehmen zu können, hingegen die Abschaltungen auch durch die Operatoren in der Verkehrszentrale durchgeführt werden. Durch eine Erhöhung des Personenkreises, bspw. durch die Ausweitung auf die Operatoren, wird der Prozess der Wiedereinschaltung beschleunigt. Hierzu bedarf es regelmäßigen Schulungen des Personals, in welchen auch die benannten Strategien behandelt werden sollten.

Ein weiterer Faktor zur Erhöhung der Verfügbarkeit stellt die Möglichkeit der fahrstreifenbezogenen bzw. richtungsbezogenen Abschaltung der Oberleitungsanlage (halbseitiger Betrieb) bei einem Störfallereignis dar. Im Feldversuch ELISA wurde die

Möglichkeit des halbseitigen Betriebs im Jahr 2020 nachträglich implementiert und bei planbaren Ausfallursachen mehrfach eingesetzt. Eine Ausweitung auch auf die angeforderten Abschaltungen durch die Gefahrenabwehrbehörden trägt nachweislich zu einer Steigerung der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage bei. Gegebenenfalls sind jedoch Einrichtungen, wie bspw. Beleuchtungsmittel zu integrieren, so dass die Gefahrenabwehrbehörden vor Ort sich der Abschaltung der richtigen Fahrtrichtung vergewissern können.

Einen weiteren Einfluss auf die Verfügbarkeit weist die Segmentlänge, also die Länge eines elektrifizierten Streckenabschnitts, auf, welche im Falle einer Abschaltung betroffen ist. Je größer die Segmentlänge, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Verkehrsunfällen und die Durchführung von Arbeitsstätten und desto länger müssen die Abschaltungen sein, um die Durchführung der straßenbetrieblichen Aktivitäten und die Arbeiten für die Inspektion und Wartung zu gewährleisten. Es ist jedoch zu beachten, dass eine größere Anzahl an Segmenten auch zu höheren Kosten beim Ausbau des Systems führt, so dass im Vorfeld der Realisierung die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Störungen in Abhängigkeit der Charakteristiken des Streckenabschnitts, bspw. anhand der Verkehrsmengen und der Anzahl an Unfällen, abgeschätzt werden sollte. Ein Ausbau des Systems in einem Bereich mit einer hohen Unfallrate ist stets zu hinterfragen.

3. Forschungsfrage: Welche Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage kann zukünftig erreicht werden?

Zur Ermittlung der zukünftig erreichbaren potenziellen Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage wurde eine szenariobasierte Analyse durchgeführt. Unter Beachtung der limitierenden Einflussfaktoren und der Daten bzgl. der Abschaltungsdauer aus dem Feldversuch ELISA sowie auf Grundlage der Einschätzungen der Experten über die durchgeführte Befragung konnten Verfügbarkeitswerte abgeschätzt werden. Diese Werte decken dabei eine realistische Spannweite der mittleren Ausfalldauer ab und ermöglichen eine Abschätzung der potenziellen Verfügbarkeit in Form eines Best-Case-Szenarios, eines Trendszenarios und eines Worst-Case-Szenarios. Je nach Berücksichtigung der Möglichkeiten des halbseitigen Betriebs bei den Einsätzen der Gefahrenabwehrbehörden ergibt sich eine Anlagenverfügbarkeit von 93,9 % (Worst-Case-Szenario) bis zu 98,3 % (Best-Case-Szenario). Höhere Werte sind möglich, wenn die genannten Strategien und Maßnahmen umgesetzt werden, welche zu einer Erhöhung der Verfügbarkeit beitragen können. Die Erreichung einer Anlagenverfügbarkeit von mehr als 99 % wird als realistisch angesehen und stellt die höchste Bewertungsstufe (LOS A) der Anlagenverfügbarkeit dar. Im Allgemeinen sollte eine Anlagenverfügbarkeit A_{OL} von mindestens 96 % erreicht werden (LOS C).

8.3 Diskussion der Ergebnisse

Die in dieser Arbeit erlangten Ergebnisse und Erkenntnisse basieren auf der Datenlage des Feldversuchs ELISA. Eine Objektivierung der Ergebnisse wurde durch eine umfassende Analyse der Wirkungszusammenhänge erreicht, dennoch sind die Ausfallursachen in ihrer Häufigkeit und die Auswirkungen von den gegebenen Umständen, bspw. von der Verkehrsmenge auf der Autobahn oder den lokal unterschiedlich ausgeprägten Witterungsbedingungen, abhängig. Die durchgeführte szenariobasierte Ermittlung der Anlagenverfügbarkeit variiert entsprechend anhand der Lage einer Oberleitungsanlage, wobei von einer geringen Abweichung der Werte ausgegangen werden kann.

Als beispielhafter Vergleich können die veröffentlichten Werte aus dem Feldversuch FESH aus dem Jahr 2020 herangezogen werden. Hier wurde eine Anlagenverfügbarkeit von 96,3 % (LOS C) erreicht, die gesamte Ausfalldauer betrug 326,42 Stunden (vgl. Abbildung 48).

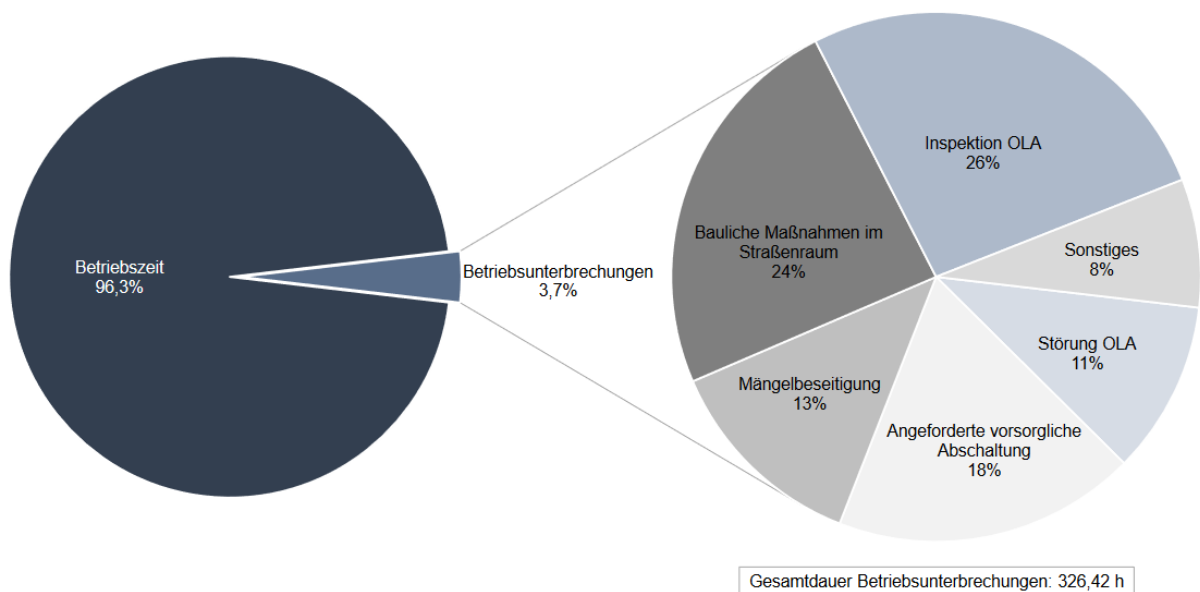


Abbildung 48: Exemplarische Darstellung des Anteils der Betriebszeit (links) sowie der Dauer der Betriebsunterbrechung nach Kategorie (rechts) für den Feldversuch FESH im Jahr 2020 (Jöhrens et al., 2022a, S. 19).

Der größte Anteil der Ausfalldauer ist auf die baulichen Maßnahmen im Straßenraum in Kombination mit der Mängelbeseitigung zurückzuführen, welche zusammen etwa 37 % der gesamten Ausfalldauer umfassen. Die kombinierte Betrachtung ist notwendig, da die Restarbeiten der Mängelbeseitigung sowie die Maßnahmen im Straßenraum in die Kategorie arbeitsstättenbedingte Ausfallursachen fallen. Die Inspektion und Wartung der Oberleitungsanlage (in Abbildung 48 als OLA bezeichnet) ist mit 26 % die zweitgrößte Ausfallursache, anschließend die Abschaltungen aufgrund der Anforderungen durch die Gefahrenabwehrbehörden (unfallbedingte Ausfallursachen) mit 18 % und die Abschaltungen aufgrund einer Störung der Oberleitungsanlage (störungsbedingte Ausfallursachen) mit 11 %. Unter die sonstigen Abschaltungen nach Abbildung 48 fallen insbesondere Abschaltungen aufgrund der Anbringung neuer Messeinrichtungen und aufgrund aufgetretener Störungen innerhalb der Betriebszentrale (8 %). Diese Ausfallursachen sind der Kategorie betriebs- und systembedingte Ausfallursachen zuzuordnen.

In Tabelle 39 sind die Werte aus dem Feldversuch FESH, dem Feldversuch ELISA und der szenariobasierten Berechnungen zur potenziellen Anlagenverfügbarkeit vergleichend aufgeführt. Für den Feldversuch FESH sind nur Werte aus dem Jahr 2020 veröffentlicht. Für die Darstellung des Feldversuchs ELISA werden die Werte aus dem Jahr 2022 verwendet, da diese weitgehend keine unerwarteten Ausfallursachen einschließen.

Tabelle 39: Vergleich der Anlagenverfügbarkeit und der Ausfallzeiten zwischen den Feldversuchen FESH und ELISA sowie mit den Szenarien der potenziellen Verfügbarkeit (eigene Darstellung).

Feldversuch (Jahr)	FESH (2020)	ELISA (2022)		Potenzielle Verfügbarkeit (Zukunft)		
Betrachtung (Fahrtrichtung, Szenario)	Beide	Süd	Nord	BCS	TS	WCS
Gesamte Ausfallzeit [h]	326,42	852,4	406,5	197,09	375,80	536,94
Anlagenverfügbarkeit [%]	96,3	90,3	95,3	97,8	95,7	93,9
Level of Service (LOS)	C	F	D	C	D	E
Störungsbedingte Ausfallursachen [%]	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Wartungsbedingte Ausfallursachen [%]	26,0	7,2	12,5	10,1	9,5	12,7
Unfallbedingte Ausfallursachen [%]	18,0	21,9	49,4	51,4	59,7	53,1
Witterungsbedingte Ausfallursachen [%]	0,0	7,6	16,0	20,8	15,6	14,2
Arbeitsstättenbedingte Ausfallursachen [%]	47,0	62,1	20,1	9,6	9,4	14,2
Betriebs- und systembedingte Ausfallursachen [%]	8,0	1,2	1,9	8,1	5,9	5,9

Werte des Feldversuchs FESH aus Jöhrens et al. (2022a); Werte des Feldversuchs ELISA nach Tabelle 3 (Seite 60) und Tabelle 4 (Seite 63); Werte der potenziellen Verfügbarkeit nach Tabelle 38 (Seite 150).

Unfallbedingte Abschaltungen unabhängig der Fahrtrichtung des Störfallereignisses.

BCS = Best-Case-Szenario, TS = Trendszenario, WCS = Worst-Case-Szenario.

Die Ermittlung der Anlagenverfügbarkeit der Feldversuche und der potenziellen Verfügbarkeit liefert einen LOS im Bereich zwischen F und C, wobei der LOS F im Feldversuch ELISA im Jahr 2022 auf die Abschaltungen aufgrund der Erweiterung der Teststrecke in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) zurückzuführen ist und sich in einem hohen Wert innerhalb der arbeitsstättenbedingten Ausfallursachen widerspiegelt. Es wird im Vergleich zwischen dem Feldversuch ELISA in nördliche Fahrtrichtung und der ermittelten potenziellen Verfügbarkeit deutlich, dass die Werte der potenziellen Verfügbarkeit diese sehr gut nachbilden. Die Abweichungen bei der Betrachtung des Feldversuchs FESH und der potenziellen Verfügbarkeit sind zum einen auf die frühe Datenlage im Feldversuch (Jahr 2020) und zum anderen auf die nur leicht variierenden lokalen Bedingungen zurückzuführen.

Die frühe Datenlage führt hierbei unweigerlich zu erhöhten Werten bei den arbeitsstättenbedingten und den wartungsbedingten Ausfallursachen. Auch die betriebs- und systembedingten Ausfallursachen im Feldversuch FESH sind aufgrund vorhandener Abschaltungen zur Anbringung neuer Messeinrichtungen erhöht. Bei den unfallbedingten Ausfallursachen zeigt sich, dass diese im Feldversuch FESH tendenziell geringer ausgeprägt sind. Dies ist auf die geringere Verkehrsstärke zurückzuführen, welche im Jahr 2015 mit einem

DTV von etwa 70.000 Kfz/Tag¹⁹ (Landesbetrieb SH, 2024) im Streckenbereich der FESH-Teststrecke deutlich geringer war als der DTV im Streckenbereich der ELISA-Teststrecke im gleichen Jahr mit etwa 131.000 Kfz/Tag (Hessen Mobil, 2024). Es ist daher anzunehmen, dass die erreichte Anlagenverfügbarkeit in den fortfolgenden Jahren mindestens einen LOS B erreicht haben könnten, sofern nicht unerwartete Ausfallursachen die Verfügbarkeit eingeschränkt haben.

Es zeigt sich bei der durchgeführten Betrachtung, dass die Herausforderungen zur Erreichung des angestrebten LOS je nach Lage der eHighway-Strecke unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Streckenabschnitte mit einer geringeren Anzahl an Fahrstreifen oder mit einer geringeren Verkehrsstärke werden tendenziell geringere Ausfallzeiten in Bezug auf die unfallbedingten, arbeitsstättenbedingten und betriebs- und systembedingten Ausfallursachen aufweisen. Umso wichtiger ist es, dass bei stärker frequentierten Streckenabschnitten Strategien im Falle einer Abschaltung aufgrund externer Ausfallursachen bereitstehen, um möglichst schnell den Regelbetrieb der Oberleitungsanlage wieder aufnehmen zu können (vgl. Abschnitt 8.2). Gegebenenfalls sind für solche Streckenabschnitte höhere LOS als Zielerreichung auszuweisen.

8.4 Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb

In den vorausgegangenen Abschnitten wurden die Ergebnisse zusammenfassend beschrieben, die Forschungsfragen beantwortet und die Ergebnisse der Arbeit diskutiert. Auf dieser Grundlage sowie insbesondere durch die Nutzung der aufgestellten Kernaussagen werden im Folgenden die Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb einer Oberleitungsanlage abgeleitet. Diese Empfehlungen sollen zukünftig dazu dienen, den Ausbau des Systems und den Betrieb selbst zu optimieren und basieren auf den wissenschaftlichen Ergebnissen dieser Arbeit.

8.4.1 Empfehlungen zum Netzausbau

E1: Empfehlung zur Bestimmung der Lage einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs

Grundsätzlich sollten nur jene Streckenabschnitte elektrifiziert werden, welche ein hohes Schwerverkehrsaufkommen aufweisen oder als Verbindungsstrecke zwischen weiteren Streckenabschnitten mit jeweils hohem Schwerverkehrsaufkommen dienen, um ein durchgängig rein elektrisches Befahren der Autobahnen zu gewährleisten (Wilke et al., 2024). Für die Auswahl des elektrifizierten Teilstücks eines solchen Streckenabschnittes sollte in Bezug auf die zukünftige und mögliche Anlagenverfügbarkeit bereits darauf geachtet werden, dass möglichst keine kritischen Punkte, wie bspw. Häufungspunkte von Verkehrsunfällen oder Verwindungsbereiche mit schlechter Erreichbarkeit der Fahrleitung sowie Brückenbauwerke, im elektrifizierten Teilstück vorhanden sind. So führen Häufungspunkte von Verkehrsunfällen zu einer erhöhten Anzahl an erforderlichen Abschaltungen durch die Gefahrenabwehrbehörden. Eine schlechte Erreichbarkeit der Fahrleitung hingegen beeinflusst die Dauer der Tätigkeiten bei der Inspektion und Wartung einer Oberleitungsanlage und kann im Weiteren zu umfangreichen Verkehrssicherungsmaßnahmen führen. Brückenbauwerke stellen besonders kritische Punkte im Verkehrsnetz dar, da diese zusätzlich regelmäßig auf den Zustand geprüft und saniert werden müssen. Dies kann sich negativ auf die arbeitsstättenbedingten Abschaltzeiten auswirken. Weiterhin ist zu beachten, dass die lokalen

¹⁹ DTV im Bereich der FESH-Teststrecke. Es liegen keine aktuelleren Werte zum DTV in diesem Streckenbereich auf der A1 vor.

klimatischen Bedingungen sich auch auf die Verfügbarkeit auswirken können. So können hohe Windstärken zu einer Beschädigung der Oberleitungsanlage führen (vgl. Kernaussage K15) und sich die Qualität der Energieversorgung bei bspw. hohen Lufttemperaturen verschlechtern (vgl. Kernaussage K16).

E2: Empfehlung zur Bestimmung der Segmentlänge einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs

Eine Oberleitungsstrecke entlang des Fahrwegs kann als ein Segment oder als mehrere Segmente realisiert werden, wobei die einzelnen Segmente im Falle eines Störfallereignisses stromlos geschaltet werden können. Für die gesamte Länge einer Oberleitungsanlage ist die geplante Lage dieser entscheidend (vgl. Empfehlung E1). Weiterhin wird jedoch die Anlagenverfügbarkeit auch durch die Festlegung der Segmentlänge beeinflusst (vgl. Kernaussage K23), da mit steigender Länge eines Segments sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Störfallereignissen erhöht, gleichzeitig bedürfen längere Segmente auch mehr Aufwand in der Inspektion und Wartung. Dies spiegelt sich letztlich in den unfallbedingten und wartungsbedingten Ausfallursachen wider. In Bezug auf die unfallbedingten Ausfallursachen ist jedoch festzuhalten, dass nicht jedes Störungsereignis zwingend zu einer Abschaltung der Oberleitungsanlage führt (vgl. Kernaussage K11) und sich der Anteil der Abschaltungen in Bezug auf die potenziellen Störungsereignisse mit Dauer des operativen Betriebs der Oberleitungsanlage reduziert (vgl. Kernaussage K12). Bei der Festlegung der Segmentlänge sind die möglichen Störungsereignisse im Vorfeld zu erfassen und das Risiko der Abschaltungen aufgrund der unterschiedlichen Ausfallursachen in Abhängigkeit der Segmentlänge abzuschätzen.

E3: Empfehlung zur Implementierung der Möglichkeit des halbseitigen Betriebs einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs

Die Anlagenverfügbarkeit wird maßgebend durch die unfallbedingten Ausfallursachen, insbesondere durch die Abschaltungen aufgrund der Gefahrenabwehrbehörden beeinflusst. Nach aktueller Handlungsanweisung werden durch die Operatoren im Falle eines Unfallereignisses oder einer angeforderten Abschaltung stets beide Fahrtrichtungen stromlos geschaltet, um die Durchführung der Rettungs- und Bergungsarbeiten gewährleisten zu können. Nachweislich würde eine alleinige Abschaltung der betroffenen Fahrtrichtung die Anlagenverfügbarkeit steigern (vgl. Kernaussage K13), wobei das Potenzial von der Häufigkeit des Auftretens der Störungsereignisse abhängt. Dabei ist zu beachten, dass der Anteil der Abschaltungen in Bezug auf die potenziellen Störungsereignisse mit Dauer des Betriebs abnimmt (vgl. Kernaussage K12). Neben den unfallbedingten Ausfallursachen lassen sich jedoch auch die planbaren Ausfallursachen, wie bspw. die wartungsbedingten und arbeitsstättenbedingten Ausfallursachen, im halbseitigen Betrieb ausführen, so dass eine hohe Anlagenverfügbarkeit eine richtungsbezogene Abschaltung der Oberleitungsanlage voraussetzt (vgl. Kernaussage K24).

E4: Empfehlung zur Berücksichtigung der klimatischen Veränderungen beim Ausbau einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs

Derzeit wird von einer Verschärfung der klimatischen Veränderungen aufgrund der angestiegenen Treibhausgasemissionen ausgegangen, so dass sich die Wahrscheinlichkeit von Extremwetterereignissen in Zukunft erhöhen wird. Die Folgen wären bspw. intensivere

Gewitterereignisse mit hohen Windgeschwindigkeiten oder längere Hitzeperioden. Die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage wird auch durch die witterungsbedingten Ausfallursachen in Zukunft beeinträchtigt werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass hohe Windgeschwindigkeiten zu einer Beschädigung der Oberleitungsanlage führen können (vgl. Kernaussage K15) und die Qualität der Energieversorgung durch hohe Lufttemperaturen beeinträchtigt wird (vgl. Kernaussage K16). Die Zunahme von Extremwetterereignissen kann weiterführend auch zu unerwarteten Ausfallursachen führen, welche erhebliche Auswirkungen auf die Verfügbarkeit aufweisen können (vgl. Kernaussage K5). Die klimatischen Veränderungen können sich somit zukünftig signifikant auf die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auswirken (vgl. Kernaussage K26) und sind infolgedessen bei der Auslegung eines Oberleitungssystems zu berücksichtigen (vgl. Kernaussage K17). Dies kann bspw. bereits bei der Lage einer Oberleitungsanlage erfolgen, bspw. durch Platzierung der Unterwerke in einem beschatteten Bereich oder der Fahrleitung in windgeschützten Gebieten. In jedem Fall sollten Strategien für witterungsbedingte Ausfallursachen erarbeitet werden, welche die möglichen Witterungsereignisse und die damit einhergehenden Beschädigungen abdecken.

