
Beurteilung von Störfallprogrammen anhand ihres Einschwingverhaltens

am Beispiel des Schienenpersonennahverkehrs
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Friederike Chu



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Fachgebiet
Bahnsysteme und
Bahntechnik

Schriftenreihe des Instituts für Verkehr
Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik

Heft B9
ISSN 1614-9300

Darmstadt 2014

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-41465
URI: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/4146>



Beurteilung von Störfallprogrammen anhand ihres Einschwingverhaltens am Beispiel des Schienenpersonennahverkehrs

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

Dissertationsschrift

von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Friederike Chu
Geboren am 23. Juni 1984 in Zwickau

Referent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Tag der Einreichung: 14. Januar 2014
Tag der Disputation: 09. April 2014

Darmstadt, 2014
Hochschulkenziffer D17



Pour Marc Champourlier
1944–2012
1^{er} ingénieur et 2^e père dans ma vie



Zusammenfassung

Störungen sind im komplexen und von vielfältigen externen Einflüssen mitbestimmten Bahnbetrieb oft unvermeidbar und führen i. d. R. zu Abweichungen vom Fahrplan. Die Folgekosten von Störungen können sehr hoch sein, weshalb strukturierte Wege gefunden werden müssen, um Störungen im Schienenverkehr zu begegnen. Die Verwendung von vorab geplanten Störfallprogrammen zum Umgang mit Störungen im Schienenverkehr bietet vielerlei Vorteile, wie die Verkürzung der Reaktionszeit der Disposition und die Möglichkeit einer effizienten Kommunikation. Daher ist der Einsatz von Störfallprogrammen als Teil einer umfassenden Störfallmanagementstrategie im Schienenverkehr sinnvoll und wichtig.

Der Begriff *Störfallprogramm* (SFP) bezeichnet Handlungskonzepte für den Störfall im Schienenverkehr in deren Rahmen vorab ausgewählte und definierte Maßnahmen der Disposition, Kommunikation und Fahrgastlenkung umgesetzt werden. Störfallprogramme laufen in verschiedenen Phasen ab. Bisher fehlen Methoden zur Bewertung der verschiedenen Phasen von Störfallprogrammen in Bezug auf ihre Machbarkeit, Dauer und die zu erwartende betriebliche Qualität.

Der Zeitraum vom Zeitpunkt der Ausrufung eines Störfallprogramms bis zum Erreichen eines stabilen Störungszustands wird *Einschwingphase* genannt. Der Zeitraum vom Zeitpunkt der Aufhebung eines Störfallprogramms bis zum Erreichen des Regelbetriebs wird *Ausschwingphase* genannt. Der Verlauf der Einschwingphase bestimmt die Dauer, bis die stabile Phase erreicht ist, wobei das Erreichen eines des stabilen Zustands die Grundlage für eine erfolgreiche Ausschwingphase bildet. Aufgrund ihrer besonderen Bedeutung wird sich in der vorliegenden Arbeit auf die Betrachtung der Einschwingphase konzentriert. Zusätzlich erfolgt – aufgrund der verbreiteten Anwendung von Störfallprogrammen bei diesen Störungsarten – eine Betrachtung von Störungen, bei denen die Verfügbarkeit der Infrastruktur teilweise oder vollständig eingeschränkt ist.

Um das Einschwingverhalten von Störfallprogrammen abschätzen zu können, werden die Einflüsse auf die Einschwingphase identifiziert und quantifiziert. Neben den Einflussfaktoren Prozessqualität, Schulungsstand der Mitarbeiter und Vorhandensein von Reserven im Störfall ist der Auswahl und Gestaltung der Dispositionsmaßnahmen die größte Bedeutung zuzuschreiben. Dies ist in den besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen, d. h. längeren Belegungszeiten und der schrittweise umgesetzten Abstellung überzähliger Züge in der Einschwingphase, begründet.

Die im Störfall zur Verfügung stehenden Dispositionsmaßnahmen lassen sich größtenteils auf die Hauptdispositionsmaßnahmen *Teilausfall*, *Ausfall* und *Umleitung* von Zügen oder Linien zurückführen. Hierbei erfordert die Dispositionsmaßnahme *Teilausfall* vorzeitige Wenden. Darauf aufbauend wird ein Vorgehen zur Berechnung des Belegungsgrads in Wendebahnhöfen erarbeitet, welches die bei Störfällen besonderen Eigenschaften der längeren Belegungszeiten und der schrittweise erfolgenden Reduktion der Zugzahlen in die Berechnungen einbezieht.

Der Belegungsgrad einzelner Gleise in Wendebahnhöfen ermöglicht es, verschiedene Lösungsmöglichkeiten vorab zu beurteilen. In Verbindung mit den ebenfalls in der Arbeit entwickelten Regeln und Richtwerten zur Machbarkeit von Störfallprogrammen ist es nun möglich, die Machbarkeit einzelner SFP-Lösungen bereits in der Planung abzuschätzen sowie diese Lösungen untereinander zu vergleichen. Zur Vervollständigung der Arbeit wird ein

Ansatz zur Abschätzung der Dauer der Gesamtvorgänge bis zum Ende der Einschwingphase entwickelt.

Bisher wurden die Übergangsphase von einer Störung zum geregelten Störungsbetrieb im Allgemeinen unzureichend sowie die Einschwingphase von Störfallprogrammen im Speziellen weder in der Forschung noch in der Praxis behandelt. Dies erfolgt in der vorliegenden Arbeit. Weiterhin werden zum ersten Mal die besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen und ihre Wirkung auf das Einschwingverhalten von Störfallprogrammen beschrieben und modelliert.

Die Erstellung von Störfallprogrammen kann durch die vorliegenden Ergebnisse deutlich verbessert werden. Durch die Vorabbeurteilung der Machbarkeit verringert sich der Anteil der „Versuch-Irrtum“-Vorgehensweise bei der Entwicklung und ersten Umsetzung konkreter Störfallprogramme. Folgen sind verkürzte Lernphasen bei der Umsetzung, bessere Betriebsqualität auch in Störungen sowie eine größere Akzeptanz des SFP-Konzeptes. Letztendlich wird dadurch die Attraktivität des Schienenpersonenverkehrs gesteigert, weshalb die vorliegende Arbeit auch einen kleinen Beitrag zur Verlagerung des Verkehrs auf die Schiene leistet.

Abstract

In a complex system like railway transport, which is governed by a lot of different external influences, disruptions can often not be avoided and cause timetable deviations during operations. The costs resulting from disruptions in railway transport can be significant, which is the reason why structured ways in dealing with railway disruptions have to be found. The application of disruption programs offers different advantages when dealing with railway disruptions, like shorter reaction times for dispatchers and the possibility of communicating passenger information more efficiently. For this reason, disruption programs constitute an important part of any comprehensive disruption management concept in passenger railway transport.

Disruption programs are sets of pre-defined dispatching, communication and passenger routing measures in case of large (infrastructural) disruptions with the goal of ensuring stable operations during a disrupted situation. Disruption programs evolve in different phases. Until now, methods to evaluate the different phases of disruption programs in regard to their feasibility, duration and the expected operational quality are missing.

The transition phase – after the declaration of a disruption program until steady operations during the disruption are reached – is crucial and therefore the basis of a smooth return to regular operations after the disruption. Due to its particular importance, the work at hand concentrates on the transition phase of disruption programs. Furthermore, only disruptions causing limited infrastructure availability are considered further.

In order to estimate the behavior of the transition phase, the influencing factors are identified, quantified and modeled. Besides influencing factors like process quality, level of knowledge and training of operating personnel and the availability of additional resources, the most importance has to be attributed to the selection and configuration of the dispatching measures which form the disruption program. This is due to the special characteristics of railway operations during disruptions which are longer blocking times of the infrastructure and the stepwise reduction of surplus trains that are put into siding during the transition phase.

The available choice of possible dispatching measures during a disruption can be traced back to the major measures of partly canceling, canceling and rerouting trains. Here, the measure of partly canceling trains requires early turnings at other stations than during regular operations. Based on these assumptions, a method for calculating the occupancy rate in turning stations is elaborated, which considers the characteristics of longer blocking times and the stepwise reduction of the number of trains within the calculation.

The occupancy rates of single tracks in turning stations offers the possibility to evaluate different disruption programs. This reference number in combination with the developed rules and guidance figures helps to pre-assess the feasibility of disruption programs already during the planning phase and to compare different solutions. For completion, an approach to estimate the duration until the end of the transition phase is elaborated.

Until now, the transition phase between the beginning of a disruption and until a steady state is reached in general and the transition phase of disruption programs in particular have never been analysed before, neither in research nor in practice. The work at hand describes and models the special characteristics of railway operations during disruptions for the first time.

With the results at hand, the development of disruption programs can be improved significantly. The possibility of pre-assessing the feasibility reduces the share of trial-and-error-learning during the development and implementation of disruption programs. Results are shorter learning cycles, better operational quality during disruptions and a higher acceptance of the concept of disruption programs. The resulting increase in operational quality improves in turn the public image of passenger railway transport, why the work at hand contributes a small part to shift passenger traffic towards the railway sector.

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting für die Möglichkeit der Promotion am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik und Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze für die Übernahme des Koreferats der Arbeit.

Die Vorarbeiten für meine Dissertation entstanden in den Projekten SturM und Adios. Von den Arbeitsgruppen sind besonders Aline Böhme für ihre stetige Unterstützung und Rüdiger Gahr als sehr geschätzte Quelle betrieblichen Wissens hervorzuheben. Großer Dank gebührt auch meinem SturM-Projektpartner Leif Fornauf für die hervorragende Zusammenarbeit – es hat viel Spaß gemacht und motiviert.

Allen Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Verkehr – speziell Anette Büttgen, Uwe Böttcher, Sören Griese, Julia Herbst, Anna-Katharina Keck, Peter Knuth, Sebastian Schön, Isabel Schütz, Anselmo Stelzer, Constanze Streitzig und Sabine Valk vom Fachgebiet sowie Lada Beara, Markus Gerigk, Theresia Glock und Nina Schwebel – danke ich für die freundliche und offene Atmosphäre: Danke fürs Zuhören und gegenseitige Unterstützen. Vor allem danke ich Euch für die entspannten Mittagspausen – sie waren sehr wichtig.

In meiner Zeit am Institut habe ich viele studentische Hilfskräfte kommen und bleiben sehen. Dank geht hierbei vor allem an Moritz Becher, Andreas Brauner, Yigit Fidansoy, Dietrich Jähnert, Dejan Petkov und Christoph Zeitler für ihre Unterstützung.

Danke Nicolas Godin und Jean-Benoît Dunckel für Moon Safari.

Besonderer Dank gilt meinen Freunden – alten und neuen: Adrian und Cathleen haben mich durch alle Höhen und Tiefen der letzten fünf Jahre begleitet. Danke für Eure Freundschaft. Danke Sandra für die Ermutigungen, die nützlichen Tipps und die Spaziergänge ums Oberfeld. Danke Verena und Katharina für Durchsetzungsdiskussionen und fürs Mitfiebern. Danke Axel und Nadine, die mir die Anfangszeit am Institut erleichtert haben und nun Freunde geworden sind. Lene und Sarah sowie Solenne danke ich sehr für die Mädelsabende als Erinnerung an die wichtigen Dinge im Leben.

Ich danke auch meinen Eltern, die in jeglicher Hinsicht die Grundsteine für meinen Weg gelegt haben und die mich immer unterstützen – egal von welchem Winkel der Erde aus.

Meinem Mann André danke ich für seine Unterstützung in allen Belangen und seinen steten Zuspruch, für die vielen nützlichen Hinweise, fürs FUP und \LaTeX -Support. Danke für die gemeinsamen Jahre – ich freue mich auf viele weitere! ♡

Friederike Chu



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung – Bedeutung des Störfallmanagements	1
2	Stand der Forschung	5
2.1	Störfallmanagement	5
2.1.1	Störungen im Schienenverkehr	5
2.1.2	Störfallmanagement im Schienenverkehr	6
2.2	Bestehende Ansätze des Störfallmanagements im Schienenverkehr	7
2.2.1	Ansätze der Störfallvorsorge	7
2.2.2	Ansätze der Vorbereitung auf Störfälle	8
2.2.3	Ansätze zum Bewältigen von Störfällen	8
2.2.4	Ansätze der Rückkehr zum Regelbetrieb	9
2.2.5	Störfallprogramme als spezieller Ansatz der Störfallvorsorge	10
2.2.6	Fazit Ansätze des Störfallmanagements im Schienenverkehr	14
2.3	Bestehende Ansätze des Störfallmanagements bei anderen Verkehrsträgern	15
2.3.1	Straßenverkehr	15
2.3.2	Luftverkehr	17
2.3.3	Fazit Ansätze andere Verkehrsträger	18
2.4	Betriebliche Abläufe in Störungen	19
2.4.1	Akteure der Betriebssteuerung im Schienenverkehr	19
2.4.2	Kommunikation im Störfall	21
2.4.3	Dispositionsmaßnahmen im Störfall	22
2.5	Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Grundlagen zur Leistungsfähigkeitsermittlung einer Infrastruktur	24
2.5.1	Leistungsfähigkeit einer Infrastruktur und weitere Begriffe	24
2.5.2	Allgemeines Vorgehen zur Leistungsfähigkeitsermittlung	27
2.5.3	Überblick über die speziellen Verfahren der Leistungsfähigkeitsermittlung	28
3	Aufgabenstellung, Ansatz und Aufbau der Arbeit	31
3.1	Einleitung – Bedeutung der Einschwingphase	31
3.2	Problemstellung	31
3.3	Definitionen verwendeter Begriffe	32
3.4	Aufgabenstellung und inhaltliche Abgrenzung	33
3.4.1	Ziele der Arbeit	33
3.4.2	Inhaltliche Abgrenzung	33
3.5	Anforderungen an die Modellierung und Lösungsansätze	35
3.5.1	Anforderungen	35
3.5.2	Lösungsansätze	35
3.6	Aufbau der Arbeit	36
4	Identifikation von Einflüssen auf die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase	37
4.1	Identifikation der Einflüsse und Wirkzusammenhänge	37
4.1.1	Einleitung	37
4.1.2	Einflüsse auf die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase	37
4.1.3	Dispositionsmaßnahmen und ihre impliziten Effekte	42

4.1.4	Steuerbarkeit der Einflüsse auf die Einschwingphase	44
4.1.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der Identifikation	46
4.2	Experteninterviews	47
4.3	Betriebsdatenanalyse	47
4.3.1	Ziele und Ansatz für die Betriebsdatenanalyse	47
4.3.2	Beschreibung der zur Verfügung stehenden Daten	48
4.3.3	Analyse der Verspätungsursachen	52
4.3.4	Analyse der Orte, an denen Verspätungen auftreten	57
4.3.5	Analyse der Orte mit verspätetem Fahrtbeginn	59
4.3.6	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der Betriebsdatenanalyse	60
4.4	Schlussfolgerungen – Veränderungen von Belegungszeiten im Störfall	62
4.5	Zusammenfassung und weiteres Vorgehen	63
4.5.1	Zusammenfassung	63
4.5.2	Weiteres Vorgehen	64
5	Veränderung der Belegungszeiten in Störungen	65
5.1	Identifikation zusätzlicher Belegungszeiten	65
5.1.1	Einleitung	65
5.1.2	Notwendigkeit von Identifikation und Quantifizierung	65
5.1.3	Unterteilung der zusätzlichen Belegungszeitelemente	65
5.1.4	Beispiel für die Veränderung von Belegungszeiten durch Störungen	68
5.2	Quantifizierung der zusätzlichen Belegungszeiten	71
5.2.1	Problematik der Quantifizierung und Vorgehen	71
5.2.2	Dauer Nothaltevorgang $t_{Nothalt}$	72
5.2.3	Dauer der Ermittlungs- und Entscheidungsphase t_{Entsch}	72
5.2.4	Dauer von Handlungen zur Umsetzung zu Beginn von Störfallprogrammen	73
5.2.5	Dauer von wiederkehrenden Handlungen im SFP $t_{SFPWende}$ und $t_{SFPUmleitung}$	77
5.3	Erwartungswerte der zusätzlichen Belegungszeitelemente	78
5.4	Zusammensetzung einzelner Belegungszeitelemente zu einer Gesamtbelegungszeit	80
5.4.1	Problematik der Quantifizierung der Dauer mehrerer Vorgänge	80
5.4.2	Überschlägige und exakte Berechnung der Dauer mehrerer Vorgänge	80
5.4.3	Vergleich und Diskussion der Ergebnisse	81
5.5	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	82
5.5.1	Zusammenfassung und weiteres Vorgehen	82
5.5.2	Diskussion der Ergebnisse	83
6	Veränderung von Wendezeiten in Störungen	85
6.1	Einleitung – Wendevorgänge in Störungssituationen	85
6.1.1	Motivation und Zielstellung	85
6.1.2	Problemstellung	85
6.1.3	Vorgehensweise	87
6.2	Betriebsdatenanalyse	88
6.2.1	Analyseziel und verwendete Daten	88
6.2.2	Vorgehen Betriebsdatenanalyse	90
6.2.3	Ergebnisse der Betriebsdatenanalyse	96
6.3	Ursachen für veränderte Wendezeiten in Störungen	101
6.4	Ermittlung eines Planungswertes $t_{SFPWende}$ für die Wendezeit in Störungen	103
6.5	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	104
6.5.1	Zusammenfassung	104
6.5.2	Diskussion der Ergebnisse	105

7	Veränderung von Fahrdauern bei Umleitungen in Störungen	107
7.1	Ursachen für längere Fahrdauern durch Umleitungen	107
7.1.1	Einleitung	107
7.1.2	Mögliche Ursachen	107
7.1.3	Beobachtete Ursachen	108
7.1.4	Zusammenfassung der Ursachen	109
7.1.5	Schlussfolgerungen	111
7.2	Quantifizierung von Verlängerungen der Fahrdauern bei Umleitungen	111
7.3	Vorgehen zur Prüfung der Machbarkeit von Umleitungen	113
7.4	Zusammenfassung, Diskussion und Forschungsbedarf	115
7.4.1	Zusammenfassung	115
7.4.2	Diskussion der Ergebnisse und weiterer Forschungsbedarf	115
8	Veränderung der Zugzahlen in der Einschwingphase	117
8.1	Einleitung	117
8.2	Problematik der schrittweise umgesetzten Reduktion der Zugzahlen in der Einschwingphase	117
8.3	Modellierung der schrittweise umgesetzten Reduktion der Zugzahlen in der Einschwingphase	119
8.3.1	Anforderungen an die Modellierung und Ansatz	119
8.3.2	Notwendige Szenarien und 15-Min-Heuristik	120
8.3.3	Anwendungsbeispiel	122
8.4	Zusammenfassung und Diskussion des Modells	125
8.4.1	Zusammenfassung	125
8.4.2	Diskussion des Modells	125
9	Modell zur Berechnung des Belegungsgrads in Wendebahnhöfen	127
9.1	Einleitung	127
9.1.1	Motivation und Zielstellung	127
9.1.2	Anforderungen an das Modell	128
9.1.3	Modellansatz und Vorgehen	129
9.2	Entwicklung eines Modells zur Berechnung des Belegungsgrads in Wendebahnhöfen	129
9.2.1	Modellierung der Infrastruktur	129
9.2.2	Modellierung des Betriebsprogramms und der Disposition	130
9.2.3	Ermittlung der Belegungszeiten	130
9.2.4	Berechnung der Leistungsfähigkeit	132
9.2.5	Zusammenfassung des Modells	134
9.3	Anwendungsbeispiel Berechnung des Belegungsgrads eines SFP-Wendebahnhofs	135
9.3.1	Situationsbeschreibung und Vorgehen	135
9.3.2	Modellierung der Infrastruktur des Bahnhofs C	135
9.3.3	Modellierung von Betriebsprogramm und Disposition auf der Infrastruktur	136
9.3.4	Ermittlung der Belegungszeiten	137
9.3.5	Berechnung des Belegungsgrads	138
9.4	Zusammenfassung und Diskussion des Modells	139
9.4.1	Zusammenfassung und weiteres Vorgehen	139
9.4.2	Diskussion des Modells	139
10	Gestaltung funktionsfähiger Störfallprogramme	141
10.1	Einleitung	141

10.2	Beurteilung der Machbarkeit eines Störfallprogramms anhand des Belegungsgrads	141
10.3	Grundsätze zur Gestaltung von Störfallprogrammen	142
10.4	Anpassung von Störfallprogrammen bei Nicht-Machbarkeit	143
10.4.1	Allgemeiner Prozess des SFP-Entwurfs und der Machbarkeitsabschätzung	143
10.4.2	Störfalltrichter	143
10.4.3	Wahl der Wendebahnhöfe	144
10.4.4	Weitere Maßnahmen zur Herstellung der Machbarkeit	146
10.5	Anwendungsbeispiel	146
10.5.1	Machbarkeitsabschätzung	146
10.5.2	Maßnahmen zur Herstellung der Machbarkeit	148
10.6	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	150
10.6.1	Zusammenfassung	150
10.6.2	Diskussion der Ergebnisse	150
11	Abschätzung der Dauer bis zum Ende der Einschwingphase	153
11.1	Einleitung	153
11.1.1	Notwendigkeit der Abschätzung	153
11.1.2	Ansatz	153
11.1.3	Vorabbemerkung	154
11.2	Abschätzung der Dauer, bis die vorgesehene Zugzahl erreicht ist	155
11.3	Abschätzung der Dauer, bis alle Züge auf den im Störfallprogramm vorgesehenen Fahrwegen verkehren	157
11.4	Abschätzung der Dauer, bis alle Züge pünktlich verkehren	160
11.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	163
12	Zusammenfassung und Ausblick	165
12.1	Zusammenfassung	165
12.1.1	Ergebnisse	165
12.1.2	Bedeutung der Ergebnisse	167
12.2	Ausblick	168
	Literaturverzeichnis	171
	Abbildungsverzeichnis	179
	Tabellenverzeichnis	181
	Abkürzungsverzeichnis	183
A	Fragenkatalog für die Experteninterviews	187
A.1	Abfrage Netzcharakteristiken	187
A.2	Abfrage des aktuellen Stands der Störfallprogrammanwendung	187
A.3	Inhaltliche Fragen	188
B	Dokumentation der SQL-Abfragen zu den Analysen in Kapitel 4 und 6	189
B.1	Identifikation der Züge, deren Fahrt verspätet beginnt	189
B.2	Identifikation der Züge, deren Fahrt verspätet endet	189
B.3	Identifikation der Züge, die sich bei SFP-Ausrufung im Netz befinden.	190
B.4	Identifikation der Züge, deren Fahrt nach der SFP-Ausrufung beginnt	191
B.5	Abfrage zur Ermittlung aller Zusatzverspätungen über 120 Sekunden	192

B.6	Abfrage zur Ermittlung von Wendungen	192
C	Werte der Betriebsdatenanalyse aus Kapitel 4	193
C.1	Verspätungsfälle und beobachtete Verspätungsgründe	193
C.2	Orte, an denen Verspätungen auftreten	193
D	Quantifizierung zusätzlicher Belegungszeitanteile im Störfall	195
D.1	Dauer Nothaltvorgang in einem S-Bahn-Netz	195
D.1.1	Erklärungen zu den Berechnungen der einzelnen Elemente	196
D.2	Ermittlung der Dauer zum Erteilen schriftlicher Befehle	197
E	Erläuterungen und Berechnungen zur Ermittlung der Gesamtdauer	199
E.1	Vorgang der Faltung zweier Funktionen	199
E.1.1	Allgemeiner Ablauf	199
E.1.2	Beispiel zur Ermittlung der Dauer von zwei Vorgängen	199
E.2	Vorgang der Faltung von drei Funktionen	200
E.2.1	Allgemeiner Ablauf	200
E.2.2	Beispiel zur Ermittlung der Dauer von drei Vorgängen	200
E.3	Wertetabellen für die durchgeführten Berechnungen	202
F	Werte der Betriebsdatenanalyse aus Kapitel 6	209
F.1	Abweichungen von der technischen Mindestwendezeit für die Städte 1 und 3	209
F.2	Wendedauern der Städte 1 und 3	211
F.3	Verteilung der Gründe für einen verspäteten Fahrtbeginn pro Bahnhofstyp	213
G	Arbeitsschritte zur Durchführung einer betrieblichen Wende	215
G.1	Exemplarische Abfolge von abschließenden und vorbereitenden Aufgaben für eine betriebliche Wende mit einem Triebfahrzeugführer	215
G.2	Exemplarische Abfolge von abschließenden und vorbereitenden Aufgaben für eine betriebliche Wende mit zwei Triebfahrzeugführern	216
H	Schriftenverzeichnis	217
I	Lebenslauf	219



1 Einleitung – Bedeutung des Störfallmanagements

Die Unvermeidbarkeit von Störungen im Schienenverkehr

Störungen des Schienenverkehrs treten in regelmäßigen und unregelmäßigen Abständen auf, können nicht grundsätzlich vermieden werden und führen i. d. R. zu Abweichungen vom Fahrplan. Dabei sind die Gründe für das Auftreten von Störungen vielfältig – aufgrund der Komplexität des Systems Bahn an sich bestehen die Möglichkeiten des Versagens einzelner Komponenten und der Störung des Zusammenwirkens mehrerer Komponenten. Aber auch externe Einflüsse wie beispielsweise Umwelt, Wetter, Personen, Maschinen oder andere Systeme, die auf das System Bahn einwirken, stellen Störungsgründe dar. Diese Vielzahl und auch Vielfältigkeit der möglichen Gründe für Störungen im Schienenverkehr wird in der Zusammenstellung von (Dobritz u. Weidmann, 2012) deutlich, welche in Abbildung 1.1 zu finden ist. Störungen des Schienenverkehrs sind in dem von vielfältigen externen Einflüssen mitbestimmten Bahnbetrieb demnach unvermeidbar.

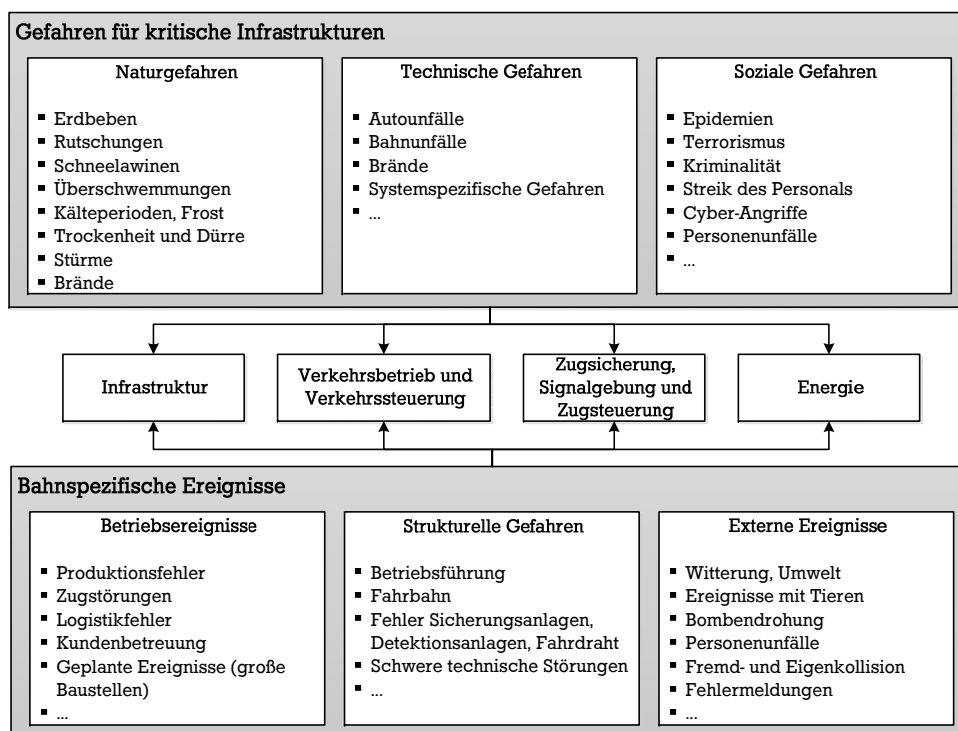


Abbildung 1.1: Übersicht über mögliche Störungen für kritische Infrastrukturen und den Bahnverkehr (Dobritz u. Weidmann, 2012)

Anforderungen der Fahrgäste im Störfall

Treten Störungen im Schienenverkehr auf, so besteht weiterhin die Grundanforderung der Fahrgäste pünktlich das Fahrtziel zu erreichen. Entsprechend sollte eine möglichst schnelle Wiederherstellung des Regelbetriebs bzw. mindestens die Aufrechterhaltung eines (eingeschränkten) Betriebs während des Bestehens der Störung angestrebt werden.

Wichtiger als die pünktliche Beförderung ist im Störfall jedoch die Versorgung der Fahrgäste mit den entsprechenden Informationen (Pfister, 2011). Dies beinhaltet zum einen zeitnahe Informationen über den Störungsgrund sowie eine Prognose der voraussichtlichen Störungsdauer. Diese Informationen sind für den direkten Umgang mit den Störungsauswirkungen zwar nicht wesentlich, sorgen aber für „Beruhigung“ und für ein besseres Verständnis der Fahrgäste für die Situation¹. Zum anderen erwarten Fahrgäste während Störungen Informationen über die Auswirkungen der Störung auf ihren weiteren Reiseverlauf sowie Handlungsempfehlungen, wie bspw. Umleitungsmöglichkeiten, alternative Züge und Verkehrsmittel u. ä., auf kollektiver und individueller Ebene. Diese Informationen sind zeitnah und vorausschauend, also mit einem zeitlichen Vorlauf, welcher eine Reaktion noch zulässt, zu geben.

Im Störfall ist es demnach wichtig, dass die Fahrgäste schnell, umfassend und im besten Fall individuell informiert werden. Damit diese Anforderungen eines schnellen und umfassenden Informationsflusses durch Infrastrukturbetreiber und Verkehrsunternehmen erfüllt werden können, ist eine schnelle und koordinierte Reaktion aller auf die Störung unabdingbar.

Folgen von Störungen im Schienenverkehr

Sind Störungen aufgetreten und behindern bzw. verhindern den Betrieb, so wird die Aufrechterhaltung des Betriebs unter dem Störungseinfluss angestrebt, wofür entsprechende Maßnahmen erforderlich sind. Bei diesen Maßnahmen handelt es sich i. d. R. um dispositive Maßnahmen, welche beispielsweise Teilausfälle, Ausfälle oder Umleitungen von Zugfahrten beinhalten. Die Durchführung dieser Maßnahmen ist oft nur unter Anpassung der Fahrzeug- und Personalpläne möglich und erfordert oft weitere ungeplante Ressourcen.

Ist die Aufrechterhaltung des Betriebs z. B. aufgrund eines weitreichenden Unwetters nicht möglich, werden Maßnahmen zur Versorgung der Fahrgäste notwendig, welche ebenfalls zusätzliche ungeplante Ressourcen erfordern. Weiterhin sind Maßnahmen zur Beseitigung des Störungsgrunds durchzuführen, damit eine Rückkehr zum Regelbetrieb möglich wird.

Bis der Störungsgrund beseitigt und der Regelbetrieb wieder hergestellt ist, kann i. d. R. nicht der vollständige im Fahrplan angebotene Service der Beförderung sichergestellt werden, da bspw. Züge ausfallen oder Halte nicht angefahren werden. Dieser Umstand führt dazu, dass Fahrgäste und ggf. Güter entweder verspätet, nicht mit dem gewohnten Komfort oder auch gar nicht an ihrem Ziel ankommen. Dementsprechend können durch Störungen im Schienenverkehr die Kundenzufriedenheit und damit auch langfristig die Attraktivität des Schienenverkehrs sinken.

Störungen im Schienenverkehr wirken sich vielfältig auf das gesamte System Bahn aus, wobei den meisten Auswirkungen auch durch die Störung bedingte Kosten zugeordnet werden können. Eine Übersicht über die Zusammenhänge und die störungsbedingten Folgekosten im System Bahn sind in Abbildung 1.2 dargestellt. Erweitert man diese rein betriebswirtschaftliche

¹ Entsprechend „*Unsichere Wartezeiten erscheinen länger als bekannte und begrenzte Wartezeiten. Unerklärte Wartezeiten dauern länger als erklärte.*“ – zwei von acht Thesen des „Perception Management“, siehe Maister (1985)

Betrachtung um eine volkswirtschaftliche, so sind auch die Zeitverluste der Reisenden sowie die daraus entstehenden Folgekosten ebenfalls mit einzubeziehen. Anhand der Vielzahl störungsbedingter Folgekosten und dem Umstand, dass den meisten Störungsgründen nicht vorgebeugt werden kann, ist es ersichtlich, dass der Grad der Auswirkungen und die damit verbundenen Folgekosten zu minimieren sind. Je nach Umfang der Störung reichen dazu einfache dispositive Maßnahmen aus, bzw. ist ein umfassendes Störfallmanagement notwendig.

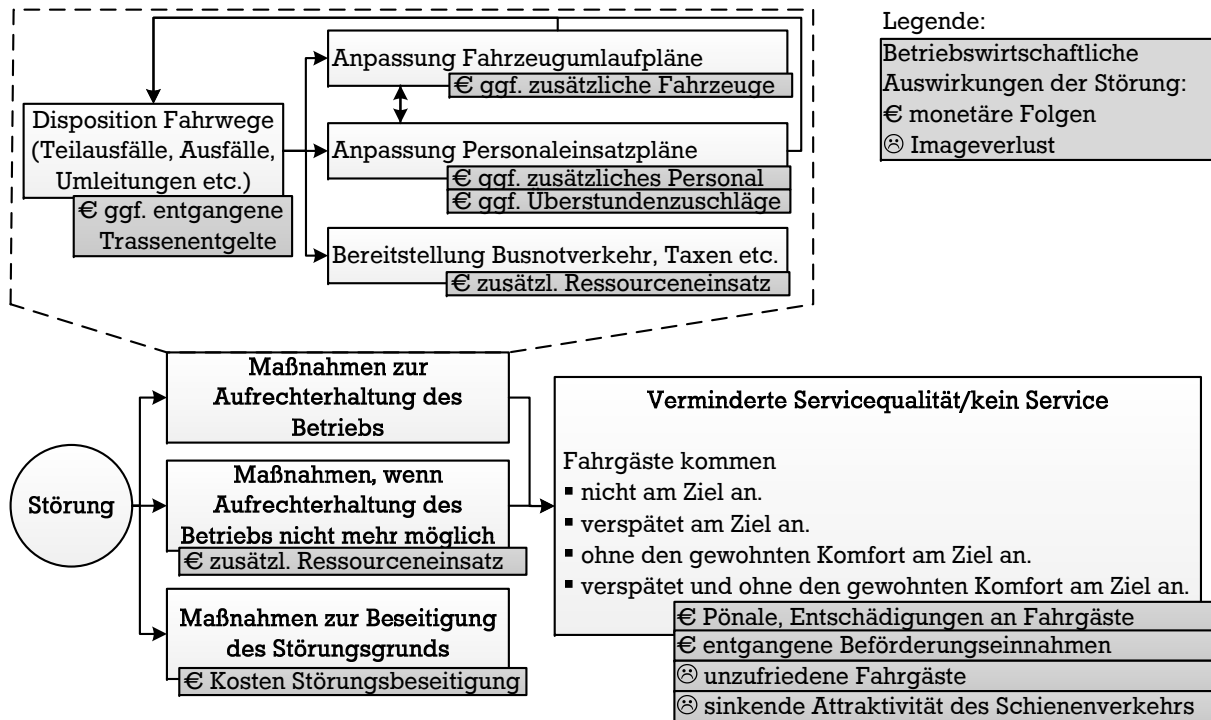


Abbildung 1.2: Wirkung von Störungen im Schienenverkehr am Beispiel der entstehenden betriebswirtschaftlichen Folgekosten

Bedeutung des Störfallmanagements

Wie aus den einleitenden Bemerkungen ersichtlich wird, stehen Störungen dem Qualitäts- sowie dem Pünktlichkeitsziel im Eisenbahnverkehr entgegen und verursachen sowohl direkte als auch indirekte betriebswirtschaftliche und volkswirtschaftliche Folgekosten. Die direkten Folgekosten entstehen – verallgemeinert – aus den Kosten für die notwendigen Reaktionen auf die Störung und aus einem unwirtschaftlichen Ressourceneinsatz, der aufgrund der ungeplanten Störung entstehen kann. Weiterhin können durch eine langfristige Unzufriedenheit der Fahrgäste aufgrund der Störungsauswirkungen Imageverlust und damit indirekte Folgekosten entstehen. Diese kommen zum Tragen, wenn die oben beschriebene Anforderung eines schnellen und transparenten Informationsflusses im Störfall nicht erfüllt wird bzw. nicht erfüllt werden kann.

Die Folgekosten von Störungen sind demnach bedeutend, weshalb strukturierte Wege gefunden werden müssen um Störungen im Schienenverkehr zu begegnen. Es sind also Störfallmanagementkonzepte für den Schienenverkehr notwendig, welche den wirksamen und wirtschaftlichen Ressourceneinsatz garantieren und einen transparenten und schnellen Informationsfluss innerhalb der Organisation sowie nach außen ermöglichen.

Weiteres Vorgehen

Mithilfe der Literaturrecherche im nachfolgenden Kapitel 2 sollen drei Ziele verfolgt werden. Das erste Ziel ist die Erarbeitung des Wissensstands in Forschung und Praxis im Bereich des Störfallmanagements im Allgemeinen und im Schienenverkehr im Speziellen, um die bestehenden Herausforderungen des Störfallmanagements im Schienenverkehr zu identifizieren. Ebenso soll der Stand des Wissens im Störfallmanagement anderer Verkehrsträger untersucht werden, um gegebenenfalls geeignete Lösungsansätze zur Übertragung auf den Schienenverkehr zu identifizieren.

Das zweite Ziel besteht in der Erarbeitung des aktuellen Stands in Bezug auf die betrieblichen und dispositiven Abläufe im Störfall: Da im Rahmen von Störungen oft Rückstaus entstehen, welche zu Verspätungen und damit zu Abweichungen vom Fahrplan führen, ist die genaue Kenntnis dieser Abläufe notwendig, um beispielsweise die genauen Ursachen der Rückstaus zu identifizieren.

Durch Störungssituationen im Bahnbetrieb wird die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur i. d. R. eingeschränkt. Die Durchführung von Dispositionsmaßnahmen während einer Störung beeinflusst ebenfalls die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur und erfolgt mit dem Ziel, die verbleibende Leistungsfähigkeit bestmöglich zu nutzen. Daher besteht das dritte Ziel der Literaturrecherche in der Erarbeitung des aktuellen Wissensstands, wie die Kapazität von Schieneninfrastruktur definiert, gemessen und bemessen wird.

Auf Basis der Literaturrecherche sollen im Anschluss wichtige Problemstellungen im Bereich des Störfallmanagements im Schienenverkehr identifiziert werden.

2 Stand der Forschung

2.1 Stöfallmanagement

2.1.1 Störungen im Schienenverkehr

Für den Begriff der Störung im Schienenverkehr lassen sich in der Literatur unterschiedliche Definitionen finden. Eine Möglichkeit ist die Definition anhand der Beschränkung auf die Störungsursache, indem Störungen als „*Veränderung von Infrastruktureigenschaften, wie die zeitweise Nichtverfügbarkeit einer oder mehrerer Blockabschnitte, welche zu Veränderungen von Reisezeiten und Reiserouten führt*“ betrachtet werden (übersetzt nach Corman (2010)). In den Regelwerken der DB Netz AG werden Störungen allgemein und ursachenunabhängig als „*Abweichungen von betrieblichen Planungen oder definierten Sollzuständen.*“ beschrieben ((DB Netz, 420), Modul 9001). Andere Definitionen schließen wiederum die Notwendigkeit ein, dass die Abweichungen mindestens bemerkt (Potthoff, 1962) bzw. sogar „*unangenehm bemerkt*“ (VDV, Iffländer (2009)) werden müssen. In Schranil u. Weidmann (2012b) wird dieser Gedanke fortgeführt, indem eine Betriebsstörung als „*ein vom Regelbetrieb unerwartet abweichender Zustand*“ beschrieben wird, „*dessen Behebung außerplanmäßige Ressourcen erfordert*“. Diese Definition von Störungen bildet die Grundlage für die weitere Arbeit, da sie sowohl alle Störungsursachen als auch die Notwendigkeit der unangenehm bemerkten Abweichung einbezieht sowie den für die Behebung notwendigen dispositiven Aspekt betrachtet.

Für die Einteilung von Störungen lassen sich in Literatur und Praxis ebenfalls verschiedene Ansätze finden. So besteht die Möglichkeit der Einteilung nach Größe in kleine, mittlere und große Störungen (siehe DB Regio (615)) oder nach Ursache bzw. Verursacher der Störung in Betreiber der Schienenwege, Eisenbahnverkehrsunternehmen, externe Einflüsse und sekundäre Ursachen (siehe DB Netz (420)). Weiterhin existiert die Einteilung nach Problembereichen, also Fahrzeuge, Mitarbeiter, Infrastruktur und Bahnbetrieb (siehe Bässe (2012), S.13).

Aus dispositiver Sicht sind jedoch weder Ursache noch Verursacher für den Umgang mit Störungen ausschlaggebend. Wichtig sind vor allem die betrieblichen Auswirkungen der Störung auf den Betrieb, da sie die erforderlichen bzw. noch zur Verfügung stehenden Dispositionsmaßnahmen bestimmen. Eine entsprechende Kategorisierung von Störungen nach ihren Auswirkungen ist in Abbildung 2.1 dargestellt. In dieser Kategorisierung werden die Wirkungsbereiche „Station“, „Strecke“ und „Netz“ unterschieden. Auch die Einteilung des Problembereiches Infrastruktur in „vollständig nicht befahrbar“, „teilweise nicht befahrbar“ und „Beschränkung der Kapazität“ macht deutlich, dass aus betrieblicher Sicht nicht die Ursache, wie bspw. ein auf der Strecke liegengeliebenes Fahrzeug oder ein umgestürzter Baum, sondern die Auswirkung der Nichtbefahrbarkeit der Strecke maßgebend ist. Selbstverständlich bleibt die Störungsursache für die Beseitigung der Störung entscheidend.

Zusammenfassend kann bemerkt werden, dass Störungen im Schienenverkehr auf vielen verschiedenen Ursachen beruhen können und dass ihr Auftreten zu Abweichungen im Betrieb führt, welche korrigiert werden müssen. Die Einteilung von Störungen hängt vom Bedarf des jeweiligen Betrachters ab, wobei aufgrund der dispositiven Sicht für die weitere Arbeit eine Einteilung von Störungen in Bezug auf ihre Auswirkungen am sinnvollsten erscheint.

Problembereich		Auswirkungsbereich		
		Station	Strecke	Netz
Infrastruktur	1: Vollständig nicht befahrbar	Sperrung wg. Bombendrohung, Brand etc.	Streckensperrung wegen Suizid, Oberleitungsschäden, Gleisarbeiten, Ausfall von Kommunikationsmitteln, ESTW-Ausfall	meteorologische Bedingungen (Vereisungen), Ausfall von Kommunikationsmitteln
	2: Teilweise nicht befahrbar	Bauarbeiten im Gleis, defekte Rolltreppen am Bahnsteig (nur am Bahnsteig, Sperrung eines Gleises), Beleuchtungsausfall	ESTW-Teilausfall, Oberleitungsschaden, Gleisschaden, Bauarbeiten	Ausfall Stromversorgung/ LST-Anlagen/ Weichenheizungen o.ä.
	3: Beschränkung der Kapazität	Beschränkung des Durchsatzes von Zügen aufgrund diverser Ursachen	Trassenreduzierung, Geschwindigkeitsreduzierung, z.B. durch Fern- und Güterverkehr bedingt	witterungsbedingt, Großbaustelle
	4: Verfügbarkeit Fahrzeuge	Verspätete Übergabe von Fahrzeugen	Triebfahrzeugschaden	Flottenstörungen
Betrieb	5: Verfügbarkeit Betriebspersonal	Verspäteter Arbeitsbeginn, Personalwechsel	Verspäteter Arbeitsbeginn, Personalwechsel, streckenbezogener Streik (Tf)	Verspäteter Arbeitsbeginn, Personalwechsel, Generalstreik
	6: Passagieraufkommen	Durch Großveranstaltungen, Umleitungsmaßnahmen	Großveranstaltungen (Fußball, Konzert), besondere Ereignisse (Demonstrationen)	langfristige Großveranstaltungen (Fußball-WM, Expo, IAA, etc.)

Abbildung 2.1: Einteilung von Störungen nach Problem- und Auswirkungsbereich (Wolters u. a., 2011)

2.1.2 Störfallmanagement im Schienenverkehr

Auch für den Begriff des Störfallmanagements im Schienenverkehr lässt sich in der Literatur keine einheitliche Definition finden. Grundlegend kann das Störfallmanagement als „*alle Aktionen und Handlungen, die wir unternehmen, um die bemerkte(n) unangenehme(n) Abweichung(en) vom geplanten Betriebszustand wieder unschädlich zu machen*“ beschrieben werden (Iffländer, 2009). Neben der Eliminierung der aufgetretenen Abweichungen steht in der Definition von Zeng u. a. (2011) die zeitnahe Minderung der Abweichungen im Fokus: „*Störfallmanagement hat zum Ziel, unerwartete Ereignisse zu bewältigen um die Auswirkungen der Störung in Echtzeit zu lindern*“ (übersetzt nach Zeng u. a. (2011)). In Jespersen-Groth (2008), S. 83 werden die kooperativen Aspekte bei der Störungslösung sowie der Fahrgastfokus in die Definition des Störungsmanagements eingebracht: „*Entsprechen definieren wir Störungsmanagement als den gemeinsamen Ansatz der betroffenen Organisationen mit den Auswirkungen der Störungen umzugehen mit dem Ziel den bestmöglichen Service für die Fahrgäste sicher zu stellen*“ (übersetzt nach Jespersen-Groth (2008)).

Die umfassendste Definition des Störfallmanagements gibt Kuster u. a. (2009) wider: „*Störfallmanagement ist der Vorgang, ein angemessenes Set an Interventionsmaßnahmen nach dem Eintritt einer Störung auszuwählen. Typischerweise ist das zentrale Ziel des Störfallmanagements, wieder in den Regelbetrieb zurück zu finden und das beste Verhältnis zwischen dem geplanten und dem tatsächlichen Prozess zu finden indem zukünftige Fahrpläne so aktualisiert werden, dass die negativen Auswirkungen minimiert werden. Dabei besteht das Störfallmanagementproblem aus*

1. einem gegebenen Plan für die Zukunft,
2. einer bestimmten Störung,
3. verschiedenen dispositiven Maßnahmen sowie
4. einer Zielfunktion für die Anpassung der Pläne.“

(übersetzt nach Kuster u. a. (2009))

Anhand der aufgeführten Definitionen wird deutlich, dass sich das Störfallmanagement, mit seiner Hauptaufgabe des Umgangs mit den Auswirkungen von Störungen, klar vom Notfallmanagement, also dem Umgang mit dem Störungsgrund und dessen Beseitigung (siehe Vogt (2007)), unterscheidet.