8.4.2 Empfehlungen zum Betrieb

E5: Empfehlung zur Auswahl der Betriebsstrategie einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs

Der operative Betrieb einer Oberleitungsanlage kann über zwei unterschiedliche Betriebsstrategien realisiert werden, dem zeitweisen Betrieb (bspw. 8/5-Betrieb) und dem dauerhaften Betrieb (24/7-Betrieb). Um möglichst vielen Nutzern die Möglichkeit zum Stromladen zu geben, muss die Betriebszeit bei Umsetzung eines zeitweisen Betriebs auf die potenziellen Nutzer abgestimmt werden (vgl. Kernaussage K4). Letztlich wirkt sich die Wahl der Betriebsstrategie signifikant auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage aus und zwar nicht nur, da die Dauer des zeitweisen Betriebs bezogen auf die gesamte Dauer gegenüber dem dauerhaften Betrieb geringer ist, sondern insbesondere aufgrund der damit einhergehenden Prozesse des Einschaltens und des Abschaltens der Oberleitungsanlage, welche an das vorhandene Personal gebunden sind und geplant und eingehalten werden müssen (vgl. Kernaussage 1). Es konnte festgestellt werden, dass insbesondere im zeitweisen Betrieb die betriebs- und systembedingten Ausfallursachen dominieren und die Verfügbarkeit einschränken. Weiterhin lässt sich festhalten, dass beim zeitweisen Betrieb sich die planbaren Ereignisse auch außerhalb der geplanten Betriebszeit durchführen lassen können, wodurch sich hier Vorteile in Bezug auf die Anlagenverfügbarkeit aufzeigen lassen (vgl. Kernaussage K2). Im dauerhaften Betrieb konnte ein großer Anteil der Ausfallzeiten innerhalb der Hauptverkehrszeit festgestellt werden (vgl. Kernaussage K3). Für die Auswahl der Betriebsstrategie sollte daher im Vorfeld der zeitliche Bedarf der Strombereitstellung abgeschätzt werden, sowie im Weiteren geprüft werden, welche planbaren Tätigkeiten in ihrer jeweiligen Häufigkeit zu welchen Tageszeiten ausgeführt werden können und wie viel Personal für den operativen Betrieb zur Verfügung steht. Durch Abschätzung der aufgeführten Einschränkungen kann eine bedarfsgerechte und optimierte Betriebsstrategie entwickelt werden.

E6: Empfehlung zur Festlegung einer Bewertungsmethode bzgl. des operativen Betriebs einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs

Um den operativen Betrieb einer Oberleitungsanlage bewerten zu können, bedarf es eines einheitlichen Bewertungsschemas. Hierzu bietet sich die erreichte Anlagenverfügbarkeit (A_{OL}) an, welche sich aus der realisierten gegenüber der geplanten Betriebszeit ergibt. Im Feldversuch ELISA konnte eine Anlagenverfügbarkeit von bis zu 95,3 % erreicht werden, die ermittelte zukünftige potenzielle Verfügbarkeit liefert einen Wert von 98,4 %, basierend auf einer Abschätzung der relevanten Störfallereignisse, so dass nachweislich die potenzielle Verfügbarkeit einer 5 km langen Oberleitungsanlage einen Wert von über 98 % erreichen kann (vgl. Kernaussage 25). Je nach Lage der Oberleitungsstrecke (vgl. Empfehlung E1) sind jährliche Anlagenverfügbarkeitswerte über 99 % möglich. Es bietet sich an, die Verfügbarkeitswerte als Vergleichswerte zur Bewertung des operativen Betriebs einer Oberleitungsanlage heranzuziehen. Hierzu werden folgende Bewertungsstufen (Level of Service, LOS) empfohlen:

- $A_{OL} \geq 99 \%$ → ausgezeichnete Anlagenverfügbarkeit (LOS A)
- $A_{OL} \geq 98 \%$ → sehr gute Anlagenverfügbarkeit (LOS B)
- $A_{OL} \geq 96 \%$ → gute Anlagenverfügbarkeit (LOS C)
- $A_{OL} \geq 94 \%$ → schlechte Anlagenverfügbarkeit (LOS D)
- $A_{OL} \geq 92 \%$ → grenzwertige Anlagenverfügbarkeit (LOS E)
- $A_{OL} < 92 \%$ → ungenügende Anlagenverfügbarkeit (LOS F)

Eine Anlagenverfügbarkeit von mehr als 96 % (LOS C) sollte mindestens angestrebt werden, um eine nach außen annehmbar verlässliche Verfügbarkeit der Anlage zu gewährleisten. Dies entspricht einer maximalen Ausfalldauer von 350,4 Stunden im Jahr bei einem dauerhaften Betrieb (vgl. Empfehlung E5). Geringere Verfügbarkeiten weisen darauf hin, dass Maßnahmen zur Steigerung dieser zu ergreifen sind und gegebenenfalls die bestehenden Strategien optimiert werden müssen. Die Bewertungsstufen dienen somit nicht nur dem Vergleich, sondern sind vielmehr auch Auslöser umfassender Optimierungsprozesse im operativen Betrieb der Oberleitungsanlage zur Steigerung der Verfügbarkeit.

Die Bewertungsstufen wurden hierbei auf Grundlage der Werte aus dem Feldversuch ELISA bzw. über die Betrachtung der Wirkungszusammenhänge ermittelt. Die witterungsbedingten Abschaltungen sind hierbei berücksichtigt (vgl. Empfehlung E4). Da sich jedoch die zukünftigen klimatischen Veränderungen signifikant auf die Verfügbarkeit auswirken können, sind die Bewertungsstufen zukünftig gegebenenfalls anhand dieser Veränderungen anzupassen (vgl. Kernaussage K26).

E7: Empfehlung zur Entwicklung von Handlungsstrategien bei Störfallereignissen für den operativen Betrieb einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs

Im operativen Betrieb einer Oberleitungsanlage können eine Vielzahl an unterschiedlichen, sowohl geplanten als auch ungeplanten, Ausfallursachen auftreten. Während bei planbaren Störfallereignissen der gesamte Prozess über die Dauer der Abschaltung zeitlich geplant werden kann, sind bei ungeplanten Störfallereignissen Handlungsstrategien aufzustellen, welche die erforderlichen Maßnahmen und Umsetzungsschritte umfassen, um schnellstmöglich eine Rückführung in den planmäßigen operativen Betrieb zu erreichen, wodurch eine hohe Verfügbarkeit sichergestellt werden kann (vgl. Kernaussage K6). Diese Maßnahmen und Umsetzungsschritte umfassen bspw. die Durchführung der Abschaltung, die Prüfung auf Beschädigung der Oberleitungsanlage, die gegebenenfalls erforderlichen Reparaturen der

Anlage, die Prüfung der Funktionalität und Wiedereinschaltungsmöglichkeiten und die eigentliche Wiederinbetriebnahme (vgl. Kernaussage K18). Durchdachte situationsangepasste Routinen und Handlungsstrategien können dazu beitragen, die negativen Auswirkungen von geplanten Störfallereignissen, wie bspw. bei Festlegung der Abschaltungszeiten, aber auch die Ausfallzeiten ungeplanter Störfallereignisse zu reduzieren (vgl. Kernaussagen K10 und K20). Dies ist darauf zurückzuführen, dass insbesondere im dauerhaften Betrieb ein großer Anteil der Ausfallzeiten innerhalb der Hauptverkehrszeit festgestellt werden konnte (vgl. Kernaussage K3) und unerwartete Ausfallursachen zu erheblichen Auswirkungen im operativen Betrieb führen können, sofern keine nutzbaren Handlungsstrategien bestehen (vgl. Kernaussage K5). Die frühzeitige Entwicklung und Umsetzung der Handlungsstrategien sowie eine nachträgliche Bewertung und Optimierung der Maßnahmen und Umsetzungsschritte (Wirkungskontrolle) wird sich positiv auf die Anlagenverfügbarkeit auswirken.

E8: Empfehlung zur zeitlich optimierten Umsetzung planbarer Ereignisse im operativen Betrieb einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs

Planbare Ereignisse, wie bspw. Arbeiten im Streckenbereich, die Durchführung der Inspektion und Wartung oder die Tätigkeiten des Straßenbetriebsdienstes, treten regelmäßig auf und unterscheiden sich in ihren Auswirkungen von den unplanbaren Ereignissen (vgl. Kernaussage K8). Weiterhin finden die geplanten Abschaltungen hauptsächlich während der Hauptverkehrszeit statt (vgl. Kernaussage K9). Durch eine zeitliche Optimierung der planbaren Ereignisse lässt sich die Anlagenverfügbarkeit steigern. Dies ist bspw. dann möglich, wenn mehrere planbare Ereignisse gebündelt und somit zeitgleich umgesetzt werden. Ein weiterer positiver Effekt wird erreicht, wenn die planbaren Ereignisse außerhalb der Hauptverkehrszeit umgesetzt werden, da dadurch eine geringere Anzahl an Nutzern von den Abschaltungen betroffen sind. Es bietet sich ferner an, die zeitlich flexiblen planbaren Ereignisse auf jene Zeiträume im Jahr zu schieben, an welchen der Anteil des Schwerverkehrs auf den Autobahnen am geringsten ist. Bei einem zeitweisen Betrieb sollten die planbaren Ereignisse bestenfalls außerhalb der geplanten Betriebszeiten realisiert werden, wobei diese Betriebszeiten auf die potenziellen Nutzer abzustimmen ist (vgl. Kernaussage K4). Es konnte aufgezeigt werden, dass die planbaren Ereignisse generell seltener auftreten als die ungeplanten Ausfallursachen (vgl. Kernaussage K7), wobei festzuhalten ist, dass die Anzahl der ungeplanten Störfallereignisse von der Lage der Oberleitungsanlage (vgl. Empfehlung E1) und der Länge der Segmente (vgl. Empfehlung E2) abhängt.

E9: Empfehlung zum Personal- und Materialeinsatz im operativen Betrieb einer Oberleitungsstrecke auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs

Die Dauer der Abschaltungen, insbesondere bei den ungeplanten und externalen Ausfallursachen, ist abhängig von der Verfügbarkeit des Personals und dem vorhandenen Material zur Reparatur bei aufgetretenen Beschädigungen. So kann sich eine geringe Verfügbarkeit an berechtigten Personen zur Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage negativ auf den Prozess zur Inbetriebnahme (vgl. Kernaussage K22) und somit auf die Verfügbarkeit auswirken (vgl. Kernaussage K21). Die Ausweitung des Personenkreises mit der Berechtigung zur Wiedereinschaltung bspw. auf die Operatoren und entsprechend auf alle Tages- und Nachtzeiten würde die Verfügbarkeit erheblich erhöhen (vgl. Kernaussage K14). Neben der Verfügbarkeit des Personals ist jedoch auch die Verfügbarkeit des Materials zur Reparatur und Instandsetzung entscheidend, um den Prozess der Reparatur der Oberleitungsanlage bei vorhandenen Beschädigungen zu beschleunigen. Es ist entsprechend

vorab zu prüfen, welches Material in welcher Menge vorzuhalten ist, um im Falle eines Störfallereignisses mit Beschädigung schnellstmöglich agieren zu können (vgl. Kernaussage K19). Hierzu zählt auch die Aufstellung geeigneter Wartungsverträge, bspw. mit festgelegten Reaktionszeiten und Zeiträumen zur Behebung von Störungen.

9 Schlussbetrachtung

9.1 Fazit der Dissertation

In der vorliegenden Arbeit wurde eine umfassende Analyse der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage im ELISA-Feldversuch durchgeführt, die Wirkungszusammenhänge zwischen den Einflussfaktoren und der Verfügbarkeit ermittelt und basierend auf diesen Wirkungszusammenhängen eine potenzielle Verfügbarkeit abgeleitet. Die Ergebnisse wurden ferner mit Hilfe von Expertenbefragungen validiert.

Es konnte aufgezeigt werden, dass bei einem Ausbau des Systems von einer generell hohen Anlagenverfügbarkeit ausgegangen werden kann, welche im rechnerisch besten Fall 98,3 % beträgt. Dieser Wert spiegelt ferner jedoch eine Oberleitungsanlage bei vergleichbaren Streckenabschnitten zum ELISA-Feldversuch wider, da die unfallbedingten Abschaltungen aufgrund der hohen Verkehrsstärken im Streckenbereich relativ häufig eintreten und dadurch den größten Anteil an der jährlichen Ausfallzeit ausmachen (vgl. Tabelle 38 auf Seite 150). Auch die Abschaltungen aufgrund von Gewitterlagen wurden in die Betrachtung eingeschlossen. Diese nehmen ebenfalls einen großen Anteil an den gesamten jährlichen Ausfallzeiten, nicht zuletzt auch bedingt durch die derzeitigen klimatischen Veränderungen, ein.

Die erreichbare Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auf Autobahnen steht somit nicht im Widerspruch eines (flächendeckenden) Ausbaus des Systems. Der ELISA-Feldversuch und die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen konnten zeigen, dass ein solches System effizient betrieben werden kann. Stellt man sich den Herausforderungen im Verkehrssektor, insbesondere der dringlichen Reduktion der Treibhausgasemissionen (vgl. Abschnitt 2.2), so ist die Oberleitungstechnologie ein vielversprechender Ansatz.

Um die Entscheidungen in Bezug auf den zukünftigen Technologiemark im Straßengüterverkehr zu unterstützen, liefert die Arbeit folgende Ergebnisse:

- Einflussfaktoren (bzw. Ausfallursachen) auf die Anlagenverfügbarkeit, welche insbesondere auch dazu genutzt werden können, um Störfallsituationen zu identifizieren und Strategien zur Beseitigung des Störfalls und zur Rückkehr in den Regiebetrieb zu entwickeln.
- Wirkungszusammenhänge zwischen den Einflussfaktoren und der Verfügbarkeit, welche insbesondere dazu dienen, die relevanten Einflussfaktoren zu identifizieren (limitierende Ausfallursachen) und die Auswirkungen von Störfallereignissen besser prognostizieren zu können.
- Kategorien von Ausfallursachen zur strukturierten Analyse und als Grundlage zum Vergleich der Störfallereignisse unterschiedlicher Oberleitungsanlagen.
- Ansatz der kritischen Betriebszeiten zur Bewertung der Auswirkungen der Ausfalldauer einer geplanten und ungeplanten Ausfallursache.
- Szenariobasierte Abschätzung der potenziellen Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage, bspw. auch zur Vorbewertung von möglichen zu elektrifizierenden Streckenabschnitten.
- Bewertungsstufen zur Beschreibung des LOS einer Oberleitungsanlage.
- Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb einer Oberleitungsanlage zur Steigerung der Anlagenverfügbarkeit.

9.2 Offene Fragestellungen

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit basieren auf den Daten des ELISA-Feldversuchs, welcher auf den Streckenabschnitten einer hoch-frequentierten Autobahn liegt. Insofern können insbesondere die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Ausfallursachen bei einem Ausbau des Systems an einer anderen Stelle im Verkehrsnetz deutliche Unterschiede aufweisen. In Abschnitt 8.3 wurde dazu ein Vergleich mit dem FESH-Feldversuch durchgeführt, gleichwohl die Datenlage auf das Jahr 2020 begrenzt war. Hierbei zeigt sich, dass die Dauer der Ausfälle durch die jeweiligen Ausfallursachen gegenüber dem ELISA-Feldversuch unterschiedlich verteilt sind. Insbesondere die Abschaltungen der Gefahrenabwehrbehörden weisen nur einen Anteil von 18 % auf, im ELISA-Feldversuch bzw. bei der szenariobasierten Ermittlung ist hingegen etwa die Hälfte der gesamten Ausfallzeit auf jene Ausfallursache zurückzuführen. Weitere Daten zur Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage liegen bisher nicht vor.

Es ist demnach noch zu untersuchen, wie sich die jeweiligen Eintrittshäufigkeiten der **Ausfallursachen bei unterschiedlichen Streckencharakteristiken und unterschiedlichen Verkehrsstärken** unterscheiden. Ferner kann durch einen Vergleich der Ausfallursachen verschiedener Oberleitungsanlagen auch eine zusätzliche Validierung der Wirkungszusammenhänge erzielt werden.

Ein weiterer wichtige Forschungsaspekt, welcher innerhalb dieser Arbeit zwar betrachtet, jedoch nicht abschließend bewertet werden konnte, umfasst die **Abschaltungen aufgrund der Witterungsbedingungen**. Eine Oberleitungsanlage ist den vorherrschenden Witterungsbedingungen grundsätzlich, mit Ausnahme bei einer Elektrifizierung von Tunnelbauwerken, ausgesetzt. Klimatische Veränderungen, welche bspw. zu einer Steigerung der Niederschlagsintensitäten führen oder in höheren Spitzenwindgeschwindigkeiten resultieren, sind zu erwarten. Es ist zum aktuellen Zeitpunkt der durchgeführten Analysen unklar, wie sich das Klima tatsächlich verändern wird und wie sich dies auf den Betrieb einer Oberleitungsanlage auswirken wird. Zwar wurden die witterungsbedingten Ausfallursachen bei der szenariobasierten Ermittlung der Anlagenverfügbarkeit beachtet, dennoch sollte diese Betrachtung kontinuierlich auf Grundlage aktueller Daten überprüft werden.

Um auch auf politischer Ebene den Pfad zum zukünftigen und gewünschten **Technologiemix im Straßengüterverkehr** festlegen zu können, sind neben der Oberleitungsanlage auch die weiteren alternativen Antriebstechnologien in ihrer jeweiligen Eignung diverser Anwendungsmöglichkeiten weiter zu erforschen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Hierbei sollten aber auch die sich ergebenden neuen technologischen Möglichkeiten, wie bspw. Platooning und autonomes Fahren, in die Betrachtungen eingeschlossen werden. So weist bspw. das dynamische Laden gegenüber dem stationären Laden insbesondere in einer zukünftigen Betrachtung weitere erhebliche Vorteile auf:

- **Intelligentes und gesteuertes Laden:** Die Bereitstellung der Energiemenge kann auf Grundlage unterschiedlicher Parameter anlagenseitig reguliert werden, indem die Leistung der Oberleitungsanlage (anlagenseitig) oder die Leistung des O-Lkw (fahrzeugseitig) flexibel angepasst wird. Es ist davon auszugehen, dass zukünftig die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastrukturen eine Vielfach eingesetzte Methode sein wird, um Optimierungen im Verkehrsablauf zu erreichen. Ist eine solche Kommunikation serienmäßig vorhanden, bspw. als Voraussetzung für die Bezahlung und somit die Erlaubnis zum Strombezug, so kann der Energiebedarf ganzer

Streckenabschnitte durch gezielte Analyse der Informationen aus den Fahrzeugen abgeschätzt werden und die notwendige Energie entsprechend im Stromnetz verteilt und an geeigneter Stelle abgegeben werden. Gegebenenfalls können sogar einzelne elektrifizierte Streckenabschnitte vorübergehend stromlos geschaltet werden, da diese durch andere elektrifizierte Streckenabschnitte kompensiert werden können.

- **Monetäre Anreize:** Während beim stationären Laden monetäre Anreize nur durch die Festlegung des Energiepreises an einer Lademöglichkeit, demnach an einem lokalen Punkt, geschaffen werden können, bestehen beim dynamischen Laden flexiblere Beeinflussungsmöglichkeiten, da das Laden nicht auf einen Ladepunkt konzentriert ist. So kann bspw. die Bepreisung auf unterschiedlichen Streckenabschnitten variieren, um zu einer räumlichen Verlagerung der Schwerverkehre beitragen zu können. Ferner kann die Bepreisung tageszeitabhängig gestaltet werden, um auch zeitliche Verlagerungen zu bewirken.
- **Energieeinspeisung durch die O-Lkw:** Da beim stationären Laden der Energiespeicher bis zu einer bestimmten Energiemenge (im Stillstand) befüllt wird, ist eine Energieeinspeisung durch den O-Lkw keine sinnvolle Anwendungsmöglichkeit. Diese Betrachtungsweise ist beim dynamischen Laden komplementär. Das Laden wird zeitlich nicht begrenzt, vielmehr ist ein Anbügeln, sofern die Oberleitungsanlage funktionsfähig ist, jederzeit möglich. Da sich das Fahrzeug nicht im Stillstand befindet, besteht zusätzlich die Möglichkeit, Energie durch Rekuperation zu beziehen, so dass bspw. im Gefälle überschüssige Energie gewonnen und letztlich sogar eingespeist werden kann.
- **Lebensdauer der Batterie:** Das dynamische Laden zeichnet sich durch eine kontinuierliche Energiebereitstellung aus, welche nicht darauf ausgelegt ist, die Energiespeicher möglichst schnell aufzuladen. Da Ladezeiten nicht verkürzt werden müssen, um die Attraktivität zu steigern, können die Laderaten auch reduziert werden, wodurch die Energiespeicher eines O-Lkw eine höhere Lebensdauer erreichen. Hierbei ist es sogar denkbar und in der Umsetzung sehr wahrscheinlich, dass die Laderaten in Abhängigkeit des Ladezustands und dem Fahrtziel durch das Fahrzeug selbst reguliert werden.
- **Platzbedarf der Ladeinfrastruktur:** In Deutschland fehlen etwa 20.000 Lkw-Stellplätze (ADAC, 2022). Die bestehenden Abstellmöglichkeiten sind entsprechend größtenteils überlastet und bieten keinen Raum zur Unterbringung stationärer Ladeeinrichtungen, ohne die Problematik zu verschärfen. Zwar wird auch beim dynamischen Laden Fläche für die Aufstellung eines Unterwerks benötigt, diese ist jedoch im Vergleich zum Platzbedarf eines Lkw-Stellplatzes mit Lademöglichkeit deutlich kleiner und muss nicht an die Verkehrsführung des Lkw-Verkehrs angeschlossen werden.
- **Fahren ohne Anzuhalten:** Ein besonderer Vorteil des dynamischen Ladens ist die Möglichkeit des Energiebezugs, ohne das Fahrzeug abstellen zu müssen. Dieser Vorteil wird insbesondere dann relevant, wenn das autonome Fahren auch im Straßengüterverkehr Einzug erhält. Die Notwendigkeit eines Anhaltens eines autonomen Lkw zum Aufladen des Energiespeichers sollte zukünftig nicht erforderlich sein.
- **Versorgung von Fahrzeugkolonnen:** Während eine Ladesäule nur eine bestimmte (sehr geringe) Anzahl an Fahrzeugen versorgen kann (in Abhängigkeit der Anzahl an Anschlusspunkten), sind beim dynamischen Laden die Anzahl der Fahrzeuge lediglich durch die Gesamtmenge der erforderlichen Energie begrenzt. Dies bedeutet, dass zur selben Zeit eine viel größere Anzahl an O-Lkw geladen werden kann und auch

Fahrzeugkolonnen, welche bspw. als Platoon unterwegs sind, gleichzeitig geladen werden können. Bei stationärem Laden ist die Umsetzung von Platooning kaum denkbar.

Die Analyse der Verfügbarkeit bildet demnach nur einen, jedoch einen sehr entscheidenden, Ansatzpunkt, um die Oberleitungstechnologie in ihrer Eignung für den Straßengüterverkehr zu bewerten. Die zusammenfassende Ergebnisdarstellung (vgl. Abschnitt 8.1), die Beantwortung der Forschungsfragen (vgl. Abschnitt 8.2) sowie die Empfehlungen zum Netzausbau und zum Betrieb der Oberleitungsanlage (vgl. Abschnitt 8.3) sind ein weiterer wichtiger Schritt, um den Transformationsprozess im Verkehrssektor zu unterstützen.

9.3 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Die Ergebnisse innerhalb dieser Arbeit legen den Grundstein zur Identifikation von Ausfallursachen sowie deren Auswirkungen auf die Anlagenverfügbarkeit. Jeder Ausfallursache folgt jedoch ein Prozess der Wiedereinschaltung, welcher gegebenenfalls eine Reparatur oder eine Freigabe vorgeschaltet ist (vgl. Abbildung 24 auf Seite 67). Die Analysen haben gezeigt, dass diese Prozesse je nach Ausfallursache und dem Schadensausmaß einen erheblichen zeitlichen Umfang in Anspruch nehmen können. Basierend auf den bereits durchgeführten Analysen und Ergebnissen sollten in einem weiteren Schritt Strategien abgeleitet werden, welche dazu dienen, die nachgelagerten Prozesse bis zur Wiedereinschaltung umfänglich zu definieren und vorzugeben, so dass eine schnelle Rückkehr in den Regelbetrieb gewährleistet wird.

In Bezug auf die Abschaltungen durch die Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden ist die Implementierung und Umsetzung eines halbseitigen Betriebs zu empfehlen, um die Anlagenverfügbarkeit weiter zu steigern. Die Umsetzung ist mit den Gefahrenabwehrbehörden in einem weiteren Schritt abzustimmen und zu erproben.

Es ist davon auszugehen, dass jede Antriebsmöglichkeit im Straßengüterverkehr für bestimmte Anwendungsgebiete geeignet ist und einen Beitrag zur politischen Zielerreichung in Bezug auf die Reduktion der Treibhausgasemissionen leisten kann. Insofern sollten die unterschiedlichen Antriebsformen, Technologien und Kraftstoffe vergleichend untersucht werden. Hierzu sollten Innovationskorridore eingerichtet werden, welche es erlauben, umfangreiche Untersuchungen durchzuführen. Es ist jedoch zu bedenken, dass der Transformationsprozess im Straßengüterverkehr zeitlich nicht (weiter) herausgezögert werden sollte, sondern zielführende Lösungsansätze bereits heute sukzessive ausgebaut werden müssen.

Abkürzungsverzeichnis

BCS	Best-Case-Szenario
BEV	Battery Electric Vehicle
BIP	Bruttoinlandsprodukt
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COP	Conference of Parties
DB AG	Deutschen Bahn AG
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
ELISA	Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen
ERS	Electric Road Systems,
EU	Europäische Union
FESH	Feldversuch Elektrifizierter Schwerverkehr auf Autobahnen
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
HVZ	Hauptverkehrszeit
Lkw	Lastkraftwagen
LOS	Level of Service
LTS	großes technisches System (Large Technical Systems)
Mio.	Millionen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
Mrd. tkm	Milliarden Tonnenkilometern
MTBF	mittlerer Ausfallabstand (Mean time between failures)
MTTF	mittlere Lebensdauer (Mean time to failure)
NDC	Klimaschutzbeiträge (Nationally Determined Contributions)
NEPA	National Environmental Policy Act
NVZ	Nebenverkehrszeit
O-Bus	Oberleitungsbus, O-Bus
OL	Oberleitung
OLA	Oberleitungsanlage
O-Lkw	Oberleitungs-Lkw
Pkw	Personenkraftwagen
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability, Safety
SVZ	Schwachverkehrszeit
THG	Treibhausgasemissionen
TLS	Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen
TS	Trendszenario
Tsd.	Tausend
WCS	Worst-Case-Szenario
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht zum inhaltlichen Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung).	5
Abbildung 2:	Entwicklung der Transportleistung des Güterverkehrs (Gesamt und Straßengüterverkehr) und des Bruttoinlandsprodukts in Deutschland ab 1950; eigene Datenauswertung (BMDV, 2022; BMWV, 2004; DIW, 1991; Statistisches Bundesamt, 2023) sowie eigene Darstellung.	6
Abbildung 3:	Durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV) des Schwerverkehrs an den Zählstellen 6810, 6811, 6815, 6821 und 6940 entlang der A5 in Hessen bezogen auf das Basisjahr 2003 (Daten nach BASt (2024), eigene Darstellung).	8
Abbildung 4:	Entwicklung der Anzahl an Veröffentlichungen pro Jahr nach ausgewählten Filterkriterien (Daten aus Web of Science - Core Collection (Clarivate Analytics, 2024); eigene Darstellung).	10
Abbildung 5:	Entwicklung der THG in Deutschland je Sektor sowie ausgewiesener Zielpfad bis 2030. Abbildung aus Umweltbundesamt (2024b, S. 8f.).	15
Abbildung 6:	Arten von ERS: Konduktiv mit Oberleitung (a), mit Stromschiene von der Seite (b) oder in der Fahrbahn (c); Induktiv (d), Bildquelle: Bateman et al. (2018, S. 14).	18
Abbildung 7:	Typischer Verlauf der Ausfallrate λ über die Zeit t , Bildquelle: Lienig & Brümmer (2024, S. 55).	19
Abbildung 8:	Zusammenhang zwischen Störfallsituation, Strategie und Szenario (Darstellung nach Fornauf (2015, S. 13) nach ZIV (2000) und Andree et al. (2001); übernommen in: FGSV (2003)).	21
Abbildung 9:	Szenario-Trichter innerhalb der Szenarioanalyse (eigene Darstellung).	22
Abbildung 10:	OH-Lkw im Feldversuch ELISA auf der Autobahn A5, Bildquelle: Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik (2022).	24
Abbildung 11:	Unterwerk an der Bundesautobahn A5 am Parkplatz Bornbruch (eigene Aufnahme, 2024).	25
Abbildung 12:	Lichtraumprofil und Querprofil einer Oberleitungsanlage. Abbildung nach Lehmann, Sommer, et al. (2021, S. 43), überarbeitet durch Wauri (2024).	26
Abbildung 13:	Lage der eHighway Teststrecken in Deutschland (Stand: 2024; Bildquelle: eHighway.SH (2024b)).	30
Abbildung 14:	Lage der ELISA-Teststrecke im ELISA-Projekt (Google Earth 2024, eigene Darstellung).	32
Abbildung 15:	Die vier Bereiche der Known-Unknowns-Matrix (Zhang, 2024).	34

Abbildung 16: Darstellung der Untersuchungsschritte sowie der Zwischenergebnisse, Ergebnisse und externen Datenquellen im Rahmen des Forschungsdesigns (eigene Darstellung).	38
Abbildung 17: Acht Schritte der Szenarioanalyse (Skorna & Nießen, 2020, S. 45).	40
Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung einer stufenlosen Risikomatrix in Anlehnung an Skorna & Nießen (2020, S. 55).	44
Abbildung 19: Vergleich der täglichen Verkehrsmenge an den Wochentagen auf der A5 an der Zählstelle Erzhausen (6922) für das Jahr 2021 (Daten nach BASt (2024), eigene Darstellung).	48
Abbildung 20: Darstellung der Informationen (Legende) eines Boxplots (eigene Darstellung).	49
Abbildung 21: Ausschnitt aus dem Anlagenbetriebstagebuch: Betriebszeiten (eigene Darstellung).	57
Abbildung 22: Ausschnitt aus dem Anlagenbetriebstagebuch: Betriebsinformationen (eigene Darstellung).	58
Abbildung 23: Monatliche Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage im Betrachtungszeitraum (Mai 2019 bis Dezember 2022) getrennt nach Fahrtrichtungen (eigene Darstellung).	61
Abbildung 24: Mögliche Ausfallursachen einer Oberleitungsanlage (eigene Darstellung).	67
Abbildung 25: Anteil der Ausfalldauer nach Kategorien der Ausfallursachen in Fahrtrichtung Süd (eigene Darstellung).	74
Abbildung 26: Anteil der Ausfalldauer nach Kategorien der Ausfallursachen in Fahrtrichtung Nord (eigene Darstellung).	74
Abbildung 27: Häufigkeiten von Ausfällen der Oberleitungsanlage (kategorisiert) im jeweiligen Betrachtungsjahr (eigene Darstellung).	77
Abbildung 28: Häufigkeiten von Abschaltungen der Oberleitungsanlage (ungeplant und geplant) der jeweiligen Fahrtrichtung und im jeweiligen Betrachtungsjahr (eigene Darstellung).	79
Abbildung 29: Mittlere Ausfalldauer (Mittelwerte in Stunden) und Häufigkeit der Ausfallursachen (kategoriale Betrachtung) im Betrachtungszeitraum (eigene Darstellung).	80
Abbildung 30: Mittlere Ausfalldauer (Mittelwerte in Stunden) und Häufigkeit der Ausfallursachen im Betrachtungszeitraum (eigene Darstellung).	80
Abbildung 31: HeatMap über die absolute Anzahl an Fahrzeugen im Schwerverkehr in Fahrtrichtung Süd (S) und Fahrtrichtung Nord (N) am Querschnitt der Zählstelle Erzhausen im Jahr 2021 in der Abstufung von geringer Verkehrsstärke (grün) bis hohe Verkehrsstärke (rot). Eigene Berechnungen und Darstellung nach Daten der BASt (2024).	86

Abbildung 32: Schwerverkehrsaufkommen in Bezug zur Tageszeit und getrennt nach den jeweiligen Fahrtrichtungen sowie in Summe beider Fahrtrichtungen für das Jahr 2021. Eigene Berechnungen und Darstellung nach Daten der BAST (2024).....	87
Abbildung 33: Summe der Verkehrsstärke des Schwerverkehrsaufkommens in Bezug zur Tageszeit für das Jahr 2021 sowie differenziert nach Haupt-, Neben- und Schwachverkehrszeit. Eigene Berechnungen und Darstellung nach Daten der BAST (2024).	88
Abbildung 34: Vergleichende Betrachtung der Strombezugsfahrten und des Verkehrsaufkommens über die Tageszeit. Eigene Berechnungen und Darstellung, Daten der Verkehrsstärke nach BAST (2024).	90
Abbildung 35: Gegenüberstellung der Verteilung der Häufigkeiten und der Ausfalldauer der Ursachenkategorien in Abhängigkeit der Betriebsstrategie (eigene Darstellung).	94
Abbildung 36: Vergleich der durchschnittlichen täglichen Ausfallzeit pro Betriebstag in Abhängigkeit der Betriebsstrategie (eigene Darstellung).	95
Abbildung 37: Durchschnittliche tägliche Ausfallzeit pro Betriebstag in der Hauptverkehrszeit in Abhängigkeit der Betriebsstrategie (eigene Darstellung).	96
Abbildung 38: Gegenüberstellung der Häufigkeit und der Ausfallzeit (Dauer) in Stunden der erwarteten Ausfallursachen und der unerwarteten Ausfallursachen im Regelbetrieb (eigene Darstellung).....	99
Abbildung 39: Visuelle Bewertung der Lage der Verkehrsunfälle entlang der Autobahn (eigene Darstellung; erstellt mit: Google My Maps, 2024).	107
Abbildung 40: Boxplots der Zusammenhänge zwischen der Ausfalldauer in Stunden und dem Wochentag des Eintretens des Störungsereignisses.	110
Abbildung 41: Verteilung der Strombezugsfahrten nach der Anzahl über die Intervallbereiche der Dauer des Strombezugs (eigene Darstellung).....	115
Abbildung 42: Vergleich des Anteils des jeweiligen Einschaltungstags gegenüber allen Einschalttagen zwischen den geplanten und ungeplanten Ausfallursachen bei einer Ausfalldauer > 0,5 Stunden (eigene Darstellung).	124
Abbildung 43: Ausschnitt der Eingangsseite zur Befragung zur Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs als Grundlage zur Validierung der Ergebnisse.	140
Abbildung 44: Einschätzung der Auswirkungen (1 = sehr gering bis 5 = sehr hoch) und der Eintrittswahrscheinlichkeit (1 = sehr selten bis 5 = sehr häufig) der Ausfallursachen (Mittelwerte) durch die Befragten (n = 5), eigene Darstellung.....	141

Abbildung 45: Einschätzung der Kernaussagen (1 = „stimme nicht zu“ bis 5 = „stimme zu“; Mittelwerte) durch die Experten (n = 5 bzw. *n = 4; **n = 3), eigene Darstellung.	142
Abbildung 46: Einschätzung der potenziellen Ausfalldauer eines zukünftigen operativen Betriebs einer Oberleitungsanlage auf Grundlage der Angaben der Befragten (n = 5), eigene Darstellung.	143
Abbildung 47: Vergleich der angegebenen Werte zur Ausfalldauer (Mittelwerte) der Ausfallursachen durch die Experten (Einschätzung) zu den ermittelten Werten innerhalb der Szenarien (eigene Darstellung).	148
Abbildung 48: Exemplarische Darstellung des Anteils der Betriebszeit (links) sowie der Dauer der Betriebs-unterbrechung nach Kategorie (rechts) für den Feldversuch FESH im Jahr 2020 (Jöhrens et al., 2022a, S. 19).	157

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kreuztabelle zur beispielhaften deskriptiven Auswertung der Verkehrsunfälle in Deutschland im Jahr 2023 (Daten nach Statistisches Bundesamt (2024a), eigene Darstellung).	50
Tabelle 2:	Verteilung der Betriebstage nach Kategorie (Kat A = Betriebstage ohne Unterbrechung, Kat B = Betriebstage mit Unterbrechung, Kat C = Betriebstage ohne Betrieb) je Fahrtrichtung (eigene Darstellung).	59
Tabelle 3:	Jahresbezogene Anlagenverfügbarkeit je Fahrtrichtung (eigene Darstellung).	60
Tabelle 4:	Ausfallursachen der Oberleitungsanlage und Ausfalldauer (Summe je Ursache in Stunden) je Fahrtrichtung im Betrachtungszeitraum (eigene Darstellung).	63
Tabelle 5:	Anteil [%] der Ausfalldauer [h] der fünf längsten Ausfallursachen an der gesamten Ausfallzeit [h] der Oberleitungsanlage im Betrachtungszeitraum (eigene Darstellung).	65
Tabelle 6:	Anzahl der identifizierten Abschaltungen, differenziert nach Ausfallursache und Jahr (eigene Darstellung).	71
Tabelle 7:	Gesamte Ausfallzeiten in Stunden je Kategorie pro Jahr (eigene Darstellung).	75
Tabelle 8:	Erfassungsarten nach TLS und Ermittlung des Schwerverkehrs (eigene Darstellung).	84
Tabelle 9:	DTV-Werte im betrachteten Streckenabschnitt aus dem Jahr 2021 (eigene Auswertung nach BAST (2024)).	85
Tabelle 10:	Kreuztabelle zur Untersuchung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen den Betriebsstrategien und der Betriebstage in Fahrtrichtung Süd (eigene Darstellung).	92
Tabelle 11:	Kreuztabelle zur Untersuchung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen den Betriebsstrategien und der Betriebstage in Fahrtrichtung Nord (eigene Darstellung).	92
Tabelle 12:	Ergebnisse des Tests der stochastischen Unabhängigkeit mit $n = 1268$ (eigene Darstellung).	92
Tabelle 13:	Ergebnisse des Tests der stochastischen Unabhängigkeit mit $n < 1268$ (eigene Darstellung).	93
Tabelle 14:	Beispiel der rechnerischen Verteilung und Zuordnung der Ausfallzeit eines Ausfallereignisses zu den jeweiligen Betriebszeiten (eigene Darstellung).	95
Tabelle 15:	Ergebnisse des Mann-Whitney U-Tests bzgl. des Einflusses der unerwarteten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit (eigene Darstellung).	100

Tabelle 16:	Ergebnisse der deskriptiven Auswertung zum Einfluss der geplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit (eigene Darstellung).	102
Tabelle 17:	Ergebnisse des Mann-Whitney U-Tests bzgl. des Einflusses der geplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit (eigene Darstellung).	102
Tabelle 18:	Ergebnisse des Mann-Whitney U-Tests bzgl. des Einflusses der geplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit ohne Betrachtung der Abschaltungen aufgrund der Erweiterung (eigene Darstellung).	103
Tabelle 19:	Aufteilung der Ausfallzeiten (in Stunden) nach geplanter und ungeplanter Ausfallursache in Abhängigkeit der Betriebszeit für Fahrtrichtung Süd (eigene Darstellung).....	103
Tabelle 20:	Aufteilung der Ausfallzeiten (in Stunden) nach geplanter und ungeplanter Ausfallursache in Abhängigkeit der Betriebszeit für Fahrtrichtung Nord (eigene Darstellung).....	103
Tabelle 21:	Darstellung und Ermittlung der relevanten Auswertungsfälle aus den Unfalldaten (eigene Darstellung).	106
Tabelle 22:	Analyse der potenziellen Störungsereignisse zur Ermittlung des Anteils der Anzahl Abschaltungen im operativen Betrieb im Verhältnis der relevanten Störungsereignisse (eigene Darstellung).	107
Tabelle 23:	Ergebnisse der deskriptiven Auswertung zum Einfluss der Gefahrenabwehrbehörden auf die Verfügbarkeit (eigene Darstellung).	108
Tabelle 24:	Deskriptive Auswertung bzgl. des Tages des Eintretens des Störungsereignisses und der Ausfalldauer (eigene Darstellung).....	109
Tabelle 25:	Deskriptive Auswertung bzgl. der Tageszeit des Eintretens des Störungsereignisses und der Ausfalldauer (eigene Darstellung).	110
Tabelle 26:	Aufteilung der Ausfallzeiten (in Stunden) aufgrund der Anforderungen der Gefahrenabwehrbehörden (gesamte und reduzierte Betrachtung) in Abhängigkeit der Betriebszeit für beide Fahrtrichtungen (eigene Darstellung).	111
Tabelle 27:	Ausfalldauern und Anteil der witterungsbedingen Ausfallursachen im Vergleich zur gesamten Dauer an Betriebsunterbrechungen (eigene Darstellung).....	113
Tabelle 28:	Statistische Werte bzgl. Strombezugsdauer und Energiemenge der betrachteten Strombezugsfahrten (n = 3.867).....	117
Tabelle 29:	Kreuztabelle zur Untersuchung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen dem Einfluss der Niederschlagsintensität und der mittleren Übertragungsleistung (eigene Darstellung).	117
Tabelle 30:	Kreuztabelle zur Untersuchung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen dem Einfluss der Windgeschwindigkeit und der mittleren Übertragungsleistung (eigene Darstellung).	118