Die bestehenden Definitionen des Störfallmanagements beschränken sich jedoch auf den Umgang mit akuten Störungen, weshalb im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine erweiterte, ganzheitliche Betrachtung des Störfallmanagements nach Chu u. Fornauf (2011) erfolgt. Betrachtet man das Auftreten einer Störung im betrieblichen Kontext, so kann ein Störungszyklus beschrieben werden. Der Störungszyklus, welcher aus dem Katastrophenszyklus nach Alexander

(2002) abgeleitet wurde, besteht aus den Phasen bzw. Handlungsfeldern Vorsorge, Vorbereitung, Bewältigung der Störung und Rückkehr zum Regelbetrieb. Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Phasen sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Eine Darstellung des Stands von Forschung und Praxis in Bezug auf die vier Handlungsfelder Vorsorge, Vorbereitung, Bewältigen und Rückkehr erfolgt im nächsten Abschnitt.

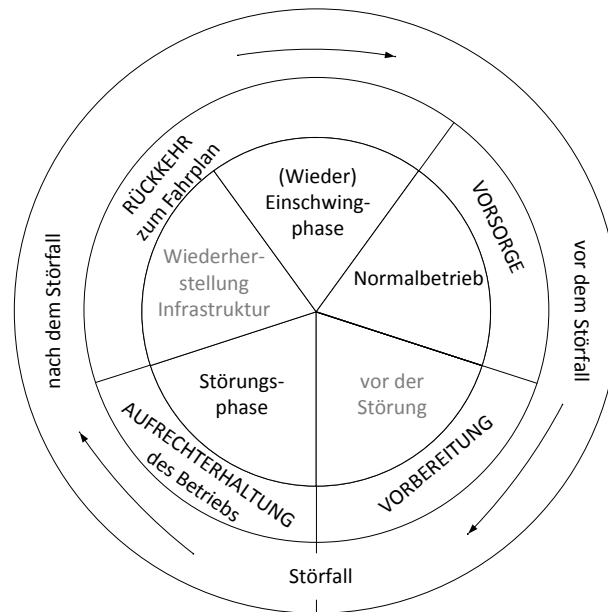


Abbildung 2.2: Phasen des Störungszyklus (Chu u. Fornauf, 2011)

2.2 Bestehende Ansätze des Störfallmanagements im Schienenverkehr

2.2.1 Ansätze der Störfallvorsorge

Die Aufgaben des Handlungsfelds „Vorsorge“ bestehen darin „Betriebsstörungen zu verhindern und die Auswirkungen zukünftiger Störfälle zu reduzieren“ (Chu u. Fornauf, 2011). Potenzielle Betriebsstörungen können auf verschiedene Weise verhindert werden, beispielsweise durch vorbeugende Instandhaltung von Infrastruktur und Fahrzeugen sowie durch die Beseitigung von Dauerstörstellen (siehe auch Anemüller u. Jacobs (2013) und von Störungsursachen in Abbildung 2.1). Die Reduktion der Auswirkungen zukünftiger Störfälle kann durch den Aufbau von Kompetenzen zum effizienten und effektiven Umgang mit Störungen erfolgen. Die entsprechenden Ansätze aus der Praxis beinhalten hierbei

- das Training von Disponenten und Betriebspersonal im Umgang mit Störfallsituationen (Wolters u. Böhme, 2009),
- die Schaffung von entsprechenden Kommunikationsstrukturen und Abstimmungsprozessen für den Störfall (Täubler, 2010),
- die Festlegung von Verantwortlichkeiten (Göwert, 2008) sowie
- die Erarbeitung von Störfallprogrammen für spezielle Störungssituationen (siehe Rey u. a. (2007) und Steger (2008)).

Die Auswirkungen zukünftiger Störfälle können ebenfalls reduziert werden, indem der Betrieb so geplant wird, dass sich kleinere Störungen nicht sofort im gesamten Netz verbreiten bzw. im Fahrplangefüge bemerkbar machen. Dieser Ansatz der Entwicklung robuster Fahrpläne für den Schienenverkehr wird derzeit im Bereich der Eisenbahnforschung vorangetrieben (siehe

u.a. Ahuja u. a. (2009), Andersson u. a. (2013) sowie Dewilde u. a. (2013)), aber auch von Praktikern beachtet (siehe Weigand (2012) und Fechner u. Rothe (2012)).

Neben der Erstellung robuster Fahrpläne, lassen sich in der Literatur vereinzelte Forschungsarbeiten im Bereich des vorsorgenden Störfallmanagements finden. Neben den Arbeiten von Chu u. a. (2012) zum Bereich der Störfallprogrammerstellung, beschäftigen sich Nakamura u. a. (2011) mit der Gestaltung von Wendemustern im Störfall und Kunimatsu u. a. (2013) mit der sinnvollen Anordnung von Überleitverbindungen, um im Störfall dispositiv flexibler agieren zu können. Weiterhin existieren Arbeiten von Pender u. a. (2013) über die optimale Planung von Busnotverkehr.

2.2.2 Ansätze der Vorbereitung auf Störfälle

Die Aufgaben des Handlungsfelds „Vorbereitung“ bestehen darin *„Auswirkungen von angekündigten oder absehbaren Betriebsstörungen zu reduzieren“* (Chu u. Fornauf, 2011). Im Rahmen der Literaturrecherche konnten vorbereitende Ansätze in der Praxis identifiziert werden. Hierbei handelt es sich um die Erstellung von Baustellenfahrplänen, die organisatorische Vorbereitung im Falle von Unwetterwarnungen (siehe Chu (2012b)) sowie um die Erstellung von Sonderfahrplänen für bestimmte Ereignisse und Massenveranstaltungen, wie beispielsweise für die Olympischen Spiele in London 2012 (siehe Currie u. a. (2013)). Forschungsansätze, welche sich mit vorsorgendem Störfallmanagement beschäftigen, konnten im Rahmen der Literaturrecherche nicht identifiziert werden.

2.2.3 Ansätze zum Bewältigen von Störfällen

Die Aufgaben des Handlungsfelds „Bewältigung der Störung“ umfassen alle *„alle Aktivitäten während des Eintritts eines Störfalls und der unmittelbaren Folgezeit mit den Hauptzielen Aufrechterhaltung des Betriebs, Minimierung von Verspätungen und Sicherung von Transportketten“* (Chu u. Fornauf, 2011). Die drei Hauptaufgaben der Störungsbewältigung bestehen dabei in der Anpassung von Fahrplänen, Fahrzeugumläufen und Personalplänen (siehe Zeng u. a. (2011)). Die Durchführung der entsprechenden Anpassungen erfolgt je nach Zielstellung in der Regel unter Beachtung verschiedener Perspektiven. In Kroon u. Huisman (2009) werden als weitere Beispiele für mögliche Zielperspektiven die Bereiche Fahrgastsicht, Verwendung von Ressourcen, Robustheit und Prozesseffizienz genannt.

Die betriebliche Bewältigung von Störungen erfolgt grundsätzlich in den Schritten „Konflikt erkennen“ und „Konflikt lösen“, wobei es sich je nach Ressourcenebene um Belegungskonflikte, fehlende Fahrzeuge oder fehlendes Personal handelt. Entsprechend des Automatisierungsgrads lassen sich folgende existierenden Grundarten der Konflikterkennung und -lösung unterscheiden: manuell und basierend auf der Erfahrung der diensthabenden Disponenten, auf Basis von Regeln, computergestützt und Mischformen.

Derzeit erfolgt die Konfliktlösung in der Praxis vor allem durch erfahrene Disponenten (Chu, 2012b), mithilfe von einfachen Vorrangregelungen wie „schnell vor langsam“ / „Premiumprodukte vor anderen“ (siehe Jacobs (2008) und Moosbrugger (2008)) oder mit einfachen Prinzipien wie „wer am längsten wartet zuerst“ (Kliwer u. Suhl, 2011), „first come first serve“ oder „der Zug mit der größten Verspätung zuerst“ (Jespersen-Groth u. a., 2009). Die dafür grundsätzlich zur Verfügung stehenden Dispositionsmaßnahmen werden in Abschnitt 2.4 aufgezeigt.

Die Ansätze der computergestützten Konflikterkennung und -lösung lassen sich grundsätzlich in Offline- und Echtzeitansätze einteilen, wobei für die Bewältigung von Störfällen vor allem Echtzeitansätze infrage kommen. Die Konfliktlösung erfolgt dabei mindestens anhand von Regeln und oft mit einem optimierenden Ansatz. Einen ausführlichen Überblick über die existierende Forschung zur Offline-Konflikterkennung und -lösung gibt Törnquist (2006) im Anhang A des zweiten Artikels wieder. Dort werden 48 Modelle aus dem Zeitraum von 1973 bis 2005 nach Art des mathematischen Modellierungsansatzes, Art der Infrastrukturmodellierung, Zielfunktion sowie Optimierungsansatz und Kontrollstrategie kategorisiert. Eine Übersicht über die aktuellen Ansätze der Echtzeitdispositionsunterstützung sind in Tormo u. a. (2013) zu finden, wobei eine Einteilung der Ansätze in Modelle mit mathematischer Optimierung mithilfe von Heuristiken oder deterministischen Algorithmen anhand von Zielfunktionen, wissensbasierte Ansätze und Simulation vorgenommen wird. Tormo u. a. (2013) stellen weiterhin einen klaren Trend zu Verwendung heuristischer Optimierungsmodelle fest und vergleichen die prominentesten Ansätze. Mit der verstärkten Verwendung von Optimierungsansätzen lassen sich in der Literatur weitere Zielstellungen, wie die Minimierung von Warte- und Haltezeiten, Verspätungen pro Zug, Gesamtverspätung, Gesamtreisezeit, die Maximierung von Leistungsfähigkeit und Profit oder die Machbarkeit von Fahrplänen finden (siehe Törnquist (2006), Artikel II und VI).

Neben Forschungsarbeiten, die nicht mehr weiter verfolgt werden (bspw. Hauenstein u. a. (2004) und Schaer u. a. (2005)), existieren folgende prominente Forschungsarbeiten mit dem Ziel der Echtzeit Dispositionsunterstützung:

- Die Arbeiten von D’Ariano und Corman in den Niederlanden zum Modul ROMA (Railway traffic Optimization by Means of Alternative graphs), siehe Corman (2010) und Corman u. a. (2011c)).
- Die Arbeiten von Törnquist-Krasemann in Schweden, siehe Törnquist (2006) und Törnquist-Krasemann (2012)).
- Die Arbeiten von Chen u. a. in Großbritannien zu Junction Rescheduling Model, siehe Chen (2012) und Chen u. a. (2010).
- Die Arbeiten der DB Netz in Deutschland zur Konflikterkennung und Konfliktlösung, siehe Oetting u. a. (2013).

Obwohl die Modelle der angeführten Arbeiten mit realen Betriebsdaten validiert wurden, ist bisher nur für das letztgenannte Modell die Umsetzung in einen Prototypen erfolgt (siehe Pänke u. Klimmt (2012)). Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist die Steuerung und Disposition von Güterzügen im Lötsch-Bergbasistunnel in der Schweiz (siehe Rao u. a. (2013)). Außerhalb dieser Arbeiten sind entsprechende theoretische Forschungsarbeiten aus Spanien (Cadarsó u. a., 2013), aus der Türkei (siehe Sahin (1999) sowie Dündar u. Sahin (2013)) und aus Frankreich (Delorme u. a., 2009) zu nennen, welche bisher jedoch keine praktische Relevanz zu haben scheinen.

Insgesamt kann von einem starken Bestreben der Forschung in Richtung computerunterstützter Disposition im Störfall gesprochen werden, wobei die Umsetzung der existierenden Forschungsergebnisse in die Praxis noch in den Anfängen steckt.

2.2.4 Ansätze der Rückkehr zum Regelbetrieb

Die Aufgabe des Handlungsfelds „Rückkehr zum Regelbetrieb“ besteht in der „Wiederherstellung des planmäßigen Betriebs nach (Beseitigung) der Störung“ (Chu u. Fornauf, 2011). Ist es möglich gewesen, während der Störung einen geordneten gestörten Betrieb zu erreichen, ist eine Rückführung der Fahrzeuge auf die geplanten Linienverläufe und -takte relativ einfach. Jedoch führt die Verwendung der beschriebenen Dispositionsmaßnahmen zur Herstellung eines

geordneten gestörten Betriebs (siehe Abschnitt 2.4) zu Abweichungen von den ursprünglichen Fahrzeugumlauf- und Personalplänen, weshalb der Fokus bei der Rückführung zum Regelbetrieb auf der Wiederherstellung der Fahrzeug- und Personalumläufe liegt.

Obwohl aus dem Erfahrungsschatz von Praktikern lokal Vorgehensweisen für die Rückführung in den Regelbetrieb entwickelt wurden, fehlen dafür allgemeingültige methodische Ansätze in der betrieblichen Praxis (Chu, 2012b). Auch in der Forschung existieren nur sehr wenige Arbeiten, welche sich mit einer Methodik zur Rückkehr zum Regelbetrieb nach Störungen beschäftigen. Monecke (2010) entwickelte bspw. ein Programmsystem, welches die zur Verfügung stehenden Dispositionsmöglichkeiten für die Rückführung der Fahrzeugumläufe und Personalpläne auf Basis entstehender (Warte-)Kosten bewertet und anschließend geeignete Dispositionslösungen vorschlägt. Leider erfolgte nur ein theoretischer Nachweis der Eignung dieses Systems für die genannte Aufgabe. Eine weitere Forschungsarbeit beschäftigt sich mit der optimalen Wiedereinführung von Zügen, deren Linien im Störfall gestrichen wurden (siehe Jespersen-Groth u. Clausen (2006)). Mithilfe eines Modells der ganzzahligen Programmierung werden hier die optimalen Depots für die Wiedereinführung bestimmt, wobei die Funktionsfähigkeit des Modells an realen Betriebsdaten nachgewiesen wurde.

Insgesamt ist festzustellen, dass speziell für Aufgabe der Rückführung in den Regelbetrieb weder in der Praxis noch in der Forschung viele Ansätze zur Verfügung stehen. Hier besteht demnach eine Wissenslücke.

2.2.5 Störfallprogramme als spezieller Ansatz der Störfallvorsorge

Die Ausführungen zum Stand von Forschung und Praxis in den vier Handlungsfeldern des Störfallmanagements zeigen die besondere Bedeutung der Handlungsfelder „Vorsorge“ und „Bewältigen“. Während im letzteren Handlungsfeld bereits viele Forschungsarbeiten unternommen werden, befinden sich die Forschungsarbeiten im Handlungsfeld „Vorsorge“ noch in den Anfängen. Der Einsatz von Störfallprogrammen bildet einen wichtigen Bestandteil des Handlungsfeldes „Vorsorge“ (siehe Chu u. Fornauf (2011)), weshalb nachfolgend der aktuelle Stand von Forschung und Praxis zu Störfallprogrammen wiedergegeben wird.

Störfallprogramme

Unter Störfallprogrammen versteht man *„Handlungskonzepte für den Fall von Infrastruktur- und Betriebsstörungen im Schienenverkehr; in deren Rahmen vorab ausgewählte und definierte Dispositionsmaßnahmen umgesetzt werden“* (Chu u. a., 2012). Die Handlungskonzepte bestehen aus Maßnahmen zur Disposition (siehe Abschnitt 2.4.3), zur Kommunikation und zur Fahrgastlenkung. Störfallprogramme beschreiben hierbei entweder einen Betrieb, bei dem auf die Inanspruchnahme bestimmter Gleis-/Streckenabschnitte verzichtet wird bzw. die Inanspruchnahme nicht möglich ist, oder einen entlasteten Betrieb, bei dem bestimmte Linien nicht in einem bestimmten Streckenabschnitt verkehren, obwohl die vorgesehene Infrastruktur zur Verfügung steht (s. g. Entlastungsprogramme, siehe Wolters u. a. (2011)).

Der zeitliche Ablauf einer Störung mit Störfallprogramm ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Nach dem Eintritt der Infrastruktur- oder Betriebsstörung ist es notwendig, die Störungsursache zu ermitteln und das auf die Situation zutreffende Störfallprogramm auszuwählen. Wurde eine Entscheidung über das anzuwendende Störfallprogramm getroffen, wird diese durch die Ausrufung des Störfallprogramms kommuniziert. Ab dem Zeitpunkt der Ausrufung beginnt die Umsetzung des Störfallprogramms mit dem Ziel den gestörten Betrieb in einen stabilen Störungszustand zu überführen. Ein Störfallprogramm ist dann stabil und gilt als eingeschwungen, wenn die

Züge auf den im Störfallprogramm vorgesehenen (verkürzten) Laufwegen, im vorgesehenen (verringerten) Takt, zuverlässig und pünktlich fahren. Dieser Zeitraum wird Einschwingphase genannt. Die Zeit vom Beginn der Störung bis zum Ende der Einschwingphase wird in der Praxis auch als „Chaosphase“ bezeichnet, da sie, vor allem aus Fahrgastsicht, oft als chaotisch empfunden wird, weil gegensätzliche Aussagen und Informationen existieren und sich ein genaues Bild über die tatsächliche Störfallsituation erst sukzessive ergibt (Chu, 2012b). Nachdem die Störungsursache beseitigt ist, kann die Rückführung in den Regelbetrieb erfolgen. Diese Überführung beginnt mit der Aufhebung des Störfallprogramms und wird Ausschwingphase genannt. Ein Störfallprogramm ist dann beendet und gilt als vollständig ausgeschwungen, wenn die Züge auf ihren regulären Laufwegen, im planmäßigen Takt, zuverlässig und pünktlich fahren.

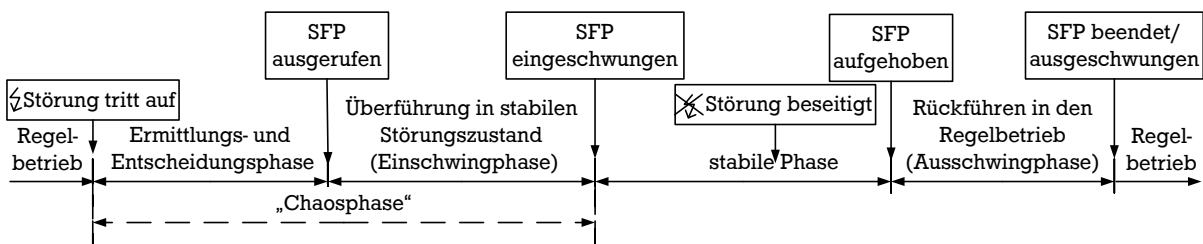


Abbildung 2.3: Phasen der Anwendung von Störfallprogrammen (Chu u. a., 2013)

Vorteile und Nachteile von Störfallprogrammen

Aus dem Umstand, dass in einem Störfallprogramm bereits die Dispositionsmaßnahmen, die Kommunikationswege und -inhalte sowie das Vorgehen zur Umsetzung festgelegt und mit allen Beteiligten abgeprochen sind, ergeben sich folgende Vorteile:

- *Schnellere Reaktionszeit:* Durch eine vorher definierte Auswahl an Störfallprogrammen reduziert sich die Anzahl von Lösungsmöglichkeiten. Dadurch wird die Lösungsfindung vom eigentlichen Störungszeitpunkt entkoppelt und die Dauer für die Entscheidungsfindung verkürzt.
- *Vereinfachte Kommunikation:* Aufgrund der im Störfallprogramm vorab beschlossenen und kommunizierten Maßnahmen und der festgelegten Rollenverteilung, ist eine vereinfachte, schnelle und zuverlässigere Abstimmung möglich. Dies erlaubt wiederum eine bessere und schnellere Fahrgastinformation und verringert die notwendigen telefonischen Rückfragen zwischen den beteiligten Personen.
- *Höhere Lösungsqualität:* Da bereits im Vorfeld von Störungen mögliche Lösungen durchdacht und erörtert werden, führt dies zu weniger Improvisation und damit zu einer geringeren Fehleranfälligkeit, zu einer gezielteren Lenkung der Fahrgastströme und zu einem gezielten Einsatz der vorhandenen Ressourcen – unter Beibehaltung einer kurzen Reaktionszeit. Weiterhin besteht dadurch die Möglichkeit, eine für das gesamte Netz sinnvolle Lösungen zu finden, während bei ad-hoc Entscheidungen oft nur eine lokale Sicht bedient werden kann.
- *Entlastung der Disponenten:* Die in den vorhergehenden Punkten genannten Verbesserungen entlasten die Disponenten im Störfall. Ebenso erlaubt der Einsatz von Störfallprogrammen, soweit die softwareseitige Implementierung gewährleistet ist, eine einfache und automatische Dokumentation aller Dispositionshandlungen während eines Störfalls.

Insgesamt wird durch die verbesserten Entscheidungs-, Kommunikations- und Umsetzungsprozesse ein effektiver und effizienterer Umgang mit Störungen möglich. Dies verringert die nega-

tiven Auswirkungen von Störungen im Schienenverkehr (siehe Kapitel 1) und führt wiederum zu einer gesteigerten Betriebsqualität und erhöhten Kundenzufriedenheit.

Ein Nachteil des Einsatzes von Störfallprogrammen besteht im großen Erstellungsaufwand. Dieser lässt sich in allen Erstellungsschritten wiederfinden: bei der Definition und Priorisierung der kritischen Störungen, bei der Entwicklung machbarer Lösungsmöglichkeiten sowie bei der Ausarbeitung der entsprechenden Unterlagen. Mit Hilfe des bereits entwickelten Leitfadens zur Störfallprogrammerstellung (Wolters u. a., 2011) wurde der Erstellungsprozess strukturiert, wodurch der Erstellungsaufwand etwas eingeschränkt werden konnte. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die Machbarkeit eines Störfallprogramms (siehe Kapitel 3) bisher erst während der tatsächlichen Anwendung eines Störfallprogramms nachgewiesen werden kann. Aus diesem Umstand ergibt sich oft die Notwendigkeit eines „Versuch-Irrtums-Vorgehens“, welches wiederum Ressourcen bindet. Ein Vorgehen zur Prüfung der Machbarkeit von Störfallprogrammen bereits in der Erstellungsphase ist demnach notwendig.

Anwendung von Störfallprogrammen in der Praxis

Das Konzept der Störfallprogramme ist in Deutschland bekannt und wird derzeit im S-Bahn und Regionalverkehr eingesetzt. Im Netz der S-Bahn München wird dieses Konzept bereits seit den Neunziger Jahren praktiziert und weiterentwickelt (siehe Steger (2008)), in den Netzen der S-Bahnen Frankfurt am Main und Stuttgart sowie im Dispositionsbereich der Betriebszentrale Berlin finden Störfallprogramme seit mehreren Jahren (siehe Chu u. a. (2012) und Chu (2012b)) Anwendung. Weiterhin sind Anwendungen von Störfallprogrammen im Mischverkehrsnetz der S-Bahn Hannover sowie auf einzelnen Regionalstrecken in Sachsen und Südhessen bekannt (siehe Chu (2012b)).

Die von der Autorin durchgeführten Experteninterviews zum Einsatz von Störfallprogrammen in Deutschland ergaben, dass die Erstellung von Störfallprogrammen bisher manuell und durch Experten mit netzspezifischem Wissen erfolgt (Chu, 2012b). Als Hilfe bei der Erstellung steht ein Leitfaden mit allgemeinen Schritten zur Verfügung – allgemeingültige Methoden zur Überprüfung der Machbarkeit bzw. der Qualität der entwickelten Störfallprogramme sind nicht vorhanden (Chu u. a., 2012). Die Durchführung der in analoger bzw. elektronischer Form vorliegenden Störfallprogramme in Deutschland erfolgt derzeit manuell unter Verwendung bestehender IT-Systeme ohne zusätzliche spezifische Softwareunterstützung. Für eine erfolgreiche Anwendung der Störfallprogramme im Betrieb wird dabei derzeit die Erfahrung und Expertise der diensthabenden Disponenten als entscheidender Faktor angesehen. Jedoch ist es auch möglich, dass die Anwendung durch erfahrene Disponenten nicht zum Erfolg führt, wobei in diesen Fällen auch Experten nicht immer die Gründe für ein Mislingen benennen können (Chu, 2012b). Gerade an diesen Beispielen wird deutlich, dass ein allgemeingültiges, von den lokalen Bedingungen unabhängiges Verständnis in Bezug auf die Anwendung von Störfallprogrammen fehlt.

Auf internationalem Niveau konnten nur wenige Nachweise über den Einsatz von Störfallprogrammen oder ähnlichen Konzepten gefunden werden. Eine sehr fortgeschrittene Anwendung von Störfallprogrammen wird im Netz der Schweizerischen Bundesbahnen praktiziert (siehe Fischer (2009)). Hier werden Störfallprogramme seit über 20 Jahren eingesetzt, deren Durchführung durch den an das Dispositionssystem RCS gekoppelten Alarm- und Ereignisassistenten ALEA unterstützt und dokumentiert wird (siehe SBB (2012)). Auch im Japanischen Bahnbetrieb werden vorab Wendebahnhöfe für den Fall von Infrastrukturstörungen definiert, welches sich mit dem Grundgedanken von Störfallprogrammen deckt (Tamura u. a., 2013). In Dänemark fin-

den Störfallprogramme unter dem Begriff „Notfallszenario“ Anwendung (siehe Jespersen-Groth u. a. (2009)).

Zusammenfassend kann bemerkt werden, dass es sich bei Störfallprogrammen um ein anerkanntes Konzept handelt, welches jedoch in der Praxis noch nicht flächendeckend eingesetzt wird. Die Erstellung und Umsetzung von Störfallprogrammen erfolgt durch Experten, deren Wissen nur selten allgemeingültig formuliert zur Verfügung steht. Auch das Prüfen oder Plausibilisieren erarbeiteter Störfallprogramme erfolgt größtenteils nur anhand von Expertenwissen (Chu, 2012b).

Störfallprogramme in der Forschung

Im Rahmen einer zum Thema durchgeführten internationalen Literaturrecherche konnten – bis auf die Arbeiten von (Chu u. a., 2012) – keine Forschungsarbeiten speziell zu Störfallprogrammen gefunden werden. Es ist zu vermuten, dass dieser Umstand durch den Fokus der Forschung auf die Entwicklung von Echtzeitdispositionsunterstützungssystemen und die Erstellung robuster Fahrpläne (siehe Abschnitt 2.2.3) zurückzuführen ist. Außerhalb dieses Forschungsgebietes erfolgten Forschungen zu betrieblichen Auswirkungen von Störungen (Schranil u. Weidmann, 2012a), zur optimalen Festlegung von Wendebahnhöfen für einzelne Linien bei Netzen mit gattungsreinem Verkehr (siehe Tamura u. a. (2013) und Nakamura u. a. (2011)), zu Gestaltungsprinzipien für Busnotverkehr (Pender u. a., 2013) sowie zur optimalen organisatorischen Gestaltung von Taxi- bzw. Busnotverkehr (Zeng u. a., 2011) im Störfall.

Obwohl das Konzept von Störfallprogrammen anerkannt und die Wirksamkeit von Störfallprogrammen in der Praxis nachgewiesen ist, fehlt vertieftes theoretisches Wissen über die Vorgänge während der Einschwingphase von Störfallprogrammen (Corman u. a., 2011c). Auch in der wissenschaftlichen Literatur über die aktuellen Ansätze der Echtzeitdispositionsunterstützung (siehe Abschnitt 2.2.3) lassen sich weder Ansätze zur Modellierung der Vorgänge während der Umsetzung von Dispositionsentscheidungen noch grundsätzliche Hinweise auf die Beachtung der Einschwingphase in den Modellierungen finden.

Bewertung von Störfallprogrammen in Forschung und Praxis

Im Rahmen der Entwicklung von Störfallprogrammen und zur Auswahl passender Störfallprogramme ist eine Bewertung dieser notwendig. Dabei sollte die Bewertung in Bezug auf die Einschwingphase, die stabile Phase und die Ausschwingphase erfolgen. Dies ist erforderlich, da ein Störfallprogramm mit einer guten stabilen Phase nicht zwangsläufig auch in der Einschwingphase positiv bewertet sein muss.

Die Bewertung von Störfallprogrammen ist anhand folgender Kriterien denkbar (analog zu Abschnitt 2.2.3, vierter Absatz und erweitert auf Basis von Chu (2012b)), wobei eine Erweiterung der Liste denkbar ist:

- Gesamtverspätungsminuten,
- Verspätungsminuten je Zug,
- Anzahl der (teil-)ausgefallenen Züge bzw. Zugausfallkilometer,
- Anzahl der Umleitungen,
- Gesamtreisezeit,
- Maximierung Leistungsfähigkeit während der Störung und
- Summe der durch die Störung entstehenden Strafzahlungen (Pönale).

Im Rahmen der Literaturrecherche ließen sich keine Hinweise auf allgemeingültige Methoden oder Forschungsansätze zur Bewertung von Störfallprogrammen finden. Hier wird ein Zusammenhang mit dem Ergebnis des vorhergehenden Absatzes vermutet, nämlich der bisherigen Nichtbeachtung des Themengebiets der Störfallprogramme in der Eisenbahnbetriebsforschung.

Experteninterviews zur Bewertung von Störfallprogrammen in der Praxis (Chu, 2012b) ergaben, dass die Bewertung i. d. R. rudimentär durch erfahrene Disponenten erfolgt. Dabei wird jedoch lediglich das Funktionieren der stabilen Phase geprüft. In einem Fall wird bei neu erstellten Störfallprogrammen die Machbarkeit der stabilen Phase mittels Simulation geprüft. Hierbei wird bisher jedoch weder auf die Einschwing- noch auf die Ausschwingphase geachtet.

Zusammenfassend ist zu bemerken, dass derzeit keine Methoden der systematischen Bewertung von Störfallprogrammen vorhanden sind. Bisher wird die Bewertung der Einschwing- bzw. Ausschwingphase gar nicht betrachtet. Es sind also entsprechende Vorgehensweisen und Metriken zu entwickeln.

2.2.6 Fazit Ansätze des Störfallmanagements im Schienenverkehr

Alle in diesem Abschnitt 2.2 beschriebenen Ansätze des Störfallmanagements im Schienenverkehr basieren auf einem der drei Ansätze (1) Störungen nicht auftreten zu lassen, (2) Lösungen für mögliche Störungen bereits im Vorfeld zu entwickeln oder (3) ad-hoc Lösungen für die Betriebsführung nach Auftreten der Störung zu finden. Bisher lag der Forschungsfokus auf dem dritten Ansatz, indem vor allem an einer Verbesserung der ad-hoc Organisation des Betriebs nach dem Auftreten von Störfällen gearbeitet wurde. Während der letzten Jahre fand mit der Arbeit an der Erstellung robuster Fahrpläne auch der erste Ansatz stärkere Beachtung. Dagegen wurde zwar die Notwendigkeit des Ansatzes der Vorsorge im Störfallmanagement im Schienenverkehr anerkannt, in der Forschung jedoch kaum beachtet. Vermutlich ist ein Grund dafür, dass dies bisher vor allem als Aufgabe der Praxis angesehen wurde. Die geführten Experteninterviews ergaben jedoch einstimmig, dass die Vorsorge in Form von Störfallprogrammen – trotz der erwiesenen Vorteile – nur gering verbreitet ist und dass kaum allgemeingültiges Wissen bzw. Regeln zur Prüfung und Anwendung von Störfallprogrammen existieren. Dies führt zu Ineffizienzen und zur Wiederholung vermeidbarer Fehler.

Es ist weiterhin aus folgenden Gründen wichtig, den vorsorgenden Ansatz von Störfallprogrammen komplementär zu den Ansätzen Echtzeitunterstützung und Robustheit zu betrachten. Wie die Ausführungen in Abschnitt 2.2.1 und Abschnitt 2.2.3 zeigen, scheint eine zeitnahe Umsetzung von Echtzeitdispositionsunterstützungssystemen in die Praxis derzeit nicht durchgehend gegeben. Bis diese verbreitet eingesetzt werden können, ist es ebenfalls notwendig Alternativen voranzubringen. Auch mag die Wirtschaftlichkeit von Echtzeitdispositionsunterstützungssystemen nicht in jedem Anwendungsfall gegeben sein. Weiterhin ist im Fall der ad-hoc Disposition nur die schrittweise Weitergabe von Informationen an die Fahrgäste gegeben – nämlich maximal zeitgleich zum Entscheidungszeitpunkt über die jeweilige Dispositionsmaßnahme. Die Anwendung von Störfallprogrammen hingegen ermöglicht eine gezielte und rechtzeitige Kommunikation von Informationen an die Fahrgäste bereits kurz nach Störungsbeginn.

Anhand der durchgeführten Recherchen wurde nachgewiesen, dass besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen sowie die Einschwingphase bei der bisherigen Betrachtung und Modellierung des Betriebs vernachlässigt wurde. In diesem Fehlen von Modellen und Erklärungsansätzen, welche die Abläufe bei der Umsetzung von Dispositionsmaßnahmen nach Störfällen im Allgemeinen und während der Einschwingphase von Störfallprogrammen im Speziellen beachten, besteht eine Wissenslücke. Eine Bearbeitung dieser Wissenslücke birgt

nicht nur den Vorteil, dass Erkenntnisse für die Erarbeitung, Vorabprüfung und Anwendung von Störfallprogrammen gewonnen werden können, sondern dass dieses Wissen auch für die Weiterentwicklung der Echtzeitdispositionsunterstützung sowie für die damit zusammenhängenden Optimierungsmodelle verwendet werden kann.

Analog zur Wissenslücke bezüglich der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen fehlt eine Beschreibung und Modellierung der Vorgänge und der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs während der Rückkehr zum Regelbetrieb, also während der Ausschwingphase. Diese Wissenslücke wird von der Autorin jedoch als zweitrangig betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass eine Rückkehr zum Regelbetrieb aus einem stabilen Störungszustand i. d. R. leichter zu bewerkstelligen sein wird als aus einem Ungeordneten. Dementsprechend hat die Untersuchung der Einschwingphase vorrangig zu erfolgen.

Übergreifend sind Methoden und Metriken zur Bewertung von Störfallprogrammen in den verschiedenen Phasen erforderlich um die Erstellung und Auswahl passender Störfallprogramme zu ermöglichen. Dies ist jedoch erst auf Grundlage der Kenntnis der ebenfalls zu erarbeitenden Gesetzmäßigkeiten während der einzelnen Phasen möglich.

2.3 Bestehende Ansätze des Störfallmanagements bei anderen Verkehrsträgern

2.3.1 Straßenverkehr

Das Störfallmanagement im Kontext des Straßenverkehrs ist theoretisch in den Rahmen des Verkehrsmanagements einzuordnen. Nach FGSV (2012) ist das Verkehrsmanagement als *„die Beeinflussung von Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage durch ein Bündel von Maßnahmen mit dem Ziel, die positiven und negativen Wirkungen des Verkehrs insgesamt zu optimieren“* definiert. Die Maßnahmenbündel bestehen aus Maßnahmen der Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung (zeitlich, räumlich und modal) sowie der Verkehrslenkung und können auf kurz-, mittel- und langfristige Wirkungen ausgerichtet sein.

Für das Verkehrsmanagement im Straßenverkehr in Deutschland existieren verschiedene kommunale und regionale Ansätze, wie beispielsweise in München (siehe Projekt MOBINET – (Kellermann u. a., 2005) und (Keller u. Busch, 2004)), im Rhein-Main-Gebiet (Hessen, 2013) und in Mitteldeutschland (Projekt Mosaïque – (Meier u. Okun, 2010)). Diesen Beispielen ist ein integrierter, oft verkehrsträgerübergreifender und i. d. R. vor allem langfristiger Ansatz gemeinsam, welcher die verschiedenen Akteure auf lokaler, kommunaler und privater Ebene in die Lösungsfindung und -gestaltung einbezieht.

Überträgt man die in den vorhergehenden Abschnitten erarbeitete Definition von Störungen im Schienenverkehr als *„ein vom Regelbetrieb unerwartet abweichender Zustand“* auf den Straßenverkehr, so sind vor allem die kurzfristigen Wirkungen des Verkehrsmanagements in Störungssituationen gefragt. Hier bildet das Konzept des *„dynamischen Verkehrsmanagements“* (Andree u. a., 2001) den Rahmen. Nach FGSV (2003) bezeichnet der Begriff des dynamischen Verkehrsmanagements einen *„Teil des umfassenden Verkehrsmanagements [, welches] (...) auf kurzfristige und spezifische Maßnahmen bei bestimmten Verkehrssituationen [begrenzt ist]“*. Weiterhin beinhaltet das dynamische Verkehrsmanagement *„das Beeinflussen der aktuellen Verkehrsnachfrage und des vorhandenen Verkehrsangebotes durch Abstimmung situationsgerechter Maßnahmen mit dem Ziel, die für diesen Zeitbereich bestmögliche Mobilität zu sichern“* (ebenfalls FGSV (2003)). Wie bei der Anwendung von Störfallprogrammen im Schienenverkehr steht dabei die Vorsorge, mit dem Ziel, die Auswirkungen zukünftiger Störfälle zu reduzieren und Störungen zu verhindern, im Vordergrund.

Grundgedanke des dynamischen Verkehrsmanagements ist die Erarbeitung von Handlungskonzepten zum Umgang mit vorab definierten Situationen. Hierbei werden die „vorab festgelegten Handlungskonzepte für das Ergreifen von Maßnahmen (-bündeln) zur Verbesserung einer definierten (Ausgangs-)Situation“ als „Strategien“ bezeichnet (siehe FGSV (2003)). Die jeweiligen strategieauslösenden Situationen ergeben sich aus definierten Ereignissen, Problemen und weiteren relevanten Zuständen und können beispielsweise die Sperrung eines Straßen- oder Netzabschnittes aufgrund von Unfällen oder Bauarbeiten, das Erreichen bzw. Überschreiten von vorher definierten verkehrlichen oder Umweltgrenzwerten oder das Unterschreiten eines bestimmten Qualitätsniveaus (siehe FGSV (2009)) beinhalten.

Es ist besonders hervorzuheben, dass für den Straßenverkehr eine allgemeingültige Methodik zur Erarbeitung der Strategien zum dynamischen Verkehrsmanagement besteht (FGSV, 2003). Im Rahmen dieser Methodik wurden Problemkategorien erarbeitet, denen mögliche Maßnahmen zugeordnet wurden. Problemkategorien sind bspw. die Überlastung des Straßennetzes oder des Netzes des öffentlichen Verkehrs, Engstellen in diesen Netzen, Notfallsituationen sowie witterungsbedingte Probleme. Die zu entwickelnden Strategien beinhalten alle o. g. Maßnahmen des Verkehrsmanagements und werden in die Maßnahmenkategorien „öffentlicher Verkehr“, „motorisierter Individualverkehr“, „intermodal“ und „multimodal“ unterteilt. Die zur Umsetzung der Maßnahmen notwendigen Leit- und Steuerungssysteme sowie die Informationssysteme wurden ebenfalls im Leitfaden benannt. Auf Basis eines definierten strategischen Netzes und einer systematischen Problemerkennung können dann mithilfe der Zuordnung Problem-Maßnahme-System verschiedene mögliche Strategien entwickelt und mit allen Beteiligten abgestimmt werden.

Der operative Einsatz der entwickelten und abgestimmten Strategien beginnt, indem eine der vorab definierten Situationen eintritt. Nach einer manuellen oder automatischen Erkennung der strategieauslösenden Situation wird die Aktivierung der Strategie durch die Kontrollinstanzen bestätigt und, soweit möglich, automatisiert umgesetzt. Ist in der Strategie beispielsweise die Verwendung anderer Programme für die Steuerung von Lichtsignalanlagen vorgesehen, erfolgt ein automatisierter Wechsel nach entsprechenden Umschaltverfahren z. B. zu festen Zeitpunkten, unter Dehnung oder Stauchung von Phasen der Lichtsignalanlagen, auf Anforderung oder mit Zwischenprogrammen (siehe auch FGSV (2010b), Kap 4.5.4 und FGSV (2010a), Kapitel Sechs). Andere zur Strategieumsetzung benötigte Anlagen, wie bspw. Verkehrsbeeinflussungsanlagen, können ebenfalls automatisiert oder durch Personal aktiviert werden.

Zum derzeitigen Stand der Entwicklung konstatieren Boltze u. Fornauf (2013), dass das dynamische Verkehrsmanagement praktisch erfolgreich erprobt sowie durch bestehende Forschungsprojekte und Leitfäden theoretisch verankert ist. Weiterhin heben sie den Forschungsbedarf in folgenden Bereichen hervor (sinngemäße Übersetzung nach Boltze u. Fornauf (2013)):

- *Strategiebewertung*: Bisher fehlen quantitative Ansätze zur Bewertung ganzer Maßnahmenbündel und unterschiedlich komplexer Lösungen.
- *Strategieoptimierung*: Basierend auf den zu entwickelnden quantitativen Bewertungsansätzen ist die Entwicklung von Modellen zur online bzw. offline Strategieoptimierung sinnvoll.
- *IT-Unterstützung*: Im Hinblick auf eine möglichst hohe Effizienz, ist die Schaffung von IT-Unterstützung für die Entwicklung, Verwaltung und Kommunikation von Strategien angezeigt.
- *Qualitätsmanagement*: Zur langfristigen Qualitätssicherung ist ebenfalls die Erarbeitung effizienter Methoden zur Überwachung der Qualität der angewandten Strategien angezeigt.

2.3.2 Luftverkehr

Für das Störfallmanagement im Luftverkehr existieren, wie auch für den Schienenverkehr, die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Möglichkeiten, wobei hier vorrangig zwischen den Möglichkeiten „auf die Störung reagieren“ sowie „proaktives Verringern von Störungsauswirkungen“ gewählt wird (siehe auch Clausen (2007) und Kohl u. a. (2007)).

Die Handlungsmöglichkeiten des reaktiven Störfallmanagements bestehen in der ad-hoc Umplanung des Ressourceneinsatzes, indem Bereitschaftspersonal eingesetzt, Flüge ausfallen gelassen oder verspätet sowie Leerflüge durchgeführt werden (Clausen, 2007). Folgende Möglichkeiten zur Verringerung des Umfangs von Störungsauswirkungen im Luftverkehr werden nach Kohl u. a. (2007) gesehen:

- Vermeidung operativer Komplexität durch Einsatz weniger verschiedener Flugzeugtypen, Beschränkung auf punktuelle Verbindungen sowie wenige Linienwechsel während der Schicht einer Crew,
- Vorausplanung von Alternativszenarien für eine schnellere Reaktionszeit im Störfall und
- Robuste Planung, bei der Pufferzeiten vor allem an besonders für Störungen anfälligen Stellen eingeplant werden.

Die Vielzahl an veröffentlichten Forschungsaufsätzen zu Planungsalgorithmen im Luftverkehr in Verbindung mit fehlenden Praxisbeispielen oder Anwendungsfällen lässt jedoch vermuten, dass vor allem der Ansatz robuster Planung im Luftverkehr bisher lediglich erforscht wird.

Es ist weiterhin zu beachten, dass die Fahrplanplanung im Schienenverkehr deutlich präziser als im Luftverkehr ist, obwohl der Vorgang der langfristigen Kapazitätsplanung bei beiden Verkehrsträgern ähnlich abläuft. Während die genaue Reihenfolge sowie Ankunfts- und Abfahrtszeiten im Schienenverkehr mit großem zeitlichem Vorlauf exakt geplant sind, werden im Luftverkehr lediglich Slots für die Flughafenutzung geplant und die letztendliche Reihenfolge der Flugzeuge operativ durch die Fluglotsen bestimmt (siehe Kösters u. a. (2007)). Dieses Vorgehen im Luftverkehr hat zur Folge, dass bei der Realisierung des täglichen Flugbetriebs operative Entscheidungen durch Menschen getroffen werden müssen, auch wenn im Betrieb keine Störungen vorliegen – im Unterschied zum Betrieb im Schienenverkehr, wo Disponenten nur bei Planabweichungen operative Entscheidungen treffen.

Um die Qualität des Verkehrsablaufs vom diensthabenden Personal unabhängiger zu gestalten, gibt es auch im Luftverkehr die Bestrebung der softwareseitigen Unterstützung und der Nutzung von Modellen des Operations Research zur Bestimmung optimaler Lösungen (Clausen, 2007). Eine Übersicht über den aktuellen Stand der Forschung für Störfallmanagementmodelle im Luftverkehr geben Castro u. Oliveira (2011) wieder. Sie teilen dabei Ansätze in folgende Bereiche ein:

- In Datenbanken zur Verfügung gestellte Betriebsdaten, mit deren Hilfe eine Lösung erarbeitet werden kann. Hier ist die Lösungsqualität komplett von der Erfahrung und der Fitness des Bearbeiters abhängig.
- Systeme zur Entscheidungsunterstützung, wobei die eigentliche Entscheidung durch den Bearbeiter getroffen wird.
- Automatische oder halbautomatische Systeme, welche die Entscheidungen autonom nach festgelegten Regeln treffen.

Nach Aussage von Castro u. Oliveira (2011) existieren derzeit noch sehr wenige Ansätze des letzteren Typs.

2.3.3 Fazit Ansätze andere Verkehrsträger

Betrachtet man die Ansätze des Störfallmanagements im Straßen- und im Luftverkehr, lassen sich viele Gemeinsamkeiten mit den Ansätzen des Schienenverkehrs finden. So stimmen der allgemeine Ansatz, sich auf Störungen vorzubereiten und deren Auswirkungen so gering wie möglich zu halten, sowie das langfristige Ziel der (Teil-)Automatisierung einfacher Dispositionsschritte und einer allgemeinen IT-Unterstützung bei allen drei Verkehrsträgern überein. Auch die operativen Entscheidungen im Störfall werden bei allen drei Verkehrsarten vorrangig von Menschen getroffen, wobei diese in unterschiedlichem Grad durch Informationssysteme bei der Entscheidungsfindung und -umsetzung unterstützt werden. Vor allem im Schienen- und Luftverkehr scheint weiterhin das Bestreben verbreitet, zur Entlastung der Disponenten einfache Entscheidungen automatisiert durch Dispositionssysteme treffen zu lassen.

In den Ansätzen zur Minderung von Störungsauswirkungen stimmen die Ansätze im Schienenverkehr mit den Inhalten von Vorausplanung und Abstimmung mit dem Ziel einer möglichst kurzen Reaktionszeit im Ernstfall weitgehend mit denen des Straßenverkehrs überein. Hier ist der Stand des Wissens im Straßenverkehr aufgrund bereits vorhandener Regelwerke höher als im Schienenverkehr, wobei bei beiden Verkehrsarten noch Forschungsbedarf und Bedarf der praktischen Umsetzung der bereits existierenden Erkenntnisse besteht. Der im Luftverkehr zumindest in der Forschung bereits in der Erarbeitung befindliche Ansatz der robusten Planung wird seit einiger Zeit auch im Schienenverkehr verfolgt, weshalb dort auf bereits bestehende Modelle des Luftverkehrs aufgebaut werden sollte. Auch die bereits für die Anwendung im Luftverkehr entwickelten Modelle des Operations Research sollten auf die Problemstellungen des Schienenverkehrs übertragen werden (Clausen u. a., 2010).