Tabelle 31:	Kreuztabelle zur Untersuchung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen dem Einfluss der Lufttemperatur und der mittleren Übertragungsleistung (eigene Darstellung).	118
Tabelle 32:	Kreuztabelle zur Untersuchung der stochastischen Unabhängigkeit zwischen dem Einschalttag und des Störungstyps für beide Fahrtrichtungen (eigene Darstellung).	124
Tabelle 33:	Aufteilung der Ausfallzeiten (in Stunden) nach geplanter und ungeplanter Ausfallursache in Abhängigkeit der Betriebszeit für beide Fahrtrichtungen (eigene Darstellung).	125
Tabelle 34:	Hochrechnung der Ausfalldauer im Jahr ausgewählter Ausfallursachen auf eine um zwei auf sieben Kilometer verlängerte Segmentlänge (eigene Darstellung).	127
Tabelle 35:	Ausgangswerte für die szenariobasierte Analyse der potenziellen Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage (eigene Darstellung).	133
Tabelle 36:	Ermittlung der Szenarien der potenziellen Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage über die Ausfalldauer der Ausfallursachen über die Ausgangswerte (Werte in Stunden, eigene Darstellung).	133
Tabelle 37:	Korrigierte Werte für die szenariobasierte Ermittlung der potenziellen Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage (eigene Darstellung).	149
Tabelle 38:	Ermittlung der Szenarien der Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage über die Ausfallzeit der Ausfallursachen über die korrigierten Werte (Werte in Stunden, eigene Darstellung).	150
Tabelle 39:	Vergleich der Anlagenverfügbarkeit und der Ausfallzeiten zwischen den Feldversuchen FESH und ELISA sowie mit den Szenarien der potenziellen Verfügbarkeit (eigene Darstellung).	158
Tabelle 40:	Zählwerte zum DTV-Schwerverkehr sowie die relative Veränderung bezogen auf das Basisjahr 2003 (berechnet) ausgewählter Zählstellen auf der Bundesautobahn A5 (Daten nach BASt (2024), eigene Darstellung).	II
Tabelle 41:	Zuordnung der Ausfallursachen (N = 35) zu den identifizierten Ursachenkategorien im Betrachtungszeitraum.	III
Tabelle 42:	Liste der erfassten Betriebsunterbrechungen im Betrachtungszeitraum.	IV
Tabelle 43:	Häufigkeit, Ausfalldauer und mittlere Ausfalldauer der identifizierten Ausfallursachen (n = 32) sowie der kategorisierten Ausfallursachen.	XI
Tabelle 44:	Absolute Werte des Schwerverkehrsaufkommens je Wochentag im Jahr 2021 an der Zählstelle Erzhausen (6922) der Monate Januar bis April. (Daten nach BASt (2024), eigene Ermittlung und Darstellung).	XII
Tabelle 45:	Absolute Werte des Schwerverkehrsaufkommens je Wochentag im Jahr 2021 an der Zählstelle Erzhausen (6922) der Monate Mai bis August. (Daten nach BASt (2024), eigene Ermittlung und Darstellung).	XIII

Tabelle 46:	Absolute Werte des Schwerverkehrsaufkommens je Wochentag im Jahr 2021 an der Zählstelle Erzhausen (6922) der Monate September bis Dezember. (Daten nach BAST (2024), eigene Ermittlung und Darstellung).....	XIV
Tabelle 47:	Aufsummierte Verkehrsstärken des Schwerverkehrs im Jahr 2021 sowie bezogen auf die Stunde am Tag und Anzahl der Strombezüge bezogen auf die Stunde am Tag.	XV
Tabelle 48:	Häufigkeiten und Ausfalldauer der jeweiligen Ausfallursachenkategorien im Betrachtungszeitraum in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) bezogen auf die Betriebsstrategie.	XVI
Tabelle 49:	Häufigkeiten und Ausfalldauer der jeweiligen Ausfallursachenkategorien im Betrachtungszeitraum in Fahrtrichtung Süd (Frankfurt) bezogen auf die Betriebsstrategie.	XVI
Tabelle 50:	Häufigkeiten und Ausfalldauer der jeweiligen Ausfallursachenkategorien im Betrachtungszeitraum in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) bezogen auf die Betriebsstrategie (bereinigt).....	XVII
Tabelle 51:	Häufigkeiten und Ausfalldauer der jeweiligen Ausfallursachenkategorien im Betrachtungszeitraum in Fahrtrichtung Süd (Frankfurt) bezogen auf die Betriebsstrategie (bereinigt).....	XVII
Tabelle 52:	Übersicht der identifizierten Strombezugsfahrten (Anzahl) nach Dauer (Klasse) des Strombezugs.	XVIII

Literaturverzeichnis

- ADAC. (2022, November 8). Parkplatznot an Raststätten: So oft parken Lkw-Fahrer falsch. <https://www.adac.de/news/lkw-parken-an-raststaetten/>
- ADAC. (2023, Februar 2). ADAC Staubilanz. <https://www.adac.de/verkehr/verkehrsinformationen/staubilanz/>
- Ajanovic, A., & Haas, R. (2016). Dissemination of electric vehicles in urban areas: Major factors for success. *Energy*, 115, 1451–1458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.040>
- Andersson, G., Donalek, P., Farmer, R., Hatziaargyriou, N., Kamwa, I., Kundur, P., Martins, N., Paserba, J., Pourbeik, P., Sanchez-Gasca, J., Schulz, R., Stankovic, A., Taylor, C., & Vittal, V. (2005). Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(4), 1922–1928. *IEEE Transactions on Power Systems*. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.857942>
- Andree, R., Boltze, M., & Jentsch, H. (2001). Entwicklung von Strategien für dynamisches Verkehrsmanagement. *Straßenverkehrstechnik*, Kirschbaum Verlag, 45(12), 610–620.
- Autobahn GmbH. (2023). Erweiterte eHighway-Teststrecke erfolgreich in Betrieb genommen [Pressemittelung vom 28.08.2023]. Die Autobahn GmbH des Bundes. https://www.autobahn.de/storage/user_upload/qbank/PM_ELISA_.pdf
- Basciftci, B., Ahmed, S., Gebraeel, N. Z., & Yildirim, M. (2018). Stochastic Optimization of Maintenance and Operations Schedules Under Unexpected Failures. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6), 6755–6765. *IEEE Transactions on Power Systems*. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2829175>
- BASSt. (2024). BASSt—Fachthemen – Verkehrstechnik—Automatische Dauerzählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen. <https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html>
- Bateman, D., Leal, D., Reeves, S., Emre, M., Stark, L., Ognissanto, F., Myers, R., & Lamb, M. (2018). Electric Road Systems: A Solution for the Future? A PIARC Special Project. World Road Association (PIARC). www.piarc.org
- Behnert, M., & Bruckner, T. (2018). Causes and effects of historical transmission grid collapses and implications for the German power system. 20.
- Bertolini, L., Clercq, F. le, & Straatemeier, T. (2008). Urban transportation planning in transition. *Transport Policy*, 15(2), 69–72. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.11.002>
- Bijker, W. E. (1997). *Of Bicycles, Bakelites, and Bulbs*. MIT Press. <https://mitpress.mit.edu/9780262522274/of-bicycles-bakelites-and-bulbs/>
- BMDV. (2022). Verkehr in Zahlen 2022/2023. Bundesministerium für Digitales und Verkehr.
- BMDV. (2023a). Sofortprogramm Saubere Luft. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. <https://bmdv.bund.de/DE/Themen/Mobilitaet/Urbane-Mobilitaet/Sofortprogramm-Saubere-Luft/sofortprogramm-saubere-luft.html>
- BMDV. (2023b). Wissenschaftliche Untersuchungen im Rahmen der MKS. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/Wissenschaftliche-Untersuchen/wissenschaftliche-untersuchungen.html>

- BMDV. (2024). Elektromobilitätsgesetz (EmoG). Bundesministerium für Digitales und Verkehr. <https://bmdv.bund.de/DE/Themen/Mobilitaet/Elektromobilitaet/Elektromobilitaetsgesetz/elektromobilitaetsgesetz.html>
- BMI. (2009). Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie). Bundesministerium des Innern. https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- BMUB. (2016). Klimaschutzplan 2050—Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (.).
- BMUV. (2020). Fragen und Antworten zum eHighway. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV).
- BMVI. (2018). Energie auf neuen Wegen. Referat Z 32 Hausdruckerei.
- BMVW (Hrsg.). (2004). Verkehr in Zahlen 2004//2005 (33. Jg., erw. Ausg.). Dt. Verkehrs-Verl.
- Boltze, M. (2016). Zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen im Straßenverkehr. Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum Verlag, 12, 853–862.
- Boltze, M. (2020). eHighway – An Infrastructure for Sustainable Road Freight Transport. In C. Ha-Minh, D. V. Dao, F. Benboudjema, S. Derrible, D. V. K. Huynh, & A. M. Tang (Hrsg.), CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure (S. 35–44). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0802-8_4
- Boltze, M., Jiang, W., Groer, S., & Scheuven, D. (2019). Analyse der Wirksamkeit von Umweltzonen hinsichtlich Feinstaub- und Stickstoffdioxidkonzentrationen. Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum Verlag, 58(4), 219–228.
- Boltze, M., & von Möerner, M. (2018). Sammelverkehr mit autonomen Fahrzeugen im ländlichen Raum—Zur Zukunft des ÖPNV in dünn besiedelten Gebieten. Der Nahverkehr, 11, 6–13.
- Bonart, T., & Bär, J. (2020). Quantitative Betriebswirtschaftslehre Band III: Marketing und Marktforschung, Technische Zuverlässigkeit. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-27937-0>
- BR. (2023). Lkw Parkplatz: Warum sind so viele Autobahn-Parkplätze mit Lkw verstopft? <https://www.br.de/radio/bayern1/lkw-fahrer102.html>
- Braess, H.-H., & Seiffert, U. (2000). Automobil und Verkehr—Wie kann es weitergehen? In H.-H. Braess & U. Seiffert (Hrsg.), Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik (S. 642–649). Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-93873-2_11
- Buchanan, C. (1963). Titel: Traffic in Towns: A Study of the Long Term Problems of Traffic in Urban Areas. Her Majesty's Stationery Office (HMSO).
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr. (2022). Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung.
- Bundesregierung. (2002). Perspektiven für Deutschland: Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung.
- Chang, S. E., McDaniels, T. L., Mikawoz, J., & Peterson, K. (2007). Infrastructure failure interdependencies in extreme events: Power outage consequences in the 1998 Ice Storm. Natural Hazards, 41(2), 337–358. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9039-4>
- Chen, F., Taylor, N., & Kringos, N. (2015). Electrification of roads: Opportunities and challenges. Applied Energy, 150, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.067>

-
- Clarivate Analytics. (2024). Web of Science | Clarivate. <https://clarivate.com/academia-government/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-referencing/web-of-science/>
- Demirbas, A. (2007). Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy*, 35(9), 4661–4670. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.04.003>
- DIW. (1991). Verkehr in Zahlen 1991. Deutsches Institut für Wirtschaftsförderung.
- Dollinger, H. (1972). Die totale Auto Gesellschaft. Deutscher Bücherbund.
- Döring, N., & Bortz, J. (2016). Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften (5. vollständig überarbeitete, aktualisierte und erweiterte Auflage). Springer Verlag.
- DPG. (2005). Klimaschutz und Energieversorgung in Deutschland 1990 – 2020 Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. https://www.dpg-physik.de/static/info/klimastudie_2005.pdf
- du Prel, J.-B., Röhrig, B., Hommel, G., & Blettner, M. (2010). Auswahl statistischer Testverfahren. *Deutsches Ärzteblatt*, 107(19), 343–348.
- Dueñas-Osorio, L., Craig, J. I., & Goodno, B. J. (2007). Seismic response of critical interdependent networks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(2), 285–306. <https://doi.org/10.1002/eqe.626>
- DWD. (2019a). Hitzewelle Juli 2019 in Westeuropa – neuer nationaler Rekord in Deutschland. Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20190801_hitzerekord_juli2019.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- DWD. (2019b). Kräftige Gewitter über Deutschland. Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Thema des Tages. https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2019/8/19.html
- DWD. (2022). Erst ZEYNEP und dann? Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Thema des Tages. https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2022/2/18.html
- DWD. (2024a). Beaufort-Skala. Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Glossar - B. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100310&lv3=100390>
- DWD. (2024b). Climate Data Center (CDC). Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html
- DWD. (2024c). Frost. Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Glossar - F. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=100784&lv3=100916>
- DWD. (2024d). Heißer Tag. Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Glossar - H. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=101162>
- DWD. (2024e). Niederschlagsintensität. Wetter und Klima Deutscher Wetterdienst - Glossar - N. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=101906&lv2=101812>
- DWD. (2024f). Wetter und Klima—Deutscher Wetterdienst—Warnungen aktuell—Warnstufen und Farbskala. Deutscher Wetterdienst: Warnstufen und Farbskala. https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnstufen.html

- EEA. (2023). Statistics | Eurostat. Treibhausgasemissionen nach Quellsektor (Quelle: EUA). https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AIR_GGE_custom_1256039/bookmark/table?lang=de&bookmarkId=1ffd5837-18ba-4e68-9634-1eaf2d6d4023
- eHighway.SH. (2024a). Projektbeschreibung – eHighway.SH. <https://ehighway-sh.de/projektbeschreibung/>
- eHighway.SH. (2024b). Weitere eHighway-Strecken – eHighway.SH. <https://ehighway-sh.de/weitere-strecken/>
- ELISA. (2022). ELISA Ergebniszwischenbericht Band 0. https://www.autobahn.de/storage/user_upload/qbank/20220311_ELISA_Ergebniszwischenbericht_Band_0.pdf
- Ellersiek, K. (1958). Transportbedürfnisse der Unternehmung. In K. Ellersiek, Materialflußkosten im Betrieb (S. 14–14). Gabler Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-663-04344-7_3
- Environmental Protection Agency. (2016). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2014. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-04/documents/us-ghg-inventory-2016-main-text.pdf>
- EU Commission. (2020). A fundamental transport transformation [Text]. European Commission - European Commission. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_20_2329
- Europäisches Parlament. (2019). Die EU und das Übereinkommen von Paris: Auf dem Weg zur Klimaneutralität. Themen | Europäisches Parlament. <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20191115STO66603/die-eu-und-das-ubereinkommen-von-paris-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitat>
- European Commission. (2019). The European Green Deal. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions".
- European Union. (2017). Electrification of the Transport System—Studies and reports. Directorate-General for Research and Innovation, Smart, Green and Integrated Transport.
- FGSV. (2003). Hinweise zur Strategieentwicklung im dynamischen Verkehrsmanagement. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- FGSV. (2009). Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (RPS). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- Fornauf, L. (2015). Entwicklung einer Methodik zur Bewertung von Strategien für das dynamische Straßenverkehrsmanagement [Dissertation am Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik]. Technische Universität Darmstadt.
- Gather, M., & Lüttmerding, A. (2009). Abschätzung des Bedarfs von Lkw-Parkplätzen an Autobahnen. Straße und Autobahn, Kirschbaum Verlag, 12, 800–805.
- Geels, F. W. (2005a). Technological Transitions and System Innovations: A Co-evolutionary and Socio-technical Analysis. Edward Elgar Publishing.
- Geels, F. W. (2005b). The dynamics of transitions in socio-technical systems: A multi-level analysis of the transition pathway from horse-drawn carriages to automobiles (1860–1930). Technology Analysis & Strategic Management, 17(4), 445–476. <https://doi.org/10.1080/09537320500357319>
- Geels, F. W. (2007). Transformations of Large Technical Systems. <https://doi.org/10.1177/0162243906293883>

- Gohdes, A. R. (2015). Pulling the plug: Network disruptions and violence in civil conflict. *Journal of Peace Research*, 52(3), 352–367. <https://doi.org/10.1177/0022343314551398>
- Gökalp, I. (1992). On the Analysis of Large Technical Systems. *Science, Technology, & Human Values*, 17(1), 57–78.
- Götz, K., Loose, W., Schmied, M., & Schubert, S. (2002). Mobilitätsstile in der Freizeit (Abschlussbericht des Projekts “Minderung der Umweltbelastungen des Freizeit- und Tourismusverkehrs” FKZ 298 54 109).
- Gurske, D. (2022). Evaluating the Implementation of the ELISA catenary system. 14th ITS European Congress, Toulouse, 30 May-1 June 2022.
- Hacker, F., Görz, W., Bernecker, T., Speiser, J., Röckle, F., Schubert, M., & Nebauer, G. (2020). StratON: Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf>
- Hacker, F., Jöhrens, J., Gather, M., Hartwig, M., Gnann, T., Göckeler, K., Plötz, P., & Lehmann, M. (2023). Expansion Strategies for Electric Road Systems (ERS) in Europe.
- Haghani, M., Sprei, F., Kazemzadeh, K., Shahhoseini, Z., & Aghaei, J. (2023). Trends in electric vehicles research. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 123, 103881. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103881>
- Hanesch, S., Schöpp, F., Göllner-Völker, L., & Schebek, L. (2022). Life Cycle Assessment of an emerging overhead line hybrid truck in short-haul pilot operation. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130600. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130600>
- Haugen, M. J., Flynn, D., Greening, P., Tichler, J., Blythe, P., & Boies, A. M. (2022). Electrification versus hydrogen for UK road freight: Conclusions from a systems analysis of transport energy transitions. *Energy for Sustainable Development*, 68, 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.03.011>
- He, L.-Y., & Chen, Y. (2013). Thou shalt drive electric and hybrid vehicles: Scenario analysis on energy saving and emission mitigation for road transportation sector in China. *Transport Policy*, 25, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.11.006>
- Hein, C., Lerchl-Mitsch, K., & Wilke, J. K. (2023). Akzeptanz für straßengebundene Oberleitungstechnologie. *ew - Magazin für die Energiewirtschaft*, 1.
- Hessen Mobil. (2024). Interaktive Verkehrsmengenkarte. mobil.hessen.de. <https://mobil.hessen.de/verkehr/interaktive-verkehrsmengenkarte>
- Hoogma, R., Kemp, R., Schot, J., & Truffer, B. (2002). Experimenting for Sustainable Transport: The Approach of Strategic Niche Management. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203994061>
- Hoppe, M., Christ, A., Castro, A., Winter, M., & Seppänen, T.-M. (2014). Transformation in transportation? *European Journal of Futures Research*, 2(1), 45. <https://doi.org/10.1007/s40309-014-0045-6>
- Höse, S., & Huschens, S. (2022). Ereignisrisiko: Statistische Verfahren und Konzepte zur Risikoquantifizierung. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-64691-5>
- Hughes, T. P. (1969). Technological Momentum in history: Hydrogenation in Germany 1898–1933. *Past & Present*, 44(1), 106–132. <https://doi.org/10.1093/past/44.1.106>
- Hughes, T. P. (1983). Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930. 492.