Von den erläuterten Ansätzen des Störfallmanagements anderer Verkehrsarten sind demnach bereits die grundlegenden Ansätze in den Schienenverkehr übertragen worden, in der Übertragung begriffen bzw. dort ebenfalls vorhanden. Bei der operativen Umsetzung des Störfallmanagements können die Möglichkeiten des Straßenverkehrs als am fortgeschrittensten bezeichnet werden. Grund dafür ist, dass ein verhältnismäßig hoher Grad der (teil-)automatischen Umsetzung von Strategien durch Verkehrsbeeinflussungsanlagen möglich ist und entsprechende allgemeingültige Regelwerke zur Bemessung und Steuerung dieser Anlagen sowie zur Bestimmung entsprechender Grenzwerte vorhanden sind. Ein entsprechendes automatisches Erkennen bestimmter Verkehrssituationen sowie ein (teil-)automatisches Umsetzen des Störfallmanagements (nach manueller Bestätigung) wie im Straßenverkehr wäre für den Schienenverkehr wünschenswert. Allerdings ist dies aufgrund der anderen Rahmenbedingungen derzeit nicht möglich. Gründe hierfür sind bspw. die im Schienenverkehr nicht ausreichend festgelegten Grenzwerte zur Beurteilung der Qualität des realisierten Verkehrsflusses.

Zusammenfassend kann bemerkt werden, dass sich die bestehenden Ansätze und Prinzipien des Störfallmanagements im Straßen- und Luftverkehr bereits im Schienenverkehr wiederfinden lassen. Eine Verbesserung der operativen Umsetzung ist nun für jede Verkehrsart unterschiedlich weiterzuentwickeln. Besonders im Schienenverkehr besteht in der (Teil-)Automatisierung und Unterstützung der operativen Prozesse weiterhin viel Potenzial.

2.4 Betriebliche Abläufe in Störungen

Störungssituationen im Bahnbetrieb erfordern Vorgänge des Erkennens der Störung sowie des Handelns zum Umgang mit der Störung. An diesen Prozessen sind verschiedene Akteure beteiligt und bei der Durchführung sind Besonderheiten des Eisenbahnbetriebs zu beachten. Für ein besseres Verständnis der nachfolgenden Ausführungen werden in diesem Abschnitt die Akteure und grundlegende Zusammenhänge der Betriebssteuerung im Schienenverkehr sowie notwendiges Detailwissen zur Kommunikation im Störfall dargestellt.

2.4.1 Akteure der Betriebssteuerung im Schienenverkehr

Entsprechend der Richtlinien 2001/12/EG und 91/440/EWG der Europäischen Gemeinschaft (EU, 2001) ist der Betrieb der Schienenwege vom Betrieb des Eisenbahnverkehrs wirtschaftlich zu trennen. Dementsprechend wird in Europa zwischen Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) als Betreiber der Schienenwege und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) als Operateure der Verkehre auf den Schienenwegen voneinander unterschieden.

Hauptziel des EVU ist die Durchführung der Verkehrsleistungen, die den Fahrgästen über veröffentlichte Fahrpläne angeboten werden. Dementsprechend liegt der Fokus allen Handelns eines EVU auf der Beförderung der Fahrgäste. Hauptziel des EIU ist die Durchführung der mit den EVU vertraglich vereinbarten Zugfahrten, weshalb der Fokus allen Handelns eines EIU auf dem reibungslosen Betriebsablauf liegt.

Der Betriebsablauf wird von Bereichsdisponenten und Fahrdienstleitern auf Seiten des EIU in Zusammenarbeit mit den Disponenten der Transportleitungen der einzelnen EVU gesichert. Während die Hauptsorge der EVU-Disponenten in der Durchführung der EVU-eigenen Verkehre besteht, muss der EIU-Disponent diskriminierungsfrei handeln, d.h. den Betriebsablauf im gesamten Netzbereich ohne Benachteiligung einzelner EVU beachten. In Tabelle 2.1 sind die jeweiligen Aufgaben und Zielstellungen der beiden Akteure EVU und EIU zusammengefasst.

Im Fall von Störungen erarbeitet der Bereichsdisponent eine betriebliche Lösung, die im Idealfall im Einverständnis mit allen beteiligten EVU erfolgt. Dabei können die TP-Disponenten jeweils Lösungsvorschläge unterbreiten. Den Letztentscheid über die tatsächlich durchgeführten Dispositionsmaßnahmen hat der Bereichsdisponent des EIU.

Für die bessere Lesbarkeit wird im weiteren Verlauf nur der Begriff „Disponent“ verwendet. Dies bezieht sich je nach Kontext auf EVU- und EIU-Disponenten, da die angewandten Dispositionsmaßnahmen i. d. R. in Abstimmung zwischen beiden erfolgen. Handelt es sich um Entscheidungen bezüglich der Verwendung bestimmter Fahrzeuge oder Personalentscheidungen, ist der Disponent des EVU gemeint.

Tabelle 2.1: Unterscheidung der Ziele und Aufgaben von Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) – eigene Darstellung nach (Heister u. a., 2009), S. 146-172, (DB Netz, 420), Modul 0100 und (DB Regio, 615), Modul 0101

	EIU	EVU
Verantwortlich ¹	Betriebszentrale Bereichsdisponent Fahrdienstleiter	Transportleitung/Leitstelle TP-Disponent
Funktion	Betreiben der Infrastruktur	Betreiben der Verkehre (auf der Infrastruktur)
Hauptziel	Erhalten und Wiederherstellen des Regelzustandes im gesamten Netz	Erhalten und Wiederherstellen des Regelzustandes der Verkehre des EVU
Aufgaben	Sicherstellen der vertraglich mit den EVU vereinbarten Leistungen Koordinieren, Disponieren, Steuern und Überwachen des Betriebs auf der Infrastruktur Sicherung des Betriebs	Sicherstellen der den Fahrgästen angebotenen Verkehrsleistungen Koordinieren, Disponieren, Steuern und Überwachen der Ressourcen des EVU (Fahrzeuge, Personal) Information der Fahrgäste bei Abweichungen und Störungen Betreuung der Fahrgäste Erfassen von Störungen

¹Bezeichnung der Organisationseinheiten und Positionen in Deutschland

2.4.2 Kommunikation im Störfall

Kommunikationsabläufe

Das Zusammenspiel der oben genannten Akteure im Störfall wird von Schranil u. Weidmann (2012a) allgemein wie folgt beschrieben (siehe auch Abbildung 2.4): Störungen können entweder vom EVU oder vom EIU automatisch sowie auch manuell festgestellt werden. Eine besondere Art der Meldung einer Störung ist der Nothalt, dessen Eigenschaften im nachstehenden Abschnitt kurz beschrieben werden. Nach der Feststellung der Störung wird diese Information an die zuständigen Stellen im EIU weitergeleitet und eine Auswertung der Störungsmeldung folgt. Wurde ein Dispositionskonzept erarbeitet – und z. B. ein Störfallprogramm ausgewählt – werden diese Dispositionsanweisungen an das EVU elektronisch, in Form von Signalen oder fernmündlich weitergegeben und von diesem umgesetzt.

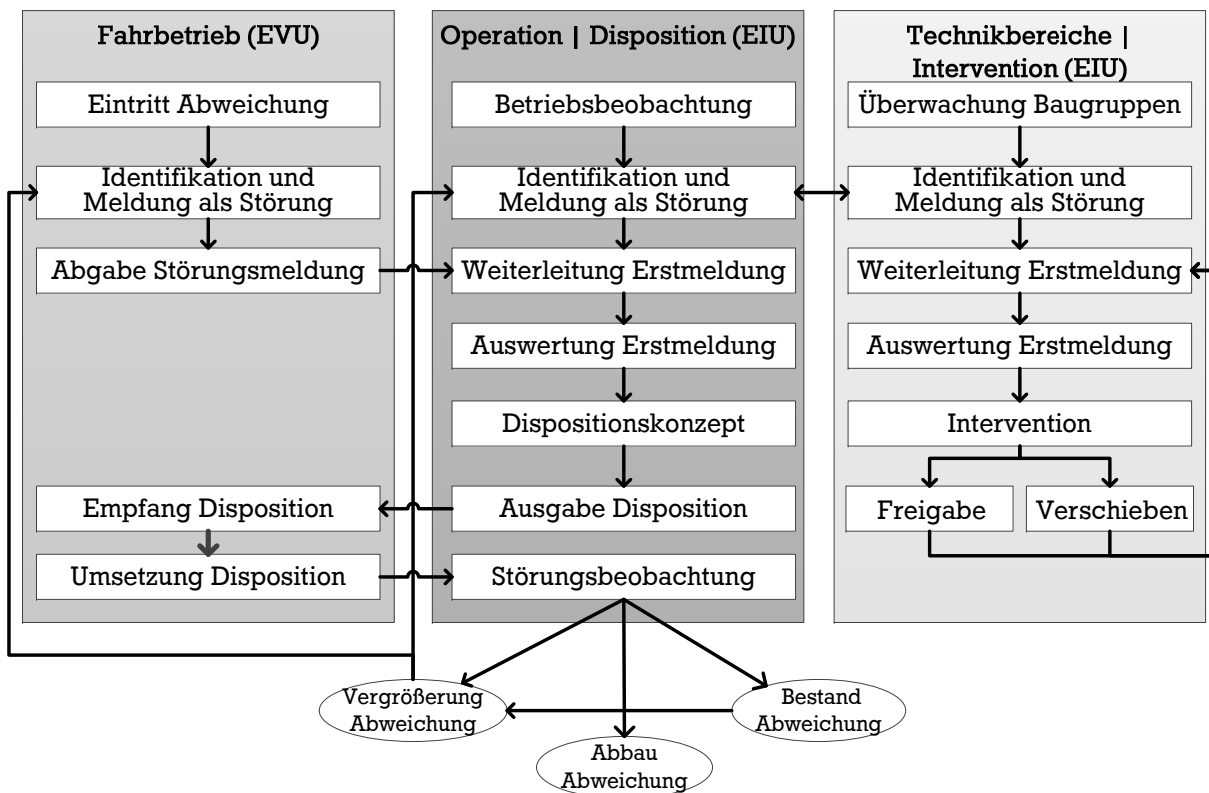


Abbildung 2.4: Meldekette im Störfall (Schranil u. Weidmann, 2012a)

Entscheidungszeit zum Finden von Dispositionslösungen

Die Zeit, bis alle Informationen eingeholt werden und eine Entscheidung über die anzuwendende Dispositionslösung bzw. das Störfallprogramm getroffen wird (siehe auch Schritte „Identifikation und Meldung als Störung“ bis „Dispositionskonzept“ in Abbildung 2.4), kann sehr stark schwanken. So kann sie in Standardsituationen wenige Minuten dauern. Zeitspannen von bis zu einer Stunde sind hingegen möglich, wenn schnelle Aussagen über die Art und Dauer einer Störung nicht einfach zu treffen sind – z. B. weil erst ein Spezialist die Störung bewerten muss (Chu, 2012a). Grundsätzlich ist es notwendig diese Zeit so stark wie möglich zu begrenzen, um die Auswirkungen der Störung eingrenzen zu können. Daher ist es empfehlenswert, eine netzspezifische Obergrenze für eine maximale Entscheidungsdauer zu definieren (Chu, 2012b). Dieser Wert gibt an, nach welcher Zeit eine Entscheidung über

eine Dispositionslösung gefallen sein muss. Diese Beschränkung ist notwendig, weil sich mit zunehmender Dauer der Ermittlungs- und Entscheidungsphase immer mehr Züge vor dem Störungsort aufstauen können, was wiederum dazu führen kann, dass im gesamten Netz große Verspätungen auftreten, obwohl die Störung nur in einem Abschnitt auftritt.

Die Festlegung der netzspezifischen Obergrenze für eine maximale Entscheidungsdauer sollte sich dabei an dem Takt, mit dem die einzelnen Linien im Netz verkehren, orientieren. Auch die Anzahl der Züge, die höchstens durch die Disposition betreut werden kann sowie die Zeitspanne, in der sich diese maximale Zugzahl vor der Störung im Netz aufstaut, ist in die Festlegung der Entscheidungsobergrenze einzubeziehen (siehe Chu (2012a)).

Kommunikation zwischen Disponenten und dem Fahrpersonal

Die Ausrufung eines Störfallprogramms erfolgt i. d. R. sehr schnell und effizient per Gruppenruf bzw. Sammel-SMS über die IT-Systeme (Chu, 2012b). Im Idealfall reicht diese eine Information aus und es besteht kein Bedarf nach Rücksprachen zwischen den einzelnen Beteiligten und den Disponenten. In der Realität ist dies selten der Fall. So kommt es regelmäßig zu Rückfragen zwischen Triebfahrzeugführern und Fahrdienstleiter bzw. Disponent. Auch zur Übermittlung von Ersatzzugnummern sind gegebenenfalls Rücksprachen notwendig. Weiterhin gibt es in jeder Störungssituation Züge, die nicht problemlos in das Störfallprogramm finden, und für welche gesonderte Anweisungen notwendig oder spezielle Absprachen zu treffen sind.

Eine weitere Form der Kommunikation zwischen Fahrdienstleiter und Triebfahrzeugführern ist das fernmündliche oder schriftliche Erteilen von Befehlen durch den Fahrdienstleiter an den Triebfahrzeugführer. Befehle sind notwendig, sobald die Leit- und Sicherungstechnik nicht (mehr) zuverlässig funktioniert. Dies ist bspw. der Fall, wenn ein Signal rot ausgeleuchtet ist obwohl die Fahrstraße eingestellt und gesichert ist. Befehle sind weiterhin notwendig, wenn ein Netzelement befahren werden soll, welches nicht durch die entsprechende Leit- und Sicherungstechnik gesichert ist (z. B. Fahren im Gegengleis auf Befehl). Die möglichen Fälle, die entsprechenden Abläufe sowie die dafür definierten elf Standardbefehle sind in den Modulen 0411 „Befehle – Regeln für Fahrdienstleiter, Zugmelder, Örtliche Aufsichten und Bediener von Stellwerken“ und 0412 „Befehle – Regeln für Triebfahrzeugführer, Triebfahrzeugbegleiter und Zugführer“ der Richtlinie 408 geregelt (siehe DB Netz (408) und Anhang D).

2.4.3 Dispositionsmaßnahmen im Störfall

Grundsätzlich mögliche Dispositionsmaßnahmen

Zur operativen Steuerung des Bahnbetriebs stehen den EIU- und EVU-Disponenten folgende Grundmaßnahmen zur Verfügung (siehe (Jacobs, 2008), S. 182 ergänzt nach (Chu, 2012a)):

- Umleiten von Zügen (weiträumig über andere Strecke bzw. andere Fahrwege innerhalb von Stationen und Strecken),
- Anpassen verkehrlicher Halte (Halte streichen oder zusätzliche Halte),
- zusätzliche betriebliche Halte (z. B. Warten auf Überholung),
- Fahrzeit- und Haltezeitverlängerung,
- Fahrzeit- und Haltezeitverkürzung,
- Ausfall einzelner Zugfahrten oder aller Züge einer Linie,
- Teilausfall von einzelnen Zugfahrten oder allen Zügen einer Linie (Brechen oder Verkürzen von Linien),
- Kapazitätsanpassung (Taktausdünnung) oder

-
- Flügeln bzw. Zusammenlegen von Zugfahrten auf gestörten Streckenabschnitten.

Weiterhin sind für die EVU-Disponenten im Bereich der Fahrzeugdisposition die grundlegenden Dispositionsmaßnahmen „Kurswechsel“, „Wendezeitverkürzung“ und „vorzeitige Wende“ möglich. Für die Personaldisposition stehen den EVU-Disponenten die grundlegenden Dispositionsmaßnahmen „Fahrerwechsel aufgrund Kurswechsel oder Dienstplan“ und „Fahrerwechsel durch Springer“ zur Verfügung (Monecke, 2010).

Der Einsatz bzw. die Dauer der Umsetzung der Dispositionsmaßnahmen wirkt sich auf die Belegungszeiten der Infrastruktur aus. Für den Großteil der genannten Maßnahmen ist diese Wirkungsweise direkt ersichtlich, bei der Dispositionsmaßnahme „Wenden“ hingegen sind für das Verständnis weitere Details zum Ablauf dieser Maßnahmen hilfreich. Diese Informationen werden im nachfolgendem Abschnitt gegeben.

Besonderheiten der Dispositionsmaßnahme „Wenden“

Ein bedeutendes Element von Störfallprogrammen ist die Dispositionsmaßnahme „Wende von Fahrzeugen“. Wenden beginnen mit dem Ende einer Zugfahrt, beinhalten einen Fahrtrichtungswechsel und enden mit dem Beginn einer weiteren Zugfahrt. Dazu sind vom Triebfahrzeugführer die Aufgaben „abschließende Arbeiten“, „Laufen vom Zugende zum Zuganfang“ sowie „vorbereitende Arbeiten“ auszuführen. Wird die Wende eines Zuges von zwei Triebfahrzeugführern gleichzeitig ausgeführt, finden abschließende und vorbereitende Arbeiten parallel statt und es wird ein fernmündliches Übergabegespräch bezüglich des Fahrzeugzustandes, Streckeninformationen und besonderen Vorkommnissen geführt.

Die Mindestdauer zur Ausführung der beschriebenen Vorgänge wird als technische Mindestwendezeit bezeichnet. Sie ist baureihenspezifisch, von der Länge des zu wendenden Zuges sowie von der Anzahl der durchführenden Triebfahrzeugführer abhängig und in DB Regio (498) festgelegt. Ein repräsentatives Beispiel für die Abfolge aller für eine Wende notwendigen Tätigkeiten ist in Anhang G zu finden.

Nothalt

Besteht für den Betrieb Gefahr, müssen alle Züge angehalten werden. Der Ablauf dieses Nothaltevorgangs wird für die Bundesrepublik Deutschland in der Richtlinie 408 (Züge fahren und rangieren im Modul 0581 –“Verhalten bei Gefahr“) präzise geregelt – siehe DB Netz (408). Der betriebliche Ablauf eines Nothalts sowie die erforderlichen Handlungen werden in Anhang D wiedergegeben.

2.5 Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Grundlagen zur Leistungsfähigkeitsermittlung einer Infrastruktur

Durch Störungssituationen im Bahnbetrieb wird die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur i. d. R. eingeschränkt. Die Durchführung von Dispositionsmaßnahmen während einer Störung beeinflusst ebenfalls die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur und erfolgt mit dem Ziel, die verbleibende Leistungsfähigkeit bestmöglich zu nutzen. Deshalb werden im vorliegenden Abschnitt die notwendigen eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Grundbegriffe eingeführt und der Stand der Forschung – basierend auf der Richtlinie 405 der DB Netz AG und dem UIC Merkblatt 406 – zu den Methoden der Leistungsfähigkeitsermittlung dargelegt. Dies ist notwendig, um die Auswirkungen von Störungen auf die Infrastrukturbelegung quantifizieren und gegebenenfalls Kapazitätsengpässe und deren Ursachen nachweisen zu können.

2.5.1 Leistungsfähigkeit einer Infrastruktur und weitere Begriffe

Kapazität und Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit einer Infrastruktur wird in der Richtlinie „405 – Fahrwegkapazität“ der DB Netz AG beschrieben (DB Netz, 405). Umgangssprachlich auch als „Kapazität“ bezeichnet werden unter dem Oberbegriff Leistungsfähigkeit verschiedene Kenngrößen der Fahrwegkapazität verstanden (siehe auch Abbildung 2.5). Dabei ist die Leistungsfähigkeit *„von den Bedingungen [abhängig], die durch die Struktur der Leistungsanforderungen (Eigenschaften, Reihenfolge, zeitliche Verteilung der Züge), die Infrastruktur, die Organisation und Disposition (zeitlich und in der Nutzung der verfügbaren Infrastruktur) sowie durch qualitative Anforderungen gegeben sind.“* (siehe Richtlinie 405, Modul 0102).

Es werden je nach Qualitätsbezug die Begriffe praktische und theoretische Leistungsfähigkeit unterschieden, wobei die theoretische Leistungsfähigkeit ohne Relevanz ist, da sie keinen Qualitätsbezug aufweist (siehe Heister u. a. (2009), S. 320). Die *„praktische Leistungsfähigkeit (...) ist die unter Einhaltung bestimmter Qualitätsgrenzen ermittelte fahrbare Zugzahl (...)“* (siehe Richtlinie 405, Modul 0102). Weiterhin wird bei der praktischen Leistungsfähigkeit nach Bezug des Untersuchungsgegenstandes und der zu Grunde liegenden Bedingungen in Fahrplan- und Infrastrukturleistungsfähigkeit unterschieden.

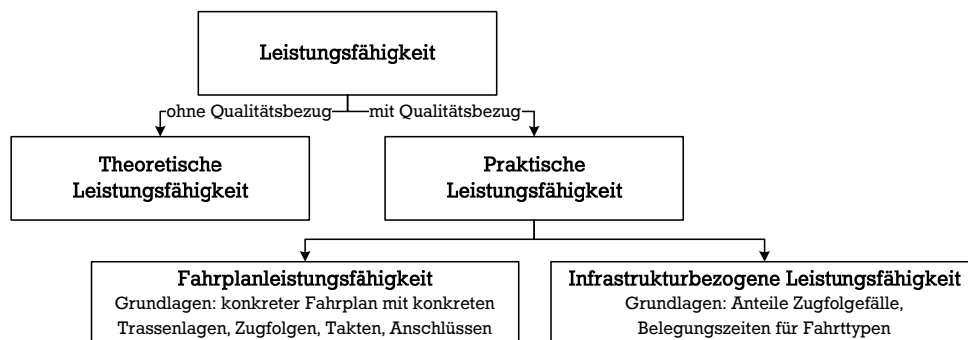


Abbildung 2.5: Einordnung der verschiedenen Leistungsfähigkeitsbegriffe – eigene Darstellung in Anlehnung an die Inhalte von DB Netz (405), Modul 0102 und 0104A02

Kenngrößen der Leistungsfähigkeit und Qualität

Zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit stehen verschiedene Leistungskenngrößen zur Verfügung, welche ebenfalls in der Richtlinie 405 der DB Netz AG (DB Netz, 405) beschrieben werden:

- Die Leistungsanforderung beschreibt die *„Anzahl der Zugtrassen oder Zuglagen im Untersuchungszeitraum, die für Leistungsuntersuchungen im Betrachtungsraum zu berücksichtigen sind. Leistungsanforderungen beinhalten eine bestimmte Struktur, d.h. die Mischung von Zugfolgefällen, die Zugeigenschaften des Trassenprogramms bzw. Zuggefüges sowie deren zeitliche Verteilung“* (Modul 0102, S. 10). *„Bei Fahrwegkapazitätsuntersuchungen dient [das Betriebsprogramm] der Beschreibung der Leistungsanforderungen“* (Modul 0102, S. 5).
- Die Nennleistung *„ist die in einem Netzelement durch die Organisation des Zugbetriebes auf dessen betrieblicher Infrastruktur, bei vorgegebener Struktur des Betriebsprogramms, während des Betriebsablaufes mit einer definierten Qualität und bei wirtschaftlich optimaler Auslastung unter Wahrung aufgaben- und streckenstandardspezifischer Nutzungsvorgaben verarbeitbare Anzahl von Zug- und Rangierbewegungen in einem bestimmten Untersuchungszeitraum, wobei das Verhältnis der Zugfolgefälle untereinander dem der Ermittlung unterstellten Belastung entspricht“* (Modul 0102, S. 10 f.)
- Der Leistungsbereich ist der *„Bereich, in dem für Leistungsanforderungen eine ausreichende Wirtschaftlichkeit und eine hinreichende Qualität erwartet werden kann. Er umfasst die Qualitätsbereiche optimal und risikobehaftet“* (Modul 0102, S. 10 f.)

Der in diesen Formulierungen verwendete Begriff der „Qualität“ wird, ebenfalls in der Richtlinie 405, derzeit anhand von vier „Bewertungsstufen der Betriebsqualität“ unterschieden. Die vier Qualitätsstufen lauten „Premiumqualität“, „wirtschaftlich optimal“, „risikobehaftet“ und „mangelhaft (nicht marktgerecht)“. Diese Stufen dienen der Orientierung bei der Festlegung von Qualitätsmaßstäben verschiedener Qualitätskenngrößen, welche wiederum zur Berechnung von Leistungskenngrößen verwendet werden.

Im Modul 0104 der Richtlinie 405 werden verschiedene Gruppen von Qualitätskenngrößen unterschieden:

- *zeitliche Qualitätskenngrößen*, wie planmäßige und die tatsächliche Beförderungszeit, Pufferzeit, Wartezeiten und Verspätungsveränderung,
- *spezifische zeitliche Qualitätskenngrößen*, wie Pünktlichkeitsgrad, Warteschlangenlänge, Wartewahrscheinlichkeit (Warterisiko) etc. und
- *infrastrukturbezogene Kenngrößen*, wie Belegungsgrad und infrastrukturbezogene Behinderungen.

Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Begriffen Leistungsfähigkeit und Qualität ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Zusammenfassend beschreibt die Leistungsanforderung, welche Leistung die Infrastruktur in einem bestimmten Szenario erbringen müsste. Die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur beschreibt, welche Leistung die Infrastruktur tatsächlich bei einer noch akzeptablen Qualität (obere Grenze des Leistungsbereichs) bzw. bei wirtschaftlich optimaler Qualität (Nennleistung) erbringen kann.

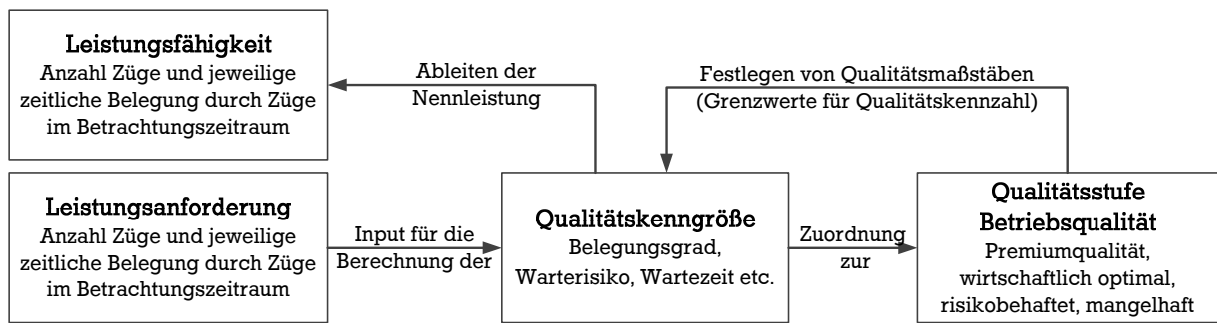


Abbildung 2.6: Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit und Qualität – eigene Darstellung nach Inhalten von DB Netz (405), Modul 0102 und 0104

Qualitätskenngröße Belegungsgrad

Wie in Abschnitt 9.2.4 zu sehen sein wird, eignet sich die infrastrukturbezogene Kenngröße des Belegungsgrads zur Beurteilung der Machbarkeit von Störfallprogrammen, weshalb an dieser Stelle näher auf die Definition des Belegungsgrads eingegangen wird.

Laut Definition in Modul 0104 der Richtlinie 405 ist der Belegungsgrad der „zeitliche Anteil, an dem ein Fahrwegabschnitt oder Netzelement durch Zugtrassen oder Zuglagen innerhalb des Untersuchungszeitraumes oder Auswertzeitraumes belegt ist (im Sinne einer betrieblichen Beanspruchung), d.h. für weitere Züge nicht nutzbar ist“. Dies entspricht sinngemäß der Aussage im Merkblatt 406 „Kapazität“ der Union Internationale des Chemins de Fer (UIC, 2004), in welcher der resultierende Belegungsgrad auch als „Kapazitätsverbrauch“ bezeichnet wird.

Der Belegungsgrad wird in den Einzelbelegungsgrad und den verketteten Belegungsgrad unterschieden, wobei sich der Einzelbelegungsgrad „auf einen Fahrwegabschnitt, der insgesamt freizumelden ist“ und der verkettete Belegungsgrad „auf ein Netzelement, das aus mehreren getrennt freizumeldenden Fahrwegabschnitten (...) besteht“ bezieht (DB Netz (405), Modul 0104).

In der Richtlinie wird ebenfalls darauf hingewiesen, dass auf die „tatsächlich zu erwartende Betriebsqualität (Höhe der Wartezeiten bzw. die Verspätungen im Betriebsablauf), die wesentlich vom Zugmix und vom Niveau der Einbruchsverspätung abhängt, (...) allein anhand des Belegungsgrades nicht geschlossen werden [kann]“ (siehe DB Netz (405), Modul 0104). Weitere Ausführungen, die diese Aussage unterstreichen sind in Lindner (2011a) zu finden. Dementsprechend ist der Belegungsgrad als Qualitätskenngröße nur im Sinne eines groben Richtwertes zu verwenden. Aufgrund der relativ einfachen Ermittlung stellt er jedoch ein sinnvolles Hilfsmittel zur Bewertung dar.

Für den einfachen Belegungsgrad einer Strecke sind im Merkblatt 406 der UIC die in Tabelle 2.2 dargestellten oberen Grenzwerte für die Infrastrukturbelegung von Strecken zu finden. Für den verketteten Belegungsgrad lassen sich in DB Netz (405) Richtwerte für zulässige verkettete Belegungsgrade finden.

Tabelle 2.2: Grenzwerte für den zulässigen Belegungsgrad auf Strecken (UIC, 2004)

Streckentyp	Hauptverkehrszeit	Gesamter Tag
Ausschließlich Vorort-Personenverkehr	85%	70%
Ausschließlich Hochgeschwindigkeitsverkehr	75%	60%
Mischverkehrsstrecken	75%	60%

2.5.2 Allgemeines Vorgehen zur Leistungsfähigkeitsermittlung

Bei der Betrachtung der Standardliteratur zur Leistungsfähigkeitsermittlung von Potthoff (1962), Hansen u. Pacht (2008), Pacht (2011) und Heister u. a. (2009) sowie der Richtlinien DB Netz (405) und UIC (2004), lässt sich ein allgemeines Vorgehen zur Leistungsfähigkeitsermittlung ableiten, welches aus den Schritten Infrastrukturmodellierung, Modellierung des Betriebsprogramms, Ermittlung der Belegungszeiten, Ermittlung der Mindestzugfolgezeiten und Berechnung der Leistungskenngrößen besteht. Eine schematische Darstellung der Abfolge ist in Abbildung 2.7 zu finden. Zwar hängt die Ausgestaltung der einzelnen Schritte von den letztendlich zur Berechnung der Leistungskenngrößen verwendeten Verfahren ab, die Reihenfolge der Schritte bleibt jedoch grundsätzlich bestehen.

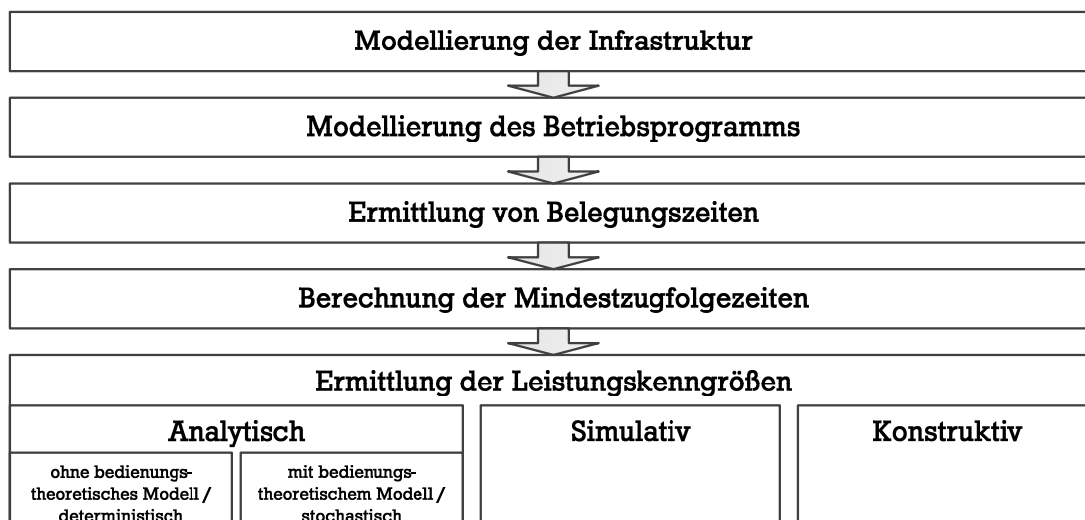


Abbildung 2.7: Allgemeiner Ablauf zur Berechnung von Leistungskenngrößen – eigene Darstellung nach (DB Netz, 405), (Heister u. a., 2009) und (Hansen u. Pacht, 2008)

Bei der Infrastrukturmodellierung wird die Granularität der Modellierung je nach Analysezweck nach makroskopischen und mikroskopischen Modellen unterschieden. Dabei erfolgt die Modellierung beim makroskopischen Modell auf der Ebene von Strecken und Knoten und beim mikroskopischen Modell auf Ebene von Blockabschnitten, Gesamtfahrstraßenknoten und Teilfahrstraßenknoten. Eine Übersicht zu den einzelnen Aspekten der Infrastrukturmodellierung ist in Radtke (2008) zu finden.

Beim Betriebsprogramm handelt es sich um „die datenmäßige Beschreibung aller Informationen zu betrieblichen Vorgängen und zu den Eigenschaften der an diesen Vorgängen beteiligten Beförderungseinheiten“ (DB Netz (405), Modul 0102, S. 5), wobei auch die Modellierung des Betriebsprogramms in unterschiedlicher Granularität erfolgen kann. So kann das Betriebsprogramm je nach Datenlage und Analysezweck über Tagesganglinien, Zugzahlen, Beschreibung der Zugfolgefälle bzw. ihrer Anteile und deren zeitliche Verteilung, Fahrplankonzepte, konkrete Fahrpläne oder Vorgaben zur Disposition beschrieben werden (siehe Pacht (2011), S. 162 und DB Netz (405), Modul 0201).

Anhand des Betriebsprogramms werden die Belegungszeiten der Infrastruktur, welche durch die resultierenden Zugfahrten entstehen, mithilfe von Sperrzeitenrechnungen ermittelt (siehe Pacht (2011), S.44 und UIC (2004)) und die Mindestzugfolgezeiten für die auftretenden Zugfolgefälle berechnet (siehe ebenfalls Pacht (2011), S. 139 ff.). Der Begriff *Belegungszeit* bezeichnet die Zeit, die ein oder mehrere Infrastrukturelemente durch einzelne Züge bzw. Zugfahrten belegt sind. Der Begriff *Gesamtbelegungszeit* bezeichnet die kumulierte Zeit, die ein oder mehrere

Infrastrukturelemente durch mehrere Züge bzw. durch mehrere Zugfahrten innerhalb eines Betrachtungszeitraums belegt sind. Die Belegungszeit und die Gesamtbelegungszeit werden in Minuten gemessen.

Zur Ermittlung der Leistungskenngrößen stehen grundsätzlich drei Verfahren zur Verfügung: konstruktive, simulative und analytische Verfahren, wobei letztere in deterministische und stochastische Verfahren – also ohne und mit bedienungstheoretischem Ansatz – zu unterscheiden sind (siehe DB Netz (405) und Heister u. a. (2009)). Eine kurze Beschreibung der Merkmale der einzelnen Verfahren sowie eine Zusammenstellung der jeweiligen Eignung wird im nachfolgenden Abschnitt wiedergegeben.

2.5.3 Überblick über die speziellen Verfahren der Leistungsfähigkeitsermittlung

Analytische Verfahren

Nach Vakhtel (2002) sind *„analytische Modelle abstrakte Darstellungen eisenbahnbetrieblicher Prozesse, die auf der Wahrscheinlichkeitstheorie oder der Bedienungstheorie basieren“*.

Das Ergebnis analytischer Verfahren ohne bedienungstheoretischen Ansatz ist der verkettete Belegungsgrad für Strecken und die Behinderungswahrscheinlichkeit für Knoten. Für eine ausführliche Darstellung der analytischen Verfahren ohne bedienungstheoretischem Ansatz wird auf Potthoff (1962), Kapitel 3 – 5 und Pachl (2011), S. 138 – 158 verwiesen.

Die Grundlage für analytische Verfahren mit bedienungstheoretischem Ansatz bilden die Arbeiten von Schwanhäuser (1974). Für eine ausführliche Darstellung der analytischen Verfahren mit bedienungstheoretischem Ansatz wird auf Wendler u. Nießen (2008) verwiesen. Das Ergebnis analytischer Verfahren mit bedienungstheoretischem Ansatz sind Erwartungswerte für Wartezeiten, Warteschlangenlängen und Wartewahrscheinlichkeiten vor den betrachteten Netzelementen.

Analytische Verfahren erfordern keinen konkreten Fahrplan als Ausgangsinformation, sie sind also fahrplanunabhängig. Anhand analytischer Verfahren können Kenngrößen für den Zustand der Fahrplanerstellung und der Betriebsdurchführung ermittelt sowie Beeinflussungen innerhalb eines Netzelementes erfasst werden. Es können näherungsweise Aussagen zur Beförderungszeit und -geschwindigkeit getroffen werden. Bei, durch analytische Verfahren erhaltenen, Leistungskennwerten und Aussagen zur Betriebsqualität handelt es sich um Mittelwerte, die auf dem zugrunde gelegten Betriebsprogramm und den zugehörigen Betriebszuständen basieren (DB Netz (405), Modul 0202).

Simulative Verfahren

Bei der Anwendung von Simulationsmodellen werden die einzelnen Prozesse des Eisenbahnbetriebs nachempfunden und die Ergebnisse statistisch ausgewertet (nach Vakhtel (2002)). Es entspricht einem *„Betriebsexperiment, [welches] nicht an der real existierenden Anlage, sondern nur an einem als Datenmodell vorliegenden Abbild der Realität vorgenommen“* wird (siehe Pachl (2011), S. 135). Eine Übersicht über den Stand von Forschung und Praxis über den Einsatz von Simulation im Bereich der Eisenbahnbetriebswissenschaft ist in Siefer (2008) zu finden.

Simulative Verfahren erfordern konkrete Fahrpläne als Ausgangsinformation. Anhand simulativer Methoden können Kenngrößen für den Zustand der Fahrplanerstellung und der Betriebsdurchführung ermittelt sowie Beeinflussungen innerhalb eines Netzelementes und zwischen

Netzelementen erfasst werden. Mithilfe von Simulationen können Aussagen zu Verspätungsverlauf und Pünktlichkeit im Betrachtungsraum, zur Anzahl bzw. zum Anteil gehaltener Anschlüsse und Umläufe im Betrieb wie auch zur Beförderungszeit und -geschwindigkeit getroffen werden. Bei den so erhaltenen Werten handelt es sich um Mittelwerte über alle der Simulation zugrunde gelegten Betriebszustände (DB Netz (405), Modul 0202).

Die existierenden Simulationsverfahren lassen sich in asynchrone und synchrone Verfahren einteilen: Während bei asynchronen Verfahren die Trassen der einzelnen Züge anhand von Prioritäten, also hierarchisch, eingelegt werden, erfolgt bei synchronen Verfahren eine zeitsynchrone Abbildung der ablaufenden betrieblichen Prozesse (Pachl (2011), S. 135). Dementsprechend ergeben sich die unterschiedlichen Stärken der einzelnen Methoden (nach Martin u. Schmidt (2010)): Im Rahmen der asynchronen Simulation ist ein schnelles Erzeugen realitätsnaher Fahrpläne möglich, wobei eine vorausschauende Konflikterkennung und -lösung stattfindet. Daher eignet sich diese Simulationsart zur Fahrplankonstruktion und -bewertung. Mithilfe der synchronen Simulation können sehr gut betriebsablaufbezogene Leistungsuntersuchungen, die Lokalisierung von Konflikten, die unmittelbare Visualisierung des direkten Betriebsablaufs sowie die Untersuchung einzelner Fragestellungen zur Fahrplanbewertung bearbeitet werden.

Konstruktive Verfahren

In konstruktiven Verfahren werden die einzelnen Elemente der Prozessabläufe für ausgewählte Zeitabschnitte aus den Blockbelegungszeiten der einzelnen Zugfahrten zusammengesetzt, also „konstruiert“ (siehe Heister u. a. (2009), S. 348). Dementsprechend erfordern konstruktive Methoden konkrete Fahrpläne als Ausgangsinformation. Ein anerkanntes Beispiel für konstruktive Verfahren der Leistungsfähigkeitsermittlung ist die im UIC-Merkblatt 406 beschriebene „Kompressionsmethode“ (siehe UIC (2004)).

Mithilfe konstruktiver Verfahren können Beeinflussungen innerhalb eines Netzelementes und zwischen Netzelementen erfasst werden. Weiterhin sind Aussagen zu Verspätungsverlauf und Pünktlichkeit im Betrachtungsraum und zur Beförderungszeit und -geschwindigkeit für den speziellen untersuchten Fall des zugrunde gelegten Fahrplans möglich. Anhand konstruktiver Methoden können weder Kenngrößen für den Zustand der Fahrplanerstellung noch für den Zustand der Betriebsdurchführung ermittelt werden, auch die direkte Ermittlung der Betriebsqualität ist nicht möglich (DB Netz (405), Modul 0202).

Eignung der einzelnen Verfahren

Wie aus den Beschreibungen der verschiedenen Verfahren zur Leistungsfähigkeitsberechnung zu entnehmen ist, ist die Verwendung des jeweiligen Verfahrens nach dem Verwendungszweck zu richten. Im Allgemeinen eignen sich analytische Verfahren besonders für die langfristige Netzplanung, simulative Verfahren besonders für die Infrastrukturplanung und konstruktive Verfahren besonders zur Trassenplanung. Weiterhin finden simulative und konstruktive Verfahren Anwendung in Betrieb und Disposition (Fachgebiet Bahnsysteme, 2012b).

Die genaue Eignung der einzelnen Verfahren in Bezug auf die zur Verfügung stehende Datenbasis aus DB Netz (405), Modul 0202, wird in Tabelle 2.3 wiedergegeben.

Detaillierte Übersichten über die in Deutschland genutzten Softwarewerkzeuge für Leistungsuntersuchungen von Schienenfahrwegen sind in Heister u. a. (2009), S. 350–351 und Vakhtel (2002), S. 25, zu finden.

Tabelle 2.3: Auswahl der geeigneten Methode hinsichtlich der Anwendbarkeitsgrenzen (DB Netz (405), Modul 0202)

Hauptkriterien	Details	Analytische	Konstruktive	Simulations-
		Methode	Methode	methode
Abbildung	Alternative, genutzte Fahrwege in den Fahrstraßenknoten und Laufwege zwischen den Knoten bzw. auf mehr als zweigleisigen Strecken sind flexibel je nach Zugfolgefall zu nutzen	- [1]	++	++
	Die Verteilung der Züge auf alternative, genutzte Fahrwege in den Fahrstraßenknoten und Laufwege zwischen den Knoten bzw. auf mehr als zweigleisigen Strecken kann fest vorgegeben werden	+ [1]	++	++
Infrastruktur	Alternative Fahr- und Laufwege sind nicht vorhanden oder nicht zu berücksichtigen	++	++	++
	Mehrfachbelegung von Bahnsteigkanten ohne Umfahrungsmöglichkeit	+ [2]	++	++
Abbildung	Mehrfachbelegung von Bahnsteigkanten mit Umfahrungsmöglichkeit	+ [2]	++	++
	Betriebsprogramm liegt als Fahrplan vor	+ [3]	++	++
Betriebsprogramm	Betriebsprogramm liegt als Tagesganglinie vor	++	+ [4]	+ [4]
	Betriebsprogramm liegt nach Stundengruppen getrennt vor (z.B. getrennt nach Tages- und Nachtzeitraum)	++	- [4]	- [4]
Betriebsprogramm	Betriebsprogramm liegt als Summe für den Tag vor	++	-- [4]	-- [4]
	Berücksichtigung von Anschlussbindungen	XX	++	++
Betriebsprogramm	Berücksichtigung von bevorzugten Gleisnutzungen	XX	++	++

XX prinzipiell nicht möglich ++ sehr gut geeignet + gut geeignet – weniger geeignet -- ungeeignet

[1] Alternative Fahrwege können nur näherungsweise berücksichtigt werden, indem Züge einer Zugfamilie darauf verteilt werden.

[2] Keine Unterscheidung zwischen den Varianten mit/ohne Umfahrungsmöglichkeit.

[3] Verwertbar bei Zugfolgenmatrix fahrplanabhängig; bei Zugfolgenmatrix fahrplanunabhängig; Abbildungsgenauigkeit nur wie bei Tagesganglinie.

[4] Entwicklung eines Fahrplanes mit Hilfe von Annahmen erforderlich.

3 Aufgabenstellung, Ansatz und Aufbau der Arbeit

3.1 Einleitung – Bedeutung der Einschwingphase

Die Verwendung von vorab geplanten Störfallprogrammen zum Umgang mit Störungen im Schienenverkehr bietet verschiedene Vorteile, wie die Verkürzung der Reaktionszeit der Disposition auf die Störung und die Möglichkeit einer effizienteren Kommunikation von Informationen an die Fahrgäste. Daher ist der Einsatz von Störfallprogrammen als Teil einer umfassenden Störfallmanagementstrategie im Schienenverkehr sinnvoll und wichtig.

Um bereits bei der Erstellung und später bei der Auswahl des letztendlich einzusetzenden Störfallprogramms dessen Eignung beurteilen zu können, ist eine Bewertung vonnöten. Diese Bewertung ist für alle drei Phasen eines Störfallprogramms (Einschwingphase, stabile Phase und Ausschwingphase) erforderlich. Wie in Abschnitt 2.2.5 ausgeführt, existieren bereits (rudimentäre) Ansätze zur Beurteilung der Machbarkeit der stabilen Phase eines Störfallprogramms, während Ansätze zur Beurteilung der Ein- und der Ausschwingphase gänzlich fehlen.

Eine funktionierende stabile Phase eines Störfallprogramms ist jedoch nur hilfreich, wenn sie überhaupt und in angemessener Zeit erreicht werden kann. Deshalb ist eine gelungene Einschwingphase die Voraussetzung für einen stabilen Betrieb im Störfall, welcher wiederum für eine geordnete Ausschwingphase notwendig ist. Daher ist es für die erfolgreiche Anwendung von Störfallprogrammen erforderlich, sich zuerst der Bewertung der Einschwingphase zu widmen. Selbstverständlich ist in zukünftigen Arbeitsschritten die Ausarbeitung einer vollständigen Bewertungsmethode erforderlich, welche alle drei Phasen eines Störfallprogramms einschließt.