- Idding, U., & Zeilinger, A. (2011). Lkw-Parkplaetze auf deutsche Autobahnen—Status quo und Potenziale / Lorry parking spaces on German motorways—Status quo and possibilities. *Straßenverkehrstechnik*, 55(4). <https://trid.trb.org/view/1122684>
- Jittrapirom, P., Caiati, V., Feneri, A.-M., Ebrahimigharehbaghi, S., González, M. J. A., & Narayan, J. (2017). Mobility as a Service: A Critical Review of Definitions, Assessments of Schemes, and Key Challenges. *Urban Planning*, 2(2), 13–25. <https://doi.org/10.17645/up.v2i2.931>
- Jöhrens, J., Lehmann, M., Bramme, M., Brauer, C., Bulenda, A., Burghard, U., Burgert, T., Doll, C., Kaßens-Noor, E., Linke, R., Öztürk, Ö., Schöpp, F., Staub, M., Werner, M., Wilke, J., & Worbs, M. (2022a). Aktuelle technische Erkenntnisse zum eHighway-System aus Feldversuch und Begleitforschung. Arbeitspapier des Arbeitskreises Technik (AK Technik) der Feldversuchs- und Forschungsprojekte.
- Jöhrens, J., Lehmann, M., Bramme, M., Brauer, C., Bulenda, A., Burghard, U., Burgert, T., Doll, C., Kaßens-Noor, E., Linke, R., Öztürk, Ö., Schöpp, F., Staub, M., Werner, M., Wilke, J., & Worbs, M. (2022b). Current technical findings on the eHighway system from field tests and accompanying research in Germany. Working paper compiled by the German cross-project Working Group on eHighway Technology (AG Technikbewertung).
- Jöhrens, J., Rücker, J., Kräck, J., Allekotte, M., Helms, H., Biemann, K., Schillinger, M., Waßmuth, V., Paufler-Mann, D., Frischmuth, F., & Gerhard, N. (2020). Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030. ifeu, Fraunhofer IEE, PTV Transport Consul.
- Kaijser, A. (2005). How to Describe Large Technical Systems and Their Changes over Time? In G. Jönson & E. Tengström (Hrsg.), *Urban Transport Development: A Complex Issue* (S. 12–19). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-27761-7_3
- Kassens-Noor, E., Dake, D., Decaminada, T., Kotval-K, Z., Qu, T., Wilson, M., & Pentland, B. (2020). Sociomobility of the 21st century: Autonomous vehicles, planning, and the future city. *Transport Policy*, 99, 329–335. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.08.022>
- KBA. (2024). Kraftfahrt-Bundesamt—Jahresbilanz. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/fz_b_jahresbilanz_node.html?yearFilter=2023
- Koç, Y., Warnier, M., Mieghem, P. V., Kooij, R. E., & Brazier, F. M. T. (2014). The impact of the topology on cascading failures in a power grid model. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 402, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.01.056>
- La Porte, T. R. (1994). Large technical systems, institutional surprises, and challenges to political legitimacy. *Technology in Society*, 16(3), 269–288. [https://doi.org/10.1016/0160-791X\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0160-791X(94)90002-7)
- Landesbetrieb SH. (2024). Straßenverkehrszählung in Schleswig-Holstein. Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein; schleswig-holstein.de - strassenbau. https://www.schleswig-holstein.de/DE/landesregierung/ministerien-behoerden/LBVSH/Aufgaben/Strassenbau/Verkehrszaehlung/strassenbau_Verkehrszaehlung
- Le Corbusier. (1973). *The Athens Charter*. CIAM; Grossman Publisher. https://jasonsedar.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/03/the_athens_charter.pdf
- Lehmann, M., Sommer, H., Hahn, G., Dietrich, K., & Schemmel, A. (2021). A.2 Energieversorgung des eHighway. In *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr—Umsetzung des System eHighway* (S. 30–66). Kirschbaum (Verlag).

- Lienig, J., & Brümmer, H. (2024). Elektronische Gerätetechnik: Grundlagen für das Entwickeln elektronischer Baugruppen und Geräte. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-68708-6>
- Linden, E., & Wittmer, A. (2018). Zukunft Mobilität: Gigatrend Digitalisierung und Megatrends der Mobilität. Center for Aviation Competence (CFAC-HSG).
- Linke, R. (2024). Integration alternativer Lkw-Antriebssysteme bei Transportunternehmen—Eintwicklung eines Bewertungsverfahrens am Beispiel von Oberleitungs-Hybrid-Lkw. [Dissertation am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik (bisher nicht veröffentlicht)]. TU Darmstadt.
- Loorbach, D., Frantzeskaki, N., & Thissen, W. (2010). Introduction to the special section: Infrastructures and transitions. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(8), 1195–1202. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.06.001>
- Madurai Elavarasan, R., Pugazhendhi, R., Irfan, M., Mihet-Popa, L., Khan, I. A., & Campana, P. E. (2022). State-of-the-art sustainable approaches for deeper decarbonization in Europe – An endowment to climate neutral vision. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112204. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112204>
- MAN Deutschland. (2024). Der MAN eTGX elektrifiziert den Fernverkehr. Der MAN eTGX elektrifiziert den Fernverkehr. <https://www.man.eu/de/de/lkw/alle-modelle/der-man-etgx/der-man-etgx/uebersicht.html>
- Mareev, I., & Sauer, D. U. (2018). Energy Consumption and Life Cycle Costs of Overhead Catenary Heavy-Duty Trucks for Long-Haul Transportation. *Energies*, 11(12), 3446. <https://doi.org/10.3390/en11123446>
- Markard, J. (2011). Transformation of Infrastructures: Sector Characteristics and Implications for Fundamental Change. *Journal of Infrastructure Systems*, 17(3), 107–117. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000056](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000056)
- Markopoulou, A., Iannaccone, G., Bhattacharyya, S., Chuah, C.-N., Ganjali, Y., & Diot, C. (2008). Characterization of Failures in an Operational IP Backbone Network. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(4), 749–762. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. <https://doi.org/10.1109/TNET.2007.902727>
- Maus, W. (Hrsg.). (2019). Zukünftige Kraftstoffe: Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58006-6>
- McCollum, D., Krey, V., Kolp, P., Nagai, Y., & Riahi, K. (2014). Transport electrification: A key element for energy system transformation and climate stabilization. *Climatic Change*, 123(3), 651–664. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0969-z>
- MDR. (2023, Februar 15). Autobahn, aber sicher! Warum Lkw-Fahrer mehr gute Parkplätze brauchen | MDR.DE. <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen-anhalt/autobahn-parkplatz-lkw-fahrer-suche-ruhezeiten-hygiene-102.html>
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens III, W. W. (1972). *The Limits to Growth*. Potomac Associates - Universe Books.
- Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg. (2021). Oberleitungs-LKW als ein Baustein für ein nachhaltiges Verkehrssystem: Das Projekt eWayBW in Baden-Württemberg. Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg.
- Morris, E. (2007). From Horse Power to Horsepower (Number 30, Spring; ACCESS). <https://www.accessmagazine.org/wp-content/uploads/sites/7/2016/07/Access-30-02-Horse-Power.pdf>

- Naisbitt, J. (1982). *Megatrends: Ten New Directions Transforming Our Lives* (6. Aufl.). Grand Central Pub.
- Noche, B., Hoene, A., & Hollmann, R. (2021). Eine Bestandsaufnahme zum Lkw-Parkplatzmangel—Aktuelle Zahlen & Trends aus Sicht der Wissenschaft. Zentrum für Logistik und Verkehr (ZLV) der Universität Duisburg-Essen. https://www.kravag-truck-parking.de/wp-content/uploads/2024/01/KRAVAG_eWhitepaper_final.pdf
- Onat, N. C., & Kucukvar, M. (2022). A systematic review on sustainability assessment of electric vehicles: Knowledge gaps and future perspectives. *Environmental Impact Assessment Review*, 97, 106867. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106867>
- Otto, M.-F. (2023). *Management politischer Risiken: Grundlagen und Werkzeuge für die unternehmerische Praxis*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-41759-8>
- Panteli, M., & Mancarella, P. (2015). Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. *Electric Power Systems Research*, 127, 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.012>
- Pel, B., & Boons, F. A. (2010). Transition through subsystem innovation? The case of traffic management. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(8), 1249–1259. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.04.001>
- Petrović, Đ., Mijailović, R., & Pešić, D. (2020). Traffic Accidents with Autonomous Vehicles: Type of Collisions, Manoeuvres and Errors of Conventional Vehicles' Drivers. *Transportation Research Procedia*, 45, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.003>
- PIARC. (2020). *Strategic Plan 2020-2023*. PIARC - The World Road Association. <https://piarc.ch/wp-content/uploads/Strategic-Plan-2020-2023-PIARC-World-Road-Association-Update-October-2020.pdf>
- Pumberger, A., Fessl, T., & Authried, N. (2011). *Lkw-Geschwindigkeitsverhalten auf Autobahnen Erhebung und Analyse der Lkw-Geschwindigkeiten auf ausgewählten Streckenabschnitten österreichischer Autobahnen*. Kammer für Arbeiter und Angestellte für Wien, Abt. Umwelt und Verkehr.
- Reinders, H., Bergs-Winkels, D., Prochnow, A., & Post, I. (Hrsg.). (2022). *Empirische Bildungsforschung: Eine elementare Einführung*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-27277-7>
- Retzko, H.-G., & Boltze, M. (1993). *Zielorientiertes Verkehrsmanagement – das Fallbeispiel FRUIT für Frankfurt am Main und die Rhein-Main-Region*. Materialien zur 24. Internationalen Verkehrswissenschaftlichen Beratung im April 1993, Budapest 1993.
- Reutter, U., Holz-Rau, C., Albrecht, J., Hülz, M., & ARL - Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft (Hrsg.). (2020). *Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels: = Interactions between mobility and spatial development in the context of social change*. ARL - Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft.
- Roesch, W. J. (2012). Using a new bathtub curve to correlate quality and reliability. *Microelectronics Reliability*, 52(12), 2864–2869. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.08.022>
- Rolison, J. J., Regev, S., Moutari, S., & Feeney, A. (2018). What are the factors that contribute to road accidents? An assessment of law enforcement views, ordinary drivers' opinions,

- and road accident records. *Accident Analysis & Prevention*, 115, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.02.025>
- Rolko, K., Linke, R., Boltze, M., Lehmann, M., Dietrich, K., & Hahn, G. (2021). A.5 Planung und Errichtung des eHighway. In *Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr—Umsetzung des System eHighway* (S. 101–124). Kirschbaum (Verlag).
- Roos, M., Kamlage, J.-H., & Schmitt, E.-J. (Hrsg.). (2022). *Klimaresiliente Kommunalpolitik: Eine Szenarioanalyse für Bochum im Jahr 2046*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-38393-0>
- Ruhrort, L. (2019). Transformation im Verkehr: Erfolgsbedingungen für verkehrspolitische Schlüsselmaßnahmen. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28002-4>
- Sahm, K. (1978). Der Einsatz von Oberleitungsbussen im öffentlichen Personennahverkehr. *Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge*, 22(6). <https://trid.trb.org/view/1052538>
- Schoblick, R. (2013). *Antriebe von Elektroautos in der Praxis: Motoren · Batterietechnik · Leistungstechnik*. Franzis Verlag.
- Schöpp, F. (2024). Quantifizierung der Treibhausgas- emissionen des oberleitungs- gebundenen Straßengüterverkehrs. <https://doi.org/10.26083/tuprints-00027013>
- Schöpp, F., Öztürk, Ö., Linke, R., Wilke, J. K., & Boltze, M. (2021). Electrification of Road Freight Transport – Energy Consumption Analysis of Overhead Line Hybrid Trucks (TRBAM-21-00961). Article TRBAM-21-00961. Transportation Research Board 100th Annual Meeting Transportation Research Board Transportation Research Board. <https://trid.trb.org/view/1759512>
- Siemens Mobility. (2015). Siemens builds first eHighway in Sweden [C2_ct_press_release]. <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-builds-first-ehighway-sweden>
- Siemens Mobility. (2017). First U.S. eHighway Demonstration Running in California [fw_Inspiring]. Siemens USA. <https://www.siemens.com/us/en/company/press/press-releases/mobility/first-us-ehighway-demonstration-running-in-california.html>
- Singh, H., & Kathuria, A. (2021). Analyzing driver behavior under naturalistic driving conditions: A review. *Accident Analysis & Prevention*, 150, 105908. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105908>
- Skorna, A., & Nießen, P. (2020). Risikoanalyse, -bewertung und -steuerung. In A. Mahnke & T. Rohlfs (Hrsg.), *Betriebliches Risikomanagement und Industrierversicherung: Erfolgreiche Unternehmenssteuerung durch ein effektives Risiko- und Versicherungsmanagement*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30421-8>
- Spaniol, M. J., & Rowland, N. J. (2019). Defining scenario. *FUTURES & FORESIGHT SCIENCE*, 1(1), e3. <https://doi.org/10.1002/ffo2.3>
- Spedition Bode. (2020). E-Highway hat Regelbetrieb aufgenommen—Spedition Bode—Transport und Logistik. <https://spedition-bode.de/de/e-highway-hat-regelbetrieb-aufgenommen>
- Speth, D., & Funke, S. Á. (2021). Comparing Options to Electrify Heavy-Duty Vehicles: Findings of German Pilot Projects. *World Electric Vehicle Journal*, 12(2), 67. <https://doi.org/10.3390/wevj12020067>

- Spiegel Online. (2019). Offenbach und Aschaffenburg besonders von Unwettern betroffen. Der Spiegel. <https://www.spiegel.de/panorama/offenbach-und-aschaffenburg-besonders-von-unwettern-betroffen-a-1282565.html>
- Stan, C. (2020). Alternative Antriebe für Automobile. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61758-8>
- Statistisches Bundesamt. (2023). Bruttoinlandsprodukt, Bruttonationaleinkommen, Volkseinkommen—Lange Reihen ab 1925.
- Statistisches Bundesamt. (2024a). Unfälle (polizeilich erfasste): Deutschland, Jahre, Unfallkategorie, Ortslage. <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/46241/table/46241-0001/chart/line>
- Statistisches Bundesamt. (2024b). Verkehrsunfälle und Verunglückte im Zeitvergleich (ab 1950). Pkw-Bestand in Deutschland 1950-2020. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Tabellen/liste-strassenverkehrsunfaelle.html>
- Taljegarda, M., Thorsona, L., Odenbergera, M., & Johnsson, F. (2020). Large-scale implementation of electric road systems: Associated costs and the impact on CO2 emissions. *International Journal of Sustainable Transportation*, 14(8), 606–619. <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1595227>
- Tamba, M., Krause, J., Weitzel, M., Ioan, R., Duboz, L., Grosso, M., & Vandyck, T. (2022). Economy-wide impacts of road transport electrification in the EU. *Technological Forecasting and Social Change*, 182, 121803. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121803>
- Tongur, S., & Engwall, M. (2017). Exploring window of opportunity dynamics in infrastructure transformation. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 25, 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2016.12.003>
- Umweltbundesamt. (2013, Juni 24). Pkw und leichte Nutzfahrzeuge [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsstandards/pkw-leichte-nutzfahrzeuge>
- Umweltbundesamt. (2015). Auswertung der Wirkung von Umweltzonen auf die Erneuerung der Fahrzeugflotten in deutschen Städten. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Umweltbundesamt. (2023). Treibhausgasminderungsziele Deutschlands [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands>
- Umweltbundesamt. (2024a). Aktualisierung des „Daten- und Rechenmodells: „Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMODO)“ und der Datenbank „Mobile Maschinen und Geräte (TREMODO-MM)“ 2022 (76/2024). Ifeu, Umweltbundesamt.
- Umweltbundesamt. (2024b). Treibhausgas-Projektionen 2024 – Ergebnisse kompakt. Umweltbundesamtes.
- UNCED. (1992). Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development. Rio Declaration on Environment and Development. Statement of Forest Principles. United Nations Conference on Environment and Development (UNCED). https://www.un.org/depts/german/conf/agenda21/agenda_21.pdf

- United Nations. (1997). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Vogel, P. U. B. (2021). GMP-Risikoanalysen. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-35208-0>
- von Carlowitz, H. C. (1713). Sylvicultura oeconomica—Anweisung zur wilden Baum-Zucht. Johann Friedrich Braun.
- Walker, D. A. M., Steiner, T., Cachelin, D. J., Höin, R., & Keller, P. (2012). Die Zukunft der akustischen Landschaft Schweiz – eine Analyse von langfristigen Megatrends. September, Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- Wang, Q., Berlin, D., & Meijer, S. (2019). Uncovering stakeholder influences in electric road systems using two assessment methods: The case of eRoadArlanda. Research in Transportation Business & Management, 33, 100422. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2019.100422>
- Watson, P. L., Spaulding, A., Koukoula, M., & Anagnostou, E. (2022). Improved quantitative prediction of power outages caused by extreme weather events. Weather and Climate Extremes, 37, 100487. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100487>
- Wauri, D. (2024). Verkehrsverhalten und Verkehrsablauf auf Fernstraßen mit eHighway-System. <https://doi.org/10.26083/TUPRINTS-00026899>
- WCED. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. World Commission on Environment and Development (WCED). <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- Widgren, F., Helms, H., Hacker, F., Andersson, M., Gnann, T., & Plötz, P. (2022). Ready to go? Technology Readiness and Life-cycle Emissions of Electric Road Systems (S. 12). Discussion paper from the COLLERS2 project.
- Wilke, J. K., Schöpp, F., Linke, R., & Kassens-Noor, E. (2024). Hinweise zum Ausbau einer Oberleitungsinfrastruktur auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum Verlag.
- Wilson, J. R., Farrington-Darby, T., Cox, G., Bye, R., & Hockey, G. R. J. (2007). The railway as a socio-technical system: Human factors at the heart of successful rail engineering. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit, 221(1), 101–115. <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT78>
- Wissenschaftliche Beirat. (2012). Herausforderungen bei der Entwicklung der Elektromobilität in Deutschland. Straßenverkehrstechnik, 1, 11–19.
- Wołek, M., Wolański, M., Bartłomiejczyk, M., Wyszomirski, O., Grzelec, K., & Hebel, K. (2021). Ensuring sustainable development of urban public transport: A case study of the trolleybus system in Gdynia and Sopot (Poland). Journal of Cleaner Production, 279, 123807. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123807>
- Xing, L., & Levitin, G. (2013). BDD-based reliability evaluation of phased-mission systems with internal/external common-cause failures. Reliability Engineering & System Safety, 112, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.12.003>
- Zahlenbilder. (2020). Pkw-Bestand in Deutschland 1950-2020. 06.
- Zembrot, M. (2018). Hybrid-Oberleitungs-Lkw – Die Elektrifizierung der Bundesfernstraßen als Möglichkeit zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs. Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum Verlag, 62(6), 433–442.

-
- Zhang, B. (2024). Wie wir mit Unsicherheiten umgehen. Versett.
<https://versett.com/writing/undefined>
- Zhao, P. (2010). Sustainable urban expansion and transportation in a growing megacity: Consequences of urban sprawl for mobility on the urban fringe of Beijing. *Habitat International*, 34(2), 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2009.09.008>
- ZIV. (2000). Verknüpfung von Strategien, Maßnahmen und Systemen des regionalen und städtischen Verkehrsmanagements. Zentrum für integrierte Verkehrssysteme.
- Zukunftsinstitut. (2024). Die Megatrend-Map.
<https://www.zukunftsinstitut.de/zukunftsthemen/die-megatrend-map>

Verzeichnis der Gesetze und Verordnungen

- BNatSchG: Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 3. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 225) geändert worden ist.
- EmoG: Elektromobilitätsgesetz vom 5. Juni 2015 (BGBl. I S. 898), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 34 des Gesetzes vom 20. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2752) geändert worden ist.
- EnWG: Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 41 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 323) geändert worden ist.
- Gesetz über die Erhebung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen mit schweren Nutzfahrzeugen (Autobahnmautgesetz für schwere Nutzfahrzeuge - ABMG) neugefasst durch B. v. 02.12.2004 BGBl. I S. 3122; aufgehoben durch Artikel 6 Nr. 1 G. v. 12.07.2011 BGBl. I S. 1378.
- KSG: Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 235) geändert worden ist
- LSV: Ladesäulenverordnung vom 9. März 2016 (BGBl. I S. 457), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 17. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 156) geändert worden ist.
- Richtlinie (EWG) 91/441: Richtlinie 91/441/EWG des Rates vom 26. Juni 1991 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Luftverschmutzung durch Emissionen von Kraftfahrzeugen (L 242, S. 1–106).
- Richtlinie 2014/94/EU: Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (L 307, S. 1–20).
- StVO: Straßenverkehrs-Ordnung vom 6. März 2013 (BGBl. I S. 367), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 299) geändert worden ist.

Anhang

A.I DTV-Schwerverkehr an ausgewählten Zählstellen in Abschnitt 2.1.1

Tabelle 40 zeigt die für die Abbildung 3 aufbereiteten Werte zum DTV des Schwerverkehrs an den ausgewählten Zählstellen entlang der Bundesautobahn A5. Die Auswahl der Zählstellen ist bedingt durch die Datenverfügbarkeit. Für alle fünf gewählten Zählstellen sind die historischen Daten bis ins Jahr 2003 abrufbar.

Tabelle 40: Zählwerte zum DTV-Schwerverkehr sowie die relative Veränderung bezogen auf das Basisjahr 2003 (berechnet) ausgewählter Zählstellen auf der Bundesautobahn A5 (Daten nach BAST (2024), eigene Darstellung).