3.2 Problemstellung

Zur Erarbeitung einer Bewertungsmethode in Bezug auf die Einschwingphase von Störfallprogrammen bildet die Kenntnis der Abläufe und Gesetzmäßigkeiten während der Einschwingphase die Grundlage. Wie jedoch in Abschnitt 2.2.6 erarbeitet, wurde die theoretische Analyse der Abläufe bei der Umsetzung von Dispositionsmaßnahmen nach Störfällen im Allgemeinen und während der Einschwingphase von Störfallprogrammen im Speziellen bisher in der Eisenbahnforschung vernachlässigt. Daher fehlt Wissen über die Eigenschaften des Eisenbahnbetriebs in Störungen und über andere Faktoren, welche das Einschwingverhalten von Störfallprogrammen bestimmen sowie Modelle und Erklärungsansätze zur Vorhersage und Bewertung des Einschwingverhaltens von Störfallprogrammen (siehe Abbildung 3.1).

Dieses Fehlen von Modellen, welche die besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen und speziell während der Einschwingphase berücksichtigen, erschweren die Erarbeitung von Störfallprogrammen sowie deren Vorabbeurteilung in Bezug auf Machbarkeit und zu erwartende Betriebsqualität im Allgemeinen und während der Einschwingphase im Speziellen. Dies kann wiederum dazu führen, dass die Vorteile, die sich durch die Anwendung funktionierender Störfallprogramme ergeben sollten, nicht realisiert werden können.

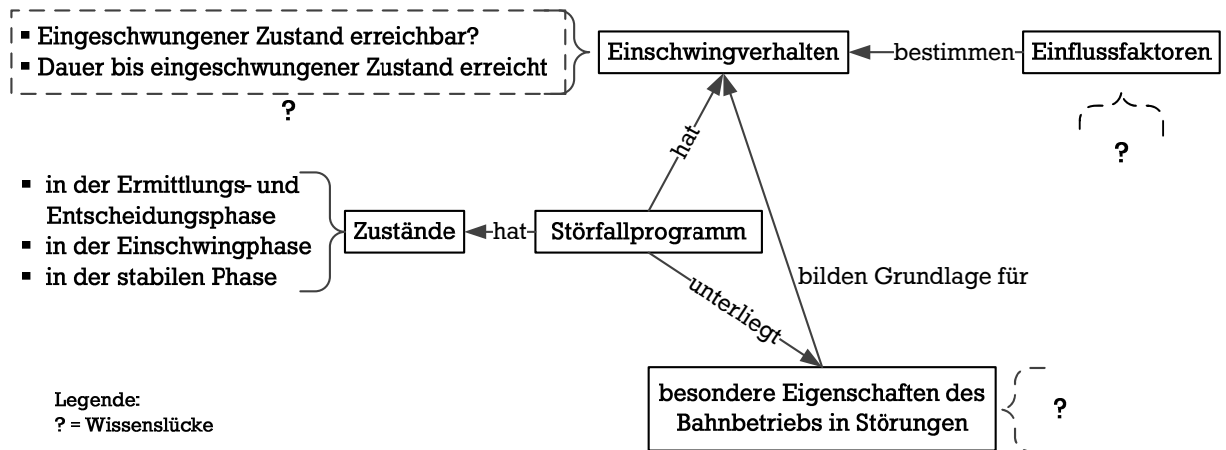


Abbildung 3.1: Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen und dem Einschwingverhalten von Störfallprogrammen

3.3 Definitionen verwendeter Begriffe

Für ein besseres Verständnis werden nachfolgend wichtige im weiteren Verlauf der Arbeit verwendete Begriffe definiert.

Wie in Abschnitt 2.2.5 definiert wurde, gilt ein Störfallprogramm dann als eingeschwungen, wenn die Züge auf den im Störfallprogramm vorgesehenen (verkürzten) Laufwegen, im vorgesehenen (verringerten) Takt und pünktlich fahren. Dementsprechend wird das *Einschwingverhalten eines Störfallprogramms* anhand der Eigenschaft, ob der eingeschwungene Zustand grundsätzlich erreicht werden kann („Machbarkeit“), und anhand der Dauer, bis der eingeschwungene Zustand erreicht wird, beschrieben.

Weiterhin sind für das Verständnis der nachfolgenden Ausführungen diese Definitionen in Bezug auf Wenden zu beachten: Der Begriff *regulärer Wendebahnhof* bezeichnet einen Bahnhof, in dem laut Fahrplan Wenden vorgesehen sind. Er befindet sich i. d. R. an den Linienenden. Der Begriff *reguläre Wende* bezeichnet eine im Fahrplan vorgesehene Wende. Der Begriff *SFP-Wendebahnhof* bezeichnet einen Bahnhof, in dem laut Störfallprogramm vorzeitige Wenden vorgesehen sind. Er befindet sich i. d. R. in der Nähe der Störungsursache und örtlich vor dem regulären Wendebahnhof. Der Begriff *SFP-Wende* bezeichnet eine im Störfallprogramm vorgesehene Wende an einem SFP-Wendebahnhof.

3.4 Aufgabenstellung und inhaltliche Abgrenzung

3.4.1 Ziele der Arbeit

Entsprechend der Ausführungen im oben aufgeführten Abschnitt der Problemstellung, lässt sich das Oberziel der vorliegenden Arbeit ableiten:

Die Verbesserung der Planung und Anwendung von Störfallprogrammen.

In Verbindung mit den in Abbildung 3.1 erfassten Wissenslücken und der besonderen Bedeutung der Einschwingphase ergeben sich die folgenden Teilziele:

Teilziel 1: Identifikation der Einflussfaktoren auf das Einschwingverhalten von Störfallprogrammen und der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen sowie Erarbeitung der Zusammenhänge.

Teilziel 2: Modellierung der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen.

Teilziel 3: Entwicklung von Modellen zur Vorhersage des Einschwingverhaltens von Störfallprogrammen – wie die Machbarkeit eines Störfallprogramms oder die Dauer der Einschwingphase – unter Berücksichtigung der zuvor identifizierten besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen.

Die im letzten Teilziel genannten Modelle können wiederum dazu genutzt werden, um die Erstellung und Umsetzung von Störfallprogrammen zu verbessern.

Den genannten Teilzielen lassen sich folgende Forschungsfragen zuordnen, deren Beantwortung im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgen soll:

Forschungsfrage 1: Welche Faktoren haben welchen Einfluss auf das Einschwingverhalten von Störfallprogrammen?

Forschungsfrage 2: Welche besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen sind bei der Vorhersage des Einschwingverhaltens zu beachten und wie können diese Eigenschaften modelliert werden?

Forschungsfrage 3: Wie kann das Einschwingverhalten von Störfallprogrammen, also die Machbarkeit und die zu erwartende Einschwingdauer, abgeschätzt bzw. bewertet werden, damit eine verbesserte Gestaltung der Einschwingphase von Störfallprogrammen möglich wird?

Diese Forschungsfragen sollen im Rahmen der Arbeit konkretisiert und bearbeitet werden.

3.4.2 Inhaltliche Abgrenzung

Bei der Beantwortung der o. g. Forschungsfragen wird sich auf spezielle Bereiche bezogen, welche in Abbildung 3.2 zusammenfassend dargestellt sind und im Folgenden erläutert werden.

Im Rahmen der Arbeit werden nur die Abläufe des *Schienenpersonenverkehrs* betrachtet, da hier – im Hinblick auf das Ziel der Steigerung der Attraktivität des Schienenverkehrs – die Bedeutung eines pünktlichen Betriebs auch in Störungssituationen besonders groß ist. Da Ursachen und Zusammenhänge von Vorgängen in „geschlossenen“ Netzen, d. h. in Netzen mit nur einer Zuggattung, i. d. R. einfacher abgrenzbar und zuzuordnen sind, erfolgen die Betrachtungen im Rahmen von S-Bahn Netzen. Hierbei ist zu bemerken, dass eine Erweiterung der Betrachtungen auf Schienennetze mit Mischverkehr nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit ist und weiterführende Betrachtungen in jedem Fall notwendig sind.

Kriterium	Ausprägungen		
	Verkehrsart	Schienenpersonenverkehr	Schienengüterverkehr
Fokus	betriebliche Abläufe, Eisenbahnbetrieb	verkehrliche Abläufe, Reiseketten und Reisendeninformation	
Problembereich der Störung	Infrastruktur	Betrieb	
Phase des Störfallprogramms	Einschwingphase	stabile Phase	Ausschwingphase
Gegenstand der Bewertung	SFP-Gesamtkonzepte	unterschiedliche Dispositionsmaßnahmen im SFP	Varianten einer Dispositionsmaßnahme im SFP
Hauptdispositionsmaßnahmen im Störfall	(Teil-) Ausfall von Zügen oder Linien	Umleitung von Zügen oder Linien	
Modellart zur Bewertung	qualitativ	quantitativ	

Legende: Fokus der vorliegenden Arbeit

Abbildung 3.2: Inhaltliche Abgrenzung des Forschungsgebietes

Die Betrachtungen erfolgen mit dem *Fokus auf die betrieblichen Abläufe* im Schienenverkehr, da ein funktionierender Betrieb die Basis für Verbesserungen im verkehrlichen Kontext – wie beispielsweise die Fahrgastinformation – darstellt.

Bezüglich des *Problembereiches* der Störung (siehe auch Abbildung 2.1) erfolgt eine Betrachtung von Störungen, bei denen die *Verfügbarkeit der Infrastruktur eingeschränkt* ist. Diese Einschränkung ergibt sich aus dem derzeitigen Stand der Praxis, da dort Störfallprogramme hauptsächlich für Störungen bei eingeschränkter Verfügbarkeit der Infrastruktur existieren. Selbstverständlich ist eine Erweiterung Störungen mit betrieblichen Ursachen zukünftig notwendig.

Eine *Fokussierung auf die Einschwingphase* erfolgt aufgrund der Notwendigkeit eines stabilen Störungszustandes, um nach einer Störung effizient in den Regelbetrieb überleiten zu können. Dieser stabile Störungszustand kann jedoch nur erreicht werden, wenn die Einschwingphase funktioniert. Selbstverständlich bleibt eine Erforschung der Einflüsse auf den Ablauf der Ausschwingphase weiterhin notwendig.

Langfristig ist für die Bewertung von Störfallprogrammen eine Bewertung von SFP-Gesamtkonzepten zum Vergleich verschiedener Störfallprogramme sowie eine Bewertung verschiedener Dispositionsmaßnahmen im Rahmen eines einzelnen Störfallprogramms erforderlich. Die Grundlage dafür bildet die Bewertung von *Varianten einer Dispositionsmaßnahme im Rahmen eines Störfallprogramms*, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt.

Die im Störfall zur Verfügung stehenden Dispositionsmaßnahmen (für eine detaillierte Aufstellung siehe Abschnitt 2.4.3 und Tabelle 4.1) lassen sich Großteils auf die beiden *Hauptdispositionsmaßnahmen (Teil-)Ausfall und Umleitung von Zügen oder Linien* zurückführen, welche beide in der vorliegenden Arbeit betrachtet werden. Dabei sind, neben Umleitungen, bei einem Teilausfall Züge vorzeitig zu wenden und bei einem Ausfall abzustellen.

Aufgrund der in den Teilzielen beschriebenen Verwendung der Modelle zur Vorhersage des Einschwingverhaltens werden weiterhin *quantitative Modelle* benötigt.

3.5 Anforderungen an die Modellierung und Lösungsansätze

3.5.1 Anforderungen

Aus dem Kontext der Ziele und der Verwendung der zu erarbeitenden Modelle und Methoden (siehe Teilziel 3) ergeben sich für die weiteren Arbeiten der Modellentwicklung folgende nicht-funktionale Anforderungen.

Allgemeingültigkeit des Ansatzes: Die Formulierung der zu erarbeitenden Methoden sollte grundsätzlich alle vorkommenden Störungssituationen abdecken und allgemeingültig sein.

Geringer Berechnungsaufwand: Weiterhin ist es notwendig, dass die Anwendung der Modelle zur Vorhersage des Einschwingverhaltens spezieller Störfallprogramme unter möglichst geringem Aufwand erfolgt. Dies ist notwendig, da dieser Vorgang nur einen Teil der bereits komplexen und aufwendigen Störfallprogrammerstellung darstellen soll.

Möglichst einfache Parametrisierung: Im Hinblick auf das Ziel einer Anwendung der erarbeiteten Modelle in der Praxis sollte bei der Modellierung darauf geachtet werden, möglichst Funktionen mit leicht verständlichen und in der Praxis einfach ermittelbaren Parametern zu verwenden.

Übertragbarkeit auf Mischverkehrsstrecken: Da die Betrachtungen im Kontext von S-Bahn Netzen erfolgen (s. o.), das Konzept der Störfallprogramme jedoch im gesamten Schienenverkehr eingesetzt werden soll, ist bei der Entwicklung der Modelle auf eine Übertragbarkeit auf Mischverkehrsstrecken zu achten.

3.5.2 Lösungsansätze

Grundsätzlich sind zur Identifikation von Einflussfaktoren auf ein System zwei Ansätze möglich – die theoretische Analyse aller denkbaren Einflüsse sowie die Analyse der im realen System maßgebenden Einflüsse.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden beide Ansätze verfolgt: Zur Identifikation der Einflussfaktoren auf das Einschwingverhalten von Störfallprogrammen erfolgt die theoretische Analyse, um die Vollständigkeit der möglichen Einflüsse sicher zu stellen. Eine Betrachtung der bereits existierenden Anwendungen von Störfallprogrammen ist notwendig, da der Stand der Praxis fortgeschrittener als der Stand der Forschung ist (siehe Abschnitt 2.2.5). Die praktische Analyse erfolgt zum einen anhand von Experteninterviews und zum anderen anhand der Betriebsdatenanalyse von Störungen, bei denen Störfallprogramme eingesetzt wurden. Anhand der Betriebsdaten lassen sich vorrangig Wirkungen der Einflussfaktoren feststellen und nicht zwangsläufig die Einflussfaktoren selbst. Allerdings geben die Erkenntnisse Hinweise auf die maßgeblichen Wirkungen, woraus Ursachen abgeleitet werden können.

Zur Modellierung der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen ist es geplant, grundsätzlich bestehende Modelle der Eisenbahnbetriebswissenschaft zu verwenden und gegebenenfalls zu erweitern. Nur bei einer Nicht-Eignung sollen neue Modelle entwickelt werden. Für die Quantifizierung der Machbarkeit und der Einschwingdauer sollen so weit wie möglich im realen Betrieb gemessene Werte, also Werte der Betriebsdatenanalyse, verwendet werden, aus denen Mittelwerte oder andere statistische Kennzahlen oder Verteilungsfunktionen abzuleiten sind. Ist eine Quantifizierung anhand der Betriebsdaten nicht möglich, erfolgt die Quantifizierung anhand von Experteneinschätzungen. Die Modellierung ist mit möglichst einfachen mathematischen Methoden zu modellieren. Hierbei wird entsprechend der oben formulierten nicht-funktionalen Anforderungen auf die Verwendung einfacher Modelle geachtet.

Analog zur Fokussierung auf die Anwendung und Erweiterung bestehender eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Modelle ist es geplant für die Einschätzung der Machbarkeit von Störfallprogrammen ebenfalls bestehende Kennzahlen und Grenzwerte zu verwenden. Nur im Falle einer Nicht-Eignung der bestehenden Größen ist die Entwicklung neuer Größen erforderlich.

3.6 Aufbau der Arbeit

Aus den in Abschnitt 3.4 formulierten Teilzielen und Forschungsfragen ergeben sich drei Bearbeitungsblöcke: Zusammenstellen und Beschreiben der Einflussfaktoren auf das Einschwingverhalten, Identifikation und Modellierung der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen und Erarbeitung von Modellen für die Vorhersage des Einschwingverhaltens in Bezug auf Machbarkeit und Dauer der Einschwingphase von Störfallprogrammen.

Bevor die Einflussfaktoren auf die Einschwingphase modelliert werden können, müssen sie identifiziert werden (siehe Kapitel 4). Die Beschreibung der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen und Quantifizierung der Auswirkungen dieser Eigenschaften auf die Belegungszeit erfolgt allgemein im Kapitel 5. Aufgrund des in Abschnitt 3.4 beschriebenen Fokus auf die Hauptdispositionsmaßnahmen (Teil-)Ausfall – mit den erforderlichen Abstellvorgängen und vorzeitigen Wenden – und Umleitung erfolgt eine spezielle Betrachtung der Dispositionsmaßnahmen „Wende“ und „Umleitung“ in Kapitel 6 und Kapitel 7. Das Teilmodell für die zeitliche Veränderung der Zugzahlen aufgrund von Abstellungen und anderen Vorgängen in der Einschwingphase wird in Kapitel 8 beschrieben. Eine Zusammenführung im Modell zur Berechnung des Belegungsgrads in Wendebahnhöfen erfolgt in Kapitel 9.

Anhand des Belegungsgrads während der Einschwingphase soll eine Vorhersage der Machbarkeit neu entwickelter Störfallprogramme erfolgen (siehe Kapitel 10). Ein Ansatz zur Abschätzung der Dauer der Einschwingphase ergibt sich aus den in Kapitel 5 bis Kapitel 10 erarbeiteten Erkenntnissen – dieser Ansatz wird in Kapitel 11 dargestellt. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der im Rahmen der Arbeit erreichten Ergebnisse sowie ein Ausblick in Kapitel 12. Abbildung 3.3 gibt einen schematischen Überblick über den Aufbau der Arbeit.

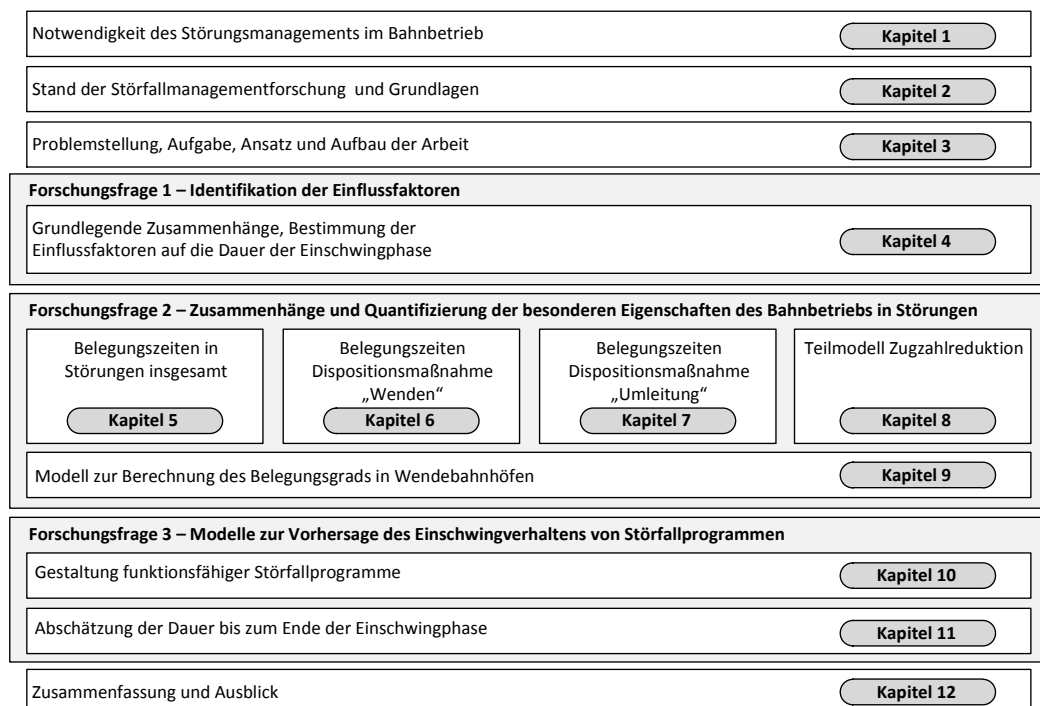


Abbildung 3.3: Aufbau der Arbeit

4 Identifikation von Einflüssen auf die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase

4.1 Identifikation der Einflüsse und Wirkzusammenhänge

4.1.1 Einleitung

Hauptkriterium Dauer

Wie in Abschnitt 2.2.5 definiert, ist ein Störfallprogramm eingeschwungen, wenn die Züge auf den vorgesehenen (verkürzten) Laufwegen, im vorgesehenen (verringerten) Takt, zuverlässig und pünktlich fahren. Bis der eingeschwungene Zustand erreicht ist, treten Verspätungen auf. Weiterhin besteht bis dahin die erhöhte Gefahr von Rückstauungen vor dem Störungsort und vor anderen kritischen Punkten. Dies bedeutet, dass sich umso mehr Züge stauen können, je länger die Einschwingphase dauert. Da dieser Zustand nicht erwünscht ist, ergibt sich die Schlussfolgerung: je schneller ein Störfallprogramm eingeschwungen ist, desto günstiger ist dies für den Betriebsablauf.

Die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase ist demnach als ein Hauptkriterium für die Beurteilung der Einschwingphase anzusehen. Im Sinne einer Gesamteinschätzung sind ebenfalls die stabile Phase und die Ausschwingphase von Störfallprogrammen zu betrachten, wobei dort andere Kriterien maßgebend sein können. Ausgangspunkt der nachfolgenden Überlegungen ist folglich die Feststellung, dass eine Verbesserung in der Anwendung von Störfallprogrammen entsteht, wenn der Zeitraum bis zum Ende der Einschwingphase eines Störfallprogramms verkürzt wird.

Vorgehen

Aus dem in Kapitel 3 dargestellten fehlendem Wissen über die Vorgänge bei der Anwendung von Störfallprogrammen und über die Einflüsse auf die Dauer der Einschwingphase ergibt sich das ebenfalls in Kapitel 3 dargestellte Ziel der Erarbeitung aller Einflüsse auf die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase und die Ableitung entsprechender Ansatzpunkte zur Verkürzung dieser Dauer.

Dazu sollen in einem ersten Schritt systematisch alle grundsätzlich möglichen Einflüsse zusammengetragen und kategorisiert und im zweiten Schritt anhand einer Betriebsdatenanalyse überprüft und mithilfe von Experteninterviews ergänzt werden. Im dritten Schritt soll eine Beschreibung der wichtigsten Einflüsse auf die Einschwingphase erfolgen anhand derer mögliche Hebel identifiziert werden, um das Ende der Einschwingphase möglichst schnell zu erreichen.

4.1.2 Einflüsse auf die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase

Grundlage für die erfolgreiche Umsetzung eines Störfallprogramms ist zweifellos die Wahl des auf den jeweiligen Störfall passenden Störfallprogramms¹. Weiterhin gilt, wie bereits erläu-

¹ I. d. R. existieren Störfallprogramme im Schienenverkehr aufgrund des hohen Erarbeitungsaufwands nur für ausgewählte risikoreiche Störungen (besonders starke Auswirkungen der Störung und/oder besonders hohe

tert, je schneller die Einschwingphase beendet ist, desto weniger Züge stauen sich vor dem Störungsort und verursachen Verspätungen bzw. können Verspätungen erfahren.

Bis zum Ende der Einschwingphase sind die Prozessschritte „Störungsinformation beschaffen“, „Entscheidung treffen“ und „Entscheidung umsetzen“ abzuarbeiten. In Orientierung an diesen Schritten kann bezüglich des Erfolgs eines Störfallprogramms folgender Leitgedanke formuliert werden, welcher sich aus den Phasen der Störfallprogramme nach Abbildung 2.3 ergibt: *Ist die grundsätzliche Eignung eines Störfallprogramms in allen drei Phasen gegeben, ist es umso wirksamer,*

- *je schneller Informationen über Störungsart und -ursache zur Verfügung stehen,*
- *je schneller eine Entscheidung über die anzuwendenden Dispositionsmaßnahmen getroffen wird und*
- *je schneller die Umsetzung des gewählten Störfallprogramms erfolgt.*

Entsprechend dieses Leitgedankens gilt es zu analysieren, welche Faktoren die Geschwindigkeit der Abwicklung der drei Prozessschritte „Störungsinformation beschaffen“, „Entscheidung treffen“ und „Entscheidung umsetzen“ erhöhen, damit die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase verkürzt werden kann.

Im Folgenden werden die Einflüsse auf die Dauer der drei Prozessschritte zusammengetragen und erklärt. Eine Zusammenfassung der Überlegungen ist der Tabelle 4.2 am Ende von Abschnitt 4.1 zu entnehmen.

Dauer, bis Informationen über Störungsart und -ursache zur Verfügung stehen

Die Dauer, bis Informationen über die Art der Störung und die Störungsursache zur Verfügung stehen, ist vorrangig von der Qualität der existierenden Kommunikationsprozesse abhängig. Es ist demnach wichtig, dass die Kommunikationsprozesse so effizient wie möglich ablaufen, d. h. dass die notwendigen Informationen über Störungsart, -ursache und -ausmaß vollständig und so schnell wie möglich zu den Disponenten gelangen.

Weiterhin hängt die Dauer, bis die entsprechenden Informationen über die Störung zur Verfügung stehen, auch von Art und Umfang der Störung ab. Dementsprechend ist die Ursache bei kleineren oder leicht abgrenzbaren Störungen oft schnell ermittelt. Bei größeren und komplexeren Störungen hingegen können die Auswirkungen oft schwerer abgeschätzt werden, was sich auf die Dauer auswirkt, bis entsprechende Informationen zur Verfügung stehen.

Auftrittswahrscheinlichkeit). Tritt eine Störung abweichend von den existierenden Störfallprogrammen auf – z. B. zwischen Station B und C anstelle zwischen A und B, so ist ad-hoc zu entscheiden, welches existierende Störfallprogramm (ggf. modifiziert) anzuwenden ist.

Dauer, bis eine Entscheidung über die anzuwendenden Dispositionsmaßnahmen getroffen wird

Die Dauer der Entscheidungsfindung über die anzuwendende Dispositionsmaßnahme bzw. das auszuwählende Störfallprogramm hängt von den aufgrund der Störung verbleibenden Dispositionsmöglichkeiten ab. Diese werden maßgebend vom Umfang der Störung sowie vom Entscheidungsfreiraum der Disponenten bestimmt. Hierbei beeinflussen die Verfügbarkeit und Nutzbarkeit von vorhandenen und zusätzlichen Ressourcen wie Personal, Fahrzeuge und verfügbarer Infrastruktur die Geschwindigkeit der Entscheidungsfindung. In Bezug auf diese zusätzlichen Ressourcen, spielen verschiedene Einflüsse für eine erfolgreiche betriebliche Umsetzung des Störfallprogramms bzw. der Einschwingphase eine Rolle. Für Fahrpersonal und Fahrzeuge gilt, dass das Vorhandensein von Reserven im Störfall positive Auswirkungen hat, da mithilfe dieser Reserven flexibler mit der Störung umgegangen werden kann. Dies gilt ebenso für Infrastrukturreserven im Sinne von zusätzlichen Fahrwegen, möglichen Umleitungen sowie Abstellgleisen mit ausreichender Länge. Das Vorhandensein von Alternativen ermöglicht einen flexiblen Umgang mit der Störung. Allerdings ist es möglich, dass eine hohe Flexibilität die Entscheidungsgeschwindigkeit verlangsamt, da mehrere Möglichkeiten abgewogen werden müssen. Ist der Entscheidungsspielraum sehr stark eingeschränkt, fällt eine schnelle Entscheidung (wie bspw. „Zugausfall“) wiederum einfacher.

Die Dauer der Entscheidungsfindung wird weiterhin zum einen durch die Vollständigkeit und Zuverlässigkeit der Störungsinformation sowie durch das Ausmaß der Störung und zum anderen von der Anzahl der an der Entscheidung beteiligten Parteien sowie der Qualität der existierenden Abstimmungsprozesse beeinflusst. Je vollständiger und zuverlässiger die Störungsinformation vorliegen, desto schneller kann die Dispositionsentscheidung getroffen werden. So existieren für viele Störungsursachen Erfahrungswerte in Bezug auf die Mindestdauern der durch die Ursachen entstehenden Störungen – Personenunfälle beispielsweise führen in der Regel zu Streckensperrungen von mindestens zwei Stunden, weshalb sich in diesem Falle i. d. R. sofort für die Anwendung eines Störfallprogramms entschieden wird (Chu, 2012a). Die Kenntnis dieser Erfahrungswerte erleichtert dementsprechend die Entscheidung, ob die Einführung eines Störfallprogramms notwendig ist. Anders verhält es sich bei Störungen, bei denen das Ausmaß nicht sofort abgeschätzt bzw. die Ursache nicht sofort benannt werden kann und bei denen Informationen nur teilweise und in zeitlichen Abständen eintreffen.

Sind Abstimmungsprozesse mit internen und externen Partnern klar definiert und sind die Bedürfnisse einiger weniger Beteiligter abzustimmen, kann eine Entscheidung schneller getroffen werden. Weiterhin zeichnen sich planbare Ereignisse, wie beispielsweise Bauarbeiten oder Massenveranstaltungen, durch ein Wegfallen der Findungs- und Entscheidungsphase während der Störung aus, was sich wiederum positiv auf die Länge der Einschwingphase auswirken sollte.

Auch die Auslastung des Disponenten bestimmt die Geschwindigkeit der Entscheidungsfindung und hat einen Einfluss auf den Ablauf der Einschwingphase (siehe dazu auch den nachfolgenden Abschnitt).

Anschlussbeziehungen und Passagieren, was wiederum eine Übertragung von Verspätungen auf ursprünglich nicht betroffene Züge begünstigt. Auch die *Lage*, in der die Störung innerhalb des Netzes auftritt, kann sich auf den Dispositionsaufwand und damit erschwerend auf den Verlauf der Einschwingphase auswirken. Dieser Effekt ergibt sich, wenn z.B. beim Brechen einer Linie in der Mitte ihres Laufweges der Zug auf einer Seite der Störung unter seiner originären Zugnummer verkehren kann, während für einen Ersatzzug auf der anderen Seite eine neue Zugnummer generiert werden muss. Die dafür notwendigen zusätzlichen Dispositionsschritte nehmen den Disponenten zusätzlich in Anspruch.

Weiterhin wirkt sich die *Anzahl der zum Störungszeitpunkt im Netz vorhandenen Züge* – in Abhängigkeit von der Größe des Netzes sowie von der Hauptverkehrszeit bzw. der Nebenverkehrszeit – direkt auf die Anzahl der erforderlichen Dispositionsschritte und damit auf die Arbeitsbelastung des Disponenten aus. Bei der Art des Störungseintritts kann zwischen dem plötzlichen Eintreten im Zusammenhang mit einem Nothalt (=Rücknahme von Fahrbefehlen), dem geordneten Anhalten („Fahre bis zum nächsten Bahnsteig und warte dort ab, bis eine Lösung gefunden wurde.“) und dem Einführen des Störfallprogramms ohne ein Anhalten des Betriebs unterschieden werden. Wird beispielsweise ein Nothalt ausgelöst, steigt die Zahl der durch den Disponenten zu erfüllenden Teilaufgaben automatisch, da bei vielen Zügen, die angehalten wurden, individuelle Rücksprachen notwendig werden. Zusammenfassend ist festzustellen, dass bestimmte Umstände, unter denen die Störung auftritt, aber auch gewisse Dispositionsmaßnahmen zu einer stark anwachsenden Zahl an abzuarbeitenden Geschäftsvorfällen führen, was die Gefahr der Überlastung des Disponenten zur Folge hat.

Entscheidungshilfen und vorgegebene Prozesse wirken sich positiv auf die Auslastung des Disponenten im Störfall aus. Für die Abfolge der Ausführung der Dispositionsmaßnahmen ist der Standort der betroffenen Züge in Relation zum Störungsort und zu den Orten, an denen die Dispositionsmaßnahmen ausgeführt werden sollen, maßgebend. Da dieser situationsabhängig ist, bieten sich Prioritätenlisten, welche Züge zuerst bearbeitet werden müssen, an. Diese sind mit den im Straßenverkehr eingesetzten Umschaltprogrammen (siehe Abschnitt 2.3.1) vergleichbar. Sie regeln die sinnvolle Abarbeitung von Aufgaben die Übergang in die stabile Phase, wie beispielsweise²:

- Disponieren von problematischen Zügen, die individuelle Informationen bzw. Entscheidungen benötigen.
- Disponieren von Zügen, die problemlos in das Störfallprogramm zu führen sind.
- Disponieren der Wenden an definierten kritischen Punkten im Netz.

Basis für eine schnelle Umsetzung der gewählten Dispositionsmaßnahmen und für den reibungslosen Ablauf der Einschwingphase ist weiterhin die *Verständlichkeit* der Störfallprogramm-Information für alle beteiligten Mitarbeiter der verschiedenen Eisenbahnverkehrs- und -infrastrukturunternehmen. Auch die Kenntnis aller Abläufe sowie die entsprechende *Umsetzungsdisziplin* aller an der Ausführung Beteiligten stellen eine Grundvoraussetzung für eine schnelle Umsetzung dar. So sind für die fachgerechte und planmäßige Umsetzung der Störfallprogramme des Weiteren eine entsprechende *Schulung und Ausbildung* aller beteiligten Mitarbeiter sowie entsprechende Anreize zur Einhaltung der Disziplin notwendig.

² Die genaue, in der Praxis verwendete Abfolge, ist der Autorin bekannt, wird zur Wahrung des Betriebsgeheimnisses an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

4.1.3 Dispositionsmaßnahmen und ihre impliziten Effekte

Das Ziel der Anwendung von Dispositionsmaßnahmen im SFP-Fall besteht in der Wiederherstellung eines geregelten Betriebs während der Störung (siehe Abschnitt 2.4.3). Dazu ist es notwendig, die vor dem Störungsort entstandenen Rückstauungen aufzulösen und die dadurch entstandenen ungeplanten zusätzlichen Belegungszeiten der Infrastruktur zu minimieren. Aufgrund der Komplexität des Systems Bahn ist es jedoch möglich, dass die gewünschte entlastende Wirkung gleichzeitig zu belastenden Effekten an anderen Stellen im Netz bzw. im Betrieb führt. Diese „Nebenwirkungen“ können dazu führen, dass die ursprünglich beabsichtigten positiven Wirkungen einer Dispositionsmaßnahme nicht oder nur teilweise erreicht werden. Zur Erläuterung des Sachverhalts werden in Tabelle 4.1 alle im Störfall zur Verfügung stehenden Dispositionsmaßnahmen sowie ihre „Nebenwirkungen“ auf das System dargestellt (siehe auch Chu u. a. (2013)).

Die Existenz dieser Nebenwirkungen ist bekannt. Allerdings zeigten Gespräche mit SFP-Experten (Chu, 2012a), dass diese Wirkungen bei der Erstellung von Störfallprogrammen aus Gründen der Komplexitätsreduktion bisher teilweise vernachlässigt wurden. Da es jedoch möglich ist, dass diese impliziten, negativen Effekte der Dispositionsmaßnahmen das Erreichen der stabilen Phase behindern können, ist es notwendig, die impliziten Effekte bei der Wahl der Maßnahmen zu bedenken und schon bereits während der Störfallprogramm-Erstellung zu prüfen.

Tabelle 4.1: Dispositionsmaßnahmen im SFP-Fall (siehe auch Abschnitt 2.4.3) sowie mögliche Auswirkungen auf die Belegungszeiten der Infrastruktur

Maßnahmen	Beabsichtigte Effekte explizite Infrastrukturentlastung		Mögliche Effekte implizite Infrastrukturbelastung	
	Trassen werden frei	kürzere Belegungszeiten als im Fahrplan vorgesehen	zusätzliche Trassen werden belegt	längere Belegungszeiten als im Fahrplan vorgesehen
Umleitung von Zügen	X		X (5)	X (7)
andere Fahrwege innerhalb von Stationen (Halte bleiben wie geplant bestehen)		(X)		X (8)
Fahrzeitverlängerungen / Haltezeitverlängerungen				X
Linie streichen (Totalausfall aller Züge einer Linie)	X		(X) (6)	X (9)
Linie verkürzen (Züge fahren nicht bis zum Endbahnhof)	X (1)			X (10)
Linie brechen (Linie wird geteilt; einige Betriebsstellen der Linie werden nicht bedient)	X (1)			X (10)
Ausfall von bestimmten Halten		X (4)		X (11)
zusätzliche Halte				X (12)
Taktausdünnung	X (2)		(X) (6)	
Zugausfall (einzelner Zug fällt auf der gesamten Strecke aus)	X (2)		(X) (6)	X (9) und ggf. (10)
Flügel-/Zusammenlegen von Zügen auf gestörten Streckenabschnitten	X (3)			X (13)
Zugteilausfall (einzelner Zug fällt auf Teilen der Strecke aus)	X (1)			X (14)

X = Effekt tritt auf

(1) auf Laufweg des Teilausfalls

(2) auf gesamten Laufweg

(3) auf gemeinsamen Laufweg

(4) an Betriebsstellen mit ausgefallenem Halt

(5) auf Umleitung

(6) für Fahrt bis zum Abstellort bei Fahrzeugabstellung

(7) Wenn die Umleitungsstrecke bereits stark ausgelastet ist, warten Züge auf die Einfahrt in die Umleitung.

(8) bei Behinderung des Betriebs/durch den Betrieb, wenn z.B. durchgehende Hauptgleise gekreuzt werden

(9) durch höheres Fahrgastaufkommen/Fahrgastwechselzeiten in anderen Zügen

(10) im Wendebahnhof

(11) durch längere Fahrgastwechselzeiten in anderen Betriebsstellen

(12) durch längere Belegungszeiten in Betriebsstellen mit zusätzlichen Halten

(13) durch höhere Belegungszeit durch den zusammengelegten Zug bzw. in Flügelbahnhöfen

(14) durch höhere Belegungszeit in Wendebahnhöfen

4.1.4 Steuerbarkeit der Einflüsse auf die Einschwingphase

Betrachtet man die in Abschnitt 4.1.2 zusammengestellten Einflüsse in Bezug auf die Möglichkeiten einer Einflussnahme auf eine kurze Prozessdauer, so lassen sich vielfältige Möglichkeiten identifizieren. Fasst man diese wiederum zu Gruppen zusammen, so sind vier verschiedene grundlegende Hebel identifizierbar, durch welche eine positive Steuerung der Dauer möglich ist:

- Verbesserung der existierenden Prozesse,
- Schulung der Mitarbeiter,
- Aufbau von Reserven für den Störfall sowie
- Auswahl und Gestaltung der entsprechenden Dispositionsmaßnahmen eines Störfallprogramms.

In Tabelle 4.2 werden die in den vorangehenden Abschnitten identifizierten Einflussfaktoren auf die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase aufgelistet und den einzelnen Hebeln zugeordnet.

Prozessanalysen und entsprechende Verbesserungen der Abläufe können dazu beitragen, die Kommunikation zu beschleunigen – hier kann die Güte der Information durch die Einführung von Kommunikationsstandards verbessert werden. Auch die Schulung der beteiligten Mitarbeiter unterstützt einen reibungslosen Ablauf der Einschwingphase. Verbesserungen in diesen und anderen Bereichen (z.B. Disziplin in der Umsetzung) müssen durch Change Management und Maßnahmen aus dem Bereich der Organisationsentwicklung begleitet werden.

Kapazitätsreserven, also zusätzliches Fahrpersonal, zusätzliche Fahrzeuge sowie zusätzliche Disponenten erhöhen im Störfall die Handlungsflexibilität. Allerdings sind – aufgrund von schlanken Betriebskonzepten und Preisdruck – i. d. R. wenig Reserven im Betrieb vorhanden und steht der Aufbau von Reserven oft außer Frage. Alle oben genannten Bereiche stellen wichtige Ansatzpunkte zur Verbesserung der Einschwingphase dar. Sie sind i. d. R. mittel- bis langfristig beeinflussbar, wobei mittelfristig ein Zeitraum von mehreren Monaten ab der Einführung des Konzepts der Störfallprogramme und unter langfristig ein Zeitraum von einem bis zu mehreren Jahren verstanden wird.

Die Umsetzbarkeit eines Störfallprogramms steht in direktem Zusammenhang mit den im Störfallprogramm eingesetzten Dispositionsmaßnahmen. So müssen die in Tabelle 4.1 beschriebenen Nebenwirkungen, welche durch den Einsatz bestimmter Dispositionsmaßnahmen auftreten, bei der Ausgestaltung der Maßnahme berücksichtigt werden. Durch die richtige Wahl der Maßnahmen im Rahmen der Gestaltung von Störfallprogrammen werden demnach die Voraussetzungen für eine funktionierende Einschwingphase geschaffen. Ohne diese Voraussetzung sind Verbesserungen mithilfe der soeben beschriebenen mittel- und langfristig wirkenden Hebel nicht ausreichend. Dementsprechend ist die Wahl der Maßnahmen Gegenstand der weiteren Betrachtungen der vorliegenden Arbeit.

Weiterhin lässt sich eine fünfte Gruppe ermitteln, deren Einflüsse i. d. R. nicht aktiv durch die einzelnen Akteure beeinflusst werden können („kein Hebel“). Hier sind Art und Ausmaß der Störung zwar nicht beeinflussbar, bestimmen jedoch maßgeblich die Geschwindigkeit der Informationssammlung, die Auslastung des Disponenten und den zur Verfügung stehenden Handlungsspielraum in der Disposition. Auch die Anzahl der am Entscheidungsfindungs- und Umsetzungsprozess beteiligten Parteien ist i. d. R. nicht beeinflussbar.

Tabelle 4.2: Zusammenstellung der Einflüsse auf die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase sowie Beurteilung der Steuerbarkeit dieser Einflüsse

Prozessschritt	Einflussfaktor auf die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase	mögl. Hebel zur positiven Beeinflussung der Dauer	Reserven	Maßnahme
		keiner	Prozess	Schulung
Identifikation der Störungsursache	Art und Ausmaß der Störung	X		
Entscheidung für bestimmte Maßnahmen	Qualität der existierenden Kommunikationsprozesse	X		
	Vollständigkeit und Zuverlässigkeit Störungsinformation	X	X	
	Anzahl der beteiligten Parteien	X	(X)	
	Qualität der existierenden Abstimmungsprozesse	X	X	
	Art und Ausmaß der Störung	X		
	Verfügbarkeit zusätzliches Fahrpersonal		X	X
	Verfügbarkeit zusätzlicher Fahrzeuge		X	X
	Einsetzbarkeit vorhandener Fahrzeuge		X	
	Vorhandensein und Erreichbarkeit der Infrastruktur	X		
	Verfügbare Kapazität der Infrastruktur			X
Umsetzung der entsprechenden Maßnahmen	Auslastung des Disponenten	X	X	X
	Verständlichkeit der Störfallprogramminformation für interne und externe Mitarbeiter	X	X	
	Korrekte Umsetzung und Disziplin bei der Störfallprogramm-Ausführung	X	X	
	Lage, Art und Eintrittszeitpunkt der Störung	X		
	Art und Ausmaß der Störung	X		
	Unterstützung durch IT-Systeme	X	X	X
	Dispositionshilfen und Vorabpriorisierung von Arbeitsschritten	X	X	
	Wirksamkeit Dispositionsmaßnahmen	X		X
	Umsetzbarkeit Dispositionsmaßnahmen	X	X	X

X = Faktor ist durch diesen Hebel positiv beeinflussbar

4.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Identifikation

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es – im Hinblick auf die Qualität des Betriebsablaufs – besser ist, je schneller der Betrieb nach Eintritt der Störung im stabilen Zustand verläuft. Damit die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase möglichst kurz ist, müssen die drei Phasen „Störungsinformation beschaffen“, „Entscheidung treffen“ und „Entscheidung umsetzen“ so schnell und so effizient wie möglich ablaufen.

Die Dauer der ersten Phase kann so kurz wie möglich gestaltet werden, wenn die Störungsursache schnell ermittelt ist und die entsprechenden Informationen schnell und vollständig die Disponenten erreichen. Die zweite Phase wird durch die vollständige und schnelle Weitergabe von Informationen, effiziente Abstimmungsprozesse und das Wirken gut ausgebildeter Disponenten beschleunigt. Auch die dritte Phase wird durch die effiziente Formulierung und Weitergabe von Informationen sowie durch das Wirken geschulter Mitarbeiter beschleunigt. Weiterhin ist es notwendig, dass die einzusetzenden Dispositionsmaßnahmen unter Berücksichtigung eventueller unerwünschter Nebenwirkungen geplant und beispielsweise vorab ideale Dispositionsreihenfolgen definiert werden.

Ausgehend von dieser Grundauffassung wurden die vier grundlegenden Einflüsse „Prozessgestaltung“, „Umsetzung durch die Mitarbeiter“, „Reserven“ sowie „Maßnahmengestaltung“ identifiziert und beschrieben. Während die ersten drei Faktoren nur mittel- bis langfristig verbessert werden können, bietet sich durch die Wahl passender Maßnahmen und die Erarbeitung dazugehöriger Einschwingstrategien direkt bei der Gestaltung von Störfallprogrammen ein wichtiger Hebel zur Verkürzung der Einschwingphase. Dabei wird unter mittelfristig ein Zeitraum von mehreren Monaten ab Implementierung von Störfallprogrammen und unter langfristig ein Zeitraum von einem bis zu mehreren Jahren verstanden.

Die systematische Analyse aller grundsätzlich möglichen Dispositionsmaßnahmen im Störfall zeigt weiterhin, dass fast jede Dispositionsmaßnahme neben ihrer erwünschten positiven Wirkung auch implizite Nebenwirkungen an zum Teil anderen Stellen im Netz aufweisen kann. Dieses Wissen wurde bisher aus Gründen der Komplexitätsreduzierung nicht immer bei der Gestaltung von Störfallprogrammen beachtet. Werden diese Wirkungen jedoch nicht beachtet, ist es möglich, dass ein Störfallprogramm gar nicht oder nur im eingeschwungenen Zustand funktionieren kann. Ist dies der Fall, so dauert es länger bis die stabile Phase eines Störfallprogramms erreicht ist. Je länger es bis zum Ende der Einschwingphase dauert, desto mehr Züge können Verspätungen erfahren, welche sich im Netz weiter fortpflanzen und somit den Erfolg des Störfallprogramms weiter gefährden können. Dies bedeutet, dass die Wahl der Dispositionsmaßnahmen auch Einfluss auf die Qualität des Betriebsablaufs hat.

Es gilt nun, die Relevanz der identifizierten Verspätungsursachen anhand von Beispieldaten zu überprüfen sowie die Besonderheiten des Bahnbetriebs in Störungen und ihren Einfluss auf die Einschwingphase näher zu ergründen (siehe Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3), die Wirkungen der Einflüsse zu beschreiben (siehe Kapitel 5 bis Kapitel 8) und entsprechende Hilfsmittel zur Minderung der Nebenwirkungen direkt für die Planung von Störfallprogrammen zu entwickeln (siehe Kapitel 10).

4.2 Experteninterviews

Wie in Abschnitt 2.2.5 beschrieben, ist der Stand der Praxis in der Erstellung und Anwendung von Störfallprogrammen fortgeschrittener als der Stand der Forschung. Deshalb ist eine Betrachtung der bereits existierenden Anwendungen von Störfallprogrammen notwendig. Dies erfolgte anhand von halbstandardisierten Experteninterviews, bei denen allen Interviewpartnern dieselben und teilweise offenen Fragen gestellt wurden. Der Einsatz halbstandardisierter Interviews ermöglicht eine relative Vergleichbarkeit der Antworten, wobei ausreichend Raum für die jeweiligen Besonderheiten bleibt. Der Fragenkatalog ist in Anhang A dargestellt.