Zählstelle:	AD Hattenbach 2		Alsfeld		Reiskirchen		AK Frankfurt NW (N)		Heppenheim	
ID	6810		6811		6815		6821		6940	
Jahr	DTV	$\frac{DTV_i}{DTV_{2003}}$	DTV	$\frac{DTV_i}{DTV_{2003}}$	DTV	$\frac{DTV_i}{DTV_{2003}}$	DTV	$\frac{DTV_i}{DTV_{2003}}$	DTV	$\frac{DTV_i}{DTV_{2003}}$
2003	9041	1,000	8275	1,000	6912	1,000	12890	1,000	7993	1,000
2004	---	---	8354	1,010	---	---	---	---	---	---
2005	---	---	9102	1,100	7063	1,022	---	---	8999	1,126
2006	---	---	9871	1,193	7646	1,106	---	---	9709	1,215
2007	10117	1,119	10727	1,296	---	---	15798	1,226	10116	1,266
2008	10407	1,151	10313	1,246	7466	1,080	15385	1,194	10297	1,288
2009	9391	1,039	9537	1,153	6798	0,984	13784	1,069	9275	1,160
2010	9937	1,099	10328	1,248	7131	1,032	14749	1,144	9307	1,164
2011	9966	1,102	10485	1,267	7258	1,050	15454	1,199	9202	1,151
2012	9562	1,058	10048	1,214	7067	1,022	15833	1,228	9375	1,173
2013	9614	1,063	10058	1,215	7128	1,031	15689	1,217	8193	1,025
2014	9898	1,095	10379	1,254	7323	1,059	16318	1,266	8256	1,033
2015	10111	1,118	10583	1,279	7478	1,082	16878	1,309	8215	1,028
2016	10722	1,186	11101	1,342	7763	1,123	17427	1,352	7571	0,947
2017	11331	1,253	11731	1,418	8012	1,159	17887	1,388	7985	0,999
2018	12414	1,373	12552	1,517	8487	1,228	18439	1,430	7785	0,974
2019	---	---	12465	1,506	8466	1,225	18154	1,408	7784	0,974
2020	---	---	12465	1,506	8225	1,190	16674	1,294	7675	0,960
2021	11931	1,320	13366	1,615	8803	1,274	17807	1,381	8530	1,067

Hinweis: Fehlende Werte zum DTV des Schwerverkehrs basieren auf fehlenden Daten der BAST.

A.II Kategoriale Zuordnung der Ausfallursachen in Abschnitt 5.5

Tabelle 41: Zuordnung der Ausfallursachen (N = 35) zu den identifizierten Ursachenkategorien im Betrachtungszeitraum.

Kategorie	Ausfallursache (N = 35)	Ausfalldauer in Stunden
Störungsbedingte Ausfallursachen	Defekte Isolatoren - Störung an der Oberleitungsanlage	1183,96
	Austausch der Isolatoren	948,51
	Störung an der Oberleitungsanlage	6,14
	Austausch Sensoren nach witterungsab. Ausfall	0,10
Wartungsbedingte Ausfallursachen	Inspektion und Wartung	249,88
	Wartungsarbeiten des Energieversorgungsnetzbetreibers	22,85
Unfallbedingte Ausfallursachen	Unfallbedingte Ausschaltung der Anlage	3112,82
	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	814,88
	Reparaturarbeiten nach Unfall	67,08
Witterungsbedingte Ausfallursachen	Sturmschaden an der Oberleitung	174,72
	Witterungsbedingte Abschaltung	129,88
	Kritische Temperatur in der Anlage (Manuelle Abschaltung)	22,24
Arbeitsstättenbedingte Ausfallursachen	Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	542,4
	Restarbeiten	80,00
	Arbeiten der Autobahnmeisterei ¹	32,92
	Brückenprüfung	25,31
	Montage der Kamerastandorte	16,98
	Mäharbeiten Straßenrand ¹	16,38
	Reparaturarbeiten Straßenbelag	16,00
	Ausbesserungsarbeiten Brückenbauwerk ²	13,05
	Instandhaltungsarbeiten an Bauwerken ²	6,16
	Arbeiten an den Bauwerken ²	2,74
	Anbringen von Beschilderung	1,58
	Inspektionsarbeiten an den Brücken	1,15
	Arbeiten am Kamerasystem	0,38
Betriebs- und systembedingte Ausfallursachen	Übergabe Anlage an die Autobahn GmbH	747,98
	IT Arbeiten	190,06
	Urlaub / Ferien (Kein Anlagenbetrieb)	143,08
	Störung in der Betriebszentrale	132,28
	Feiertag	96,00
	Kein Anlagenbetrieb	79,40
	Verspätetes Einschalten / verfrühtes Ausschalten	16,61
	Brückentag	16,00
	Arbeiten am Energieversorgungsnetz	10,62
	Erfordernis im Betriebsablauf	0,21
Summe:		8920,35

¹Zusammengefasst zu: Arbeiten der Autobahnmeisterei (bspw. Mäharbeiten); ²zusammengefasst zu: Ausbesserungs- und Instandhaltungsarbeiten an Bauwerken

A.III Liste der Betriebsunterbrechungen in Abschnitt 6.1

In Tabelle 42 sind die im Betrachtungszeitraum aufgetretenen Betriebsunterbrechungen aufgeführt. Insgesamt wurden 151 Ereignisse erfasst. Die gesamte Ausfalldauer (bei doppelter Betrachtung der Ausfalldauer bei beidseitiger Abschaltung der Oberleitungsanlage) beträgt 8919 Stunden 4 Minuten und 47 Sekunden (8919:04:47). Dies entspricht einer gesamten Ausfalldauer von 8919,08 Stunden.

Tabelle 42: Liste der erfassten Betriebsunterbrechungen im Betrachtungszeitraum.

ID	Abschaltung (UTC)		Einschaltung (UTC)		Ursache	Störungsart	Fahrt- richtung	Ausfall- dauer
	Datum	Uhrzeit	Datum	Uhrzeit				
1	06.05.2019	06:00:00	06.05.2019	06:26:35	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	0:26:35
2	10.05.2019	06:00:00	10.05.2019	14:00:00	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	beide	8:00:00
3	13.05.2019	06:00:00	13.05.2019	14:00:00	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	beide	8:00:00
4	14.05.2019	06:00:00	14.05.2019	06:28:54	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	0:28:54
5	15.05.2019	06:00:00	15.05.2019	06:40:06	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	0:40:06
6	16.05.2019	06:00:00	16.05.2019	14:00:00	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	beide	8:00:00
7	17.05.2019	06:00:00	17.05.2019	14:00:00	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	beide	8:00:00
8	20.05.2019	06:00:00	20.05.2019	08:13:41	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	2:13:41
9	21.05.2019	06:00:00	21.05.2019	06:18:15	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	0:18:15
10	22.05.2019	06:00:00	22.05.2019	06:00:23	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	0:00:23
11	24.05.2019	06:00:00	24.05.2019	06:04:59	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	0:04:59
12	27.05.2019	06:00:00	27.05.2019	08:00:22	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	2:00:22
13	30.05.2019	06:00:00	30.05.2019	14:00:00	Feiertag	geplant	beide	8:00:00
14	31.05.2019	06:00:00	31.05.2019	14:00:00	Brückentag	geplant	beide	8:00:00
15	03.06.2019	06:00:00	07.06.2019	14:00:00	Restarbeiten	geplant	beide	40:00:00
16	10.06.2019	06:00:00	10.06.2019	14:00:00	Feiertag	geplant	beide	8:00:00
17	20.06.2019	06:00:00	20.06.2019	14:00:00	Feiertag	geplant	beide	8:00:00
18	25.06.2019	06:00:00	25.06.2019	06:28:36	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	0:28:36

19	25.06.2019	-	25.06.2019	-	Zwischenschaltungen	ungeplant	beide	1:13:24
20	12.07.2019	13:38:06	12.07.2019	14:00:00	Verfrühtes Ausschalten	ungeplant	beide	0:21:54
21	15.07.2019	06:43:51	16.07.2019	11:00:50	Unfallbedingte Ausschaltung der Anlage	ungeplant	beide	12:16:59
22	25.07.2019	07:09:40	25.07.2019	14:00:00	Störung im Unterwerk	ungeplant	beide	6:50:20
23	26.07.2019	09:43:14	26.07.2019	14:00:00	Störung im Unterwerk	ungeplant	beide	4:16:46
24	05.08.2019	09:05:24	05.08.2019	10:10:15	Störung in der Betriebszentrale	ungeplant	beide	1:04:51
25	19.08.2019	06:00:00	02.09.2019	13:21:25	Sturmschaden an der Oberleitung	ungeplant	beide	87:21:25
26	09.09.2019	06:00:00	09.09.2019	06:02:12	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	0:02:12
27	03.10.2019	06:00:00	03.10.2019	14:00:00	Feiertag	geplant	beide	8:00:00
28	09.10.2019	06:00:00	09.10.2019	06:18:43	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	0:18:43
29	17.10.2019	13:59:17	17.10.2019	14:00:00	Verfrühtes Ausschalten	ungeplant	beide	0:00:43
30	21.10.2019	13:58:58	21.10.2019	14:00:00	Verfrühtes Ausschalten	ungeplant	beide	0:01:02
31	06.11.2019	07:00:00	08.11.2019	07:19:23	Inspektion und Wartung	geplant	beide	16:19:23
32	20.11.2019	14:41:45	20.11.2019	15:00:00	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	0:18:15
33	22.11.2019	07:00:00	22.11.2019	08:18:28	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	1:18:28
34	26.11.2019	07:00:00	26.11.2019	09:49:00	Störung an der Oberleitungsanlage	ungeplant	beide	3:04:12
35	29.11.2019	07:00:00	29.11.2019	15:00:00	Reparaturarbeiten Straßenbelag	geplant	beide	8:00:00
36	05.12.2019	07:00:00	05.12.2019	08:19:34	Verspätetes Einschalten	ungeplant	beide	1:19:34
37	11.12.2019	12:02:05	11.12.2019	13:37:26	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	1:35:21
38	23.12.2019	07:00:00	24.12.2019	15:00:00	Urlaub / Ferien (Kein Anlagenbetrieb)	geplant	beide	16:00:00
39	25.12.2019	07:00:00	25.12.2019	15:00:00	Feiertag	geplant	beide	8:00:00
40	26.12.2019	07:00:00	26.12.2019	15:00:00	Feiertag	geplant	beide	8:00:00
41	27.12.2019	07:00:00	31.12.2019	15:00:00	Urlaub / Ferien (Kein Anlagenbetrieb)	geplant	beide	24:00:00

41b	01.01.2020	00:00:00	02.01.2020	07:32:29	Urlaub / Ferien (Kein Anlagenbetrieb)	geplant	beide	31:32:29
42	24.01.2020	10:10:37	14.02.2020	07:23:02	Unfallbedingte Ausschaltung der Anlage	ungeplant	beide	501:12:25
43	14.02.2020	07:23:02	06.05.2020	15:04:55	Unfallbedingte Ausschaltung der Anlage	ungeplant	Darmstadt	1975:41:53
44	20.02.2020	08:48:24	20.02.2020	12:57:30	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	Frankfurt	4:09:06
45	14.03.2020	17:56:14	17.03.2020	07:01:37	Unfallbedingte Ausschaltung der Anlage	ungeplant	Frankfurt	61:05:23
46	20.03.2020	18:45:45	23.03.2020	08:12:51	Unfallbedingte Ausschaltung der Anlage	ungeplant	Frankfurt	61:27:06
47	01.04.2020	07:50:13	01.04.2020	09:51:49	Reparaturarbeiten nach Unfall	geplant	Frankfurt	2:01:36
48	27.04.2020	06:44:34	27.04.2020	12:49:01	Reparaturarbeiten nach Unfall	geplant	Frankfurt	6:04:27
49	04.05.2020	04:06:17	06.05.2020	15:04:55	Reparaturarbeiten nach Unfall	geplant	Frankfurt	58:58:38
50	17.05.2020	15:25:36	18.05.2020	05:27:04	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	14:01:28
51	27.05.2020	15:30:31	27.05.2020	17:35:09	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	2:04:38
52	29.06.2020	17:48:37	29.06.2020	20:08:09	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	2:19:32
53	01.07.2020	07:01:33	01.07.2020	16:57:41	Inspektion und Wartung	geplant	beide	9:56:08
54	02.07.2020	03:34:00	02.07.2020	13:29:16	Inspektion und Wartung	geplant	beide	9:55:16
55	13.07.2020	18:54:26	14.07.2020	05:15:29	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	10:21:03
56	05.08.2020	01:01:06	05.08.2020	07:25:26	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	6:24:20
57	11.08.2020	16:24:25	12.08.2020	07:11:31	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	14:47:06
58	20.08.2020	11:54:06	20.08.2020	13:20:29	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	1:26:23
59	23.10.2020	11:26:59	23.10.2020	13:22:48	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	1:55:49
60	24.10.2020	06:00:44	24.10.2020	15:38:17	Störung in der Betriebszentrale	geplant	beide	9:37:33
61	28.10.2020	06:36:54	28.10.2020	08:01:24	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	1:24:30
62	31.10.2020	06:39:16	31.10.2020	16:57:32	Störung in der Betriebszentrale	geplant	beide	10:18:16
63	06.11.2020	07:08:57	06.11.2020	07:15:47	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	beide	0:06:50

64	23.11.2020	05:20:17	23.11.2020	15:27:49	Inspektion und Wartung	geplant	beide	10:07:32
65	25.11.2020	05:11:39	26.11.2020	15:02:22	Inspektion und Wartung	geplant	beide	33:50:44
66	30.11.2020	23:44:25	01.12.2020	09:02:23	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	9:17:57
67	05.12.2020	07:02:29	05.12.2020	12:36:27	Ausbesserungsarbeiten Brückenbauwerk	geplant	Frankfurt	5:33:58
68	12.12.2020	07:02:29	12.12.2020	14:24:49	Ausbesserungsarbeiten Brückenbauwerk	geplant	Frankfurt	7:22:20
69	16.12.2020	09:20:31	16.12.2020	13:04:28	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	3:43:57
70	20.12.2020	19:43:00	21.12.2020	06:49:25	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	11:06:25
71	21.12.2020	14:14:38	21.12.2020	15:45:13	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	1:30:35
72	30.12.2020	17:15:35	31.12.2020	00:00:00	Übergabe Anlage an die Autobahn GmbH	geplant	beide	30:44:25
72b	01.01.2021	00:00:00	15.01.2021	07:14:44	Übergabe Anlage an die Autobahn GmbH	geplant	beide	343:14:44
73	17.01.2021	15:40:53	17.01.2021	15:56:45	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	beide	0:15:52
74	19.01.2021	06:30:28	19.01.2021	15:38:04	Montage Kamerastandorte	geplant	Darmstadt	9:07:36
75	19.01.2021	17:30:56	19.01.2021	21:06:58	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	3:36:02
76	26.01.2021	06:31:19	26.01.2021	10:46:51	Montage Kamerastandorte	geplant	Darmstadt	4:15:32
77	12.02.2021	13:27:29	12.02.2021	16:27:19	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	2:59:50
78	15.02.2021	06:50:02	15.02.2021	07:04:09	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	beide	0:14:07
79	17.02.2021	16:48:31	17.02.2021	20:54:19	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	4:05:48
80	19.02.2021	12:55:19	19.02.2021	13:06:10	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	beide	0:10:51
81	22.02.2021	21:06:18	22.02.2021	21:06:29	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	Frankfurt	0:00:11
82	15.03.2021	14:00:55	09.04.2021	05:59:49	Sicherheitsbedingte Abschaltung bis Austausch	ungeplant	beide	591:58:54
83	13.04.2021	09:09:00	13.04.2021	09:15:10	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	beide	0:06:10
84	27.05.2021	15:44:23	31.05.2021	14:46:08	Störung in der Betriebszentrale	geplant	beide	95:01:45
85	29.06.2021	11:26:59	29.06.2021	11:29:59	Kein Anlagenbetrieb	geplant	beide	0:03:00

86	23.07.2021	05:33:55	23.07.2021	13:47:37	Mäharbeiten Straßenrand	geplant	Frankfurt	8:13:42
87	24.07.2021	17:10:39	25.07.2021	10:50:06	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	17:39:27
88	26.07.2021	05:36:34	26.07.2021	13:41:03	Mäharbeiten Straßenrand	geplant	Darmstadt	8:04:29
89	09.08.2021	05:09:58	11.08.2021	12:15:04	Unfallbedingte Ausschaltung der Anlage	ungeplant	beide	55:05:06
90	13.08.2021	16:08:57	14.08.2021	05:34:44	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	13:25:47
91	15.09.2021	09:31:15	16.09.2021	08:53:46	Störung in der Betriebszentrale	ungeplant	beide	23:22:31
92	18.10.2021	09:33:44	18.10.2021	11:07:02	Anbringen von Beschilderung	geplant	Frankfurt	1:33:18
93	21.10.2021	12:10:07	21.10.2021	14:28:07	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	2:18:00
94	01.11.2021	01:51:14	01.11.2021	09:26:53	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	7:35:39
95	10.11.2021	15:58:11	11.11.2021	07:46:31	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	15:48:20
96	16.11.2021	16:10:25	17.11.2021	13:55:32	Störung in der Betriebszentrale	ungeplant	beide	21:45:07
97	22.11.2021	06:53:53	27.11.2021	15:45:17	Austausch der Isolatoren	geplant	Frankfurt	128:51:24
98	27.11.2021	15:04:11	01.12.2021	07:10:04	Austausch der Isolatoren	geplant	Darmstadt	88:05:53
99	29.11.2021	09:40:36	29.11.2021	14:44:52	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	Frankfurt	5:04:16
100	01.12.2021	07:10:04	13.12.2021	11:04:42	Austausch der Isolatoren	geplant	beide	291:54:38
101	13.12.2021	11:04:42	19.12.2021	14:46:54	Austausch der Isolatoren	geplant	Darmstadt	147:42:12
102	06.01.2022	08:52:54	06.01.2022	15:24:58	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	6:32:04
103	15.01.2022	06:30:48	15.01.2022	12:37:54	Wartungsarbeiten des Energieversorgungs- netzbetreibers	geplant	beide	6:07:06
104	19.01.2022	07:08:58	19.01.2022	17:42:54	Wartungsarbeiten des Energieversorgungs- netzbetreibers	geplant	Darmstadt	10:33:56
105	10.02.2022	07:41:21	10.02.2022	16:18:20	Arbeiten der Autobahnmeisterei	geplant	beide	8:36:59
106	11.02.2022	06:30:45	11.02.2022	14:21:14	Arbeiten der Autobahnmeisterei	geplant	beide	7:50:29
107	18.02.2022	14:02:58	21.02.2022	06:59:20	Witterungsbedingte Abschaltung	geplant	beide	64:56:22
108	20.03.2022	05:42:14	21.03.2022	11:34:50	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	29:52:36

109	22.04.2022	07:20:43	22.04.2022	10:26:59	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	3:06:16
110	11.05.2022	12:23:29	11.05.2022	14:58:02	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	2:34:33
111	16.05.2022	12:44:48	16.05.2022	15:21:46	Einarbeitung Mitarbeiter	geplant	Darmstadt	2:36:58
112	16.05.2022	13:47:51	16.05.2022	15:21:49	Einarbeitung Mitarbeiter	geplant	Frankfurt	1:33:58
113	17.05.2022	05:45:59	17.05.2022	05:51:09	Einarbeitung Mitarbeiter	geplant	Darmstadt	0:05:10
114	17.05.2022	05:46:03	17.05.2022	05:48:19	Einarbeitung Mitarbeiter	geplant	Frankfurt	0:02:16
115	06.06.2022	08:18:35	06.06.2022	16:11:01	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	7:52:26
116	08.06.2022	07:39:23	08.06.2022	08:00:24	Arbeiten am Kamerasystem	geplant	Darmstadt	0:21:01
117	13.06.2022	07:33:50	13.06.2022	10:20:27	Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	geplant	Darmstadt	2:46:37
118	15.06.2022	08:50:13	15.06.2022	09:36:17	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	Frankfurt	0:46:04
119	21.06.2022	04:36:16	22.06.2022	15:43:36	Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	geplant	Darmstadt	35:07:20
120	21.06.2022	15:26:36	22.06.2022	05:53:31	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	Frankfurt	14:26:55
121	30.06.2022	11:14:49	30.06.2022	13:09:30	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	Darmstadt	1:54:41
122	02.07.2022	22:32:27	04.07.2022	14:45:45	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	40:13:18
123	05.07.2022	05:00:07	06.07.2022	12:53:16	Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	geplant	Darmstadt	31:53:09
124	12.07.2022	05:42:01	12.07.2022	06:00:50	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	Darmstadt	0:18:49
125	14.07.2022	06:06:47	14.07.2022	16:47:28	Inspektion und Wartung	geplant	beide	10:40:41
126	24.07.2022	14:11:41	25.07.2022	07:00:35	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	16:48:54
127	27.07.2022	04:27:14	27.07.2022	07:05:44	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	2:38:30
128	29.07.2022	00:15:57	29.07.2022	05:00:56	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	4:44:59
129	30.07.2022	00:00:03	30.07.2022	05:00:36	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	5:00:33
130	23.08.2022	05:13:21	24.08.2022	14:23:58	Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	geplant	Darmstadt	33:10:37
131	24.08.2022	18:18:58	25.08.2022	09:54:54	Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	geplant	Darmstadt	15:35:56