Insgesamt wurden vier Leiter verschiedener Transportleitungen der DB Regio AG zu den Eigenschaften der jeweiligen S-Bahn Netze, zum aktuellen Stand der Störfallprogrammanwendung in ihrem Bereich und zur Anwendung von Störfallprogrammen allgemein befragt. Da adäquates Störfallmanagement einen Wettbewerbsvorteil darstellt, wird aufgrund des herrschenden Wettbewerbs im Schienenpersonennahverkehr von einem Abdruck der Antworten und der detaillierten Erkenntnisse aus den Interviews an dieser Stelle abgesehen. Anonymisiert und verallgemeinert fließen die Ergebnisse jedoch an vielen Stellen in die vorliegende Arbeit ein (hauptsächlich in Kapitel 2, Kapitel 4 bis Kapitel 7), wo sie als *Chu (2012b)* referenziert sind.

4.3 Betriebsdatenanalyse

4.3.1 Ziele und Ansatz für die Betriebsdatenanalyse

Wie in der Aufgabenstellung in Kapitel 3 beschrieben, besteht das Oberziel der Arbeit darin die Planung und Anwendung von Störfallprogrammen zu verbessern. Im ersten Abschnitt wurden die vielfältigen Einflüsse auf das Einschwingen von Störfallprogrammen erarbeitet. Zur Vervollständigung der Überlegungen werden im Weiteren Betriebsdaten von Störungen, in denen Störfallprogramme angewandt wurden, analysiert, um die Relevanz der identifizierten Einflüsse zu bestimmen.

Grundidee der Betriebsdatenanalyse ist der Rückschluss von sich manifestierenden Problemen auf entsprechende Einflüsse und Ursachen. Bei der Bestimmung der zu identifizierenden Probleme hilft die Definition der ÖPNV-Qualität nach DIN 13816 (DIN, 2002). Dort werden die Qualitätskategorien „Verfügbarkeit“, „Zugänglichkeit“, „Information“, „Zeit“, „Kundenbetreuung“, „Komfort“, „Sicherheit“ und „Umwelteinflüsse“ unterschieden. Das Merkmal „Zeit“ eignet sich hierbei am Besten um die Betriebsqualität zu beschreiben. Zur Kategorie „Zeit“ zählen laut DIN 13816 die Merkmale Reisezeit sowie Einhaltung des Fahrplans. Die Einhaltung des Fahrplans wird über die Untermerkmale Pünktlichkeit und Regelmäßigkeit beschrieben.

Das Untermerkmal Regelmäßigkeit wird über die Anzahl gefahrener Zugfahrten bestimmt. Dieses Merkmal ist zur Beurteilung der Betriebsqualität in Störungen jedoch nicht praktikabel, da die Anzahl verkehrender Züge direkt von der Art der Störung und der bestehenden Belastung des Netzes abhängt. Hier ist daher keine allgemeingültige Aussage zu erwarten. Das Untermerkmal Pünktlichkeit bezeichnet den Grad der Abweichungen vom Fahrplan, d. h. die entstehenden Verfrühungen oder Verspätungen. Im Kontext von Störfällen sind die entstehenden Verspätungen entscheidend. Im Rahmen der beschriebenen Betriebsdatenanalyse sind demnach die Verspätungen, d. h. die Verspätungsursachen und die Orte an denen Verspätungen entstehen, relevant. Deshalb erfolgt die Betriebsanalyse in den Schritten (1) Identifikation der Verspätungsursachen und (2) Einordnung der Orte an denen Verspätungen auftreten. Die Datenbasis, anhand derer die Analyse erfolgt, wird im nachfolgenden Abschnitt 4.3.2 beschrieben.

4.3.2 Beschreibung der zur Verfügung stehenden Daten

Datenquellen

Die zur Verfügung stehenden Betriebsdaten stammen vom Eisenbahninfrastrukturunternehmen DB Netz AG und vom Eisenbahnverkehrsunternehmen DB Regio AG. Hauptquelle der Analyse sind Zuglaufmeldungen (ZLM) aus dem Dispositionssystem LeiDis der DB Netz AG. In den Datensätzen Zuglaufmeldung werden die Zugfahrten durch die einzelnen Betriebsstellen registriert. Die Bestandteile der Datensätze sind in Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 erläutert.

Weiterführende und ergänzende Informationen zu den Störungen sowie die digital verfügbaren Störungsmeldungen und Fahrgastinformation wurden aus der RIS-Info-Plattform abgerufen (RIS – Reisendeninformationssystem). Weiterhin wurden Expertengespräche mit erfahrenen Disponenten der analysierten Regionen geführt (siehe Chu (2012a)) um bestehendes Wissen, lokale Sonderregelungen und bekannte Gesetzmäßigkeiten zu protokollieren. Informationen über spezifische Dispositionsentscheidungen während der analysierten Störungen sind nicht verfügbar, da keine Interviews mit den im Störfall diensthabenden Disponenten geführt werden konnten.

Anhand der beschriebenen Daten- und Informationsquellen wurden der Verlauf der Störungen, die Pünktlichkeit der Zugfahrten an allen angefahrenen Betriebsstellen und die Gleisbelegungen nachvollzogen.

Tabelle 4.3: Übersicht über den Aufbau des Datensatzes „Zuglaufmeldungen“ nach Teichmann (2010a)

Bezeichnung	Abkürzung	Erklärung
Betriebstag	BTG	JJJJ-MM-TT
Zugnummer	ZN	5-stellige Zugnummer
Zugnummernbezeichnung	ZNBZ	Codebuchstabe entspricht der Betriebszentrale, in der die Zugfahrt beginnt
Betriebsstelle	BST	Betriebsstelle, an der die Zuglaufmeldung registriert wurde
Fortschaltstatus	FSSTAT	siehe Tabelle 4.4
Soll-Zeit	SOLL	im Fahrplan vorgesehene Ankunfts-, Abfahrts- oder Durchfahrtszeit eines Zuges
Ist-Zeit	IST	gemeldete Ankunfts-, Abfahrts- oder Durchfahrtszeit eines Zuges
Verspätung	VERSP	Zeitunterschied zwischen Soll-Lage und Ist-Lage in Sekunden
Soll-Gleis	SGLS	im Fahrplan vorgesehene Gleisnutzung
Ist-Gleis	IGLS	tatsächliches befahrenes Gleis
Soll-Strecke	SSTR	im Fahrplan vorgesehene Streckennummer
Ist-Strecke	ISTR	Nummer der tatsächlich befahrenen Strecke
Zusatzerspätung	ZSVSP	positive Differenz zwischen der Verspätung am Vorgängermesspunkt und der Verspätung am aktuellen Messpunkt

Tabelle 4.4: Erläuterungen Fortschaltstatus nach Teichmann (2010a)

Fortschaltstatus	Bezeichnung
1	Zug endet
2	Zug beginnt
3	Ankunft
4	Abfahrt
5	Durchfahrt

Datenqualität

Bei den zur Verfügung gestellten LeiDis-Datensätzen handelt es sich um betriebliche Daten, die anhand von Signalhaltfällen i. d. R. automatisch durch eine Schnittstelle aus der Sicherungstechnik gewonnen werden. Bei der Übertragung können zum einen einzelne betriebliche Meldungen unvollständig oder fehlerhaft aufgenommen werden, zum anderen ist in speziellen Fällen eine manuelle Eingabe durch den Fahrdienstleiter möglich. Dieser Umstand führt zu den Fehlerursachen unvollständiger, widersprüchlicher oder doppelter Zuglaufmeldungen oder falscher Zeitmeldungen (nach Teichmann (2010a)).

Vor allem in Störungssituationen ist die Wahrscheinlichkeit gegeben, dass fehlerhafte Zuglaufmeldungen entstehen, da alle abweichend vom Fahrplan erfolgenden Dispositionsmaßnahmen manuell vom Disponenten in das IT-System eingegeben werden müssen. Hier sind aufgrund der vielen zu pflegenden Geschäftsvorfälle sowie der Störungssituation an sich Eingabefehler wahrscheinlich. Aus diesem Grunde wurden die zur Verfügung stehenden Daten kritisch untersucht und folgende Fälle bereinigt:

- Doppelte Zuglaufmeldungen konnten durch das Löschen der identischen Einträge vollständig bereinigt werden. Das Vorhandensein doppelter Zuglaufmeldungen wurde über Zeilenvergleich geprüft.
- Unvollständige Zuglaufmeldungen konnten je nach Art der Unvollständigkeit weiter verwendet werden, wenn Soll-Angaben fehlten, die Ist-Angaben jedoch eingetragen waren. Fehlten Ist-Angaben, so wurden diese Datensätze nicht weiter verwendet.
- Widersprüchliche Zuglaufmeldungen wurden nicht weiterverwendet, da eine nachträgliche Beurteilung der Richtigkeit nicht zuverlässig möglich war. Hier wäre es möglich, vereinfachend jeweils den ersten Datensatz zu verwenden und die nachfolgenden zu löschen. Im Hinblick auf die geringe Grundgesamtheit der Daten und einer bei diesem Vorgehen betragenden Fehlerwahrscheinlichkeit von 50% wurde von diesem Vorgehen abgesehen.
- Zuglaufdaten mit unplausiblen Zeitmeldungen (z. B. Ende einer Zugfahrt Stunden später nach der letzten Abfahrt, ohne dass sich der Zug in einer Störung befand) wurden ebenfalls nicht weiterverwendet, da eine nachträgliche Rekonstruktion nicht möglich war.

Insgesamt betrug die Anzahl der nach den oben genannten Kriterien zu löschenden Zuglaufmeldungen weniger als 50 Meldungen pro Störfall, was jeweils weniger als 0,5 Prozent der Zuglaufmeldungen pro Störfall ausmacht (siehe auch Tabelle 4.5). Aufgrund dieser geringen Anzahl pro Störfall ist davon auszugehen, dass durch die vorgenommenen Löschungen die Aussagekraft der Analyseergebnisse nicht beeinflusst wird.

Aufgrund der relativ geringen Anzahl an zur Verfügung stehenden Datensätzen (siehe auch im nachfolgenden Abschnitt), ist es anhand der vorliegenden Datengrundlage nicht möglich, statistisch aussagekräftige Schlussfolgerungen zu ziehen.

Zu den weiterhin zur Verfügung stehenden Daten aus dem Reisendeninformationssystem (RIS) sowie zu den im Dispositionssystem LeiDis hinterlegten zusätzlichen Informationen ist anzumerken, dass sie nur selten vollständig waren. Dies beruht auf dem Umstand, dass Disponenten in der Störung oft nicht über genügend Kapazitäten verfügen, um alle anstehenden Geschäftsvorfälle und Zusatzinformationen zeitnah in den IT-Systemen zu dokumentieren. Dementsprechend konnten die zur Verfügung stehenden Zusatzinformationen lediglich genutzt werden, um den Verlauf des Geschehens besser nachzuvollziehen, soweit dies möglich war.

Analysierte Störfälle

Um zu analysieren, welche Verspätungsursachen bei der Anwendung von Störfallprogrammen auftreten, war es nötig, Betriebsdaten von Schienenverkehrssystemen zu analysieren, in denen bereits Störfallprogramme angewendet werden. Da Wirkzusammenhänge in Netzen mit gattungsreinem Verkehr i. d. R. einfacher zu identifizieren sind als in Netzen mit Mischverkehr, bieten sich S-Bahn Systeme zur Analyse an. Die S-Bahn Systeme von drei deutschen Großstädten erfüllen die Anforderungen, weshalb sie ausgewählt wurden.

Die analysierten S-Bahn Systeme unterscheiden sich in ihrer Belastung stark voneinander – in den Netzen fanden jeweils ca. 900, 1200 und 750 Zugfahrten pro Tag statt. Die Netze weisen alle eine monozentrische Netzstruktur auf, in deren Zentrum jeweils alle oder fast alle Linien auf einer sogenannten Stammstrecke verkehren (siehe Abbildung 4.2). In allen drei Netzen wurden Störfallprogramme für den Fall von Störungen auf oder vor der Stammstrecke erarbeitet. Durch die ähnliche Struktur und den gleichen Anwendungsfall der verwendeten Störfallprogramme ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse, trotz der unterschiedlichen Belastungen, grundsätzlich gegeben.

Weiterhin wurden Störungen des S-Bahn Netzes einer vierten deutschen Großstadt ausgewertet (siehe ebenfalls Abbildung 4.2). Auch dieses Netz weist einen monozentrischen Aufbau auf, unterscheidet sich jedoch stark im darauf realisierten Betrieb von dem der anderen analysierten S-Bahn Systeme. Dies ist vor allem auf das Fehlen einer ausgeprägten Stammstrecke, die Realisierung eines für S-Bahn Systeme relativ geringen 30-Minuten-Takts auf allen Linien und den Umstand, dass der Verkehr hauptsächlich auf Mischverkehrsstrecken stattfindet, zurückzuführen. Störfälle dieses S-Bahn Systems wurden aufgrund des letzteren Unterschieds der Anwendung von Störfallprogrammen in Netzen mit Mischverkehr für die Analyse ausgewählt. Dadurch sollte überprüft werden, ob die Erkenntnisse aus reinen S-Bahn Netzen auch auf Mischverkehrsstrecken übertragbar sind.

Leider konnten aus der Analyse dieses vierten Netzes keine grundlegenden Erkenntnisse bezüglich der Einflüsse auf die Einschwingphase gewonnen werden. Dies ist vorrangig auf die – bedingt durch den 30-Minuten-Takt – geringe Anzahl von tatsächlich von der Störung betroffenen Zugfahrten zurückzuführen. Daher wird im weiteren Verlauf des vorliegenden Kapitels von einer Bezugnahme auf Ergebnisse aus dem vierten Netz abgesehen. Jedoch wird die Maßnahme Umleitung in diesem Netz im Rahmen der verwendeten Störfallprogramme vergleichsweise häufig eingesetzt, sodass eine Analyse dieser Störfälle in dieser Hinsicht als sehr erkenntnisfördernd eingeschätzt wurde. Entsprechende Analyseergebnisse sind in Kapitel 7 zu finden.

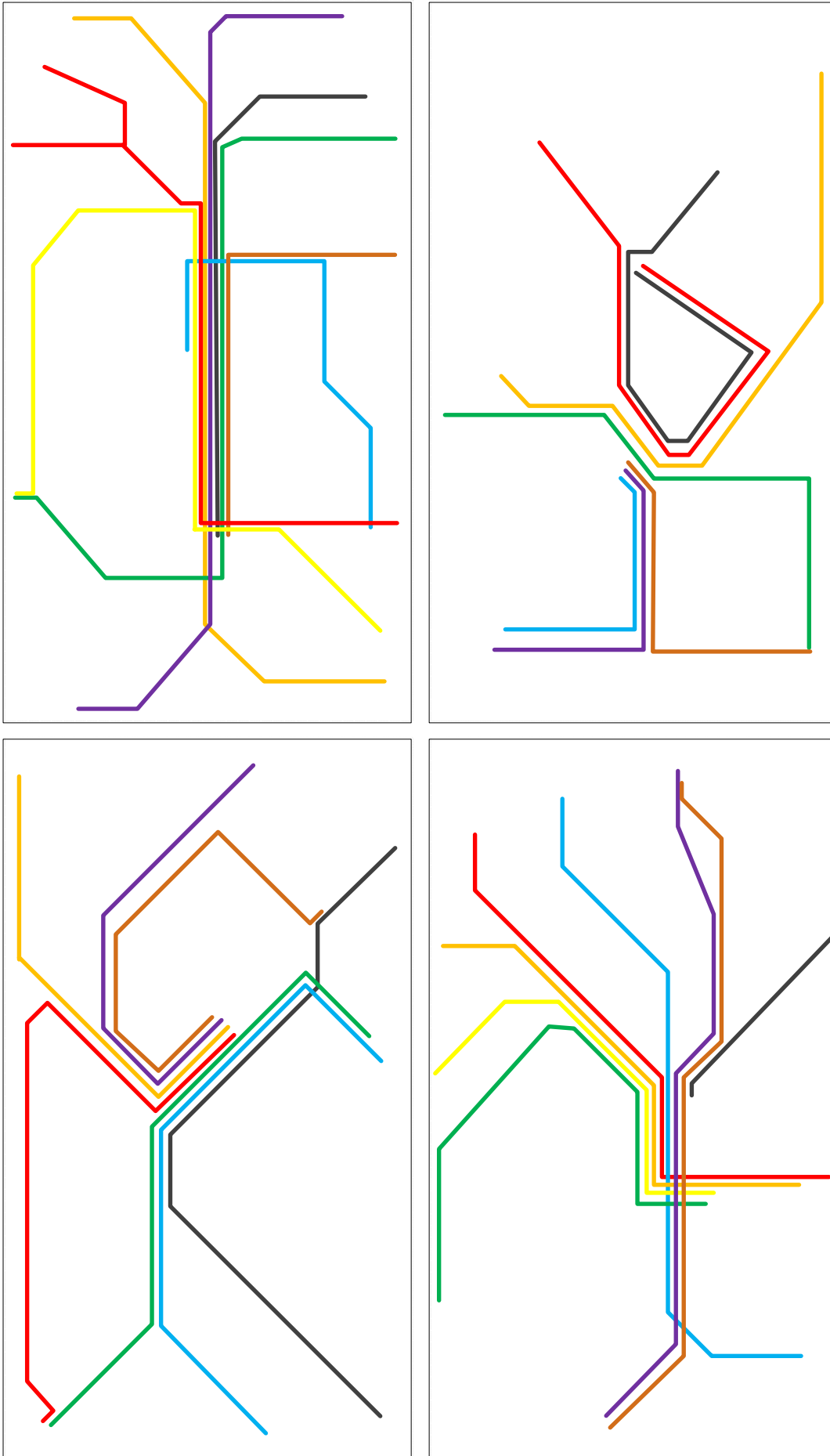


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung von Netzstruktur und Linienverlauf der analysierten S-Bahn Netze

Insgesamt wurden Betriebsdaten von zehn Störfällen der vier beschriebenen S-Bahn Systeme untersucht. Kriterium für die Auswahl der Störfälle war, dass zur Bewältigung der Störung bestehende Störfallprogramme bzw. Elemente von bestehenden Störfallprogrammen angewandt wurden. Die Betriebsdaten stammen von Störfällen aus den Jahren 2011 bis 2013, wobei unterschiedlich viele Störfälle pro S-Bahn System analysiert wurden. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass es sich um eine verhältnismäßig geringe Anzahl untersuchter Störfälle handelt. Dieser Umstand ergibt sich aus der unterschiedlichen Anzahl an Störungsereignissen in den einzelnen Netzen und aus der unterschiedlichen Verfügbarkeit der Daten.

Tabelle 4.5 bietet eine Übersicht über die betrachteten Störfälle sowie die zur Analyse zur Verfügung stehenden Grundgesamtheiten. Die Zuglaufmeldungen wurden im Zeitraum von zwei Stunden vor Beginn der Störung bis mindestens zwei Stunden nach Ende der Störung erhoben. Aus Wettbewerbsgründen können Daten und Ergebnisse nur anonymisiert dargestellt werden. Dazu wurden z. B. einzelne Störungsursachen umbenannt, um Rückschlüsse auf das Ursprungsnetz zu erschweren.

Tabelle 4.5: Übersicht der analysierten Störfälle sowie der Größenordnung der zur Verfügung stehenden Datensätze (HVZ=Hauptverkehrszeit, NVZ=Nebenverkehrszeit, ZLM=Zuglaufmeldung)

ID	Jahr	Tageszeit	Störungsgrund	# ZLM	# Fahrten
Stadt 1	2011	HVZ	Personen im Gleis	ca. 15.500	338
Stadt 1	2011	HVZ	Oberleitungsschaden	ca. 20.500	429
Stadt 1	2011	NVZ	Personenunfall	ca. 15.000	325
Stadt 1	2011	NVZ	Rauchentwicklung im Tunnel	ca. 15.500	318
Stadt 2	2012	NVZ	Isolatorbrand	ca. 11.000	247
Stadt 2	2012	NVZ	Fahrzeugstörung	ca. 11.000	236
Stadt 3	2012	NVZ	Bergung gefährlicher Gegenstand	ca. 33.500	601
Stadt 3	2012	NVZ	Bergung gefährlicher Gegenstand	ca. 68.000	1139
Stadt 4	2012	NVZ	Personenunfall	ca. 17.000	339
Stadt 4	2012	NVZ	Kurzschluss	ca. 17.000	348

4.3.3 Analyse der Verspätungsursachen

mögliche Verspätungsursachen

Die in der Richtlinie 420 der DB Netz AG (DB Netz, 420) allgemein im Bahnbetrieb vorkommenden Verspätungsursachen werden im Dispositionssystem kodiert und sind somit nachvollziehbar und automatisiert auswertbar. Sie werden in den Kategorien Betriebsplanung und Betriebsführung, Infrastruktur Technik, bauliche Gründe, verkehrliche Durchführung, Fahrzeuge, Eisenbahnverkehrsunternehmen auf Nachbarnetz, externe Einflüsse und sekundäre Ursachen systematisiert.

Die für die vorliegende Arbeit relevante Fragestellung nach den wichtigsten Verspätungsursachen im Anschluss an die Ausrufung eines Störfallprogramms ist jedoch durch eine Auswertung dieser Verspätungskodierungen nicht beantwortbar: Auslöser eines Störfallprogramms ist i. d. R. ein bestimmter Störfall – z. B. ein Fahrzeugschaden. Alle Verspätungen, die aufgrund dieses Fahrzeugschadens im System entstehen, werden in den Informationssystemen auf den entsprechenden Code, in diesem Fall Nr. 64, gebucht. Für die Beantwortung der Frage, warum

die Einschwingphase des in diesem Zusammenhang ausgerufenen Störfallprogramms nicht bzw. gut funktioniert hat, hilft die Information „Fahrzeugschaden“ jedoch nicht weiter. Hier ist die Identifikation der spezifischen Gründe für jede verspätete Zugfahrt nach Auftritt der Störung von Interesse. Je nach identifiziertem Hauptgrund für die Verspätung sind entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen, weshalb eine einfache Feststellung, dass ein Zug zu spät ist, nicht ausreicht.

Während der Anwendung eines Störfallprogramms kann es aufgrund von fehlenden Ressourcen (Fahrzeuge, Personal, Trassen/Fahrwegkapazität) und durch beabsichtigte bzw. unbeabsichtigte Verzögerungen der entsprechenden Prozesse zu Verzögerungen kommen. Mögliche betriebsspezifische Gründe für verspätete Zugfahrten sind demnach:

- Verspätungsursachen aufgrund fehlender Ressourcen:
 - Fahrzeug nicht rechtzeitig verfügbar (fehlt/zu spät/defekt),
 - Tf nicht rechtzeitig verfügbar (fehlt/zu spät/Ende der maximalen Arbeitszeit),
 - ZuB/KiN nicht rechtzeitig verfügbar (fehlt/zu spät/Ende der maximalen Arbeitszeit) und
 - verspätete Abfahrt/Ankunft wegen Zugfolge, Rückstau, Einfädelungsvorgängen bei Umleitungen, Vorlassen von bereits verspäteten Zügen und Betriebsablauf – Personal und Fahrzeuge sind vorhanden.
- Prozessverzögerungen – Abfahrt/Ankunft zu spät aufgrund von:
 - Verzögerungen bei internen Prozessen von EIU oder EVU (z.B. Warten auf weitere Anweisungen, obwohl alle Ressourcen vorhanden sind, Fehlhandlungen durch Fahrdienstleiter oder Disponent),
 - Warten auf Fahrgäste bzw. Anschlusssicherung,
 - Verzögerungen am Bahnsteig – bspw. durch längere Fahrgastwechselzeiten aufgrund eines hohen Fahrgastaufkommens oder
 - Fahrzeitverlängerungen wegen Umleitung.

Diese eigentlichen Verspätungsursachen sind von Interesse, da sie – je nach Situation – den in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Einflüsse Prozessgestaltung, Schulung des Personals, Vorhandensein von Reserven sowie die unbeabsichtigten Effekte von Dispositionsmaßnahmen zugeordnet werden können (siehe Abschnitt 4.1).

Aus Zuglaufmeldungen identifizierbare Verspätungsursachen

Wie bereits beschrieben, existiert eine Vielzahl von möglichen Verspätungsursachen während der Anwendung von Störfallprogrammen, welche je nach Situation auf fehlende Ressourcen oder suboptimal ablaufende Prozesse zurückzuführen sind. Da es sich bei den für die Analyse zur Verfügung stehenden Daten um Zuglaufmeldungen ohne Zuordnung zu Fahrzeugumläufen handelt, können nur Ursachen, die sich anhand der Infrastrukturbelegung nachvollziehen lassen, eindeutig identifiziert werden. Dies ist für Verspätungen aufgrund eines direkten Zusammenhangs mit der Störungsursache möglich. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn für die betrachtete Zugfahrt keine Bewegung während der gesamten Störzeit zu verzeichnen ist. Auch für die Verspätungsursachen Zugfolge, Rückstau sowie Ein- und Ausfädelungsvorgänge bei Umleitungen ist eine eindeutige Identifikation anhand von Zuglaufmeldungen möglich. Diese Situationen sind dadurch gekennzeichnet, dass die Zugfahrten an einer Betriebsstelle bzw. in einem Gleis verspätet sind und die Zugbewegungen an diesem Ort unmittelbar aufeinander folgen.

Sind Zugfahrten verspätet, aber weisen die Zuglaufdaten der Betriebsstelle nicht darauf hin, dass die Ursachen Zugfolge, Rückstau sowie Ein- oder Ausfädelung für die Verspätung in Frage kommen – indem bspw. verspätete Zugfahrten nicht durch unmittelbar zuvor stattfindende Fahrten blockiert wurden – dann muss von anderen Verspätungsursachen ausgegangen werden. Da für die vorliegende Betriebsdatenanalyse nur Zuglaufdaten zur Verfügung stehen, ist es kaum möglich, andere Gründe wie fehlendes Personal, fehlende Fahrzeuge oder EVU- oder EIU-interne Prozesse eindeutig zu identifizieren. Teilweise ist es möglich, die Gründe durch Hinweise aus den Kommunikationsaufzeichnungen näher einzugrenzen. Dies ist aufgrund der unvollständig vorhandenen Aufzeichnungen jedoch nicht immer möglich.

Vorgehen

Ziel der Analyse ist die Beantwortung der Frage warum nach der Ausrufung eines Störfallprogramms Verspätungen entstehen. Für die Beantwortung dieser Frage sind die Zuglaufmeldungen aller Züge, welche sich zum Zeitpunkt der Ausrufung des Störfallprogramms im System befinden und welche ihre Fahrt nach der Ausrufung beginnen, von Interesse. Anhand der Zuglaufmeldungen sollen die in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Verspätungsursachen innerhalb des Störgeschehens den entstandenen Verspätungen zugeordnet werden. Diese Zuordnung kann aus oben beschriebenen Gründen nur manuell erfolgen und ist damit sehr aufwendig. Deshalb gilt es die Anzahl der zu analysierenden Zuglaufmeldungen einzuschränken.

Eine erste Einschränkung der Anzahl der analysierenden Zuglaufmeldungen erfolgte – in Anlehnung an die bei der DB AG gültigen verkehrsartbezogenen Schwellenwerte (siehe (DB Netz, SNB)) – indem nur Zuglaufmeldungen mit Ist-Verspätungen über 5,9 Minuten ausgewählt wurden. Je nach zu untersuchendem System ist auch eine Anpassung der Obergrenze, z. B. entsprechend der im jeweils geltenden Verkehrsvertrag enthaltenen Definition, denkbar, was an dieser Stelle jedoch aus Gründen der Vergleichbarkeit nicht erfolgte.

Zusätzlich zu den in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen erkennbaren infrastrukturbezogenen Verspätungsursachen ist es möglich, dass sich während einer Zugfahrt „schleichend“ Verspätungen aufbauen, indem kontinuierlich pro Messpunkt wenige Verspätungssekunden hinzukommen. Da die Gründe für kleinere Verspätungsanstiege mit der vorliegenden Datenbasis gar nicht oder nur sehr ungenau identifiziert werden können, werden sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet. Deshalb werden aus den als verspätet definierten Zugfahrten nur jene Zugfahrten ausgewählt, welche Einträge mit einer Zusatzverspätung von über 120 Sekunden pro Zuglaufmeldung aufweisen.

Anschließend werden aus den eingegrenzten Zuglaufmeldungen die Verspätungsursachen auf die in Abschnitt 4.3.3 beschriebene Art und Weise identifiziert, quantifiziert und kategorisiert. In Abbildung 4.3 ist das Vorgehen dargestellt. Die Struktur der für die Analyse verwendeten SQL-Abfragen sind in Anhang B zu finden.

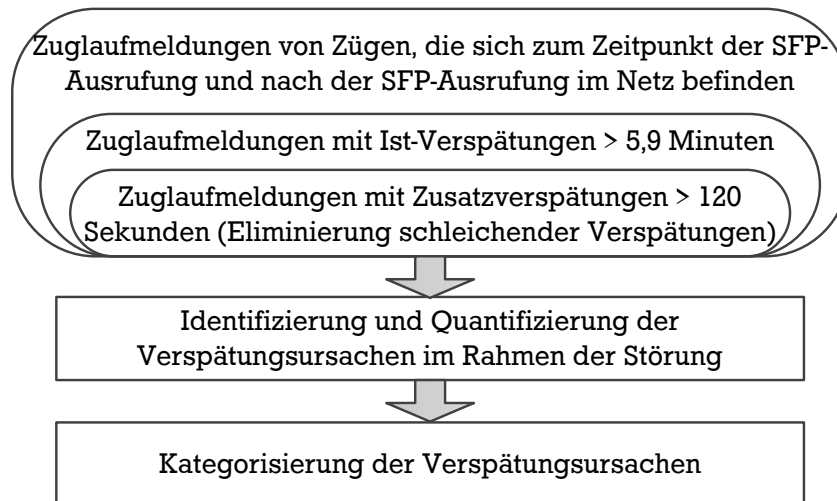


Abbildung 4.3: Vorgehen bei der Analyse auf Verspätungsursachen und -orte

Aus Zuglaufmeldungen identifizierte Verspätungsursachen – Ergebnisse

Wie zuvor hergeleitet, werden in realen Situationen nicht unbedingt alle denkbaren Ausprägungen eines Merkmals realisiert. So können die aus den vorliegenden Betriebsdaten identifizierten Verspätungsursachen wie folgt eingeordnet werden:

- ID 1 Zusatzverspätungen unter 120 Sekunden/„schleichender“ Rückstau,
- ID 2 Rückstau mit Zusatzverspätungen über 120 Sekunden,
- ID 3 Warten auf einen entgegenkommenden Zug,
- ID 4 Zug in die gleiche Richtung vorgelassen,
- ID 5 Verspätung aus vorheriger Fahrt/kein Zug vor Ort,
- ID 6 Zug befindet sich direkt in der Störung Sperrzone bzw. erfährt Nothalt,
- ID 7 Umleitung und
- ID 8 Sonstiges (keine Ursachen im direkten Zusammenhang mit der Infrastrukturbelegung erkennbar bzw. andere Gründe wie bspw. Bauarbeiten).

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass es je nach betrachtetem Netz verschiedene Hauptverspätungsgründe gibt. Obwohl die betrachteten S-Bahn Netze (siehe Abschnitt 4.3.2) vergleichbar aufgebaut sind, scheinen die unterschiedliche Art von Störungsursachen und angewandten Dispositionsmaßnahmen für die jeweils ausgeprägten Verspätungsgründe maßgebend zu sein. Dies zeigt die Vielfalt der in der Realität möglichen Verspätungsgründe auf. Über alle drei Netze aggregiert wurden folgende Kategorien wichtiger Verspätungsursachen identifiziert:

- Rückstaus/Kapazitätsprobleme (ID 2, 3 und 4),
- Nothalt/Züge in der Sperrzone (ID 6),
- Umleitungen (ID 7),
- Verspätungen aus vorherigen Fahrten (ID 5) und
- sonstige, aus den Zuglaufmeldungen nicht weiter identifizierbare Gründe (ID 8).

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.5 zu sehen. Ein Überblick über Verteilung der analysierten Verspätungsfälle auf die beobachteten Verspätungsursachen ist in Anhang C dargestellt.

Ein großer Anteil der Verspätungen ist der Kategorie *Kapazität* zuzuordnen. Hierunter fallen alle Zuwachsverspätungen über zwei Minuten, welche dadurch entstehen, dass ein Zug in einem Blockabschnitt wartet, bis der nachfolgende Blockabschnitt (i. d. R. ein Bahnhof) befahren werden kann, und dann sofort einfährt. Dieser große Anteil an Rückstaus weist darauf hin, dass

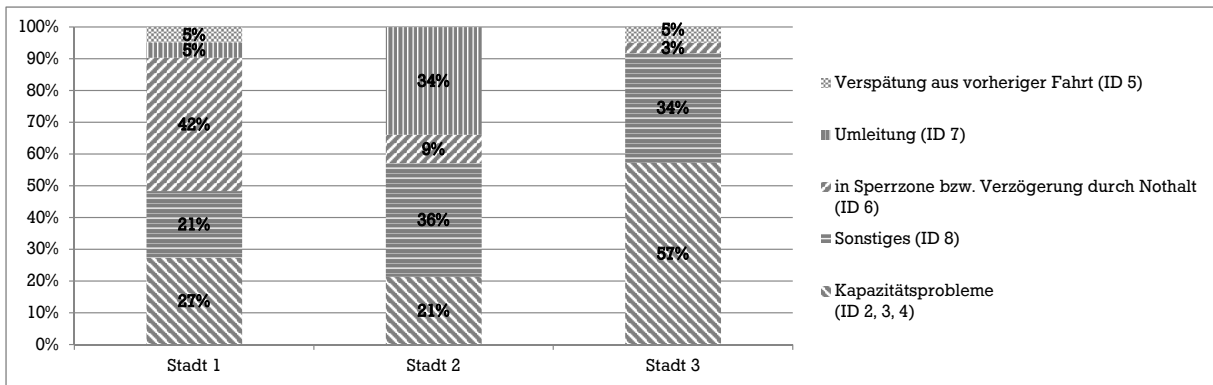


Abbildung 4.4: Anteil Verspätungsgründe je S-Bahn Netz

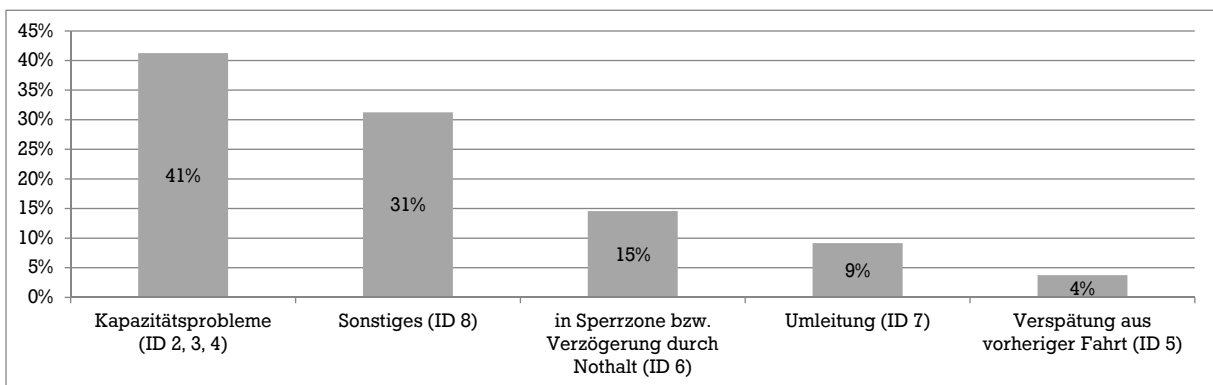


Abbildung 4.5: Anteil Verspätungsgründe über alle Netze aggregiert

die aus dem Störfall resultierenden Leistungsanforderungen größer als die zur Verfügung stehende Leistungsfähigkeit der Infrastruktur sind, welches im weiteren Verlauf der Arbeit näher untersucht werden soll.

Die aus den Daten *nicht weiter identifizierbaren Verspätungsursachen* („Sonstiges“) stellen ebenfalls einen großen Anteil dar. Da diese Verspätungsgründe mit den zur Verfügung stehenden Daten nicht zufriedenstellend erklärt werden können, erfolgen keine weitergehenden Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit.

Der Grund *Nothalt/Züge in der Sperrzone* liegt in der Natur von Störungen. Wie viele Züge davon jeweils betroffen sind, hängt von der Art der Störung ab und kann nicht aktiv beeinflusst werden. Deshalb wird von einer weiteren Analyse dieses Grundes in der vorliegenden Arbeit abgesehen.

Auch *Umleitungen* führen zu Verspätungen. In dieser Kategorie werden alle Zuwachsverspätungen über zwei Minuten zusammengefasst, welche im Zusammenhang mit der Dispositionsmaßnahme Umleitung stehen. Dazu zählen beispielsweise die Wartezeit, bis eine Umleitungsstrecke befahren werden kann, Fahrzeitverlängerungen durch die Umleitung und zusätzliche Wendezeiten, falls sich auf der Umleitungsstrecke ein Kopfbahnhof befindet. Verspätungen aufgrund von Umleitungen absolut über alle drei S-Bahn Netze betrachtet stellen nur ca. 9% der Gesamtverspätungen. Trotzdem ist es beim Einsatz von Umleitungen in Störfallprogrammen wichtig, besonders auf deren Gestaltung zu achten: Wird die Maßnahme „Umleitungen“ eingesetzt, so kann der Anteil an Verspätungen aufgrund der Umleitungsnutzung stark steigen. So bildet die Nutzung der Maßnahme „Umleitung“ zur Umgehung der Stammstrecke im Netz der Stadt 2 den Kern des Störfallprogramms, wobei 27% der Verspätungen auf Umleitungsnutzung

zurückzuführen sind (siehe Abbildung 4.4). Analysen der Verspätungen im Netz der Stadt 4 bestätigen diese Erkenntnis.

Im Laufe des ersten Schritts der Datenanalyse wurde ersichtlich, dass es sich bei den durch Umleitungsnutzung entstandenen Verspätungen mit großer Wahrscheinlichkeit ebenfalls um kapazitative Ursachen handelt. Hier ist weiter zu erarbeiten, was genau die Hauptgründe für Verspätungen bei Umleitungen sind (siehe dazu Kapitel 7).

Anzumerken ist weiterhin, dass im Verlauf der Analyse Zugfahrten auffielen, welche an Stellen im Netz verkehrten, an denen sie sich nach den Regeln des Störfallprogramms nicht mehr hätten befinden dürfen. Der Grund dafür wird darin vermutet, dass eine gewisse Zeit notwendig ist, bis alle Züge auf den vorgesehenen Wegen verkehren.

Eine weiterer Verspätungsgrund ist die *Übertragung von Verspätungen aus vorherigen Fahrten*. Auch dieser Grund wird im Folgenden näher betrachtet (siehe Abschnitt 4.3.5).

4.3.4 Analyse der Orte, an denen Verspätungen auftreten

Vorgehen

Grundlage für die in diesem Abschnitt beschriebene Analyse sind alle Zugfahrten, die sich nach Ausrufung des Störfallprogramms im Netz befinden. Für diese Zugfahrten wurden Zuglaufmeldungen mit Zusatzverspätungen von über 120 Sekunden per SQL-Abfrage ermittelt. Die Einschränkungen auf Zugfahrten mit einer Ist-Verspätung von über 5,9 Minuten wurde in diesem Fall nicht angewendet.

Es wird vermutet, dass die Orte, an denen Verspätungen im Netz entstehen, in Bezug zum Störfallprogramm und dem Störungsort stehen. In den betrachteten Fällen traten die Störungen im Bereich der Stammstrecken auf. Weiterhin wird vermutet, dass Verspätungen an Stellen im Netz entstehen, an denen dispositive Eingriffe vorgenommen werden – also SFP-Wendebahnhöfe, Betriebsstellen an denen Umleitungen beginnen oder enden, Betriebsstellen die auf Umleitungsstrecken liegen sowie Überleit-/Abzweigverbindungen die bei der Durchführung von Dispositionsmaßnahmen genutzt werden. Aus diesem Grund wurden die durch die SQL-Abfrage ermittelten Zuglaufmeldungen anhand der Lage der Betriebsstellen in die folgenden Typen unterteilt:

- SFP-Wendebahnhof,
- regulärer Wendebahnhof/Endstelle (wenn eine Betriebsstelle gleichzeitig für unterschiedliche Linien als regulärer und als SFP-Wendebahnhof fungiert, wird die Betriebsstelle als SFP-Wendebahnhof eingeordnet),
- Abzweigstelle auf Strecke bzw. Bahnhof, in dem eine Strecke abzweigt,
- Betriebsstelle auf SFP-Umleitungsstrecke,
- Betriebsstelle im Zulauf auf SFP-Wendebahnhof oder anderen SFP-Eingriffspunkt (bis zu 2 Betriebsstellen davor),
- Betriebsstelle in Stammstrecke (aber kein Wendebahnhof) und
- keine dieser Eigenschaften.

Zur Einteilung der Typen ist anzumerken, dass die letzten beiden Typen („in der Stammstrecke“ und „keine dieser Eigenschaften“) aufgrund der beobachteten Werte hinzugefügt wurden, da die ursprüngliche Einteilung nicht alle auftretenden Fälle abdeckte.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der soeben beschriebenen Analyse sind in Abbildung 4.6 zu sehen; ein Überblick über Verteilung der analysierten Fälle auf die beobachteten Typen ist in Anhang C dargestellt.

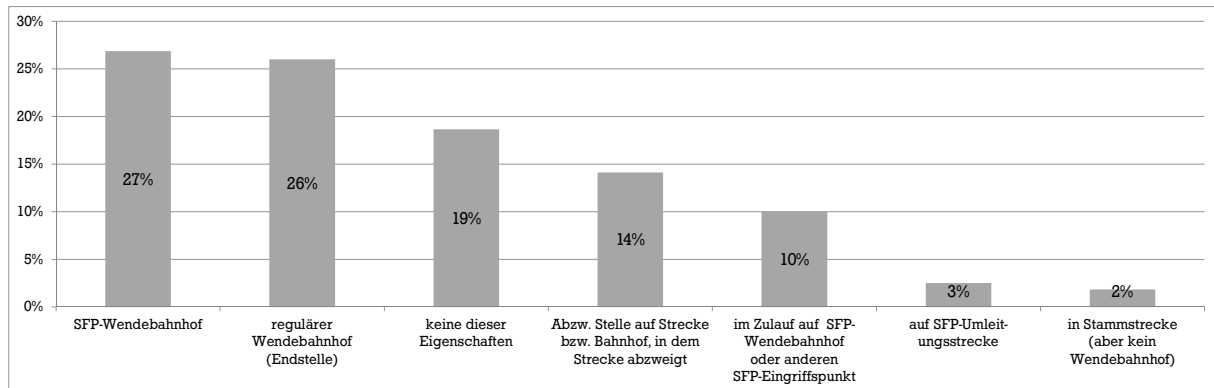


Abbildung 4.6: Orte, an denen Zusatzverspätungen von > 2 Minuten auftraten; nach Funktion im Störfallprogramm bzw. nach Lage im Netz (über alle drei S-Bahn Netze kumuliert)

Erwartungsgemäß steht mit 65% der Hauptteil der Orte an denen Zusatzverspätungen von über 120 Sekunden auftreten in direktem Zusammenhang mit den Störungsorten und den eingesetzten Störfallprogrammen.

Die SFP-Wendebahnhöfe sind Hauptorte der Verspätungsursachen. Dies ist dadurch erklärbar, dass sich die SFP-Wendebahnhöfe vor und hinter der Störung, also auf der Stammstrecke befinden. Hier treffen viele Züge in der Störung aufeinander. Da es jedoch das Ziel des Einsatzes von Störfallprogrammen ist, Verspätungen auch im SFP-Fall möglichst gering zu halten, lohnen sich hier weitere Überlegungen, warum gerade an den SFP-Wendebahnhöfen die meisten Verspätungen entstehen. Ähnlich verhält es sich mit der Verspätungsentstehung an Abzweigstellen, an Betriebsstellen im Zulauf auf SFP-Wendebahnhöfe sowie an Betriebsstellen in der Stammstrecke oder an denen Umleitungen beginnen. Hier wird eine im Störfall unzureichende infrastrukturbezogene Leistungsfähigkeit vermutet.

Nicht erwartet wurde, dass 26% der Zusatzverspätungen mit über 120 Sekunden an regulären Wendebahnhöfen entstehen – da hier auch im regulären Betrieb Wenden stattfinden und da die Störungsorte i. d. R. entfernt von diesen Orten liegen, sodass sich eine Störung nicht bis dorthin auswirken sollte. Für Betriebsstellen, die dem Typ „keine dieser Eigenschaften“ zugeordnet wurden, sind aufgrund der vorliegenden Ergebnisse keine weiteren Aussagen möglich. Hier sind weitere Analysen denkbar, da sich einige Betriebsstellen dieser Kategorie wenige Stationen vor den Wendebahnhöfen befanden, sodass hier beispielsweise besonders weitreichende Rückstauungen als Ursache in Frage kommen.

Insgesamt weisen die Daten darauf hin, dass – neben prozessualen und anderen Ursachen (siehe Abschnitt 4.3.3) – die unzureichende infrastrukturbezogene Leistungsfähigkeit im Störfall eine der Hauptverspätungsursachen ist und dass die Durchführung von Wenden – auch regulären – im Störfall Probleme bereitet. Spezifischere Aussagen sind aufgrund der bisher beschriebenen Analysen nicht möglich. Zur Eingrenzung der Wendeproblematik werden in einem nächsten Schritt die Bahnhöfe mit verspätetem Fahrtbeginn näher untersucht.

4.3.5 Analyse der Orte mit verspätetem Fahrtbeginn

Vorgehen

Um den Anteil von Verspätungen bei Fahrtbeginn an den insgesamt auftretenden Verspätungen einschätzen zu können, werden mit Hilfe von SQL-Abfragen (siehe Anhang B) alle Zuglaufmeldungen, die einen Fahrtbeginn nach Ausrufung des Störfallprogramms verzeichnen (FSSTAT=2), der Ort des Fahrtbeginns und die Verspätung bei Fahrtbeginn ermittelt.

Um herauszufinden, an welcher Art von Wendebahnhof Anfangsverspätungen auftreten, werden alle Startbahnhöfe der Fahrten herausgesucht, wo Fahrten verspätet beginnen. Die so ermittelten Startbahnhöfe werden in folgende Kategorien unterteilt:

- regulärer Wendebahnhof,
- SFP-Wendebahnhof und
- als Wendebahnhof nicht vorgesehen.

Letztere Kategorie umfasst Bahnhöfe, an denen Zugfahrten weder planmäßig noch entsprechend eines Störfallprogramms begonnen haben. Es wird vermutet, dass die Verspätungen vor allem in Bahnhöfen auftreten, in denen die Wenden nicht nach Fahrplan bzw. nach Störfallprogramm geregelt sind.

Ergebnisse

Insgesamt wurden etwas mehr als 1600 beginnende Zugfahrten nach Ausrufung eines Störfallprogramms aus den Betriebsdaten ermittelt, wovon jeweils ungefähr 400 in den S-Bahn Netzen Zwei und Drei sowie ungefähr 800 im S-Bahn Netz Eins stattfanden. Wie in Abbildung 4.7 zu sehen ist, begannen im Mittel 16 % aller Zugfahrten nach Ausrufung des Störfallprogramms verspätet, wobei darauf hinzuweisen ist, dass die Werte aus dem zweiten S-Bahn Netz deutlich von denen aus dem ersten und dem dritten S-Bahn Netz abweichen. Eine mögliche Erklärung für diesen Unterschied ist die mit 750 Zügen am Tag deutlich geringere Belastung des zweiten S-Bahn Netzes, welche auch mit einer geringeren Belastung der Disposition und damit einer besseren Handhabbarkeit einhergeht.

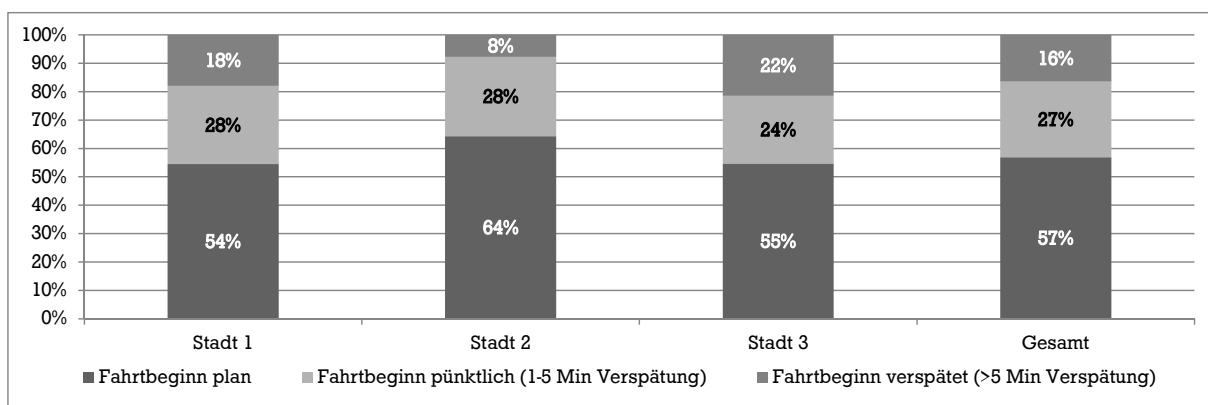


Abbildung 4.7: Anteil der Fahrten, welche nach Ausrufung des Störfallprogramms plan, pünktlich bzw. verspätet beginnen

Betrachtet man nur die verspätet begonnenen Zugfahrten und bestimmt die Kategorien der Bahnhöfe, an denen Zugfahrten verspätet beginnen (siehe Abbildung 4.8), so wird deutlich,

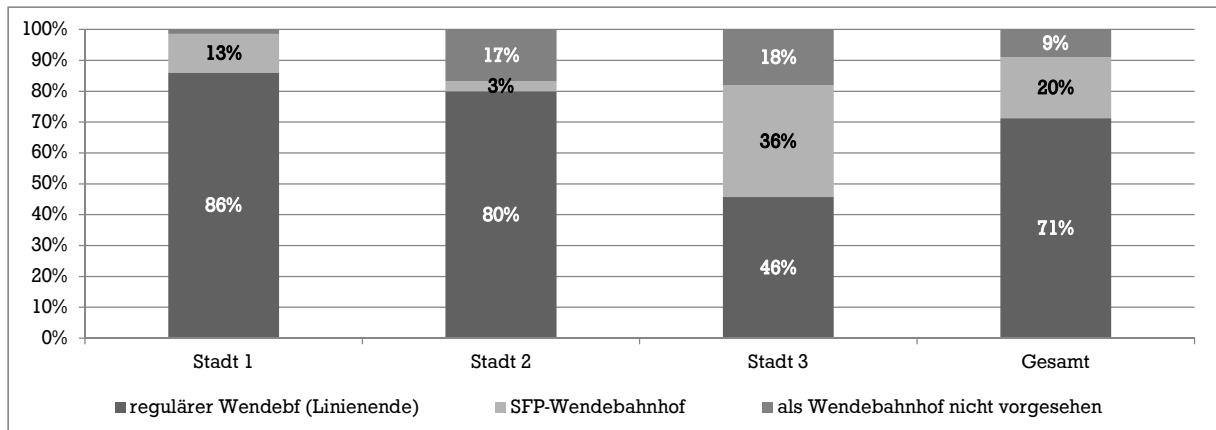


Abbildung 4.8: Bahnhöfe, an denen Zugfahrten nach Ausrufung des Störfallprogramms verspätet beginnen – kategorisiert nach Funktion

dass sehr viele Anfangsverspätungen an den regulären Wendebahnhöfen auftreten. Dies entspricht nicht den Erwartungen, da gerade die regulären Wenden reibungslos ablaufen sollten. Diese Erkenntnis aus der Analyse der Anfangsverspätungen erfordert es, die Wenden weiter zu untersuchen um die Gründe für die Wendeverspätungen herauszufinden. In Frage kommen hierbei vor allem die Übertragung von Verspätungen aus vorhergehenden Fahrten sowie fehlendes Fahrpersonal oder fehlende Fahrzeuge. Die entsprechenden Ausführungen zur vertieften Analyse von Wendeverspätungen sind in Kapitel 6 nachzulesen.

Die Anteile der SFP-Wendebahnhöfe, in denen Zugfahrten verspätet beginnen, sowie die von Bahnhöfen mit außerplanmäßigen Wenden, variieren je nach S-Bahn Netz sehr stark. Eine mögliche Erklärung für diesen Umstand ist die bedeutend stärkere Auslastung der Netze Eins und Drei, welche dazu führt, dass an den SFP-Wendebahnhöfen unterschiedlich viele Zugfahrten disponiert werden müssen. Eine andere mögliche Erklärung sind die unterschiedlichen Freiheitsgrade in der Disposition der unterschiedlichen Netze während der Einschwingphase. Im ersten S-Bahn Netz werden die Disponenten verstärkt angehalten, die SFP-Dispositionen ab dem Zeitpunkt der Ausrufung des Störfallprogramms strikt einzuhalten. In den S-Bahn Netzen Zwei und Drei hingegen scheinen die Disponenten in der Einschwingphase etwas freier zu agieren (Chu, 2012b). So ist es dort z. B. üblich, während der Einschwingphase Züge auch an nicht im Störfallprogramm vorgesehenen Bahnhöfen zu wenden oder abzustellen, um möglichst schnell in eine stabile Phase zu gelangen.

4.3.6 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der Betriebsdatenanalyse

Zur Bestimmung der Einflüsse auf die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase von Störfallprogrammen wurden Zuglaufmeldungen verschiedener Störfälle analysiert. Die Betriebsdaten stammen aus verschiedenen deutschen S-Bahn Netzen in denen zur Bewältigung von Störungen Störfallprogramme angewandt wurden. Eine detaillierte, manuelle Analyse von Zuglaufmeldungen ergab, dass kapazitative Gründe mit 41% der Fälle den häufigsten Verspätungsgrund darstellen. Zweithäufigster Verspätungsgrund sind mit 31% „Sonstige Gründe“, welche anhand der zur Verfügung stehenden Zuglaufmeldungen nicht näher ermittelt werden konnten. Die Analyse der Orte, an denen Verspätungen auftreten, ergab, dass die meisten Störungen – rund 2/3 der Verspätungen – im direkten Zusammenhang mit dem Störungsort und dem angewandten Störfallprogramm stehen. Rund 1/3 der Störungen traten am Netzende bzw. im äußeren Netz auf.

Zur ausgeführten manuellen Analyse der Verspätungsursachen ist kritisch anzumerken, dass die Einschränkung der zu analysierenden Zuglaufmeldungen anhand von Ist-Verspätungen über 5,9 Minuten erfolgte. Diese Einschränkung geschah aufgrund des großen Analyseaufwands und im Hinblick auf „große“ Verspätungen. Eine Betrachtung aller Verspätungen hätte in diesem Fall zu tieferen Erkenntnissen führen können. In Bezug auf den Gesamtumfang der zur Verfügung stehenden Daten hätte auch durch eine Beachtung aller Verspätungen keine größere Signifikanz der Ergebnisse erreicht werden können.

Der Auftritt von Rückstauungen an und vor den Störungsorten – also an und vor den SFP-Wendebahnhöfen – lässt auf eine unzureichende infrastrukturbezogene Leistungsfähigkeit schließen. Auch an regulären Wendebahnhöfen entstehen Verspätungen, welche darauf hinweisen, dass die Wendepufferzeiten im Störfall wahrscheinlich nicht ausreichen. Da für die Betriebsdatenanalyse vorrangig Zuglaufmeldungen zur Verfügung standen, ist nur eine genauere Identifikation von Verspätungsursachen im Zusammenhang mit der Gestaltung von Maßnahmen nachvollziehbar. Hier besteht der Verdacht, dass die Planung und Gestaltung der Dispositionsmaßnahmen „Wende“ und „Umleitung“ in Störungen bisher nicht präzise genug bzw. unter Einbezug von Annahmen erfolgt, welche im Störfall nicht zutreffen.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse der Betriebsanalyse die in der systematischen Analyse der Wirkzusammenhänge erarbeiteten Einflüsse auf die Dauer der Einschwingphase. Weiterhin weisen die mit 31% vertretenen „Sonstigen Gründe“ auf die große Bedeutung des Hebels Prozesse sowie auf eine grundsätzliche Bedeutung der Hebel Umsetzungsdisziplin und Reserven hin (siehe Abbildung 4.9).

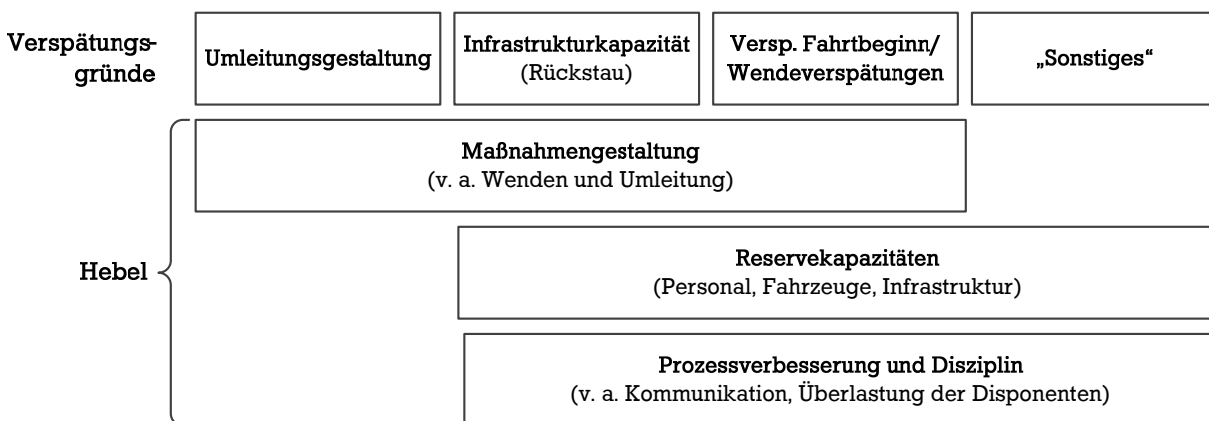


Abbildung 4.9: Durch die Betriebsdatenanalyse identifizierte Einflüsse auf die Einschwingphase

Mit dem Ziel der Verallgemeinerbarkeit wurden drei große deutsche S-Bahn Netze untersucht. Abgesehen von der monozentrischen Struktur unterscheiden sich die drei S-Bahn Netze in der Anzahl der täglich im Netz verkehrenden Züge, den eingesetzten Lösungsprinzipien (z. B. in der Rolle der Maßnahme Umleitung) und dem Erfahrungsschatz der Disponenten im Einsatz von Störfallprogrammen. Auch unterscheiden sich die Störungen in den einzelnen Netzen in Bezug auf ihre Lage zur Stammstrecke (in der Stammstrecke, am Beginn oder Ende der Stammstrecke, vor der Stammstrecke). Diese netzspezifischen Eigenschaften und unterschiedlichen Hauptverspätungsursachen je betrachteten Netz führten dazu, dass Verspätungsursachen und Einflüsse quantitativ nur bedingt zu allgemeingültigen Werten zusammengefasst werden konnten. Daher sind z. B. statistisch signifikante allgemeine Aussagen wie „X % aller Verspätungen treten in SFP-Wendebahnhöfen auf“ auf Basis der durchgeführten Analyse weder möglich noch sinnvoll.

Auch wenn keine belastbaren quantitativen Aussagen erarbeitet werden konnten, führten die Arbeiten zu einem Nachweis der Wirkzusammenhänge zwischen Verspätungsart, Verspätungsort und Verspätungsursache in den einzelnen Netzen am Beispiel „Rückstau vor und in der Stammstrecke aufgrund mangelnder infrastrukturbezogener Leistungsfähigkeit im SFP-Wendebahnhof“.

Die Ausweitung der Analysen auf das Netz der vierten Stadt erfolgte im Hinblick auf mögliche Unterschiede der Einflüsse auf die Einschwingphase in einem offenen System mit Mischverkehr. Hier stellen die erfolgten Analysen nur einen Anfang der erforderlichen Arbeiten dar. Jedoch ergeben sich bereits Hinweise auf die wachsende Bedeutung einer präziseren Ausgestaltung der Dispositionsmaßnahme Umleitung im Kontext von Störfallprogrammen in Mischverkehrsnetzen.

Trotz dieser Einschränkungen sind die Ergebnisse der Durchführung der Betriebsdatenanalyse als zielführend einzuschätzen, da sie die erste ihrer Art ist. Weiterhin geben die Ergebnisse der Betriebsdatenanalyse deutliche Hinweise, dass die Wahl bzw. Ausgestaltung der Dispositionsmaßnahmen Wende und Umleitung und – wahrscheinlich durch Infrastrukturengpässe verursachte – Rückstaus einen wichtigen Einfluss auf den Ablauf bzw. das Funktionieren der Einschwingphase haben.

4.4 Schlussfolgerungen – Veränderungen von Belegungszeiten im Störfall

Wie bereits beschrieben, konnten bei der Untersuchung der Betriebsdaten Auswirkungen der Störungen beobachtet werden, welche offensichtlich im Zusammenhang mit im Störfall unzureichender infrastrukturbezogener Leistungsfähigkeit stehen. Diese Auswirkungen in Form von Rückstaus vor den Stammstrecken und vor regulären und vor SFP-Wendebahnhöfen sowie in Form von Wendeverspätungen und Verspätungen bei Umleitungsnutzung weisen darauf hin, dass die für diese Fälle angenommenen Fahr- und Wendezeiten und damit auch die angenommenen Belegungszeiten der Infrastruktur im Störfall nicht der Realität entsprechen. Da die bei der Planung des Störfallprogramms angenommenen Werte im regulären Betrieb zutreffen, müssen also während der Störung Vorgänge existieren, welche dafür verantwortlich sind, dass die Belegungszeiten ansteigen.

Es ist anzunehmen, dass die Erhöhung der Belegungszeiten im Störfall auf die in der systematischen Analyse erarbeiteten „Nebenwirkungen“ der jeweiligen Dispositionsmaßnahme zurückzuführen ist. Ist dies der Fall, bedeutet dies, dass die sich bei der Anwendung des Störfallprogramms ergebenden Belegungszeiten in der Einschwingphase und womöglich auch im stabilen Betrieb tendenziell als zu gering angenommen werden. Dies wiederum kann dazu führen, dass die bestehende infrastrukturbezogene Leistungsfähigkeit nicht ausreicht. Weiterhin wird bei vertiefter Betrachtung der Dispositionsvorgänge im Störfall deutlich, dass die Reduktion von Zugzahlen in der Einschwingphase nur schrittweise vonstatten geht – was ebenso zur Erhöhung der Gesamtbelegungszeit führt.

Folglich muss im Zuge der Gestaltung von Störfallprogrammen bei der Auswahl der einzelnen Dispositionsmaßnahmen vorher abgeschätzt werden, wie sich die Maßnahmen und die schrittweise Reduktion der Zugzahlen auf die Gesamtbelegungszeit und damit den Belegungsgrad der Infrastruktur auswirken, um Aussagen über die Umsetzbarkeit eines Störfallprogramms treffen zu können.

4.5 Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

4.5.1 Zusammenfassung

Ein Teilziel der vorliegenden Arbeit ist die umfassende Ermittlung der Einflüsse auf die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase von Störfallprogrammen. Dazu wurden die zwei Analyseschritte der systematischen Analyse und der Betriebsdatenanalyse durchgeführt und die Ergebnisse zusammengeführt. Den Analysen liegt die Auffassung zugrunde, dass eine Verbesserung der Einschwingphase erreicht wird, indem der Zeitraum bis zum Ende der Einschwingphase so kurz wie möglich gehalten wird.

Aus den erarbeiteten Einflüssen wurden entsprechende Verbesserungsansätze abgeleitet. Insgesamt wurden die vier Hebel „Prozessgestaltung“, „Umsetzung durch die Mitarbeiter“, „Reserven“ sowie „Maßnahmengestaltung“ zur Verkürzung der Zeit bis zum Ende der Einschwingphase identifiziert. Während Maßnahmen aus den Kategorien „Prozessgestaltung“ und „Umsetzung durch die Mitarbeiter“ vorrangig begleitenden Charakter bei der Einführung von Störfallprogrammen haben, besteht bei Maßnahmen zum Aufbau von Reserven bei Personal, Fahrzeugen und Infrastruktur oft wenig Spielraum. Bereits durch die Wahl und Gestaltung der Dispositionsmaßnahmen können bei der Erstellung von Störfallprogrammen die Weichen für das Gelingen des späteren Störfallprogramms gestellt werden. Wichtig ist hierbei, dass bei der Auswahl der entsprechenden Dispositionsmaßnahmen diese auch in Bezug auf ihre unbeabsichtigten, impliziten Effekte und auf die schrittweise Reduktion der Zugzahlen untersucht und gegebenenfalls angepasst werden.

Um die theoretisch umfassend zusammengetragenen möglichen Einflüsse auf die Einschwingphase zu bestätigen und um weitere Anregungen aus dem realen Betrieb zu erlangen, wurden in einem zweiten Schritt im Rahmen einer Betriebsdatenanalyse acht verschiedene Störfälle aus drei unterschiedlichen deutschen S-Bahn Netzen untersucht (siehe Abschnitt 4.3). In allen S-Bahn Netzen konnten Auswirkungen, die offensichtlich im Zusammenhang mit im Störfall unzureichender infrastrukturbezogener Leistungsfähigkeit stehen (Rückstaus, Wendeverspätungen und Verspätungen bei Umleitungsnutzung), beobachtet werden. Die vor den Störstellen entstehenden Verspätungen weisen auf eine unzureichende Planung der Störfallprogramme in Bezug auf Dispositionsmaßnahmen „SFP-Wende“ und „Umleitung“ hin. Auch wurde durch die Ergebnisse der Betriebsdatenanalyse die Frage nach der Möglichkeit einer für den Störfall unzureichende Dimensionierung der Wendepuffer an regulären Wendebahnhöfen aufgeworfen. Weiterhin konnte durch die Betriebsdatenanalyse aufgezeigt werden, dass auch Verspätungsgründe ohne offensichtlichen Zusammenhang mit einer Überlastung der Infrastruktur eine große Relevanz haben und in diesem Bereich weitere Ursachenforschung notwendig ist.

Aufgrund der unterschiedlichen Gegebenheiten in den einzelnen Netzen sind allgemeingültige quantitative Aussagen zur Wichtigkeit einzelner Einflüsse auf die Einschwingphase auf Basis der durchgeführten Analyse nicht möglich (siehe Abschnitt 4.3.6).

4.5.2 Weiteres Vorgehen

Um die sich in Störungen ergebenden veränderten Belegungszeiten im Rahmen der Gestaltung von Störfallprogrammen explizit beachten zu können, ist die Erarbeitung eines Erklärungsmodells für die (Neben-)Wirkungen einzelner Dispositionsmaßnahmen auf die Belegungszeiten in Störungen vonnöten. Ein entsprechendes Modell soll es ermöglichen, die Dauer der Einschwingphase sowie die Machbarkeit eines stabilen Störfallprogramms bereits bei der Erstellung von Störfallprogrammen abschätzen zu können. Daher wird der Fokus in der weiteren Bearbeitung des Themas auf die richtige Gestaltung von Dispositionsmaßnahmen mit Bezug auf Einschwingphase gelegt.

Die bei der Anwendung von Störfallprogrammen resultierende Gesamtbelegungszeit der Infrastruktur ist maßgeblich von der Anzahl der Züge und ihren Belegungszeiten bzw. den jeweiligen Fahrtauern bestimmt. Demnach müssen für ein oben beschriebenes Modell zur Abschätzung der Machbarkeit von Dispositionsmaßnahmen die Einflüsse der jeweiligen Dispositionsmaßnahme auf Zugzahlen und Belegungsauern im Störfall beschrieben und quantifiziert werden, welches in den Kapiteln 5 bis 10 erfolgt.

5 Veränderung der Belegungszeiten in Störungen

5.1 Identifikation zusätzlicher Belegungszeiten

5.1.1 Einleitung

Die in Kapitel 4 erarbeiteten Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Verspätungen, welche während Störungen und während der Anwendung von Störfallprogrammen entstehen, auf Rückstauungen im Netz zurückgeführt werden können. Es ist anzunehmen, dass diese Rückstauungen und damit auch die daraus resultierende Gesamtbelegungszeit der Infrastruktur wiederum auf zusätzliche Belegungszeiten zurückzuführen sind. Ziel des vorliegenden Kapitels ist es, diese zusätzlichen Belegungszeitelemente im Störfall zu identifizieren, zu beschreiben und zu quantifizieren. Dies ist wichtig, um bei der Erstellung von Störfallprogrammen zutreffende Annahmen über tatsächliche resultierende Belegungszeiten zugrunde legen zu können.

Entsprechend Abschnitt 3.4 werden die Betrachtungen im weiteren Verlauf der auf Störungen, die eine eingeschränkte Verfügbarkeit der Infrastruktur nach sich ziehen, eingegrenzt (siehe auch Abbildung 2.1).

5.1.2 Notwendigkeit von Identifikation und Quantifizierung

Wie in Kapitel 4 beschrieben, wurde die unzureichende Infrastrukturkapazität im Störfall als eine der Verspätungsursachen identifiziert. Grund dafür sind höhere Gesamtbelegungszeiten, welche zu einer höheren Infrastrukturauslastung im Störfall und im Fall der Überschreitung der zulässigen Belastung zu Verspätungen führen können. Diese veränderte Gesamtbelegungszeit ist auf veränderte und zusätzliche Belegungszeiten im Störfall und auf die während der Einschwingphase höheren Zugzahlen als in der stabilen Phase zurückzuführen. Um zu ermitteln, wie stark sich der Gesamtbelegungsgrad einer Infrastruktur aufgrund der Anwendung eines Störfallprogramms in der Einschwingphase sowohl in Bezug auf den Regelfall als auch in Bezug zur stabilen Phase verändert, ist es notwendig, diese zusätzlichen Belegungszeiten in der Einschwingphase zu kennen.

Weiterhin bildet die Identifikation und Quantifizierung der im Störfall zusätzlichen Belegungszeiten die Grundlage für die in Kapitel 3 beschriebene Aufgabe der Entwicklung von Modellen zur Abschätzung der Dauer bis zum Ende der Einschwingphase.

5.1.3 Unterteilung der zusätzlichen Belegungszeitelemente

Ausgehend von den in Abschnitt 2.4 beschriebenen Dispositionsabläufen und Kommunikationsprozessen im Störfall und in Bezug auf die in Abbildung 2.3 dargestellten Phasen einer Störung lassen sich drei allgemeine Dispositionsphasen zu Beginn einer Störung erkennen: die Ermittlungsphase, die Entscheidungsphase und der Beginn der Einschwingphase.

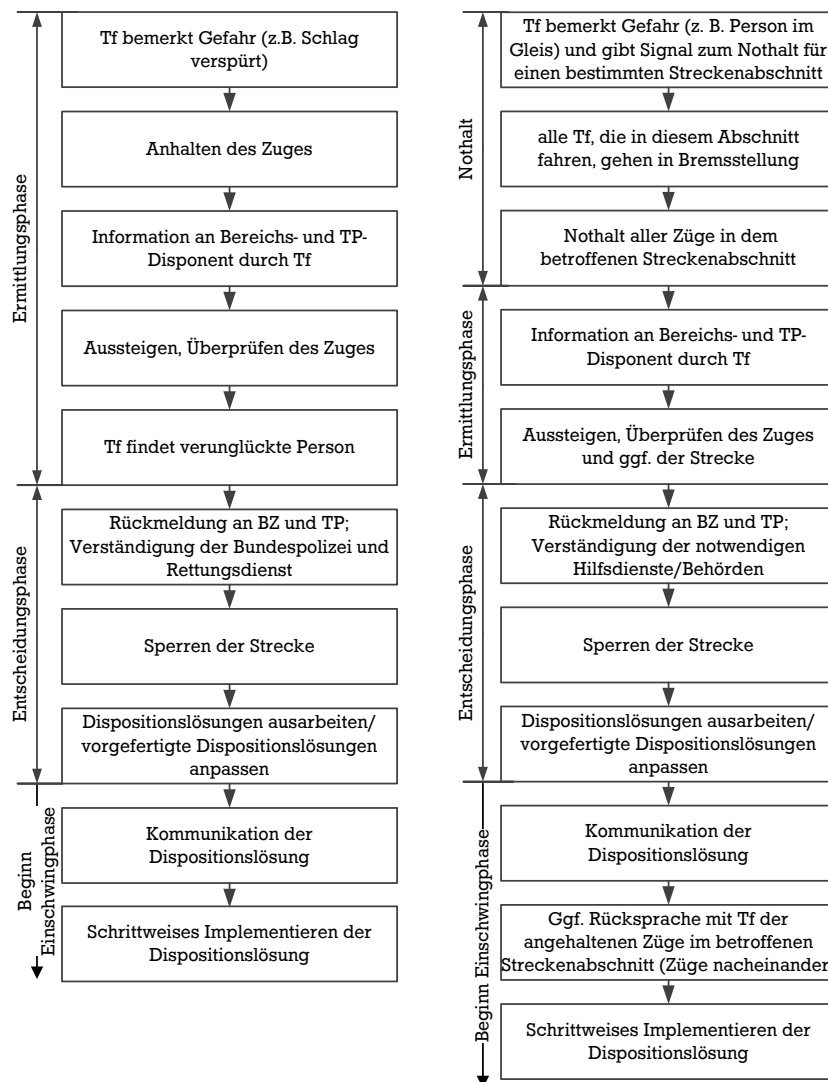


Abbildung 5.1: Ablauf der Dispositionsphasen Ermittlung, Entscheidung und Umsetzung anhand von Beispielen für die zeitliche Abfolge betrieblicher und dispositiver Handlungen nach dem Eintritt einer Störung (Tf= Triebfahrzeugführer)¹

Die Dauer der Phasen hängt von Art und Anzahl der jeweils erforderlichen dispositiven Handlungen ab, was sich wiederum direkt auf die Belegungszeiten durch die von der Störung betroffenen Züge auswirkt. Dabei ist zu beachten, dass sich die jeweils zu verrichtenden Handlungen durch den oder die betroffenen Triebfahrzeugführer, die verantwortlichen Fahrdienstleiter und die Disponenten in Abhängigkeit von Störungsart und Störungsort unterscheiden. Die Vielfältigkeit der Handlungen legt die Existenz einer Vielzahl, je nach Situation verschiedener, veränderter und zusätzlicher Belegungszeiten nahe.

In Abbildung 5.1 wird dieses Prinzip verdeutlicht. Dort ist der Ablauf der drei Dispositionsphasen Ermittlung, Entscheidung und Umsetzung anhand von Beispielen für verschiedene dispositiver Handlungen nach dem Eintritt einer Störung dargestellt. Es werden zwei unterschiedliche Störungen beschrieben: Im ersten Beispiel ist nur ein einzelner Zug von der Störung betroffen, im zweiten Beispiel befinden sich alle Züge eines Streckenabschnitts in möglicher Gefahr und werden deshalb per Nothalt gestoppt. Wie aus diesen Beispielen ersichtlich ist, hat je nach Grund eine unterschiedliche Anzahl von Handlungen zur Ermittlung der Störungsursache zu erfolgen.

Im Hinblick auf die nachfolgende Quantifizierung der Dauer der veränderten und zusätzlichen Belegungszeiten sowie auf das Ziel einer allgemeingültigen Darstellung ist es zielführend, möglichst kleine Einheiten der veränderten und zusätzlichen Belegungszeiten zu bilden. Um den Aufwand der Quantifizierung nicht zu sehr zu erhöhen ist es wiederum sinnvoll, einzelne Elemente zu Gruppen zusammenzufassen.

Betrachtet man die in Abbildung 5.1 dargestellten Phasen zu Beginn der Störung und die notwendigen dispositiven und betrieblichen Handlungen, so lassen sich, im Vergleich zu den regulären Belegungszeiten durch eine Zugfahrt, verschiedene zusätzliche Belegungszeitelemente für jede Phase ableiten. Diese Belegungszeitelemente sind in Tabelle 5.1 dargestellt und lassen sich den Phasen „Nothalt“, „Informationen sammeln und Entscheiden“ sowie „Umsetzen von Handlungen“ zuordnen. Hierbei ist zu beachten, dass für die Umsetzungsphase zwei Bereiche unterschieden werden: zum einen Belegungszeitelemente für einmalige Handlungen, die in der Einschwingphase notwendig sind, und zum anderen Belegungszeitelemente für Handlungen, die während der Anwendung des Störfallprogramms wiederholt werden. Im weiteren Verlauf des vorliegenden Kapitels erfolgt die Beschreibung der Dauern für einmalige Handlungen in der Einschwingphase. Eine Beschreibung der Eigenschaften der unterschiedlichen Belegungszeitelemente zusammen mit den Ausarbeitungen bezüglich ihrer Quantifizierung ist in Abschnitt 5.2 zu finden. Die Beschreibung der Dauern für im Störfallprogramm wiederholt notwendige Handlungen erfolgt separat in Kapitel 6 und Kapitel 7.

Tabelle 5.1: Überblick der zusätzlichen Belegungszeiten im Störfall (Verallgemeinerung von Abbildung 5.1)

Phase	Formelzeichen	Zeitanteil für
Nothalt	$t_{Nothalt}$	den Nothalt aller betroffenen Züge
Information sammeln und Entscheiden	t_{Entsch}	(maximale) Entscheidungsdauer
Umsetzen – Handlungen zu Beginn des SFP	t_{Ueberm}	die Übermittlung von Informationen über IT-Systeme
	t_{Komm}	das Geben von mündlichen Anweisungen/Rücksprachen
	t_{Befehl}	das Erteilen schriftlicher Befehle
	$t_{WartenKomm,n}$	das Warten des n-ten Tf, bis der Disponent zur Kommunikation zur Verfügung steht
	$t_{WartenBefehl,n}$	das Warten des n-ten Tf, bis der Disponent zur Übermittlung der Befehle zur Verfügung steht
	$t_{WartenAufPersonal}$	das Warten bis Fahrpersonal verfügbar
Umsetzen – wiederkehrende Handlungen im gesamten SFP	$t_{SFPWende}$	Wenden in SFP-Bahnhöfen
	$t_{SFPUmleitung}$	SFP-Umleitungen

¹ Beispiele für Störungen im Problembereich Infrastruktur (siehe Abbildung 2.1 und Abschnitt 3.4).

5.1.4 Beispiel für die Veränderung von Belegungszeiten durch Störungen

Um die Zusammenhänge zwischen den Belegungszeiten einzelner Züge besonders im Störfall aufzuzeigen, soll mit Hilfe des folgenden Beispiels qualitativ erläutert werden, wie sich zusätzliche Belegungszeiten einzelner oder aller Züge auf die Gesamtbelegungszeit einer Infrastruktur auswirken können. Ausgangssituation ist die in Abbildung 5.2 dargestellte zweigleisige Strecke. Hier verkehren vier Züge in zwölf Blockabschnitten (in Block Sechs bis Eins von links nach rechts und in Block 11 bis 61 von rechts nach links) zwischen zwei Stationen. Die in der Abbildung dargestellte Belegung stellt zwei mögliche Betriebsszenarien im Regelfall dar: „Durchfahrten durch die Blöcke Vier und 41“ oder „Wenden in diesen Blöcken“. Dazu fahren im regulären Betrieb Zug Eins und Zug Zwei auf dem oberen Gleis von rechts nach links, während Zug Drei und Zug Vier unabhängig davon auf dem unteren Gleis von links nach rechts fahren. Sind im regulären Betrieb Wenden vorgesehen, so erfolgen die Ausfahrten bis zur nächsten Weiche im Gegengleis.

Die in Abbildung 5.3 dargestellte Zeit-Wege-Linie gibt folgende Störungssituation wieder: Zug Zwei ist in Gefahr geraten und löst einen Nothalt aus. Daraufhin kommen alle vier Züge auf diesem Streckenabschnitt zum Stehen. Liegen die Informationen über den Störungsgrund vor und ist die Weiterfahrt nicht-betroffener Züge möglich, kann eine dispositive Lösung der Reihenfolge der Aufhebung des Nothalts und zur Herstellung des SFP-Betriebs wie folgt aussehen:

1. Zug Eins setzt nach Rücksprache mit den Disponenten seinen Regelweg fort.
2. Zug Zwei ist nicht in der Lage weiter zu fahren.
3. Zug Drei befindet sich nach dem Nothaltevorgang in einem Bahnhof. Er soll dort auf Anweisung des Disponenten außerplanmäßig wenden. Ist die Wende erfolgt, muss die Fahrstraße, welche durch die Abfahrt von Zug Eins belegt wurde, frei sein, damit Zug Drei ausfahren kann. Anschließend wird das Signal für Zug Drei zur Ausfahrt in Richtung links auf Fahrt gestellt.
4. Zug Vier wird durch den Nothaltevorgang auf der Strecke angehalten. Nachdem der Disponent Zug Eins informiert hat, wird Zug Vier informiert. Zug Vier fährt bis zum nächsten halt zeigenden Blocksignal und wartet. Das Signal steht auf Halt, da sich Zug Drei noch im Bahnhof befindet. Zug Vier wartet, bis er in den Bahnhof einfahren kann. Ist das Einfahrgleis frei, fährt Zug Vier in den Bahnhof, wendet dort und wartet bis die Ausfahrt in Richtung links möglich ist.

In Abbildung 5.3 sind die Belegungszeiten des zweigleisigen Streckenabschnitts im Störfall qualitativ dargestellt. Wie darauf zu sehen ist, verlängern sich die Blockbelegungszeiten der einzelnen Züge nicht nur um die Zeit für den Nothalt sondern auch um die Dauer der Informations- und Entscheidungsfindungsphase. So können Belegungskonflikte, die in der Störung entstehen, ebenfalls für längere Wenden als im Regelfall verantwortlich sein. In einem nächsten Schritt ist es notwendig, die zusätzlichen Belegungszeiten voneinander abzugrenzen und Werte für die jeweiligen Dauern zu bestimmen.

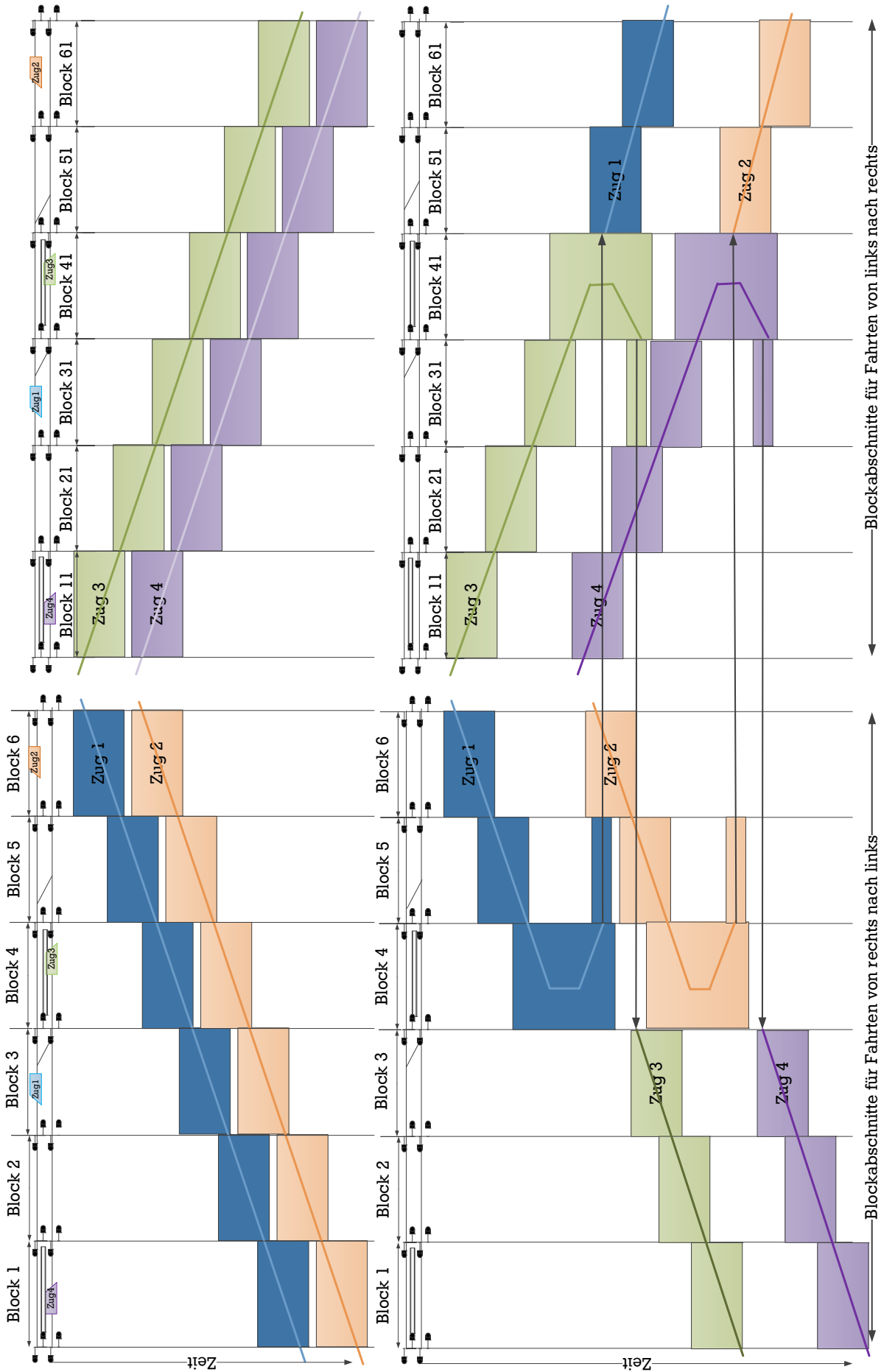


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Blockbelegungszeiten eines Streckenabschnitts mit Durchfahrten (oben) und Wenden (unten), in den Blockabschnitten 4 und 41) im regulären Betrieb

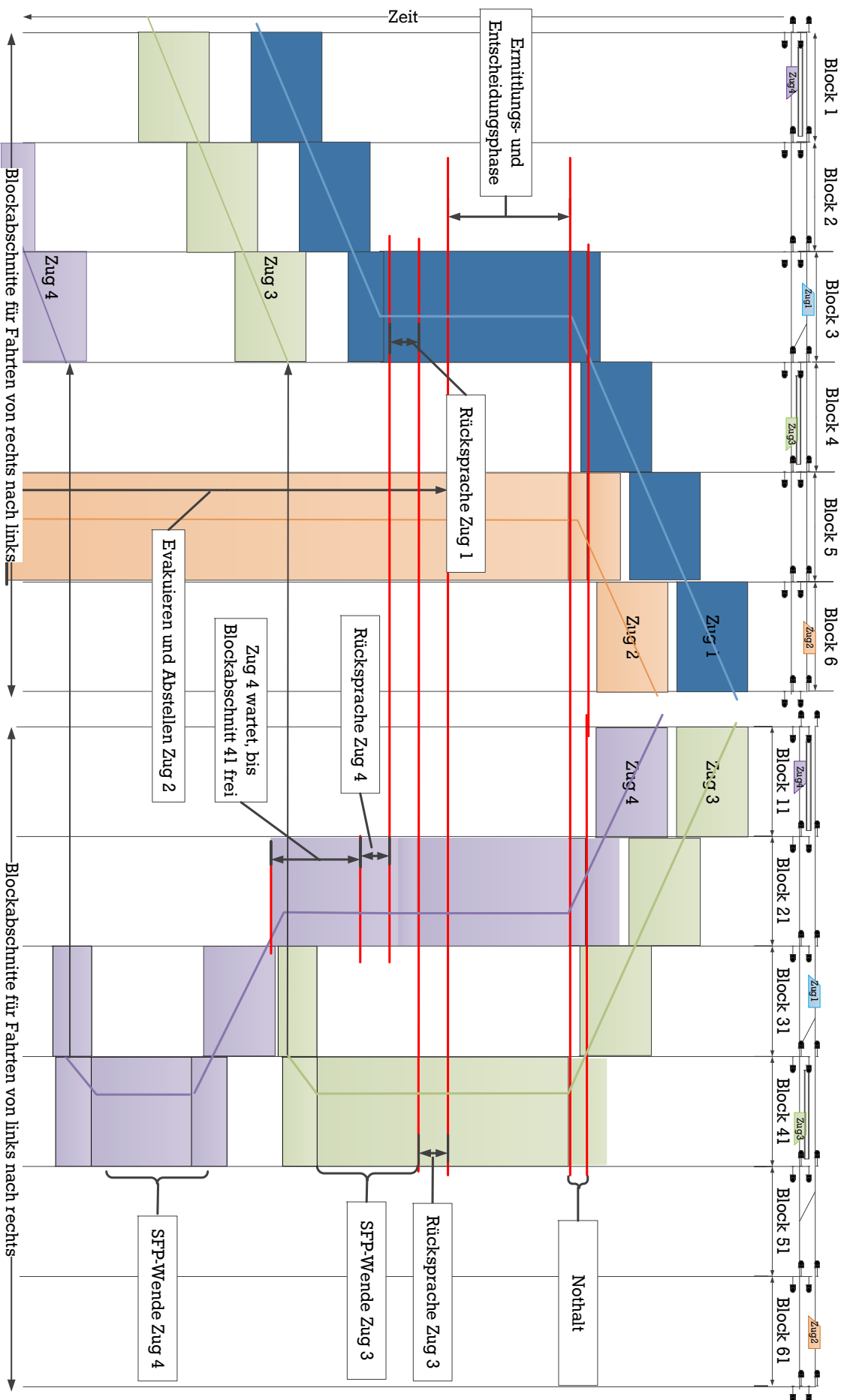


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der Blockbelegungszeiten eines Streckenabschnitts während einer Störung mit Nothalt – Stillstand von Zug Zwei und SFP-Wenden in den Blockabschnitten 4 und 41

5.2 Quantifizierung der zusätzlichen Belegungszeiten

5.2.1 Problematik der Quantifizierung und Vorgehen

Nachdem in Abschnitt 5.1 die in Störungen und im SFP-Fall zusätzlich existierenden Belegungszeitelemente identifiziert wurden, stellt sich die Frage nach ihrer Dauer. Grundsätzlich gilt, dass die Dauern vieler dieser Anteile volatil sind und von den Begleitumständen der Störung, wie Qualifikation des diensthabenden Personals, verfügbaren Ressourcen und Witterungsverhältnissen, abhängen. Deshalb ist es sinnvoll, die Dauern in Form stochastischer Größen zu beschreiben. Dies ist beispielsweise mit Hilfe von Verteilungsfunktionen möglich.

Solche Verteilungsfunktionen werden i. d. R. durch empirische Untersuchungen von Werten der entsprechenden Größen bestimmt. Die für die Analysen zur Verfügung stehenden Daten umfassen lediglich Zuglaufmeldungen (siehe Abschnitt 4.3) und keine Daten zu Entscheidungsdauern oder Dauern der einzelnen Prozesse, da diese Werte aufgrund des hohen Aufwands nicht in den Eisenbahnunternehmen erhoben werden. Daher ist das – exaktere – Vorgehen der Verwendung empirischer Werte in diesem Fall nicht möglich. Aus diesem Grund wird die in Abbildung 5.4 dargestellte Vorgehensweise für die Quantifizierung der Belegungszeitelemente angewandt. Die Basis für dieses Vorgehen bilden Expertenschätzungen (Chu, 2012b), (Chu, 2012a), welche durch eigene Messungen, Berechnungen und Plausibilisierungen ergänzt werden. Bei der Wahl der Funktionen soll darauf geachtet, möglichst Funktionen zu verwenden, deren Parameter auch für Praktiker leicht verständlich sind und welche einfach ermittelbar sind (siehe Anforderungen in Kapitel 3).

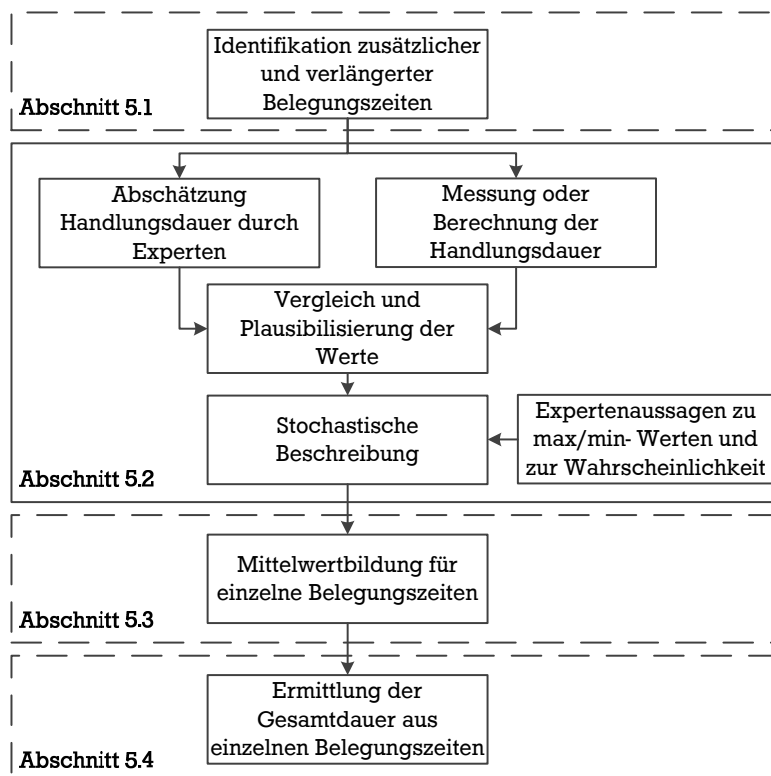


Abbildung 5.4: Vorgehen der Quantifizierung der zusätzlichen Belegungszeitelemente

5.2.2 Dauer Nothaltevorgang $t_{Nothalt}$

Für die Ermittlung der Dauer des Nothaltevorgangs wurden zwei Wege verfolgt. Zum einen wurde der Wert von Experten auf eine Spanne von ein bis zwei Minuten geschätzt (Chu, 2012a), wobei alle Werte in dieser Spanne als gleich wahrscheinlich eingeschätzt wurden. Zum anderen erfolgte eine Ermittlung der Dauer mit Hilfe eines Systems vorbestimmter Zeiten (MTM – Methods Time Measurement), wobei sich hier ein ungefährender Wert von einer Minute für die Dauer des Nothaltevorgangs in S-Bahn Netzen ergab (Berechnung siehe Anhang D).