132	24.08.2022	14:20:28	25.08.2022	09:55:06	Brückenprüfung	geplant	Frankfurt	19:34:38
133	25.08.2022	14:08:26	26.08.2022	09:42:09	Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	geplant	Darmstadt	19:33:43
134	26.08.2022	03:59:10	26.08.2022	09:42:22	Brückenprüfung	geplant	Frankfurt	5:43:12
135	15.09.2022	08:35:20	15.09.2022	13:53:42	Arbeiten am Energieversorgungsnetz	geplant	beide	5:18:22
136	19.09.2022	00:38:54	19.09.2022	07:15:37	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	6:36:43
137	21.09.2022	05:09:02	23.09.2022	10:41:32	Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	geplant	Darmstadt	53:32:30
138	26.09.2022	09:21:48	26.09.2022	10:44:12	Arbeiten an den Bauwerken	geplant	beide	1:22:24
139	04.10.2022	15:03:35	13.10.2022	14:27:24	Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	geplant	Darmstadt	215:23:49
140	12.10.2022	06:33:06	13.10.2022	14:27:26	Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	geplant	Frankfurt	31:54:20
141	27.10.2022	12:15:36	27.10.2022	14:20:29	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	2:04:53
142	31.10.2022	06:00:09	03.11.2022	06:22:22	Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	geplant	Darmstadt	72:22:13
143	07.11.2022	10:00:03	08.11.2022	16:27:23	Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	geplant	Darmstadt	30:27:20
144	22.11.2022	08:31:39	22.11.2022	14:38:53	Instandhaltungsarbeiten an Bauwerken	geplant	Frankfurt	6:07:14
145	02.12.2022	06:58:31	02.12.2022	10:12:05	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	3:13:34
146	04.12.2022	16:08:22	04.12.2022	16:15:28	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	beide	0:07:06
147	07.12.2022	08:30:20	07.12.2022	09:36:18	Inspektionsarbeiten an den Brücken	geplant	Darmstadt	1:05:58
148	14.12.2022	05:24:56	14.12.2022	05:29:08	Kein Anlagenbetrieb	ungeplant	beide	0:04:12
149	20.12.2022	06:58:27	21.12.2022	17:04:11	Inspektion und Wartung	geplant	beide	34:05:44
150	26.12.2022	06:29:58	27.12.2022	06:30:06	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	24:00:08
151	30.12.2022	16:59:34	31.12.2022	00:00:00	Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	ungeplant	beide	31:00:26

A.IV Werte zur Bestimmung der limitierenden Ausfallursachen zu Abschnitt 6.1

In Tabelle 43 sind die Häufigkeit, Ausfalldauer und mittlere Ausfalldauer der jeweiligen Ausfallursachen für die Abbildung 29 und die Abbildung 30 dargestellt.

Tabelle 43: Häufigkeit, Ausfalldauer und mittlere Ausfalldauer der identifizierten Ausfallursachen (n = 32) sowie der kategorisierten Ausfallursachen.

Ausfallursache	Häufigkeit [-]	Ausfalldauer [h]	Mittlere Ausfalldauer [h]
Restarbeiten	1	80,00	80,00
Reparaturarbeiten Straßenbelag	1	16,00	16,00
Montage der Kamerastandorte	2	13,39	6,69
Anbringen von Beschilderung	1	1,56	1,56
Arbeiten am Kamerasystem	1	0,35	0,35
Arbeiten bzgl. der Erweiterung der Anlage	11	541,79	49,25
Brückenprüfung	2	25,30	12,65
Inspektionsarbeiten an den Brücken	1	1,10	1,10
Arbeiten der Autobahnmeisterei	4	49,22	12,30
Ausbesserung- und Instandhaltungsarbeiten an Bauwerken	4	21,81	5,45
Arbeitsstättenbedingte Ausfallursachen	28	750,50	26,80
Verspätetes Einschalten / verfrühtes Ausschalten	15	17,53	1,17
Kein Anlagenbetrieb	20	78,33	3,92
Feiertag	6	96,00	16,00
Brückentag	1	16,00	16,00
Störung in der Betriebszentrale	5	132,28	26,46
Urlaub / Ferien (Kein Anlagenbetrieb)	2	143,08	71,54
Übergabe Anlage an die Autobahn GmbH	1	747,97	747,97
Erfordernis im Betriebsablauf	1	0,21	0,21
IT Arbeiten	1	190,06	190,06
Arbeiten am Energieversorgungsnetz	1	10,61	10,61
Betriebs- und systembedingte Ausfallursachen	53	1432,07	27,02
Inspektion und Wartung	7	249,85	35,69
Wartungsarbeiten des Energieversorgungsnetzbetreibers	2	22,80	11,40
Wartungsbedingte Ausfallursachen	9	272,65	30,29
Störung an der Oberleitungsanlage	1	6,14	6,14
Defekte Isolatoren - Störung an der Oberleitungsanlage	1	1183,96	1183,96
Austausch Sensoren nach witterungsab. Ausfall	1	0,10	0,10
Austausch der Isolatoren	4	948,48	237,12
Störungsbedingte Ausfallursachen	7	2138,68	305,53
Unfallbedingte Ausschaltung der Anlage	4	3112,85	778,21
Abschaltung Gefahrenabwehrbehörden	43	818,42	19,03
Reparaturarbeiten nach Unfall	3	67,08	22,36
Unfallbedingte Ausfallursachen	50	3998,34	79,97
Kritische Temperatur in der Anlage (Manuelle Abschaltung)	2	22,24	11,12
Sturmschaden an der Oberleitung	1	174,71	174,71
Witterungsbedingte Abschaltung	1	129,88	129,88
Witterungsbedingte Ausfallursachen	4	326,83	81,71

A.V Darstellung der Werte für Abbildung 31 (HeatMap) in Abschnitt 6.2

Für die Erstellung der Abbildung 31 auf Seite 86 wurden die Verkehrsdaten auf den Autobahnen der BAST (2024), speziell die Daten der Zählstelle Erzhausen (6922), verwendet. Die ermittelten täglichen Verkehrsstärken für den Schwerverkehr sind in den nachfolgenden Tabellen für die Zeiträume von Januar bis April (vgl. Tabelle 44), von Mai bis August (vgl. Tabelle 45) und von September bis Dezember (vgl. Tabelle 46) dargestellt.

Tabelle 44: Absolute Werte des Schwerverkehrsaufkommens je Wochentag im Jahr 2021 an der Zählstelle Erzhausen (6922) der Monate Januar bis April. (Daten nach BAST (2024), eigene Ermittlung und Darstellung).

Fahrt- richtung Monat → Wochentag ↓	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord
	Januar		Februar		März		April	
01	456	385	9923	9942	9991	9536	11044	8762
02	1279	1223	11408	9818	12083	10857	4500	3090
03	827	797	10893	10351	12193	11257	1596	1604
04	6618	6741	11659	10316	12542	10986	567	426
05	8797	7707	10208	8419	10914	8860	1529	1611
06	6783	7386	2749	3504	3060	3612	8202	8201
07	9024	8112	934	854	1257	1103	11253	13282
08	8356	7316	5718	3377	9928	9723	13179	12337
09	2381	3255	8865	8409	11251	10785	11629	9657
10	1002	912	10477	11115	12319	11297	3795	4308
11	9019	9702	11869	10542	12559	11198	1283	1237
12	10604	9733	10632	8356	11140	8976	10794	10797
13	10755	10218	2860	3640	2967	3703	11792	11434
14	10836	9942	1080	928	1133	1117	12152	11307
15	9521	8208	9965	9349	10125	9921	11984	11042
16	2539	3213	11550	10519	12108	11665	10798	9170
17	983	862	11365	10931	12040	11369	2977	3360
18	9489	9744	11725	10733	13008	11285	1322	1198
19	11842	10798	9914	8623	11258	8983	10691	10341
20	11759	11053	2827	3531	3098	3719	11937	11619
21	11643	10531	1022	1026	1205	1123	12212	11366
22	10113	8601	10174	10081	10186	9557	11996	11000
23	2563	3402	11656	10408	12116	11196	10654	9237
24	1031	975	11477	10489	12067	11757	2881	3283
25	9830	10195	12048	10606	13252	11770	1293	1142
26	11465	10566	10622	8727	11667	9499	10463	9739
27	11093	10937	2948	3499	3478	4208	11665	11428
28	11289	10361	1135	1043	1480	1356	11827	10907
29	9489	8590			10608	10217	11742	10705
30	2790	3559			12639	12042	9919	8720
31	1064	987			12446	11038		

Tabelle 45: Absolute Werte des Schwerverkehrsaufkommens je Wochentag im Jahr 2021 an der Zählstelle Erzhausen (6922) der Monate Mai bis August. (Daten nach BASt (2024), eigene Ermittlung und Darstellung).

Fahrt- richtung Monat → Wochentag ↓	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord
	Mai		Juni		Juli		August	
01	1863	2449	11809	11518	11828	10849	1681	1463
02	1271	1161	12007	11087	10662	9420	10057	9701
03	10105	9683	3991	4363	3024	3131	10990	10628
04	11118	10756	9588	8135	1537	1224	11436	10369
05	11556	11115	3054	3413	10306	10072	10996	10072
06	11791	10892	1538	1430	11588	10914	9719	8251
07	10541	9194	10482	10331	11907	11016	2852	2920
08	3107	3414	11949	11640	11789	10673	1410	1339
09	1304	1314	11757	11306	10550	9229	6983	9333
10	10618	10347	12040	11150	2984	3137	10962	10763
11	12106	11536	10559	9181	1533	1204	11168	10526
12	11660	10131	3111	3576	10265	10138	10974	9942
13	3111	3651	1435	1365	11301	11292	9822	8625
14	8869	7490	10433	10319	11781	10937	2855	3037
15	2853	3275	11648	11758	11755	10724	1587	1476
16	1417	1229	12135	11410	10816	9272	9639	9254
17	10321	9795	12182	11037	3290	3355	10678	10254
18	11903	11638	10559	9131	1559	1491	11056	10285
19	12032	11422	3168	3526	10380	10313	10770	10001
20	12252	11294	1463	1404	11608	11233	9545	8374
21	10784	9379	10280	10020	11775	11059	2490	2848
22	3209	3593	11755	11312	11602	10779	1577	1505
23	838	674	12051	11343	10621	8950	9618	9405
24	1998	2094	12167	10968	3128	3318	10821	10442
25	10826	10636	10616	9207	1456	1490	10645	10177
26	11969	11745	3137	3498	10045	9604	10178	9256
27	12618	11471	1552	1439	11384	10965	9170	7781
28	11022	9681	10255	9731	11278	10949	2499	2705
29	3502	3860	11574	11133	11297	10382	1221	1149
30	1473	1364	12184	11380	10270	8670	9059	8857
31	10501	10320			3157	3107	10258	9769

Tabelle 46: Absolute Werte des Schwerverkehrsaufkommens je Wochentag im Jahr 2021 an der Zählstelle Erzhausen (6922) der Monate September bis Dezember. (Daten nach BAST (2024), eigene Ermittlung und Darstellung).

Fahrt- richtung	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord
	September		Oktober		November		Dezember	
Monat → Wochentag ↓								
01	10362	9629	9721	8496	4266	4812	11631	11113
02	10275	9305	2733	2970	9643	10631	11741	10404
03	8886	7917	1204	1146	11441	10822	10127	8299
04	2642	3000	9463	9292	11941	10712	3185	3461
05	1180	970	11044	10661	10624	8900	1143	947
06	9023	9076	11172	10367	3341	3616	9884	9347
07	10050	9928	10785	10210	1171	1068	11493	10510
08	10868	10095	9510	8081	10031	9722	12048	11533
09	10592	9674	2841	3151	11228	10758	11859	11228
10	9490	8092	1246	1047	11640	10718	10902	9263
11	2498	2944	9810	9273	11739	10786	3235	3570
12	1221	1127	10607	10822	9934	8762	1202	1040
13	9212	9135	11484	10723	3008	3296	10083	9650
14	10492	10222	11345	10243	1069	986	12320	11929
15	10844	9873	9837	8323	10129	9691	12636	11126
16	10817	9838	2985	3366	11245	11069	11902	10860
17	9638	8252	1184	1053	12081	11141	9980	8208
18	2642	3022	9834	9448	11889	10796	3216	3317
19	1164	1102	11285	10782	10128	9048	1164	908
20	9527	9376	11325	10626	3325	3609	9326	8435
21	10681	10563	11392	9977	1129	983	10018	8931
22	11273	10435	9984	8658	9939	9963	9292	7875
23	11140	9978	3170	3443	11391	11224	6823	5681
24	9445	8210	1232	1037	11772	11134	1679	1762
25	3056	3245	9864	9538	11878	10643	505	359
26	1235	1062	11138	10954	10181	8838	859	689
27	9721	9347	11182	10444	3048	3373	5142	4712
28	11128	10928	11380	10348	1162	1028	5966	5444
29	11194	10643	10047	8416	10008	9442	5669	5043
30	11410	10238	3570	3159	11464	11197	4774	4123
31			964	675			1453	1534

A.VI Ermittlung der Kenngrößen in Abschnitt 6.2

In Tabelle 47 sind die relevanten Werte bzgl. der Verkehrsstärken des Schwerverkehrs nach BAST (2024) sowie die Anzahl der Strombezugsfahrten für die Abbildung 32, die Abbildung 33 und die Abbildung 34 dargestellt.

Tabelle 47: Aufsummierte Verkehrsstärken des Schwerverkehrs im Jahr 2021 sowie bezogen auf die Stunde am Tag und Anzahl der Strombezüge bezogen auf die Stunde am Tag.

Stunde am Tag	Verkehrsstärke im Jahr [Fz/Jahr]	Strombezugsfahrten pro Stunde [Sbf/h]	Verkehrsstärke pro Stunde [Fz/h]
1	132718	163	363,61
2	129761	134	355,51
3	131908	96	361,39
4	151245	151	414,37
5	190537	331	522,02
6	256034	427	701,46
7	313106	297	857,82
8	311579	366	853,64
9	317020	376	868,55
10	345752	418	947,27
11	342616	563	938,67
12	336882	427	922,96
13	335339	348	918,74
14	331209	265	907,42
15	327561	334	897,43
16	311827	474	854,32
17	277481	344	760,22
18	229013	173	627,43
19	192570	85	527,59
20	176445	44	483,41
21	151294	28	414,50
22	140138	82	383,94
23	137779	153	377,48
24	131607	145	360,57

A.VII Übersicht der aus der Analyse ausgeschlossenen Zeiträume in Abschnitt 6.3.1

Dieser Abschnitt dient der Beschreibung bezüglich der Bereinigung der Auswertungsdaten für die Analysen in Abschnitt 6.3.1.

Tabelle 48: Häufigkeiten und Ausfalldauer der jeweiligen Ausfallursachenkategorien im Betrachtungszeitraum in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) bezogen auf die Betriebsstrategie.

	Einführungsphase		Regelbetrieb	
	Häufigkeit	Dauer	Häufigkeit	Dauer
Störungsbedingte Ausfallursachen	1	3,07	5	1119,76
Wartungsbedingte Ausfallursachen	1	16,32	8	125,31
Unfallbedingte Ausfallursachen	3	14,18	39	2862,54
Witterungsbedingte Ausfallursachen	3	98,48	1	64,94
Arbeitsstättenbedingte Ausfallursachen	2	48,00	18	554,45
Betriebs- und systembedingte Ausfallursachen	31	140,39	18	576,96
Summe:	41	320,44	89	5303,96

Tabelle 49: Häufigkeiten und Ausfalldauer der jeweiligen Ausfallursachenkategorien im Betrachtungszeitraum in Fahrtrichtung Süd (Frankfurt) bezogen auf die Betriebsstrategie.

	Einführungsphase		Regelbetrieb	
	Häufigkeit	Dauer	Häufigkeit	Dauer
Störungsbedingte Ausfallursachen	1	3,07	4	1012,81
Wartungsbedingte Ausfallursachen	1	16,32	7	114,78
Unfallbedingte Ausfallursachen	3	14,18	46	1103,88
Witterungsbedingte Ausfallursachen	3	98,48	1	64,94
Arbeitsstättenbedingte Ausfallursachen	2	48	11	104,6
Betriebs- und systembedingte Ausfallursachen	31	140,4	18	574,49
Summe:	41	320,45	87	2975,5

In Tabelle 48 und Tabelle 49 sind die im Betrachtungszeitraum aufgetretenen Ausfallzeiten je Kategorie aufgeführt. Um eine Vergleichbarkeit der Betriebsstrategien herstellen zu können, werden für die Auswertung jene Zeiträume nicht betrachtet, in welchen einmalig auftretende Ereignisse mit einem starken Einfluss auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage zu verzeichnen sind. Diese Zeiträume umfassen:

- 03.06.2019 bis 07.06.2019 aufgrund der durchgeführten Restarbeiten zur Errichtung der Oberleitungsanlage (5 Tage).
- 24.01.2020 bis 06.05.2020 aufgrund des Unfallereignisses, aus welchem aufgrund der besonderen Umstände ein sehr langer Ausfall insbesondere in die Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) resultierte (104 Tage).
- 30.12.2020 bis 15.01.2021 aufgrund der Abschaltung der Oberleitungsanlage zur Übergabe des operativen Betriebs der Oberleitungsanlage von Hessen Mobil zur Autobahn GmbH (17 Tage)
- 15.03.2021 bis 09.04.2021 aufgrund des unerwarteten Auftretens der korrodierten Isolatoren durch das Streusalz des Winterdienstes (26 Tage).
- 22.11.2021 bis 19.12.2021 aufgrund des erforderlichen Austausches aller Isolatoren zur Sicherstellung der Aufrechterhaltung des Anlagenbetriebs (24 Tage).
- 13.06.2022 aufgrund der Arbeiten zur Erweiterung der Oberleitungsanlage (1 Tag).
- 21.06.2022 bis 22.06.2022 aufgrund der Arbeiten zur Erweiterung der Oberleitungsanlage (2 Tage).

- 05.07.2022 bis 06.07.2022 aufgrund der Arbeiten zur Erweiterung der Oberleitungsanlage (2 Tage)
- 23.08.2022 bis 26.08.2022 aufgrund der Arbeiten zur Erweiterung der Oberleitungsanlage (4 Tage).
- 21.09.2022 bis 23.09.2022 aufgrund der Arbeiten zur Erweiterung der Oberleitungsanlage (3 Tage)
- 04.10.2022 bis 13.10.2022 aufgrund der Arbeiten zur Erweiterung der Oberleitungsanlage. (10 Tage)
- 31.10.2022 bis 03.11.2022 aufgrund der Arbeiten zur Erweiterung der Oberleitungsanlage (4 Tage).
- 07.11.2022 bis 08.11.2022 aufgrund der Arbeiten zur Erweiterung der Oberleitungsanlage (2 Tage).

Insgesamt werden somit 204 Tage innerhalb des Betrachtungszeitraumes aus der Analyse ausgeschlossen. Es ist zu beachten, dass insbesondere bei den Ausfallzeiten aufgrund der Arbeiten zur Erweiterung der Oberleitungsanlage die Anlage im halbseitigen Betrieb operierte. Dies führt dazu, dass im Zuge einer einheitlichen Betrachtung beider Fahrtrichtungen, es neben den aufgeführten Ausfallursachen, welche die Zeiträume des Ausschlusses begründen, weitere Ausfallursachen, die parallel aufgetreten sind, ebenfalls nicht betrachtet werden.

Die für die Analyse sich ergebenden Häufigkeiten und Ausfalldauern nach Ausschluss der aufgeführten Zeiträume sind in Tabelle 50 und Tabelle 51 dargestellt.

Tabelle 50: Häufigkeiten und Ausfalldauer der jeweiligen Ausfallursachenkategorien im Betrachtungszeitraum in Fahrtrichtung Süd (Darmstadt) bezogen auf die Betriebsstrategie (bereinigt).