Bei dem rechnerisch ermittelten Wert ist zu beachten, dass hier nur eine Quantifizierung der Bedienhandlungen möglich ist. Die Zeitbestandteile für das Erkennen der Gefahr, die Reaktion der erkennenden Person sowie für die Übertragung von Notruf und Nothalteauftrag sind nur schwer bis gar nicht ermittelbar. Aus diesen Überlegungen heraus wird im Weiteren die von Experten geschätzte, gleich verteilte Dauer von ein bis zwei Minuten für den Nothaltevorgang angesetzt.

Die Volatilität der Dauer für den Nothaltevorgang ergibt sich aus der situativen Fitness und dem Erfahrungszustand der handelnden Personen, deren Beschreibung jedoch nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit steht. Für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Dauer eines Nothalts $t_{Nothalt}$ wird – aufgrund der von Experten geschätzten Gleichverteilung – eine Rechteckverteilung in den Grenzen von $a=1$ und $b=2$ Minuten vorgeschlagen. Daraus ergibt sich folgende Verteilungsfunktion:

$$F(t_{Nothalt}) = \begin{cases} 0 & , \text{ wenn } t_{Nothalt} < a \\ \frac{t_{Nothalt}-a}{b-a} & , \text{ wenn } a \leq t_{Nothalt} \leq b \\ 1 & , \text{ wenn } b < t_{Nothalt} \end{cases}$$

mit $a=t_{Nothalt,min} = 1$, $t_{Nothalt,max} = 2$.

5.2.3 Dauer der Ermittlungs- und Entscheidungsphase t_{Entsch}

Wie in Abschnitt 2.4 ausgeführt, ist es sinnvoll, eine netzspezifische Obergrenze für die maximale Entscheidungsdauer $t_{EntschMax,Netz}$ zu definieren. Sie gibt an, nach welcher Zeit eine Entscheidung für eine Dispositionslösung gefallen sein muss.

Um die Entscheidungsdauer als stochastische Größe abbilden zu können, werden in einem ersten Schritt die Eigenschaften der jeweiligen Größe beschrieben, um im Anschluss eine passende Wahrscheinlichkeitsverteilung für die tatsächliche Dauer der maximalen Entscheidungsdauer auszuwählen. Folgende Eigenschaften charakterisieren die Größe „Dauer der Ermittlungs- und Entscheidungsphase“:

- Die Mindestdauer der Ermittlungs- und Entscheidungsphase ergibt sich aus der Übermittlungsdauer der Information zuzüglich eines Zuschlags für das Erkennen der Situation und für das Abrufen des geeigneten Störfallprogramms. Von Experten wird hier eine Dauer von drei bis vier Minuten angenommen (Chu, 2012a). Eine weitere Zerlegung des Vorgangs in Einzelschritte ist zur Abschätzung der Dauer nicht sinnvoll, da der Wert für die Dauer der Informationsübertragung nur geschätzt werden kann. Somit kann nur eine Scheingenauigkeit erreicht werden. Geht die Störung mit einem Notruf (s. o.) einher, so kann von einer geringeren Übermittlungsdauer von ein bis zwei Minuten ausgegangen werden (siehe Chu (2012a) und Anhang D).

- Die meisten Entscheidungen dauern so lange wie die vorgegebene maximale Entscheidungsdauer.
- Nur sehr wenige Ermittlungs- und Entscheidungsphasen dauern länger als die maximale Entscheidungsdauer.

Entsprechend dieser Eigenschaften wird für die Ermittlungs- und Entscheidungsdauer eine nicht-symmetrische Funktion mit einem lokalen Maximum beim Wert für die maximale Entscheidungsdauer benötigt, welche linksseitig des Maximums langsamer ansteigt als sie an der rechten Seite des Maximums abfällt. Es ist möglich, eine entsprechende Funktion durch Spiegelung und Verschiebung einer Fischer-Verteilung mit den Freiheitsgraden m , n zu konstruieren. Jedoch stehen keine empirischen Werte für die Dauer einer Ermittlungs- und Entscheidungsphase zur Verfügung, sodass eine Bestimmung der erforderlichen Parameter – der Freiheitsgrade m und n sowie des Parameters x für die rechtsseitige Verschiebung der Funktion – große Schwierigkeiten bereitet. Auch weil sich die Bestimmung der Parameter in der praktischen Anwendung nicht einfach gestalten dürfte, wird – im Hinblick auf die Anforderung einer möglichst einfachen Parametrierung (siehe Kapitel 3) – auf diese Art der Darstellung verzichtet.

Eine einfache Dreiecksverteilung mit den Parametern a (Minimum), b (Maximum) und c (wahrscheinlichster Wert) bietet wiederum eine anschauliche – wenn auch stark vereinfachte – Abbildung der oben genannten Eigenschaften. Die Mindestdauer a der Entscheidungsphase ist mit drei bzw. bei Nothalt mit einer Minute anzusetzen, während sich die wahrscheinlichste Dauer c aus dem netzspezifischen Wert für die maximale Entscheidungsdauer $t_{EntschMax,Netz}$ ergibt. Für den Parameter b wird ein Wert, der um zwei Minuten länger als der Wert für die maximale Entscheidungsdauer ist, vorgeschlagen. Dieser Wert ergibt sich aus der Überlegung, dass kurz nach dem Verstreichen der maximalen Entscheidungsdauer eine Entscheidung erfolgen muss. Daraus ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit der Entscheidungsdauer t_{Entsch} folgende Verteilungsfunktion:

$$F(t_{Entsch}) = \begin{cases} 0 & , \text{ wenn } t_{Entsch} < a \\ \frac{(t_{Entsch}-a)^2}{(b-a)(c-a)} & , \text{ wenn } a \leq t_{Entsch} \leq c \\ 1 - \frac{(b-t_{Entsch})^2}{(b-a)(b-c)} & , \text{ wenn } c < t_{Entsch} \leq b \\ 1 & , \text{ wenn } b < t_{Entsch} \end{cases}$$

mit $a = t_{Ueberm,min} = 3$ Minuten (ohne Nothalt) bzw. $a = t_{Nothalt,min} = 1$ Minute (mit Nothalt), $b = c + 2$ Minuten, $c =$ netzspezifische maximale Entscheidungsdauer $t_{EntschMax,Netz}$.

5.2.4 Dauer von Handlungen zur Umsetzung zu Beginn von Störfallprogrammen

Dauer zur Übermittlung von Informationen über die IT-Systeme t_{Ueberm}

Ist die Entscheidung für ein Störfallprogramm gefallen, erfolgt die Ausrufung desselben. Die reguläre Ausrufung eines Störfallprogramms erfolgt über die Eingabe in das IT-System. Anschließend erfolgt die Information der betroffenen Mitarbeiter durch automatisch über das IT-System verschickte Textnachrichten auf deren mobile Endgeräte.

Die Zeit für die Eingabe der Informationen in das IT-System und die technische Übermittlung der Textnachrichten wird von Disponenten auf drei bis vier Minuten geschätzt, wobei jede Dauer innerhalb dieses Intervalls als gleich wahrscheinlich eingeschätzt wird (Chu, 2012a). Aufgrund der fehlenden Möglichkeit, die entsprechenden Eingabemasken und -vorgänge der verwendeten IT-Systeme zu analysieren bzw. die technische Übermittlungszeit zuverlässig zu

quantifizieren, wird an dieser Stelle auf eine Überprüfung des von den Disponenten geschätzten Wertes verzichtet.

Um die Konsistenz zu den bisherigen Ausführungen zu wahren, bietet sich für die Modellierung der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Dauer zur Übermittlung von Informationen über die IT-Systeme t_{Ueberm} die Wahl einer Rechteckverteilung mit den Grenzen von drei bis vier Minuten an. Daraus ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit der Dauer zur Übermittlung von Informationen über die IT-Systeme t_{Ueberm} folgende Verteilungsfunktion:

$$F(t_{Ueberm}) = \begin{cases} 0 & , \text{ wenn } t_{Ueberm} < a \\ \frac{t_{Ueberm}-a}{b-a} & , \text{ wenn } a \leq t_{Ueberm} \leq b \\ 1 & , \text{ wenn } b < t_{Ueberm} \end{cases}$$

mit $a=t_{Ueberm,min}=3$, $b = t_{Ueberm,max} = 4$.

Dauer von Rücksprachen t_{Komm}

Zusätzlich zur Ausrufung des Störfallprogramms mithilfe der IT-Systeme sind oft fernmündliche Rücksprachen zwischen Triebfahrzeugführern und Disponent zur Klärung von Sonderfällen notwendig. Anzahl und Dauer von Rücksprachen zwischen Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter bzw. Disponent im Störfall hängen von vielen unterschiedlichen Faktoren ab. So beeinflussen Art und Umfang der Störung, die Passgenauigkeit der zur Verfügung stehenden Störfallprogramme auf die Störungssituation, Umfang und Qualität der Kommunikation sowie der Zeitpunkt zu dem kommuniziert wird die Anzahl und Dauer dieser Rücksprachen. Wie diese Ausführungen zeigen, ist eine treffende Beschreibung der Dauer dieser Rücksprachen nur mittels empirischer Analysen möglich. Da hierfür keine Daten vorliegen, wurde für die Bestimmung der Zeitdauer auf Expertenmeinungen zurückgegriffen. Praktiker schätzen eine Dauer von ein bis vier Minuten, wobei alle Werte innerhalb dieser Grenzen als gleich wahrscheinlich angegeben wurden (Chu, 2012a).

Um hier ebenfalls die Konsistenz zu den bisherigen Ausführungen zu wahren, bietet sich daher für die Modellierung der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Dauer einer Rücksprache zwischen Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter bzw. Disponent t_{Komm} die Wahl einer Rechteckverteilung mit den Grenzen von ein bis vier Minuten an. Daraus ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit der Dauer von Rücksprachen t_{Komm} folgende Verteilungsfunktion:

$$F(t_{Komm}) = \begin{cases} 0 & , \text{ wenn } t_{Komm} < a \\ \frac{t_{Komm}-a}{b-a} & , \text{ wenn } a \leq t_{Komm} \leq b \\ 1 & , \text{ wenn } b < t_{Komm} \end{cases}$$

mit $a=t_{Komm,min}=1$, $b = t_{Komm,max} = 4$.

Möglich wäre ebenfalls die Wahl einer Dreiecksverteilung mit $a=1$, $b=4$ und $c=2,5$, wobei sich c als Mittelwert aus der oberen und unteren Spanne der Dauer ergibt. Dies ist denkbar, da eine Gleichverteilung der Dauern aufgrund der verschiedenen Einflüsse nicht notwendigerweise zutreffen muss. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass dieser Kommunikationswert stark schwankt. Zur Überprüfung und Präzisierung dieser Annahme ist eine empirische Untersuchung der Grenzwerte von eins bis vier Minuten denkbar.

Dauer zum Erteilen schriftlicher Befehle t_{Befehl}

Die Notwendigkeit von Befehlen sowie deren Anwendungsfälle werden in Abschnitt 2.4 beschrieben. Für die Ermittlung der Dauer zum Erteilen schriftlicher Befehle t_{Befehl} wurden ebenfalls zwei Wege verfolgt. Zum einen wurde der Wert von Experten auf ungefähr vier Minuten pro Befehlsvorgang pro Triebfahrzeugführer geschätzt (Chu, 2012a). Zum anderen wurden eigene Zeitstudien durchgeführt, welche für einen reinen Befehlsvorgang eine Mindestdauer von 2,5 Minuten pro Triebfahrzeugführer ergab (für den Nachweis siehe Anhang D). Bei der Durchführung der Zeitstudie gab es zu beachten, dass verschiedene Befehle zusammen, d. h. hintereinander ausgesprochen werden können. Dies bedeutet, dass sich der Umfang des Befehls aus der Menge der in der Situation notwendigen Anweisungen ergibt, weshalb kein „repräsentativer Befehl“ existiert. Dies wurde bei der Durchführung der Zeitstudie durch die Verwendung von zwei im Störfall wahrscheinlichen Befehlen berücksichtigt.

Weiterhin findet i. d. R. vor – und oft auch nach – dem Vorgang der Befehlserteilung eine kurze Kommunikation zwischen Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter statt. Die dafür benötigte Zeit ist wiederum aufgrund der vielfältigen möglichen Inhalte nicht sinnvoll allgemein abschätzbar. Verbindet man diese Überlegungen mit den Aussagen von Experten, welche die Dauer für die Befehlserteilung gleichverteilt mit ungefähr drei bis vier Minuten angeben, so erscheint die Festlegung einer Spanne von zweieinhalb bis vier Minuten sinnvoll. Dementsprechend wird für die Funktion zur Modellierung der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Dauer des Erteilen eines schriftlichen Befehls t_{Befehl} eine Rechteckverteilung in den Grenzen von zweieinhalb und vier Minuten vorgeschlagen. Daraus ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit der Dauer zum Erteilen schriftlicher Befehle t_{Befehl} folgende Verteilungsfunktion:

$$F(t_{Befehl}) = \begin{cases} 0 & , \text{ wenn } t_{Befehl} < a \\ \frac{t_{Befehl}-a}{b-a} & , \text{ wenn } a \leq t_{Befehl} \leq b \\ 1 & , \text{ wenn } b < t_{Befehl} \end{cases}$$

mit $a = t_{Befehl,min} = 2,5$, $b = t_{Befehl,max} = 4$. Die Wahl einer Rechteckverteilung ergibt sich auch hier aus den Expertenaussagen über eine Gleichverteilung der Dauer. Selbstverständlich ist auch hier eine Überprüfung sowie Anpassung der Grenzen durch empirische Studien möglich.

Dauer zum Warten auf Kommunikation und Befehlserteilung $t_{WartenBefehl,n}$ und

$t_{WartenKomm,n}$

Da Befehle an die Triebfahrzeugführer direkt durch den Fahrdienstleiter erteilt werden, stellt vor allem in Situationen, in denen mehrere Triebfahrzeugführer Befehle erhalten müssen, der Fahrdienstleiter den Engpass dar. In dieser Zeit ist der Fahrdienstleiter gebunden und i. d. R. nicht mit anderen Tätigkeiten beschäftigt. Daher müssen die Triebfahrzeugführer warten, bis sie an der Reihe sind um ihren Befehl zu erhalten. Diese Beschreibung trifft analog auch auf die Kommunikation zwischen Triebfahrzeugführern und Disponent im Störfall zu.

Die Dauer, bis der letzte Triebfahrzeugführer seinen Befehl erhalten hat, ergibt sich demnach aus dem Produkt der Dauer zur Befehlserteilung und Anzahl der betroffenen Triebfahrzeugführer. Der letzte Triebfahrzeugführer n muss demnach eine Wartezeit von $t_{warten,n} = t_{Befehl} \cdot (n - 1)$ in Kauf nehmen, wobei n die Anzahl der betroffenen Züge bezeichnet.

Wie im vorangehenden Abschnitt beschrieben, wird für das Erteilen eines einzelnen schriftlichen Befehls eine Dauer von 2,5 bis 4 Minuten angenommen. Da die einzelnen Dauern zur Befehlserteilung schwanken können, schwankt auch die Gesamtdauer, bis alle Befehle

erteilt sind. Weiterhin wird die Dauer der Erteilung eines Befehls als unabhängig von der Dauer bereits erteilter Befehle angenommen. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die Gesamtdauer zur Übermittlung von n Befehlen zu Anfang des Störfallprogramms weist demnach die nachfolgenden Charakteristiken auf (siehe Abbildung 5.5):

- Die jeweilige Wahrscheinlichkeit sowie die Schwankungsbreite der Gesamtdauer hängen von der Anzahl der abzufertigenden Züge ab – je größer die Anzahl der Züge, desto weiter liegen die obere und die unteren Grenze der Dauer auseinander und desto flacher verläuft die Kurve.
- Die untere Grenze der Gesamtdauer ist durch $n \cdot a$ als ein n -Faches der unteren Grenze $t_{Befehl,min}$ für die Dauer eines einzelnen Befehls definiert.
- Die obere Grenze der Gesamtdauer ist durch $n \cdot b$ als ein n -Faches der oberen Grenze $t_{Befehl,max}$ für die Dauer eines einzelnen Befehls definiert.
- Das lokale Maximum der Funktion liegt beim Erwartungswert c , der dem Mittelwert aus oberer und unterer Grenze der Dauer des Gesamtvorgangs entspricht.

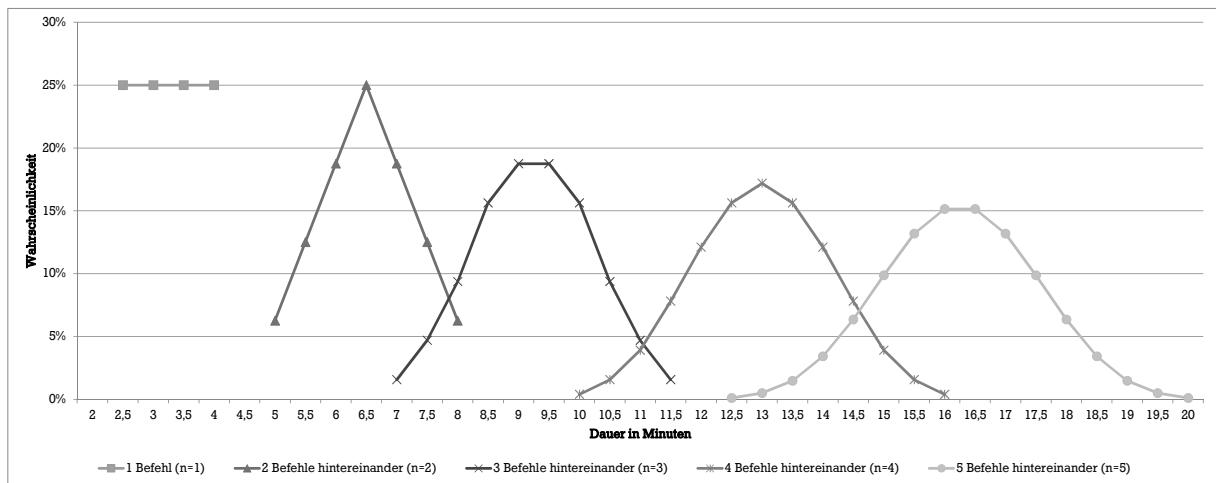


Abbildung 5.5: Wahrscheinlichkeit der Gesamtdauer zum Erteilen von n Befehlen hintereinander

Die Art der Funktion zur Modellierung der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Dauer zum Warten des n -ten Triebfahrzeugführers auf Befehlserteilung ist von der Anzahl der zu bearbeitenden Züge n abhängig. Bei $n=1$ ist die Funktion gleich verteilt, bei $n=2$ dreieckverteilt. Für $n \geq 3$ nähert sich die Funktionsform mit steigendem n einer Normalverteilung an (siehe Abbildung 5.5). Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit von einer allgemeinen Formulierung der Verteilungsdichtefunktion und der Verteilungsfunktion abgesehen.

Bei der Kommunikation von Triebfahrzeugführern mit den Disponenten stellen letztere den Engpass dar, da sie fernmündlich i. d. R. nur mit einem Triebfahrzeugführer gleichzeitig kommunizieren. Analog ergeben sich daher für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gesamtdauer der Kommunikation zu Beginn eines Störfallprogramms dieselben Charakteristiken wie für die Dauer zum Warten auf Übermittlung von Befehlen. Dabei sind für a und b jeweils die Grenzwerte für die Kommunikationsdauer einzusetzen.

Wartezeit, bis Personal und Fahrzeuge zur Verfügung stehen

Als direkte Folge der Störung ist es möglich, dass Betriebspersonal und/oder Fahrzeuge nicht rechtzeitig an Wendebahnhöfen oder Personalwechsellpunkten eintreffen, was wiederum zu Verspätungen führt. Die Gründe für nicht vorhandenes Personal oder Fahrzeuge sind sehr vielfältig. Ebenso ist die Höhe dieser Verspätungen zum einen sehr volatil und kann zum anderen durch Reservepersonal oder -fahrzeuge im Störfall abgefangen bzw. durch Prozessverbesserungen verkürzt werden. Dementsprechend ist es zielführender an der Verbesserung der internen Prozesse zu arbeiten als die Modellierung von Wartezeiten vorzunehmen. Daher wird an dieser Stelle von einer detaillierten Beschreibung der Wartezeiten abgesehen.

5.2.5 Dauer von wiederkehrenden Handlungen im SFP $t_{SFPWende}$ und $t_{SFPUmleitung}$

Unter wiederkehrenden Handlungen im Rahmen der SFP-Umsetzung werden die Maßnahmen von SFP-Wenden sowie das Befahren von Umleitungsstrecken verstanden. Hier ist es möglich, dass diese Handlungen im Störfall länger dauern als im Regelbetrieb. So ist es aus vielerlei Gründen möglich, dass die in Richtlinie 498 (DB Regio, 498) vorgegebene technische Mindestwendezeit im Störfall nicht eingehalten werden kann. Mögliche Gründe für längere Wartezeiten können sein:

- Da störungsbedingt weniger Züge im Umfeld der Störung verkehren, ist es möglich, dass sich auf dem Bahnsteig viele Fahrgäste befinden. Dieser Umstand kann dazu führen, dass der Triebfahrzeugführer länger – als in der Mindestwendezeit vorgesehen – benötigt, um vom Zugende bis zum Zuganfang zu gelangen. Auch erhöhte Fahrgastwechselzeiten aufgrund des hohen Fahrgastaufkommens sind möglich.
- Aufgrund der Maßnahme „vorzeitige Wende“ ist es möglich, dass der Triebfahrzeugführer zusätzliche administrative Tätigkeiten, wie z. B. die Ersatzzugnummer selber bestimmen oder beim Fahrdienstleiter erfragen, durchführen muss.
- Die Ausfahrt aus dem SFP-Wendebahnhof ist nicht pünktlich möglich, da sich aufgrund der Störung Rückstaus gebildet haben und auf die Ausfahrt gewartet werden muss.

Kann die in Richtlinie 498 vorgegebene technische Mindestwendezeit im Störfall nicht eingehalten werden und wird in Störungen jedoch mit diesen Mindestzeiten geplant, so sind Verspätungen sehr wahrscheinlich, welche bei jeder Wende erneut auftreten. Daher ist es notwendig, die längere Dauer der Mindestwendezeit in Störfällen zu bestimmen und diese bei der SFP-Planung verwenden. Da die Ermittlung der längeren Dauer von Umleitungen und Wenden im Störfall umfangreicher ausfallen, werden diese im nachfolgenden Kapitel 6 und in Kapitel 7 vertieft behandelt.

5.3 Erwartungswerte der zusätzlichen Belegungszeitelemente

Im vorangehenden Abschnitt wurden die stochastischen Eigenschaften der zusätzlichen Belegungszeitelemente erarbeitet und mithilfe von einfachen Verteilungsfunktionen beschrieben. Im Rahmen der Erstellung von Störfallprogrammen ist die direkte Verwendung dieser Verteilungsfunktionen nur dann sinnvoll, wenn Simulationsmodelle zur Überprüfung der SFP-Entwürfe eingesetzt werden. Dann können die entsprechenden Verteilungsfunktionen in den Simulationsmodellen hinterlegt werden. Fehlen empirische Werte zur Bestimmung von Verteilungsfunktionen, ist die Verwendung von Erwartungswerten eine mögliche Alternative, welche vor allem für die Anwendung in der Praxis in Frage kommt. Die Berechnung des Erwartungswertes ist je nach Art der Verteilungsfunktion unterschiedlich definiert.

Für eine Rechteckverteilung mit der unteren Grenze a und der oberen Grenze b ergibt sich der Erwartungswert $E(x)$ allgemein durch die Formel

$$E(x) = \frac{a + b}{2}.$$

Für eine Dreiecksverteilung mit der unteren Grenze a , der oberen Grenze b und dem wahrscheinlichsten Wert c ergibt sich der Erwartungswert $E(x)$ allgemein durch die Formel

$$E(x) = \frac{a + b + c}{3}.$$

In Tabelle 5.2 sind die Erwartungswerte der einzelnen Belegungszeiten entsprechend der in Abschnitt 5.2 erarbeiteten Verteilungsfunktionen für die Dauer der einzelnen Vorgänge dargestellt.

Tabelle 5.2: Überblick über die Erwartungswerte der zusätzlichen Blockbelegungszeiten im Störfall ($n = \text{Anzahl der Züge}$)

Formelzeichen	u. Grenze a	o. Grenze b	Erläuterung	Erwartungswert
t_{Nothalt}	1 min	2 min	$E(t_{\text{Nothalt}}) = \frac{1+2}{2}$	1,5 min
t_{Entsch}	3 min	$t_{\text{EntschMax,Netz}} + 2 \text{ min}$	$E(t_{\text{Entsch}}) = \frac{3+2 \cdot t_{\text{EntschMax,Netz}} + 2}{3}$	$\frac{5 \text{ min} + 2 \cdot t_{\text{EntschMax,Netz}}}{3}$
	1 min	$t_{\text{EntschMax,Netz}} + 2 \text{ min}$	$E(t_{\text{Entsch}}) = \frac{1+2 \cdot t_{\text{EntschMax,Netz}} + 2}{3}$	$\frac{3 \text{ min} + 2 \cdot t_{\text{EntschMax,Netz}}}{3}$
t_{Ueberm}	3 min	4 min	$E(t_{\text{Ueberm}}) = \frac{3+4}{2}$	3,5 min
t_{Komm}	1 min	4 min	$E(t_{\text{Komm}}) = \frac{1+4}{2}$	2,5 min
t_{Befehl}	2,5 min	4 min	$E(t_{\text{Befehl}}) = \frac{2,5+4}{2}$	3,25 min
$t_{\text{WartenKomm},n}$	$n \cdot 1 \text{ min}$	$n \cdot 4 \text{ min}$	$E(t_{\text{WartenKomm},n}) = (n_K - 1) \cdot E(t_{\text{Komm}})$	$(n_K - 1) \cdot 2,25 \text{ min}$
$t_{\text{WartenBefehl},n}$	$n \cdot 2,5 \text{ min}$	$n \cdot 4 \text{ min}$	$E(t_{\text{WartenBefehl},n}) = (n_B - 1) \cdot E(t_{\text{Befehl}})$	$(n_B - 1) \cdot 3,25 \text{ min}$
t_{SFPWende}			(siehe Kapitel 6)	
$t_{\text{SFPUmleitung}}$			(siehe Kapitel 7)	

5.4 Zusammensetzung einzelner Belegungszeitelemente zu einer Gesamtbelegungszeit

5.4.1 Problematik der Quantifizierung der Dauer mehrerer Vorgänge

In den vorhergehenden Abschnitten wurde dargestellt, dass eine Unterteilung der Zeitspanne vom Beginn der Störung bis zum Ende der Einschwingphase zielführend ist, da die Quantifizierung der Dauer einzelner Teilvorgänge leichter vonstatten geht, als die Quantifizierung des Gesamtvorgangs. Dies ist vor allem bei sequenziell ablaufenden Vorgängen, wie den Vorgängen vom Zeitpunkt der Störung bis zum Zeitpunkt der Information aller am Störfallprogramm Beteiligten, hilfreich. Allerdings besteht das Hauptinteresse nicht an Einzeldauern sondern an der Dauer des Gesamtvorgangs von der Störung bis zum Ende der Einschwingphase. Deshalb besteht die Notwendigkeit, die bereits quantifizierten Dauern der Einzelvorgänge zu einer Gesamtdauer zusammenzufassen.

Um die Dauer eines Gesamtvorgangs, welcher wie im beschriebenen Fall aus sequenziellen Teilvorgängen besteht, zu quantifizieren, ist es demnach zweckmäßig, die Dauern der einzelnen Vorgänge zu addieren. Da es sich bei den Dauern der Einzelvorgänge um zufällig verteilte Variablen handelt, ist auch die sich aus einer Addition ergebende Größe der Gesamtdauer eines Vorgangs zufällig verteilt. Da jede Variable unterschiedliche Ausprägungen annehmen kann, variiert dementsprechend die realisierte Gesamtdauer. Die Abbildung des Vorgangs der Addition erfolgt, indem die Funktionen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der einzelnen Vorgänge überlagert, d. h. gefaltet, werden. Das Ergebnis einer Faltung von Verteilungen ist die Verteilung der Wahrscheinlichkeit für die Ausprägung der jeweiligen Gesamtdauer. Ein ausführliches Beispiel zum Vorgang der Faltung ist in Anhang D zu finden.

Der Vorgang der Faltung selbst ist jedoch aufwendig und daher für eine Anwendung zur schnellen Ermittlung von Vorgangsdauern als Eingangsgrößen in die Störfallprogrammerstellung in der Praxis untauglich. Zur Vereinfachung des Vorgangs, besteht eine Lösungsmöglichkeit darin, die in Abschnitt 5.3 erarbeiteten Erwartungswerte der Einzelvorgänge zu addieren, um zu einem überschlägigen Erwartungswert für die Dauer des Gesamtvorgangs zu gelangen.

Zur Überprüfung der Einsetzbarkeit dieser Lösung ist es notwendig, zu prüfen, wie weit der überschlägig berechnete Erwartungswert für die Dauer des Gesamtvorgangs von dem durch Faltung berechneten exakten Wert abweicht und wie breit sich die Streuung dieser Werte gestaltet.

5.4.2 Überschlägige und exakte Berechnung der Dauer mehrerer Vorgänge

Je nach Art der eingetretenen Störung und des anzuwendenden Störfallprogramms, sind verschiedene Kombinationen an Vorgängen möglich, welche die Gesamtdauer bestimmen können. Die Gesamtdauer vom Störungseintritt bis alle betroffenen Personen informiert sind, setzt sich wie folgt zusammen:

$$t_{ges} = t_{Nothalt} + t_{Entsch} + t_{Ueberm} + t_{Befehl}.$$

Dabei besteht beispielsweise die Möglichkeit, dass kein Nothalt erfolgt ($t_{Nothalt} = 0$) und keine schriftlichen Befehle erteilt werden ($t_{Befehl} = 0$).

Für eine möglichst allgemeingültige Bewertung der Eignung der Verwendung von Erwartungswerten wurden die Teilvorgänge in jeweils unterschiedlichen Ausprägungskombinationen (siehe Tabelle 5.3) kombiniert. Die Dauer, bis über den Einsatz eines Störfallprogramms entschieden wurde, hängt stark von der festgelegten maximalen Entscheidungsdauer ab. Hierfür wurden

zum einen zwei für stark befahrene S-Bahn Netze realistische Variationen von Entscheidungsfristen von zehn und fünfzehn Minuten gewählt. Im Hinblick auf die Übertragbarkeit der im Rahmen dieser Arbeit gewonnene Erkenntnisse auf Mischverkehrsstrecken wurden ebenfalls Variationen von Entscheidungsfristen von 20 und 25 Minuten gewählt. Die Ausrufung des Störfallprogramms mit Hilfe von IT-Systemen ist in jedem Fall notwendig, weshalb dieser Parameter nicht variiert wird. Die individuelle Information einzelner Triebfahrzeugführer hängt von der Gesamtanzahl der zu informierenden Triebfahrzeugführer ab. Grundsätzlich ist dabei eine Kombination aus Rücksprachen und Befehlen möglich. Aus Vereinfachungsgründen wird an dieser Stelle nur die Abgabe einer unterschiedlichen Zahl schriftlicher Befehle hintereinander betrachtet, da diese mehr Zeit als Rücksprachen in Anspruch nehmen und diesen Vorgang dementsprechend ebenfalls abdecken.

Tabelle 5.3: Überblick über die bei der Faltung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen variierten Parameter

veränderte Merkmale	analyisierte Ausprägungen
Anzahl und Typ kombinierter Vorgänge	$t_{Entsch} + t_{Ueberm} \mid t_{Entsch} + t_{Ueberm} + t_{Befehl}$
Zielwerte für $t_{Entsch,max}^*$	10 Minuten 15 Minuten 20 Minuten 25 Minuten
Anzahl Befehle	3 Befehle hintereinander 4 Befehle hintereinander 5 Befehle hintereinander

*Parameter für t_{Entsch} : a =Minimaldauer, $c = t_{Entsch,max}$, $b = t_{Entsch,max} + 2$ Minuten

Die Berechnung des exakten Erwartungswerts für die Dauer des Gesamtvorgangs ergibt sich anhand der durch Faltung der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Einzeldauern entstandenen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung des Gesamtvorgangs:

$$E_{exakt}(t_{ges}) = \sum_{x=1}^k P(t_{ges} = x) \cdot x$$

mit $k \in \mathbb{N}$, $k = \{0 \text{ bis } t_{gesamt,max}\}$ und $t_{gesamt,max} = t_{Entsch,max} + t_{Ueberm,max} + t_{Befehl,max}$.

Der überschlägig berechnete Erwartungswert für Dauer des Gesamtvorgang ergibt sich aus Summe der Erwartungswerte der einzelnen Vorgänge:

$$E_{ueberschl.}(t_{ges}) = \sum_{i=1}^j E(t_{Vorgangi})$$

5.4.3 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse

Die überschlägig und exakt berechneten Erwartungswerte für die Dauer des Gesamtvorgangs in Kombination verschiedener Parameter sind in Tabelle 5.4 zu finden, eine Auflistung der berechneten Werte der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für die einzelnen Parameterkombinationen ist Abschnitt E.3 zu entnehmen.

Betrachtet man die berechneten Werte, ergibt sich eine maximale Abweichung von $-/+ 0,3$ Minuten zwischen den überschlägig und exakt berechneten Erwartungswerten. Da die Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Verspätungsdaten im Minutenbereich angesiedelt ist, ist einer Verwendung der überschlägig berechneten Werte nichts entgegenzusetzen.

Jedoch ist zu beachten, dass – aufgrund der Streuung der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der einzelnen Vorgänge – auch die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Dauer des Gesamtvorgangs stark streut. Die Streuung der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Gesamtdauer wächst weiterhin umso stärker, je mehr sequenzielle Einzelvorgänge miteinander kombiniert werden. Aufgrund der starken Streuung der Werte (Standardabweichung σ) kann die Verwendung des Erwartungswertes für weitere Planungen nur als grobe Näherung verwendet werden, mit welcher ungefähr die Hälfte aller möglichen Realisierungen abgedeckt wird.

Da es sich bei der zur Modellierung verwendeten Verteilungsfunktion um Abschätzungen handelt, sind es die daraus abgeleiteten Werte ebenfalls. Jedoch können durch dieses Vorgehen zumindest Größenordnung, Wertebereich und Volatilität der Belegungszeitelemente grundlegend beschrieben werden.

Tabelle 5.4: Übersicht über Erwartungswerte und Standardabweichungen der Dauer der Gesamtvorgänge – alle Werte in Minuten

Parameterkombinationen	t_{Entsch}	Anzahl Befehle	$E_{ueberschl}$	E_{exakt}	$E_{ueberschl} - E_{exakt}$	σ
2 Vorgänge ($t_{Entsch} + t_{Ueberm}$)	10 Min	0	11,8	11,6	0,250	1,9
	15 Min	0	15,2	14,9	0,250	3,1
	20 Min	0	18,5	18,3	0,250	4,3
	25 Min	0	21,8	21,6	0,250	5,4
3 Vorgänge ($t_{Entsch} + t_{Ueberm} + t_{Befehl}$)	10 Min	3	21,6	21,3	0,252	10,0
		4	24,8	25,1	-0,250	11,2
		5	28,1	28,4	-0,283	12,3
	15 Min	3	21,6	24,7	0,252	15,7
		4	24,8	28,4	-0,250	17,2
		5	28,1	31,7	-0,239	18,5
	20 Min	3	24,9	28,0	0,250	22,3
		4	28,2	31,8	-0,250	24,1
		5	31,4	35,0	-0,212	25,6
	25 Min	3	31,6	31,3	0,250	29,5
		4	34,8	35,1	-0,250	31,6
		5	38,1	38,3	-0,245	33,3

5.5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

5.5.1 Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

Im vorliegenden Kapitel wurde erarbeitet, dass im Störfall zusätzlich zu den bekannten Belegungszeitelementen weitere hinzukommen. Dieses Wissen ist für eine richtige Berechnung der Gesamtbelegungszeit und damit des Belegungsgrads der Infrastruktur während der Einschwingphase und der stabilen Phase wichtig. Die zusätzlichen Belegungszeitelemente wurden identifiziert sowie ihre Dauern stochastisch beschrieben und quantifiziert.

In einem ersten Schritt wurden diese Belegungszeitelemente ausgehend von den im Störfall erforderlichen dispositiven und betrieblichen Handlungen systematisch zusammengetragen. In

einem zweiten Schritt erfolgte die Quantifizierung auf Basis von Expertenschätzungen und, soweit möglich, eigenen Zeitstudien. Da die Dauern der einzelnen Zeitanteile von verschiedenen störungsspezifischen Faktoren beeinflusst werden, wurden die Belegungszeitelemente weiterhin mithilfe von Verteilungsfunktionen beschrieben. Für die weitere, praxisnahe Verwendung der Erkenntnisse über die einzelnen Dauern, wurden in einem dritten Schritt die aus den Verteilungsfunktionen abgeleiteten Erwartungswerte als SFP-Planungswerte vorgeschlagen. Weiterhin wurde ein Vorgehen zur überschlägigen Quantifizierung der Dauer für den Gesamtvorgang, von Störungsbeginn bis die Information über die Ausrufung des Störfallprogramms bei allen Beteiligten angelangt ist, erarbeitet. Durch die situationspezifische Verwendung einzelner Belegungszeitelemente kann die Ermittlung der Gesamtdauer in Funktion des Störungseintritts, der angewandten SFP-Maßnahmen und des im Netz herrschenden Verkehrs abgeschätzt werden.

Die in diesem und den nachfolgenden Kapiteln erläuterten zusätzlichen Belegungszeitelemente finden, zusammen mit dem Teilmodell für veränderte Zugzahlen in der Einschwingphase (Kapitel 8), im Modell zur Berechnung des Belegungsgrads in der Ermittlungs-, Entscheidungs- und Einschwingphase Anwendung (siehe Kapitel 9).

5.5.2 Diskussion der Ergebnisse

Da die Dauern der zusätzlichen Belegungszeitelemente von verschiedenen störungsspezifischen Faktoren beeinflusst werden, wurde jeweils ein Vorschlag zur Abbildung dieser Elemente als stochastische Größen erarbeitet. Aufgrund fehlender empirischer Daten konnte jedoch fast ausschließlich nur mit Expertenschätzungen gearbeitet werden. Lediglich bei den Elementen „Nothalt“ und „Befehl schreiben“ war es möglich, diese Expertenschätzungen durch Selbstversuche und Arbeitsinhaltsanalysen zu untermauern. Trotzdem bilden die erarbeiteten Werte einen Anhaltspunkt für die präzisere Planung von Störfallprogrammen. Auch die stochastische Beschreibung der Größen erfolgte nur annäherungsweise durch einfache Rechteck- und Dreieckverteilungen. Von einer differenzierteren Beschreibung wurde aufgrund der fehlenden Daten abgesehen, da auch dies lediglich zu Scheingenauigkeiten geführt hätte. Aus dem gleichen Grund wurde eine Genauigkeit der Beschreibung auf Minutenbasis gewählt.

Zur Vereinfachung der Erstellung von Störfallprogrammen wurden Erwartungswerte für die jeweiligen Dauern der Belegungszeitelemente bestimmt. Durch eine Störfallprogrammerstellung auf Basis von Erwartungswerten wird den stochastischen Charakteristiken nur teilweise Rechnung getragen, was zu ungeplanten Verspätungen im Betrieb und damit gegebenenfalls zu einem Nichtfunktionieren des Störfallprogramms führen kann. Dies gilt für Fälle, in denen Dauern realisiert werden, deren Werte sich an den oberen Grenzen der Verteilungsfunktion befinden. Andererseits vereinfacht eine Störfallprogrammplanung auf Basis von Erwartungswerten den Berechnungsaufwand. Das durch die Verwendung von Erwartungswerten entstehende Risiko kann durch die Verwendung eines noch zu bestimmenden Superiorwertes gemindert werden.

Trotz der genannten Kritikpunkte kann festgestellt werden, dass im vorliegenden Kapitel ein erster Vorschlag zur Beschreibung der Dauern der veränderten und zusätzlichen Belegungszeitelemente im Störfallfall erarbeitet wurde. Mithilfe dieser, wenn auch groben, Beschreibungen ist bereits eine detailliertere Planung von Störfallprogrammen in jedem beliebigen Netz möglich. Dies ist aufgrund der einzelnen Belegungszeitelemente möglich, durch deren Kombination alle in Störungen möglichen betrieblichen und dispositiven Situationen abgebildet werden können. Weiterhin bildet die stochastische Beschreibung mithilfe von Verteilungsfunktionen der Größen die Grundlage zur Berücksichtigung dispositiver Vorgänge in Störfallsimulationen.



6 Veränderung von Wendezeiten in Störungen

6.1 Einleitung – Wendevorgänge in Störungssituationen

6.1.1 Motivation und Zielstellung

Die Ergebnisse der Betriebsdatenanalyse in Kapitel 4 legen nahe, dass sich die bei der Anwendung von Störfallprogrammen ergebende Auslastung der Infrastruktur von der des regulären Betriebsprogramms unterscheidet. Im vorangegangenen Kapitel 5 wurde bereits grundsätzlich erarbeitet, dass dafür zusätzliche Belegungszeitelemente im Störfall als Ursache in Frage kommen.

Der in Kapitel 4 identifizierte Hauptverspätungsgrund „Rückstau“ in Verbindung mit dem Hauptverspätungsort „Stammstrecke“ weist darauf hin, dass die Durchführung der vorzeitigen SFP-Wenden einen der Hauptverspätungsgründe darstellt. Weiterhin lässt der ebenfalls in Kapitel 4 identifizierte, häufig in den Netzaußenästen stattfindende, verspätete Fahrtbeginn auf Schwierigkeiten beim Verspätungsabbau durch Nutzung von Wendepuffern an den regulären Wendebahnhöfen schließen. Da Wenden aufgrund der hauptsächlich im Störfall verwendeten Dispositionsmaßnahme des Teilausfalls von Zügen oder Linien häufig vorkommen, wird im vorliegenden Kapitel speziell für die Dispositionsmaßnahme „Wenden“ erarbeitet, ob und inwiefern auch hier veränderte Belegungszeiten im Störfall bestehen und wie diese quantifiziert werden können.

Die Erörterung dieser Fragestellung ist in Bezug auf das Oberziel der Verbesserung von Störfallprogrammen relevant: Werden die SFP-Wenden unter unzutreffenden Annahmen geplant, können dabei Verspätungen entstehen, welche wiederum aufgrund von ungenügenden Wendepuffern in den Bahnhöfen der Außenäste auf die nachfolgende Zugfahrt übertragen würden. Unter diesen Umständen wäre ein Einschwingen des Störfallprogramms nicht oder nur sehr langsam gegeben. Da der Einsatz von SFP-Wenden eine zentrale Dispositionsmaßnahme von Störfallprogrammen darstellt, ist eine Kenntnis der verlängerten Belegungszeiten bei Wenden in Störungen unabdingbar.

Ziel der Ausarbeitungen des vorliegenden Kapitels ist die Verbesserung der Planungsgrundlage von Störfallprogrammen für die Dispositionsmaßnahmen „SFP-Wende“ und „reguläre Wende“, um mögliche Verspätungsursachen bei der Anwendung von Störfallprogrammen zu mindern und um dadurch eine Verkürzung der Dauer der Einschwingphase zu erreichen. Kerninhalt des vorliegenden Kapitels ist die Bearbeitung der Frage, ob und wie stark sich Wendedauern im Störfall von der geplanten technischen Mindestwendezeit unterscheiden und wie dieser Umstand bereits in der SFP-Planung berücksichtigt werden kann.

6.1.2 Problemstellung

Wie bereits beschrieben, lässt der in Kapitel 4 identifizierte Hauptverspätungsgrund „Rückstau“ in Verbindung mit dem Hauptverspätungsort „Stammstrecke“ darauf schließen, dass die Durchführung der SFP-Wenden einen der Hauptverspätungsgründe darstellt. Möglich ist hier eine

längere Wendedauer aufgrund zusätzlicher Handlungen von Disponenten und Triebfahrzeugführern im Störfall, welche wiederum zu einer längeren Belegungszeit im Störfall führt (siehe Kapitel 5). Diese Überlegungen legen weiterhin nahe, dass längere Wendedauern nur in Bahnhöfen auftreten, in denen vorzeitige Wenden durchgeführt werden. Dies ist beispielsweise möglich, da es sich bei SFP-Wenden um nicht alltägliche Vorgehensweisen in den betroffenen Bahnhöfen handelt. Daher werden folgende Vermutungen aufgestellt:

- Die im Betrieb realisierte Wendedauer ist während Störungen i. d. R. länger als die fahrzeug-spezifische technische Mindestwendezeit.
- Diese längere Wendedauer ist ortsbezogen, d. h. davon abhängig, ob es sich um eine Wende in einem regulären Wendebahnhof oder in einem SFP-Wendebahnhof handelt.

Es ist weiterhin denkbar, dass Wenden im Störfall länger dauern, weil beispielsweise die Kommunikation im Störfall nicht effizient gestaltet ist, oder weil Mitarbeiter nicht ausreichend geschult sind. Diese Gründe können jedoch durch entsprechende Prozessverbesserungen und Schulungen beseitigt werden, was nicht Gegenstand der vorliegenden Betrachtungen ist. Ist es jedoch grundsätzlich der Fall, dass die Wendedauer im Störfall signifikant von der, den Planungen zugrunde gelegten, technischen Mindestwendezeit abweicht, so entstehen bereits in der Störfallprogrammplanung systematische Verspätungen, welche ein schnelles Einschwingen be- oder verhindern. Trifft die Vermutung einer längeren Wendezeit im Störfall zu, so ist darüber nachzudenken, wie dieser Umstand direkt im Rahmen der Störfallprogrammplanung adressiert werden kann.