	Einführungsphase		Regelbetrieb	
	Häufigkeit	Dauer	Häufigkeit	Dauer
Störungsbedingte Ausfallursachen	1	3,07	1	0,05
Wartungsbedingte Ausfallursachen	1	16,32	8	125,31
Unfallbedingte Ausfallursachen	3	14,18	38	385,64
Witterungsbedingte Ausfallursachen	3	98,48	1	64,94
Arbeitsstättenbedingte Ausfallursachen	1	8,00	10	44,55
Betriebs- und systembedingte Ausfallursachen	31	140,39	17	202,97
Summe:	40	280,44	75	823,46

Tabelle 51: Häufigkeiten und Ausfalldauer der jeweiligen Ausfallursachenkategorien im Betrachtungszeitraum in Fahrtrichtung Süd (Frankfurt) bezogen auf die Betriebsstrategie (bereinigt).

	Einführungsphase		Regelbetrieb	
	Häufigkeit	Dauer	Häufigkeit	Dauer
Störungsbedingte Ausfallursachen	1	3,07	1	0,05
Wartungsbedingte Ausfallursachen	1	16,32	7	114,78
Unfallbedingte Ausfallursachen	3	14,18	37	389,34
Witterungsbedingte Ausfallursachen	3	98,48	1	64,94
Arbeitsstättenbedingte Ausfallursachen	1	8,00	8	46,79
Betriebs- und systembedingte Ausfallursachen	31	140,39	17	200,5
Summe:	40	280,44	71	816,4

A.VIII Übersicht der Strombezugsfahrten in Abschnitt 6.3.5

In Tabelle 52 sind die über die Anlagendaten identifizierten Strombezugsfahrten unterteilt in Klassen mit einer Breite von 10 Sekunden dargestellt.

Tabelle 52: Übersicht der identifizierten Strombezugsfahrten (Anzahl) nach Dauer (Klasse) des Strombezugs.

0: 1049	(280, 290]: 13	(570, 580]: 0
(0, 10]: 415	(290, 300]: 11	(580, 590]: 0
(10, 20]: 1115	(300, 310]: 10	(590, 600]: 0
(20, 30]: 862	(310, 320]: 6	(600, 610]: 0
(30, 40]: 702	(320, 330]: 11	(610, 620]: 0
(40, 50]: 544	(330, 340]: 9	(620, 630]: 0
(50, 60]: 453	(340, 350]: 6	(630, 640]: 0
(60, 70]: 464	(350, 360]: 6	(640, 650]: 0
(70, 80]: 536	(360, 370]: 8	(650, 660]: 0
(80, 90]: 478	(370, 380]: 6	(660, 670]: 0
(90, 100]: 442	(380, 390]: 3	(670, 680]: 0
(100, 110]: 464	(390, 400]: 0	(680, 690]: 0
(110, 120]: 410	(400, 410]: 0	(690, 700]: 0
(120, 130]: 377	(410, 420]: 1	(700, 710]: 0
(130, 140]: 334	(420, 430]: 2	(710, 720]: 0
(140, 150]: 413	(430, 440]: 0	(720, 730]: 0
(150, 160]: 433	(440, 450]: 1	(730, 740]: 0
(160, 170]: 533	(450, 460]: 0	(740, 750]: 0
(170, 180]: 645	(460, 470]: 1	(750, 760]: 1
(180, 190]: 1136	(470, 480]: 0	(760, 770]: 0
(190, 200]: 1606	(480, 490]: 0	(770, 780]: 0
(200, 210]: 896	(490, 500]: 0	(780, 790]: 0
(210, 220]: 229	(500, 510]: 0	(790, 800]: 0
(220, 230]: 62	(510, 520]: 0	(800, 810]: 0
(230, 240]: 22	(520, 530]: 0	(810, 820]: 0
(240, 250]: 32	(530, 540]: 0	(820, 830]: 0
(250, 260]: 21	(540, 550]: 0	(830, 840]: 1
(260, 270]: 11	(550, 560]: 0	(840, 850]: 0
(270, 280]: 19	(560, 570]: 0	(850, 5000]: 266

A.IX Fragebogen zu Abschnitt 7.2.2

Frage 1: Bitte ordnen Sie sich einem Akteur aus dem Feldversuch ELISA zu.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
Oberleitungs- bzw. Straßeninfrastrukturbetreiber	2
Oberleitungsinfrastrukturerrichter	2
Transporteur	0
Begleitforschung	0
Energieversorgungsunternehmen	1
Fahrzeughersteller	0
Straßenbetriebsdienst	0
Gesellschaft	0

Frage 2: Wie lange arbeiten Sie schon im Kontext des dynamischen Ladens mit dem eHighway-System?

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
Keine Tätigkeiten in diesem Bereich	0
Weniger als 1 Jahr	0
1 Jahr bis weniger als 3 Jahre	0
3 Jahre bis weniger als 5 Jahre	0
Mehr als 5 Jahre	5
Keine Angabe	0

Frage 3: Bitte schätzen Sie die Eintrittswahrscheinlichkeit der jeweiligen Ursachenkategorie ab, welche zur Abschaltung der Oberleitungsanlage auf der A5 führte.

Unfallbedingte Abschaltungen (Verkehrsunfälle, Pannenfahrzeuge, Anforderung der Gefahrenabwehrbehörden)

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
sehr selten	0
eher selten	1
mittel-mäßig	2
eher hoch	1
sehr hoch	1
keine Angabe	0

Witterungsbedingte Abschaltungen (Beschädigungen an der Anlage, Sturmwarnungen)

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
sehr selten	0
eher selten	1
mittel-mäßig	2
eher hoch	1
sehr hoch	1
keine Angabe	0

Frage 3: Bitte schätzen Sie die Eintrittswahrscheinlichkeit der jeweiligen Ursachenkategorie ab, welche zur Abschaltung der Oberleitungsanlage auf der A5 führte.

Arbeitsstättenbedingte Abschaltungen (Arbeiten im Streckenbereich, Arbeiten des Straßenbetriebsdienstes)

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
sehr selten	1
eher selten	3
mittel-mäßig	1
eher hoch	0
sehr hoch	0
keine Angabe	0

Wartungsbedingte Abschaltungen (Geplant durchgeführte Inspektions- und Wartungsarbeiten der Oberleitungsanlage)

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
sehr selten	1
eher selten	2
mittel-mäßig	1
eher hoch	1
sehr hoch	0
keine Angabe	0

Betriebs- und systembedingte Abschaltungen (Fehlendes Bedienpersonal, Kommunikationsstörungen zum Fernzugriff der Anlage)

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
sehr selten	5
eher selten	0
mittel-mäßig	0
eher hoch	0
sehr hoch	0
keine Angabe	0

Störungsbedingte Abschaltungen (Fehlermeldung der Anlage, Verschleiß, Kurzschluss)

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
sehr selten	3
eher selten	1
mittel-mäßig	1
eher hoch	0
sehr hoch	0
keine Angabe	0

Frage 4: Bitte schätzen Sie die Auswirkungen (mittlere Ausfalldauer) der jeweiligen Ursachenkategorie ein.

Unfallbedingte Abschaltungen (Verkehrsunfälle, Pannenfahrzeuge, Anforderung der Gefahrenabwehrbehörden)

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
sehr gering	1
eher gering	1
mittel-mäßig	2
eher hoch	1
sehr hoch	0
keine Angabe	0

Witterungsbedingte Abschaltungen (Beschädigungen an der Anlage, Sturmwarnungen)

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
sehr gering	0
eher gering	3
mittel-mäßig	1
eher hoch	1
sehr hoch	0
keine Angabe	0

Arbeitsstättenbedingte Abschaltungen (Arbeiten im Streckenbereich, Arbeiten des Straßenbetriebsdienstes)

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
sehr gering	1
eher gering	2
mittel-mäßig	1
eher hoch	1
sehr hoch	0
keine Angabe	0

Wartungsbedingte Abschaltungen (Geplant durchgeführte Inspektions- und Wartungsarbeiten der Oberleitungsanlage)

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
sehr gering	1
eher gering	1
mittel-mäßig	1
eher hoch	2
sehr hoch	0
keine Angabe	0

Frage 4: Bitte schätzen Sie die Auswirkungen (mittlere Ausfalldauer) der jeweiligen Ursachenkategorie ein.

Betriebs- und systembedingte Abschaltungen (Fehlendes Bedienpersonal, Kommunikationsstörungen zum Fernzugriff der Anlage)

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
sehr gering	2
eher gering	1
mittel-mäßig	2
eher hoch	0
sehr hoch	0
keine Angabe	0

Störungsbedingte Abschaltungen (Fehlermeldung der Anlage, Verschleiß, Kurzschluss)

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
sehr gering	1
eher gering	0
mittel-mäßig	1
eher hoch	2
sehr hoch	1
keine Angabe	0

Frage 5: Bitte schätzen Sie die folgenden Aussagen ein.

K1: Die Wahl der Betriebsstrategie wirkt sich signifikant auf die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage aus.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	1
stimme zu	4
keine Angabe	0

K2: Bei Umsetzung eines zeitweisen Betriebs lassen sich planbare Ereignisse außerhalb der geplanten Betriebszeit durchführen.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	3
stimme zu	2
keine Angabe	0

Frage 5: Bitte schätzen Sie die folgenden Aussagen ein.

K3: Im Regelbetrieb (24/7 Betrieb) liegt ein großer Anteil der Ausfallzeiten innerhalb der Hauptverkehrszeit (09:00 bis 16:00 Uhr).

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	1
stimme weder zu noch nicht zu	1
stimme überwiegend zu	2
stimme zu	1
keine Angabe	0

K4: Die geplante Betriebszeit bei Umsetzung eines zeitweisen Betriebs ist auf die potenziellen Nutzer abzustimmen.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	0
stimme zu	5
keine Angabe	0

K5: Unerwartete Ausfallursachen treten selten auf, führen jedoch zu erheblichen Auswirkungen im operativen Betrieb.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	1
stimme weder zu noch nicht zu	1
stimme überwiegend zu	2
stimme zu	1
keine Angabe	0

K6: Zur Sicherstellung einer hohen Verfügbarkeit sind Störfallprogramme zu entwickeln.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	2
stimme überwiegend zu	0
stimme zu	3
keine Angabe	0

Frage 5: Bitte schätzen Sie die folgenden Aussagen ein.

K7: Geplante Ausfallursachen treten seltener auf als ungeplante Ausfallursachen.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	1
stimme weder zu noch nicht zu	1
stimme überwiegend zu	3
stimme zu	0
keine Angabe	0

K8: Die Auswirkungen von geplanten und ungeplanten Ausfallursachen auf die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage unterscheiden sich nicht signifikant.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	1
stimme überwiegend nicht zu	2
stimme weder zu noch nicht zu	2
stimme überwiegend zu	0
stimme zu	0
keine Angabe	0

K9: Geplante Ausfallursachen finden hauptsächlich während der Hauptverkehrszeit (09:00 bis 16:00 Uhr) im Betrieb einer Oberleitungsanlage statt.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	3
stimme weder zu noch nicht zu	1
stimme überwiegend zu	0
stimme zu	1
keine Angabe	0

K10: Durch geeignete Maßnahmen lassen sich die Ausfallzeiten ungeplanter sowie die negativen Auswirkungen geplanter Ausfallursachen reduzieren.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	2
stimme zu	3
keine Angabe	0

Frage 5: Bitte schätzen Sie die folgenden Aussagen ein.

K11: Nicht jedes Unfallereignis (Verkehrsunfälle, Pannenfahrzeuge) bedarf einer Abschaltung der Oberleitungsanlage.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	1
stimme zu	4
keine Angabe	0

K12: Der Anteil der Abschaltungen in Bezug auf die potenziellen Unfallereignisse sinkt mit Dauer des Betriebs.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	2
stimme zu	2
keine Angabe	1

K13: Die alleinige Abschaltung der betroffenen Fahrtrichtung bei einem Unfallereignis (halbseitiger Betrieb) würde die Verfügbarkeit erheblich erhöhen.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	3
stimme zu	2
keine Angabe	0

K14: Der Einsatz von Personal mit Befugnis zur Wiedereinschaltung zu allen Tages- und Nachtzeiten würde die Verfügbarkeit erheblich erhöhen.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	1
stimme zu	4
keine Angabe	0

Frage 5: Bitte schätzen Sie die folgenden Aussagen ein.

K15: Hohe Windstärken können zu einer Beschädigung der Oberleitungsanlage führen und die Verfügbarkeit beeinträchtigen.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	2
stimme weder zu noch nicht zu	1
stimme überwiegend zu	1
stimme zu	1
keine Angabe	0

K16: Die Qualität der Energieversorgung (Übertragungsleistung von OL-Anlage zu O-Lkw) wird durch hohe Lufttemperaturen reduziert.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	1
stimme überwiegend nicht zu	2
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	0
stimme zu	0
keine Angabe	2

K17: Die Zunahme von Extremwetterereignissen sind bei der Auslegung eines Oberleitungssystem zu berücksichtigen.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	4
stimme zu	1
keine Angabe	0

K18: Um die Ausfallzeiten nach einer Beschädigung zu verkürzen, sind Strategien für die Wiedereinschaltung einer Oberleitungsanlage zu entwickeln.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	1
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	3
stimme zu	1
keine Angabe	0

Frage 5: Bitte schätzen Sie die folgenden Aussagen ein.

K19: Ausreichendes Material zur Instandsetzung und zur Reparatur ist an geeigneter Stelle vorzuhalten.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	1
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	1
stimme zu	3
keine Angabe	0

K20: Es bedarf an situationsangepassten Routinen für die Durchführung einer effizienten Prüfung auf Beschädigung sowie einer nachgelagerten Instandsetzung und Reparatur.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	2
stimme zu	3
keine Angabe	0

K21: Der Anteil an berechtigten Personen zur Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage wirkt sich auf die Verfügbarkeit aus.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	1
stimme überwiegend zu	3
stimme zu	1
keine Angabe	0

K22: Eine geringe Verfügbarkeit an berechtigten Personen zur Wiedereinschaltung der Oberleitungsanlage kann sich insbesondere bei ungeplanten und externalen Ausfallursachen negativ auf den Prozess zur Inbetriebnahme auswirken.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	3
stimme zu	2
keine Angabe	0

Frage 5: Bitte schätzen Sie die folgenden Aussagen ein.

K23: Die Anlagenverfügbarkeit wird durch die Festlegung der Segmentlänge maßgeblich beeinflusst.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	1
stimme zu	4
keine Angabe	0

K24: Eine hohe Anlagenverfügbarkeit setzt eine richtungsbezogene Abschaltung der Oberleitungsanlage voraus.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	1
stimme weder zu noch nicht zu	2
stimme überwiegend zu	1
stimme zu	1
keine Angabe	0

K25: Die potenzielle Verfügbarkeit einer 5 km langen Oberleitungsanlage kann einen Wert von über 98 % erreichen.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	0
stimme weder zu noch nicht zu	0
stimme überwiegend zu	0
stimme zu	5
keine Angabe	0

K26: Die klimatischen Veränderungen können sich zukünftig signifikant auf die Verfügbarkeit einer Oberleitungsanlage auswirken.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
stimme nicht zu	0
stimme überwiegend nicht zu	1
stimme weder zu noch nicht zu	3
stimme überwiegend zu	1
stimme zu	0
keine Angabe	0

Frage 6: Bitte schätzen Sie die (voraussichtlich zukünftigen) Auswirkungen (Ausfalltage pro Jahr) ausgewählter Ausfallursachen ein. Gehen Sie von einer 5km langen elektrischen Strecke aus.

Inspektion und Wartung.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
----------------------	-----------

<1 Tag im Jahr	2
1 Tag bis <2 Tage im Jahr	2
2 bis <5 Tage im Jahr	2
5 bis <10 Tage im Jahr	1
10 bis <20 Tage im Jahr	0
20 Tage oder mehr im Jahr	0
keine Angabe	0

Anforderungen durch Dritte (bspw. Energieversorger).

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
----------------------	-----------

<1 Tag im Jahr	3
1 Tag bis <2 Tage im Jahr	1
2 bis <5 Tage im Jahr	2
5 bis <10 Tage im Jahr	0
10 bis <20 Tage im Jahr	0
20 Tage oder mehr im Jahr	0
keine Angabe	0

Straßenbetrieblichen Aktivitäten

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
----------------------	-----------

<1 Tag im Jahr	3
1 Tag bis <2 Tage im Jahr	2
2 bis <5 Tage im Jahr	2
5 bis <10 Tage im Jahr	0
10 bis <20 Tage im Jahr	0
20 Tage oder mehr im Jahr	0
keine Angabe	0

Frage 6: Bitte schätzen Sie die (voraussichtlich zukünftigen) Auswirkungen (Ausfalltage pro Jahr) ausgewählter Ausfallursachen ein. Gehen Sie von einer 5km langen elektrischen Strecke aus.

Arbeitsstätten.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
<1 Tag im Jahr	4
1 Tag bis <2 Tage im Jahr	4
2 bis <5 Tage im Jahr	1
5 bis <10 Tage im Jahr	0
10 bis <20 Tage im Jahr	0
20 Tage oder mehr im Jahr	0
keine Angabe	0

Extremwetterereignisse.

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
<1 Tag im Jahr	4
1 Tag bis <2 Tage im Jahr	4
2 bis <5 Tage im Jahr	1
5 bis <10 Tage im Jahr	0
10 bis <20 Tage im Jahr	0
20 Tage oder mehr im Jahr	0
keine Angabe	0

Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden (halbseitiger Abschaltung).

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
<1 Tag im Jahr	1
1 Tag bis <2 Tage im Jahr	1
2 bis <5 Tage im Jahr	2
5 bis <10 Tage im Jahr	1
10 bis <20 Tage im Jahr	1
20 Tage oder mehr im Jahr	0
keine Angabe	0

Frage 7: Was sind Ihrer Meinung nach die Ursachen mit den größten Auswirkungen auf die Verfügbarkeit?

Freies Textfeld

Abschaltungen infolge Gefahrenabwehrbehörden
Austausch von Verschleißteile
Gefahrenabwehrbehörden
Abschaltung durch die Gefahrenabwehrbehörden
Resilienz im Kontext der Klimawende und regulatorische Sicherheitsauflagen bei Verkehrsunfällen.
Energieversorgungstechnisch, wäre die Oberleitungsanlage ein starres Flexibilitätspotenzial im Sinne §13 EnWG.
Aufgrund der geringen Überschneidung mit anderen Verbrauchern ist nicht davon auszugehen das es hier viele netzsteuernde Maßnahmen geben wird.
Fehler oder Defekte an der Anlage (Zeitfaktor Fehlersuche) und Unfälle mit Anlagenbeteiligung.

Frage 8: Welche Anlagenverfügbarkeit (im Jahr) sollte Ihrer Meinung nach im dauerhaften Betrieb (24/7) mindestens erreicht werden?

Freies Textfeld

90
96
97
98
99

Frage 9: Welche Maßnahmen können dazu beitragen, um in Zukunft die Verfügbarkeit weiter zu erhöhen?

Freies Textfeld

Bündelung von Wartung/Inspektion der Anlage und straßenbetriebl. Aktivitäten/Arbeitsstätten
Segmentierung, Ausbildung der Operatoren zu elektrotechnisch unterwiesenen Personen mit Schaltberechtigung
Vorhaltung von Ersatzteilen
Feldversuch im großem Maßstab, intensive Nutzung der Anlage und Rückfluss der Erkenntnisse (enges Monitoring)
Wartungsverträge mit vereinbarten Reaktions- und Fehlerbehebungszeiten
Normierung des Vorgehens bei ungeplanten Abschaltungen, technische Lernkurve im unmittelbaren Betrieb
ausreichende Personalressourcen auf der Anlagenbetreibersseite
Wartungsintervall erhöhen (technisch auch möglich, Turnus bisher nur da Feldversuch)

Frage 10: Was trifft bezüglich Ihrer Haltung gegenüber der eHighway-Teststrecke auf der Bundesautobahn A5 in Hessen am ehesten zu?

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
Ich würde/werde mich aktiv für die eHighway-Teststrecke engagieren beziehungsweise engagiere mich bereits aktiv.	5
Ich stehe der eHighway-Teststrecke wohlwollend gegenüber.	0
Ich dulde die eHighway-Teststrecke.	0
Die eHighway-Teststrecke ist mir gleichgültig.	0
Ich stehe der eHighway-Teststrecke zwiegespalten gegenüber.	0
Ich lehne die eHighway-Teststrecke grundsätzlich ab.	0
Ich würde/werde mich aktiv gegen die eHighway-Teststrecke engagieren beziehungsweise engagiere mich bereits aktiv dagegen.	0
Keine Angabe	0

Frage 11: Möchten Sie, dass das eHighway-System in Zukunft ausgebaut wird?

Auswahlmöglichkeiten	Antworten
Ja	5
Nein	0
Weiß nicht	0

Frage 12: Feedback zur Befragung

Freies Textfeld

-

-