Ebenfalls fiel bei den Analysen in Kapitel 4 auf, dass 16 Prozent aller analysierten Zugfahrten verspätet begannen, wobei der Hauptanteil der verspäteten Fahrtbeginne im Störfall in regulären Wendebahnhöfen an den Netzen stattfand. Dieser Umstand entsprach nicht den Erwartungen: So wurde erwartet, dass Fahrten nach SFP-Wenden verspätet beginnen, jedoch nicht nach regulären Wenden. Verspätete Fahrtbeginne sind jedoch zu vermeiden, da Verspätungen, die bereits zu Fahrtbeginn bestehen, aufgrund begrenzter Fahrtzeitzuschläge selten im Verlauf einer Fahrt aufgeholt werden können.

Folgende Erklärungen sind für verspätete Fahrtbeginne an regulären Wendebahnhöfen im Störfall denkbar:

- Auch in regulären Wendebahnhöfen dauert der Wendevorgang in Störungen länger als die technische Mindestwendezeit, was zum Verspätungsaufbau in regulären Wendebahnhöfen führt.
- Die Ankunftsverspätung an regulären Wendebahnhöfen ist aufgrund der Dauer der SFP-Wenden in SFP-Wendebahnhöfen so hoch, dass die Wendepuffer im regulären Wendebahnhof nicht ausreichen und es dort zur Verspätungsübertragung kommt.
- Es findet eine Mischung aus Verspätungsaufbau und Verspätungsübertragung in den regulären Wendebahnhöfen statt.

Je nach Ursache für einen verspäteten Fahrtbeginn sind entsprechende Gegenmaßnahmen zu treffen. So sind bei einer Hauptverspätungsursache „Verspätungsübertragung“ die Wendepufferzeiten anzupassen und bei einer Hauptursache „Verspätungsaufbau“ vorrangig die realisierte Wendezeit und die für die längere Zeit verantwortlichen Prozesse beim Wenden zu untersuchen. Unter Beachtung der vorangehend aufgestellten ersten Vermutung, dass Wenden im Störfall vor allem in Bahnhöfen mit SFP-Wenden länger dauern, werden folgende weitere Vermutungen aufgestellt:

- Die Übertragung von Verspätungen ist einer der Hauptgründe für Anfangsverspätungen.
- Die Verspätungsübertragung erfolgt vorrangig bei Wenden an regulären Wendebahnhöfen.

6.1.3 Vorgehensweise

Zur Überprüfung der im vorangehenden Abschnitt aufgestellten Vermutungen zur längeren Wendezeit im Störfall und zur Verspätungsübertragung bei Wenden in regulären Wendebahnhöfen wird die Methode der Betriebsdatenanalyse gewählt. Hierzu werden wie in Kapitel 4 Betriebsdaten von S-Bahn Netzen, in denen Störfallprogramme eingesetzt werden, untersucht. Durch die Betriebsdatenanalyse wird es möglich, im realen Betrieb auftretende Ereignisse empirisch zu beschreiben und zu quantifizieren. Dadurch können die aufgestellten Vermutungen überprüft werden. Aufbauend auf die durch die Betriebsdatenanalyse gewonnenen Ergebnisse werden danach ein Erklärungsmodell entwickelt und Vorschläge abgeleitet, wie die Verspätungsgründe eingeschränkt oder beseitigt werden können.

Trifft die erste Vermutung zu, dass Wenden in Störungen länger als die technische Mindestwendezeit dauern, so ist im Hinblick auf ein funktionierendes Einschwingen die Frage zu klären, welche Dauer stattdessen in den Planungen angesetzt werden sollte. Zur Ermittlung des Wertes sind zwei grundsätzliche Vorgehensweisen denkbar: So ist es möglich – analog zum Vorgehen in Kapitel 5 – den Wendevorgang in Teilvorgänge zu zerlegen und deren Dauern so präzise wie möglich zu quantifizieren. Bei dieser Vorgehensweise besteht eine Vielzahl möglicher Fehlerquellen, welche durch die Notwendigkeit von Annahmen aufgrund fehlender Daten zu Inhalten und Dauern der einzelnen Teilvorgänge entstehen.

Da jedoch Betriebsdaten über die Wendezeiten im Störfall vorliegen, ist die zweite Vorgehensweise des direkten Ableitens eines Planungswertes aus den Betriebsdaten die in diesem Fall sinnvollere Möglichkeit. Anhand der zur Verfügung stehenden Wendedaten kann ermittelt werden, wie viel länger als die technische Mindestwendezeit eine Wende in Störungen dauert. Anhand dieses Wertes und der jeweiligen technischen Mindestwendezeit soll es möglich werden, einen Planungswert für die durchschnittliche Wendezeit in Störungen zu ermitteln.

Die dafür zu beschreibende Vorgehensweise sowie die Zuordnung der Inhalte zu den einzelnen Abschnitten dieses Kapitels ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

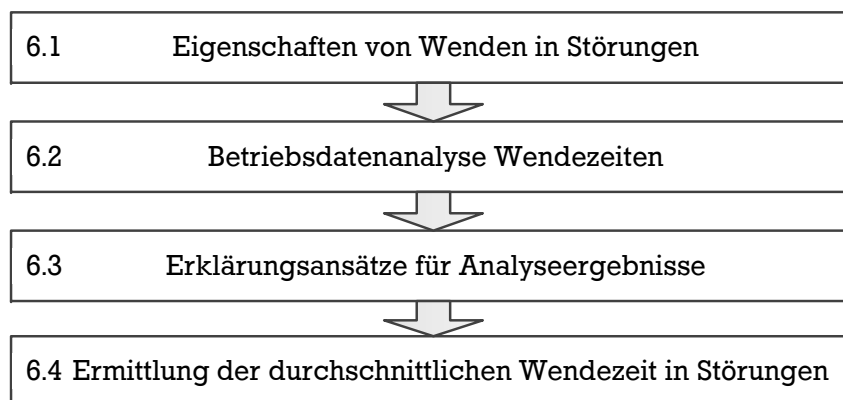


Abbildung 6.1: Vorgehen zur Erarbeitung eines Wertes für die durchschnittliche Wendedauer bei Störungen

6.2 Betriebsdatenanalyse

6.2.1 Analyseziel und verwendete Daten

Analyseziel

Anlass der Betriebsdatenanalyse ist die Ergründung spezieller Eigenschaften der Wendezeit im Kontext von Störungen. Die Überprüfung der aufgestellten Vermutungen bildet hierbei den Rahmen der Betrachtungen. Das Analyseziel besteht in der Erarbeitung von Aussagen zu quantitativen Eigenschaften der Wendezeiten sowie die Bestimmung der Ursachen für den verspäteten Beginn von Zugfahrten nach Wendungen. Ein weiteres Ziel ist die Beantwortung der Frage, ob ein Zusammenhang zwischen der Art der Wende (reguläre oder vorzeitige Wende) und der Wendedauer in Störungen sowie der Ursache für die Abfahrtsverspätung besteht.

Dazu sollen folgende Fragen beantwortet werden, welche sich aus den in Abschnitt 6.1 aufgestellten Vermutungen ergeben:

1. Wie stark weicht die Ist-Wendezeit im SFP-Fall von der technischen Mindestwendezeit ab?
2. Ist diese Abweichung von dem Ort der Wende abhängig?
3. Wie groß ist der Anteil von Verspätungsübertragungen als Ursache für verspätete Fahrtbeginne?
4. Ist die Ursache „Verspätungsübertragung“ von dem Ort der Wende abhängig?

Verwendete Daten

Bei den für die Analysen verwendeten Daten handelt es sich um LeiDis-Zuglaufmeldungen von Störungssituationen in S-Bahn Netzen, in denen Störfallprogramme zur Bewältigung von Störungen eingesetzt wurden. Hinsichtlich Herkunft, Art, Qualität und Aufbereitungsbedarf weisen sie dieselben Merkmale auf, wie die Daten, welche bereits in Abschnitt 4.3 beschrieben wurden. Auch hier wurden, soweit verfügbar, weiterführende und ergänzende Informationen zu den Störungen sowie Störungsmeldungen und Fahrgastinformation aus dem Reisendeninformationssystem zur Rekonstruktion des Betriebsablaufs verwendet, da keine Interviews mit diensthabenden Disponenten geführt werden konnten.

Insgesamt wurden für diese Aufgabe acht Störungen der Stadt Eins aus den Jahren 2011 bis 2013 sowie fünf Störungen der Stadt Drei aus dem Jahr 2012 analysiert. Eine Übersicht über die Störungen und die jeweilige Anzahl der zur Verfügung stehenden Datensätze ist in Tabelle 6.1 zu finden. Dabei ist zu beachten, dass die bereits in Abschnitt 4.3 beschriebenen Störungen der jeweiligen Städte ebenfalls in die vorliegende Analyse einbezogen wurden. Die Beschränkung der Analysen auf Daten der Städte Eins und Drei ist auf die große Anzahl der täglichen Fahrten in diesen Netzen – teilweise doppelt so viele tägliche Fahrten wie in den Netzen der Städte Zwei und Vier – zurückzuführen. So konnte mit der Analyse von verhältnismäßig wenigen Störungen trotzdem eine größere Grundgesamtheit an Daten erzielt werden.

Tabelle 6.1: Übersicht der in Bezug auf Wendezeiten analysierten Störfälle sowie der Größenordnung der zur Verfügung stehenden Datensätze (HVZ=Hauptverkehrszeit, NVZ=Nebenverkehrszeit, ZLM=Zuglaufmeldung)

ID	Jahr	Tageszeit	Störungsgrund	# ZLM	# Fahrten
Stadt	2011	HVZ	Personen im Gleis	ca. 15.500	338
Eins	2011	HVZ	Oberleitungsschaden	ca. 20.500	429
	2011	NVZ	Personenunfall	ca. 15.000	325
	2011	NVZ	Rauchentwicklung im Schienenbereich	ca. 15.500	318
	2012	HVZ	Personenunfall	ca. 9.000	235
	2012	NVZ	Weichenstörung	ca. 23.500	534
	2013	HVZ	Personenunfall	ca. 45.000	966
	2013	NVZ	Oberleitungsschaden	ca. 44.000	930
	Stadt	2012	NVZ	Bergung gefährlicher Gegenstand	ca. 33.500
Drei	2012	NVZ	Bergung gefährlicher Gegenstand	ca. 68.000	1139
	2012	NVZ	Oberleitungsschaden	ca. 65.000	1329
	2012	NVZ	Oberleitungsschaden	ca. 28.000	472
	2012	HVZ	Feuerwehreinsatz	ca. 38.000	663

„Konstruktion“ von Wende-Datensätzen

Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, bestehen die vorhandenen Datensätze der Zuglaufmeldungen unter anderem aus den Attributen Zugnummer, Name der Betriebsstelle, Soll-Zeit, Ist-Zeit, aktueller Verspätung sowie dem Fortschaltstatus. Zur Analyse von Wendevorgängen ist es notwendig zu wissen, welche endende Zugfahrt mit welcher Beginnenden zu einer Wende verknüpft ist. Da entsprechende Daten nicht für die Analysen zur Verfügung standen, war es notwendig, diese Verknüpfungen aus den vorhandenen Zuglaufmeldungen zu „konstruieren“.

Die Verknüpfung einzelner Zugfahrten zu Wendungen erfolgte mithilfe von SQL-Abfragen (siehe Anhang B) und unter anschließender Verwendung von Tabellenkalkulationsprogrammen. Der grundsätzliche Ablauf der Verknüpfungen gestaltete sich folgendermaßen:

1. Filtern der Zuglaufmeldungen mit einem Zeitstempel nach dem Zeitpunkt der Ausrufung des Störfallprogramms, welche einen Fortschaltstatus 1 (=Zugfahrt endet) bzw. Fortschaltstatus 2 (=Zugfahrt beginnt) aufweisen.
2. Ordnen dieser Datensätze nach Betriebsstelle, Gleis und Ist-Zeit, um eine zeitliche Abfolge der Vorgänge von Zugfahrenden und Zugfahrtbeginnen für jedes einzelne Gleis einer Betriebsstelle zu erhalten.
3. Halbautomatische Zuordnung der aufeinanderfolgenden Zugfahrenden und der Zugfahrtbeginne zu Wendungen für jedes Gleis.
4. Plausibilisierung der auf diese Weise zugeordneten Wendungen sowie Bereinigung der Fälle „Betriebsschluss zwischen Zugfahrende und Zugfahrtbeginn“ und „Zeitspanne von mehr als 90 Minuten zwischen Zugfahrende und Zugfahrtbeginn“.

Die Bereinigung der halbautomatisch zugeordneten Wendungen mit einer Zeitspanne von mehr als 90 Minuten zwischen Zugfahrende und Zugfahrtbeginn ist im vierten Schritt notwendig, da

Züge, die in die Abstellung fahren bzw. aus der Abstellung kommen, nicht in den Zuglaufmeldungen erfasst werden. Dieser Umstand kann dazu führen, dass ein Zug A auf einem Gleis endet und in die Abstellung rangiert wird, während direkt im Anschluss ein Zug B auf dasselbe Gleis aus der Abstellung rangiert wird und seine Fahrt beginnt. Im konstruierten Wendedatensatz sind davon nur Fahrtende Eins und Fahrtbeginn Zwei auf demselben Gleis hintereinander zu erkennen. Besteht also eine gewisse Dauer zwischen Zugfahrtende und Zugfahrtbeginn, so ist es aufgrund der „Konstruktion“ der Wendedatensätze im Nachhinein möglich, dass Wenden zugeordnet werden, die so nicht stattfanden. Um solche Fälle zu vermeiden, wurden Wendedatensätze mit einer Zeitspanne von mehr als 90 Minuten zwischen Zugfahrtende und Zugfahrtbeginn nicht weiter in die Analysen einbezogen.

Die Festlegung der Zeitspanne zur Bereinigung der Datensätze auf 90 Minuten zwischen Zugfahrtende und Zugfahrtbeginn mag arbiträr erscheinen. Sie erfolgte jedoch um oben beschriebene Fälle zu vermeiden, ohne dabei Wenden, welche aufgrund der Störungssituation erheblich länger dauern, sowie planmäßige „lange“ Wenden aus der Grundgesamtheit zu löschen. Insgesamt resultierte aus der beschriebenen Vorgehensweise eine Streichung von bis zu fünf Wendedatensätzen pro Störung, was die Grundgesamtheit nur wenig verringert.

Da es ebenfalls möglich ist, dass der Vorgang einer SFP-Wende im Störfall von den Disponenten nicht mit dem entsprechenden Fortschaltstatus Eins oder Zwei kodiert wird, wurden ergänzend die Zuglaufmeldungen von den Betriebsstellen mit im Störfallprogramm geplanten SFP-Wenden betrachtet. Hier wurden analog zur oben beschriebenen Vorgehensweise Zugfahrten zu Wenden verknüpft, wenn sich zwei aufeinanderfolgende Zugfahrten auf demselben Gleis in Ankunfts- und Abfahrtsrichtung unterschieden, jedoch keinen Fortschaltstatus Eins bzw. Zwei aufwiesen.

Das Ergebnis dieser „Konstruktion“ sind Datensätze mit den Attributen Wendebetriebsstelle, Soll-Ankunftszeit, Soll-Abfahrtszeit, Ist-Ankunftszeit, Ist-Abfahrtszeit, Ankunftsverspätung und Abfahrtsverspätung. Im bestehenden Fall konnten aus den zur Verfügung stehenden Zugfahrten 4.653 Wenden konstruiert werden, von denen nach Plausibilisierung 4.162 Wenden die Grundgesamtheit für die Analyse der Wendezeiten darstellen. Dabei kann ungefähr die Hälfte der Daten jeweils der Stadt Eins und der Stadt Drei zugeordnet werden.

6.2.2 Vorgehen Betriebsdatenanalyse

Beschränkung auf Wenden mit pünktlichem und verspätetem Fahrtbeginn

Da im Rahmen der Überprüfung der zweiten Vermutung Gründe für verspätet beginnende Zugfahrten erarbeitet werden sollen, erfolgt in diesem Zusammenhang nur eine Analyse der Wenden, bei denen die Abfahrtsverspätung größer als null Minuten ist – also pünktlich und verspätet beginnende Zugfahrten. Auch zur Überprüfung der ersten Vermutungen ist es zweckmäßig, nur Wenden mit pünktlich und verspätet beginnenden Zugfahrten zu betrachten. Grund dafür ist, dass sich die Planwendezeit aus der technischen Mindestwendezeit und einer Wendepufferzeit ergibt, welche gegebenenfalls einen Wert von null Minuten betragen kann.

Anhand der zur Verfügung stehenden Daten ist es jedoch im Nachhinein nicht möglich zu erkennen, ob zwischen Fertigstellung aller für die Abfahrt notwendigen Handlungen und Fahrtbeginn gewartet wurde oder nicht. Um eine Verfälschung des zu ermittelnden Wertes durch Einberechnung von planmäßigen Wendepuffern zu vermeiden, werden pauschal keine Wenden mit planmäßigem Fahrtbeginn betrachtet. Durch dieses Vorgehen wird zwar die Grundgesamtheit der analysierbaren Wenden verringert, was jedoch zu Gunsten einer höheren Aussagekraft der Ergebnisse in Kauf genommen wird.

Notwendigkeit der Differenzierung zwischen Wenden mit Verspätungsübertragung und -generierung

Die im Betrieb realisierte Ist-Wendezeit ergibt sich aus der Differenz von Ist-Abfahrtszeit und Ist-Ankunftszeit. Weiterhin beinhaltet die realisierte Ist-Wendezeit die Summe der technischen Mindestwendezeit, einer im Betrieb realisierten zusätzlichen Wendezeit und einer Wendepufferzeit, wobei die zusätzliche Wendezeit und die Wendepufferzeit gegebenenfalls Werte von null Minuten aufweisen können. Für die sich aus der Subtraktion von Ist-Wendezeit und technischer Mindestwendezeit ergebenden Differenz ist es im Nachhinein jedoch nicht möglich, eindeutig die Anteile von der im Betrieb realisierten zusätzlichen Wendezeit und einer ungenutzten Wendepufferzeit zu bestimmen. Werden jedoch Ist-Wendezeiten mit diesen (ungenutzten) Wendepufferzeiten in die Bestimmung der reinen Wendezeit im Störfall mit einbezogen, verfälscht dies das Ergebnis.

Geht man von einer geplanten technischen Mindestwendezeit für jede Wende aus, so ergeben sich bei pünktlich oder verspätet beginnenden Zügen (s. o.) folgende mögliche Konstellationen:

1. Die Ankunftszeit der ersten Zugfahrt reicht für die Mindestwendezeit und die planmäßige Abfahrt der zweiten Zugfahrt aus ($\text{Soll-Ab} - t_{\text{Wende,RIL}} < \text{Ist-An}$).
2. Die Ankunftszeit der ersten Zugfahrt reicht nicht für die Mindestwendezeit und die planmäßige Abfahrt der zweiten Zugfahrt aus ($\text{Soll-Ab} - t_{\text{Wende,RIL}} \geq \text{Ist-An}$).

Wird nun angenommen, dass bei Fahrten des zweiten Falls keine Wendepuffer mehr zur Verfügung stehen, kann die sich aus der Subtraktion von Ist-Wendezeit und technischer Mindestwendezeit ergebende Differenz vollständig der im Betrieb realisierten zusätzlichen Wendezeit zugerechnet werden. Auf Basis dieser Annahme werden keine Wenden mit verfälschenden (ungenutzten) Wendepuffern in die Analysen einbezogen, wenn nur Wenden analysiert werden, deren Fahrten nicht plan (also pünktlich oder verspätet) beginnen und deren Ankunftszeit nicht für die Mindestwendezeit und die planmäßige Abfahrt der zweiten Zugfahrt ausreichen.

Diese oben beschriebene Vorgehensweise ist auch im Hinblick auf die Prüfung der zweiten Vermutung konsistent. So kann es für den verspäteten Beginn einer Zugfahrt nach einer Wende folgende allgemeine Gründe geben:

1. Verspätungsübertragung,
2. Generierung von Zusatzverspätungen oder
3. Kombination von Verspätungsübertragung und Generierung von Zusatzverspätungen.

Eine reine Übertragung der Verspätung der ersten Zugfahrt im Wendebahnhof auf die zweite Zugfahrt (Fall 1) entsteht, wenn die erste Zugfahrt mit großer Verspätung endet, die geplante technische Mindestwendezeit eingehalten bzw. unterboten wird, jedoch die planmäßigen Wendepuffer nicht für einen pünktlichen Beginn der darauffolgenden zweiten Fahrt ausreichen. Die Generierung von Zusatzverspätungen (Fall 2) entsteht, wenn die erste Zugfahrt verspätet endet, die planmäßigen Wendepuffer theoretisch für einen pünktlichen Beginn der darauffolgenden zweiten Fahrt ausreichen, jedoch die Wende länger als die geplante technische Mindestwendezeit dauert. Eine Kombination von Verspätungsübertragung und Generierung von Zusatzverspätungen (Fall 3) entsteht, wenn die erste Zugfahrt mit großer Verspätung endet, sodass die planmäßigen Wendepuffer nicht für einen pünktlichen Beginn der darauffolgenden Fahrt ausreichen. Weiterhin dauert die Wende länger als die eingeplante technische Mindestwendezeit. Die Verspätung der ersten Zugfahrt wird im Wendebahnhof auf die zweite Zugfahrt übertragen, wobei die zweite Zugfahrt weiterhin eine Zusatzverspätung erfährt.

Zur Quantifizierung der tatsächlich realisierten Wendezeiten sowie der Wenden, bei denen eine reine Verspätungsübertragung stattfindet, ist eine Trennung von Wenden, bei denen nur Verspätungen generiert werden bzw. bei denen eine Verspätungsübertragung und -generierung stattfindet, notwendig. Der grundsätzliche Ablauf dieser Differenzierung ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Nach dem Vorgang der Differenzierung ist eine Quantifizierung der Wenden, welche die unterschiedlichen Attribute aufweisen, möglich.

Zur Durchführung der Differenzierung werden folgende Attribute benötigt:

- Abfahrtsverspätung
- Soll-Abfahrtszeit, Ist-Abfahrtszeit und Ist-Ankunftszeit
- Ist-Wendezeit ($t_{Wende,Ist}$)
- geplante Mindestwendezeit ($t_{Wende,RIL}$)
- planmäßige Abfahrt bei geplanter Mindestwendezeit möglich (Ja/Nein)

Während die Werte für Abfahrtsverspätung, Soll-Abfahrtszeit, Ist-Abfahrtszeit und Ist-Ankunftszeit direkt aus den vorhandenen Zuglaufmeldungen entnommen werden können, sind alle anderen Attribute zu berechnen. In den folgenden Ausführungen werden die jeweiligen Berechnungsvorgänge erläutert.

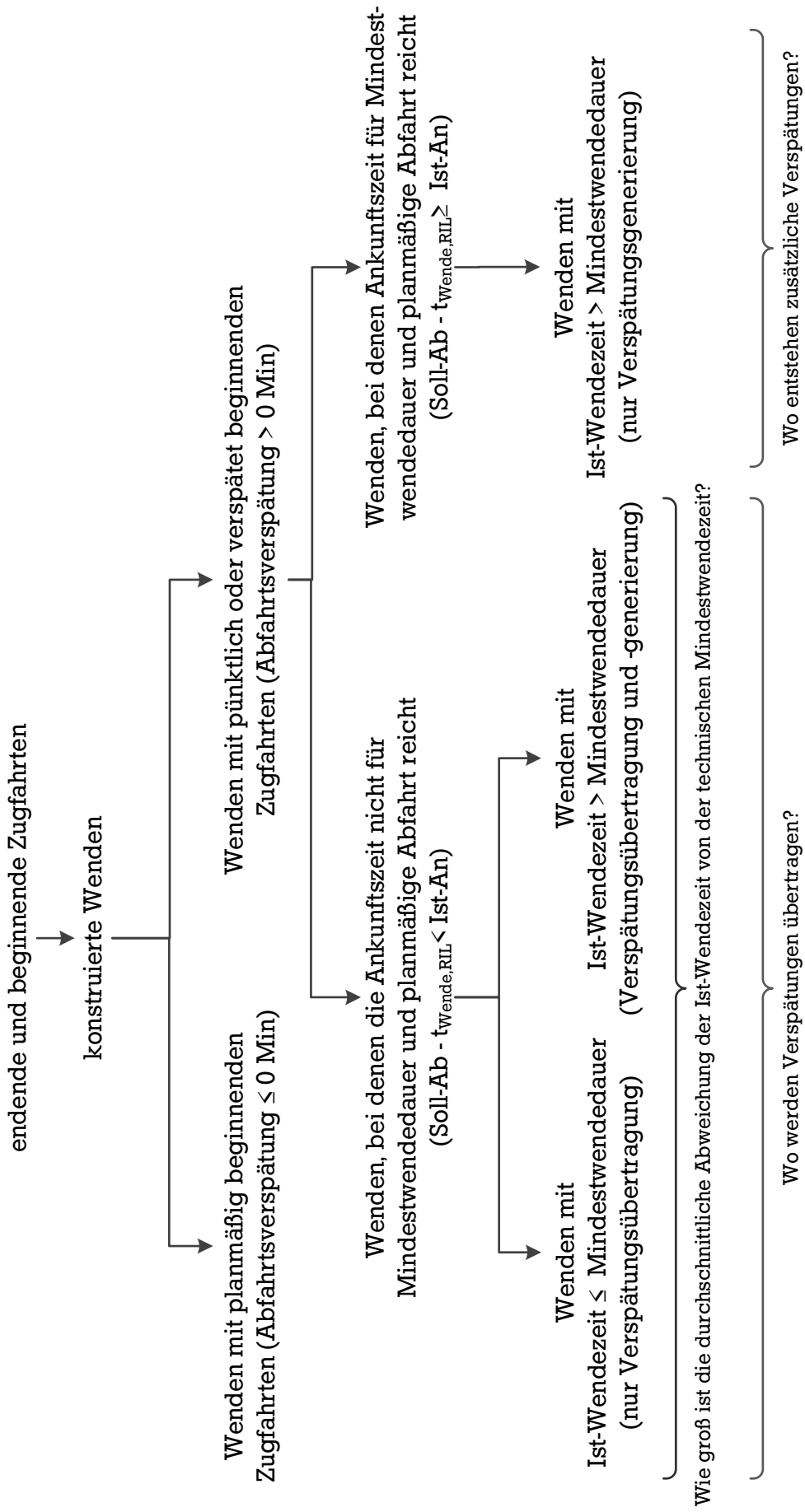


Abbildung 6.2: Unterteilung der vorhandenen Datensätze zur Überprüfung der Vermutungen

Berechnung des Attributs „Ist-Wendezeit“

Die Ist-Wendezeit $t_{Wende,Ist}$ ergibt sich aus der Subtraktion von Ist-Abfahrtszeit und Ist-Ankunftszeit und wird in Minuten gemessen:

$$t_{Wende,Ist} = Ist_{Ab} - Ist_{An}.$$

Ermittlung der geplanten technischen Mindestwendezeit

Da die zu analysierenden Wendedatensätze aus Zuglaufmeldungen konstruiert wurden, ist außer der sich rechnerisch ergebenden Planwendezeit keine Information über die dem Fahrplan zugrunde gelegte technische Mindestwendezeit verfügbar. Dementsprechend ist auch hier eine nachträgliche Zuordnung der geplanten technischen Mindestwendezeit notwendig.

Die technische Mindestwendezeit ist baureihenspezifisch und hängt von der Konfiguration des eingesetzten Zuges (Kurzzug, Vollzug und Langzug) sowie der Anzahl der für den Wendevorgang eingesetzten Triebfahrzeugführer ab (alleinige Durchführung einer Wende oder paralleles Arbeiten von zwei Triebfahrzeugführern, siehe Kapitel 2).

Im vorliegenden Fall verkehren in beiden S-Bahn Netzen Züge der gleichen Baureihe in unterschiedlichen Zusammensetzungen mit einer unterschiedlichen Anzahl der für den Wendevorgang eingesetzten Triebfahrzeugführer. Da keine zugnummerngenauen Daten über die Zusammensetzung der Züge und die Anzahl der für den Wendevorgang eingesetzten Triebfahrzeugführer zur Verfügung standen, wurde die mit großer Wahrscheinlichkeit geplante technische Mindestwendezeit für jedes System anhand von jeweils geltenden systemspezifischen (z. B. „reicht die im Fahrplan vorgesehene Wende nicht für eine Wende mit einem Tf aus, so werden grundsätzlich zwei Tf eingesetzt“) und ortsspezifischen Regeln (z. B. „bei Betriebsstelle XY werden nur Wenden mit zwei Tf durchgeführt“) zugeordnet.

Die Zuordnung der geplanten technischen Mindestwendezeit ergab, dass von den sich aus den möglichen Zugkonfigurationen und der Anzahl der für den Wendevorgang eingesetzten Triebfahrzeugführern ergebenden Kombinationsmöglichkeiten, in beiden Netzen zwei Kombinationen besonders häufig auftreten: So werden in beiden Städten fast ausschließlich Langzüge verwendet, welche entweder durch einen oder zwei Triebfahrzeugführer gewendet werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass Wenden mit zwei Triebfahrzeugführern vorrangig in Stadt Drei auftreten.

Da in den vorhandenen Betriebsdaten zu wenige Fälle der anderen Kombinationen auftreten¹, werden in den nachfolgenden Betrachtungen nur die Fälle „Langzug, 1 Tf“ ($t_{Wende,RIL,1Tf}$) und „Langzug, 2 Tf“ ($t_{Wende,RIL,2Tf}$) betrachtet, wobei $t_{Wende,RIL,1Tf} = 6$ Minuten und $t_{Wende,RIL,2Tf} = 2$ Minuten gilt.

Berechnung des Attributs „planmäßige Abfahrt bei geplanter Mindestwendezeit“

Um die zur Überprüfung der zweiten Vermutung notwendige Differenzierung zwischen Wenden mit Verspätungsübertragung und/oder Verspätungsaufbau durchzuführen, ist es notwendig zu prüfen, ob die (verspätete) Ankunft der ersten Zugfahrt ausreicht, damit die zweite Zugfahrt bei einer Realisierung der geplanten technischen Mindestwendezeit planmäßig abfahren kann.

¹ In nur 43 von 4162 Fällen werden Kurz- bzw. Vollzüge gewendet.

Im ersten Fall mit

$$\text{Soll-Ab} - t_{\text{Wende,RIL}} \geq \text{Ist-An}$$

reicht die Ankunftszeit des ersten Zuges aus, um eine planmäßige Abfahrt bei geplanter Mindestwendezeit zu ermöglichen. Hier findet – vorausgesetzt, die geplante Wendeart wird beibehalten – in jedem Fall ein Verspätungszuwachs statt.

Im zweiten Fall mit

$$\text{Soll-Ab} - t_{\text{Wende,RIL}} < \text{Ist-An}$$

reicht die Ankunftszeit des ersten Zuges in keinem Fall aus, um eine planmäßige Abfahrt bei geplanter Mindestwendezeit zu ermöglichen. Hier findet also in jedem Fall eine Verspätungsübertragung statt.

Berechnung der abweichenden Wendezeit in der Störung $t_{\text{Wende,X}}$

Da je nach Baureihe der eingesetzten Fahrzeuge und nach Prozessgestaltung unterschiedliche Mindestwendezeiten möglich sind, ist es nicht zielführend, mit der reinen Ist-Dauer eines Wendevorgangs zu arbeiten. Für eine allgemeingültige Vorgehensweise sowie zur Überprüfung, ob die Wendezeit auch von der Art der Durchführung des Vorgangs (ein oder zwei Triebfahrzeugführer) abhängt, wird mit der von der geplanten technischen Mindestwendezeit abweichenden Wendezeit in der Störung gearbeitet.

Die Berechnung der von der geplanten technischen Mindestwendezeit abweichenden Wendezeit in der Störung ergibt sich aus

$$t_{\text{Wende,X}} = t_{\text{Wende,Ist}} - t_{\text{Wende,RIL}}$$

Im vorliegenden Fall wird mit den geplanten technischen Mindestwendezeiten $t_{\text{Wende,RIL,1Tf}} = 6$ Minuten und $t_{\text{Wende,RIL,2Tf}} = 2$ Minuten gearbeitet.

Betrachtung des Ortsbezugs von Wendezeiten

Um zu überprüfen, ob ein Zusammenhang zwischen der Wendezeit in Störungen und der Art der Wende (regulär oder vorzeitig) besteht, wird überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen der Wendezeit in Störungen und dem Ort, an dem die Wende ausgeführt wird, besteht: Findet die Wende an einem regulären Wendebahnhof am Netzende statt, so ist davon auszugehen, dass es sich um eine regulär durchgeführte Wende handelt. Findet die Wende in einem Bahnhof in der Netzmitte in der Nähe der Störung statt, so kann daraus geschlossen werden, dass es sich bei der Wende um eine vorzeitige Wende im Rahmen eines Störfallprogramms handelt.

So wird für jeden Bahnhof, für den Wendedatensätze vorliegen, der Mittelwert der abweichenden Wendezeit in der Störung $MW(t_{\text{Wende,X}})$ berechnet. Anschließend werden die Bahnhöfe danach eingeteilt, ob es sich um einen regulären Wendebahnhof, einen Bahnhof für den im Störfallprogramm vorzeitige Wenden vorgesehen sind und um einen Bahnhof der keiner der beiden letzteren Kategorien zuordenbar ist, handelt (siehe auch Abschnitt 4.3.3).

6.2.3 Ergebnisse der Betriebsdatenanalyse

Von der technischen Mindestwendezeit abweichende Wendezeit in Störungen

Um die postulierte in Störungen längere Wendezeit zu ergründen, wurde für jede Wende die Abweichung $t_{Wende,X}$ der Ist-Wendezeit $t_{Wende,ist}$ von der technischen Mindestwendezeit $t_{Wende,Ril}$ berechnet und die Werte für jede Wendeart (Wende Langzug mit einem Triebfahrzeugführer und Wende Langzug mit zwei Triebfahrzeugführern) in einem Histogramm abgetragen. Diese sind in Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4 zu sehen. Hierbei ist zu beachten, dass die Werte beider Städte kumuliert dargestellt wurden, da eine nach Städten getrennte Darstellung der Werte für Wendungen mit einem Triebfahrzeugführer keinen signifikanten Unterschied aufwies. Wendungen, welche durch zwei Triebfahrzeugführer erfolgen, treten vorrangig in Stadt Drei auf, weshalb auch hier auf eine nach Städten getrennte Darstellung verzichtet wird.

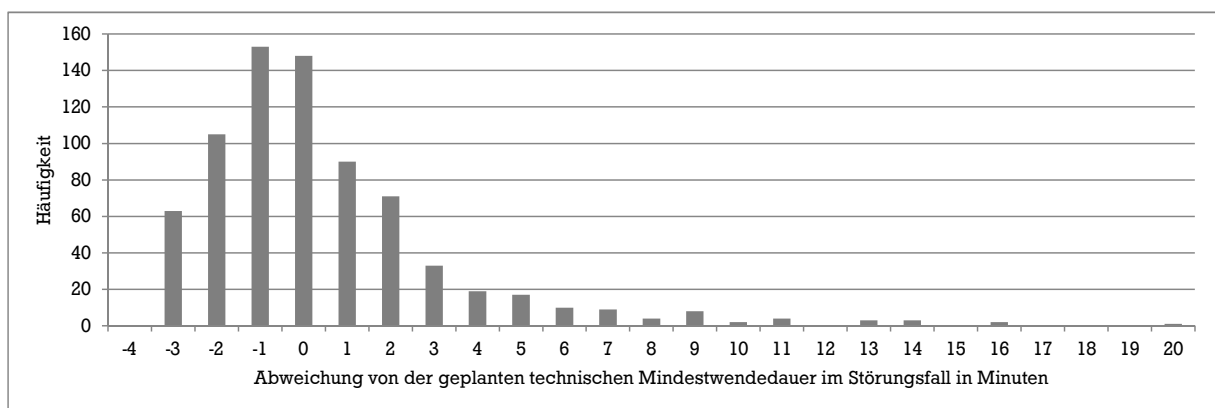


Abbildung 6.3: Verteilung der Abweichungen $t_{Wende,X}$ von der geplanten technischen Mindestwendezeit für die Städte 1 und 3 – Wendungen mit einem Triebfahrzeugführer

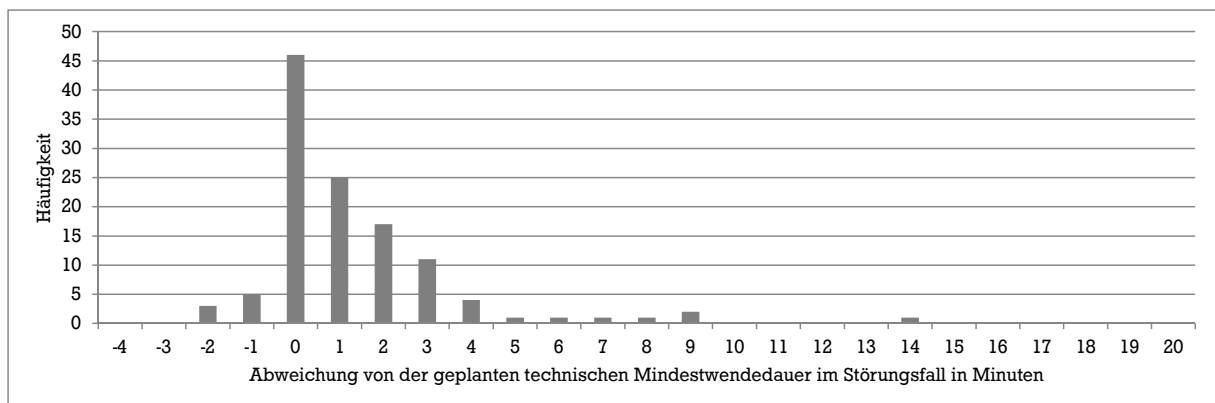


Abbildung 6.4: Verteilung der Abweichungen $t_{Wende,X}$ von der geplanten technischen Mindestwendezeit für die Städte 1 und 3 – Wendungen mit zwei Triebfahrzeugführern

Betrachtet man die sich aus den zusätzlichen Wendezeiten ergebenden Histogramme, so fällt auf, dass sie sich für die jeweiligen Wendearten sowohl hinsichtlich der Streuung der Werte als auch in der Form der Verteilung unterscheiden: Während das Histogramm für Wendungen mit einem Triebfahrzeugführer im Intervall von -3 bis 3 Minuten eine Gauss-förmige Verteilung aufweist, zeigen sich für Wendungen mit zwei Triebfahrzeugführern kaum negative Abweichungen sowie eine sehr häufige Deckung der realisierten Wendezeit mit der technischen Mindestwendezeit. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die technische Mindestwendezeit für

Wenden mit zwei Triebfahrzeugführern zwei Minuten beträgt – hier ist es relativ unwahrscheinlich, dass der Prozess im Ernstfall wesentlich beschleunigt werden kann. Für Wenden mit einem Triebfahrzeugführer beträgt die technische Mindestwendezeit hingegen das Dreifache – hier sind Prozessbeschleunigungen viel wahrscheinlicher.

Zu beachten ist, dass sich die Wendezeiten aus Subtraktionen von in LeiDis nur minutengenau erfassten Ankunfts- und Abfahrtszeiten ergeben, welches zu folgenden Ungenauigkeiten führt: So kann eine Wendezeit von zwei Minuten beispielsweise aus einer Ankunftszeit von 21:53:05 Uhr und einer Abfahrtszeit von 21:55:58 Uhr (173 Sekunden) oder aus einer Ankunftszeit von 21:53:01 Uhr und einer Abfahrtszeit von 21:54:58 Uhr (117 Sekunden) entstehen. Dementsprechend sind Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der zusätzlichen Wendedauer in Störungen $t_{Wende,X}$ sowie Wenden von null Minuten „Dauer“ möglich.

Wie in Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4 zu sehen ist, können Wenden im Störfall sowohl länger als auch kürzer als die vorgesehene technische Mindestwendezeit dauern. Betrachtet man die sich aus den Werten ergebende statistische Kenngröße des Erwartungswertes der zusätzlichen Wendezeit in Störungen (siehe Tabelle 6.2), ist diese positiv. Dies beweist, dass i. d. R. ein positiver Zuschlag auf die technische Mindestwendezeit zu addieren ist. Da die statistische Kenngröße der Standardabweichung der zusätzlichen Wendezeit in Störungen sehr groß ist, sind dementsprechend kürzere Wendezeiten ebenfalls möglich. Damit kann die Vermutung „Die im Betrieb realisierte Wendezeit ist in Störungen i. d. R. länger als die fahrzeugspezifische technische Mindestwendezeit.“ bestätigt werden.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Wendezeitenanalyse im Störfall nach Wendart

	$E(t_{Wende,X})$	$E(t_{Wende,Ist})$	$\sigma_{t_{Wende,X}}$
Wenden mit einem Triebfahrzeugführer	0,56 Min	6,51 Min	3,31 Min
Wenden mit zwei Triebfahrzeugführern	1,31 Min	3,31 Min	2,26 Min

Ortsbezug der abweichenden Wendezeiten in Störungen

Kategorisiert man die Mittelwerte der zusätzlichen Wendezeiten danach, ob sie an einem regulären Wendebahnhof oder an einem SFP-Wendebahnhof stattfanden (siehe Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6), so lässt sich keine Regelmäßigkeit in Bezug auf den Wendort ausmachen. Ein möglicher Grund dafür kann in der geringen Anzahl an Wendedaten je einzelnen Bahnhof bestehen. Die anonymisierten Werte für die einzelnen Bahnhöfe sind in Anhang F zu finden.

Damit kann die Vermutung „Diese längere Wendedauer ist ortsbezogen.“ nicht bestätigt werden. Aufgrund der geringen statistischen Signifikanz der Anzahl der Werte ist jedoch ein Widerlegen der Vermutung ebenfalls nicht angebracht.

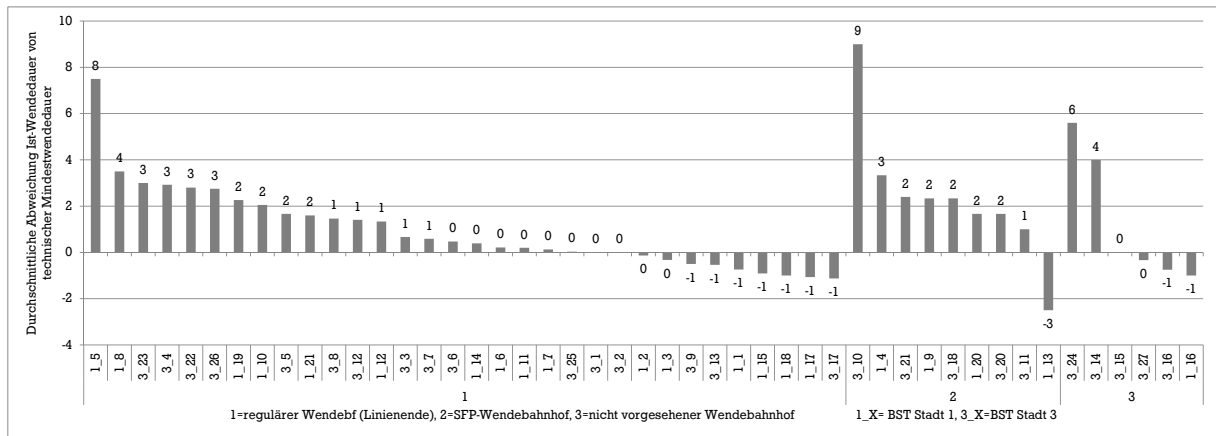


Abbildung 6.5: Bahnhöfe an denen Abweichungen von der technischen Mindestwendezeit auftreten – geordnet nach Typ, für Wenden mit einem Triebfahrzeugführer (Städte 1 und 3)

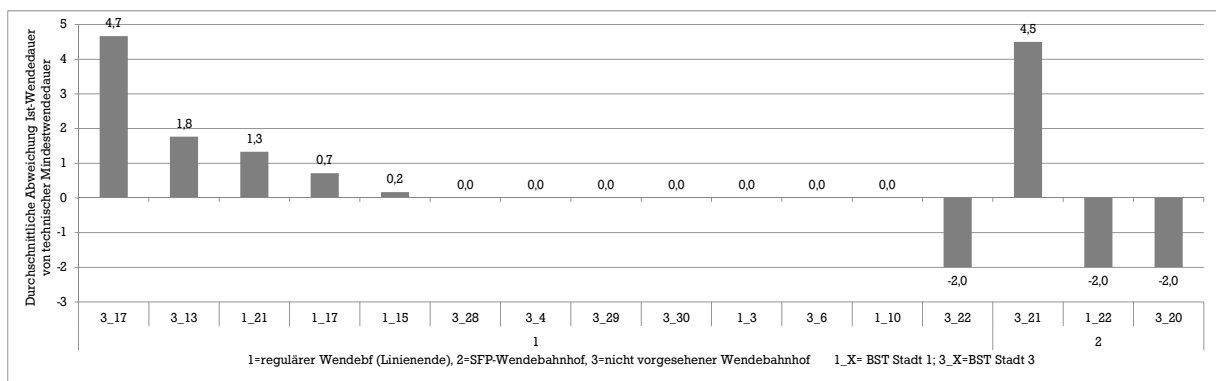


Abbildung 6.6: Bahnhöfe an denen Abweichungen von der technischen Mindestwendezeit auftreten – geordnet nach Typ, für Wenden mit zwei Triebfahrzeugführern (Städte 1 und 3)

Verspätungsübertragung und Verspätungsentstehung bei Wenden

Wie in Abschnitt 6.2.2 dargestellt, ist zur Untersuchung eines möglichen Zusammenhangs zwischen dem Auftreten von Verspätungsentstehung und -übertragung in Störungen unter anderem eine Unterteilung der analysierten Wenden in Gruppen mit unterschiedlichen Attributen notwendig. Die jeweiligen absoluten und relativen Häufigkeiten für jeden Fall sind in Abbildung 6.7 dargestellt.

Bei ungefähr der Hälfte aller Wenden, deren Fahrten mit einer Abfahrtsverspätung von über null Minuten beginnen, erfolgt eine Verspätungsübertragung. Jedoch beinhaltet diese Gruppe Wenden, bei denen Verspätungen von einer Zugfahrt auf die andere übertragen und gleichzeitig weitere Verspätungen aufgebaut werden. Rechnet man die Anzahl der Werte dieser Gruppe heraus, so ist eine reine Verspätungsübertragung in $(55\% \cdot 60\%) \approx 33\%$ der Fälle der Grund für nichtplanmäßige Fahrtbeginne. Damit kann die Vermutung „Die Übertragung von Verspätungen ist einer der Hauptverspätungsgründe.“ nicht bestätigt werden. Sie ist ein Verspätungsgrund, aber nicht der Hauptverspätungsgrund.

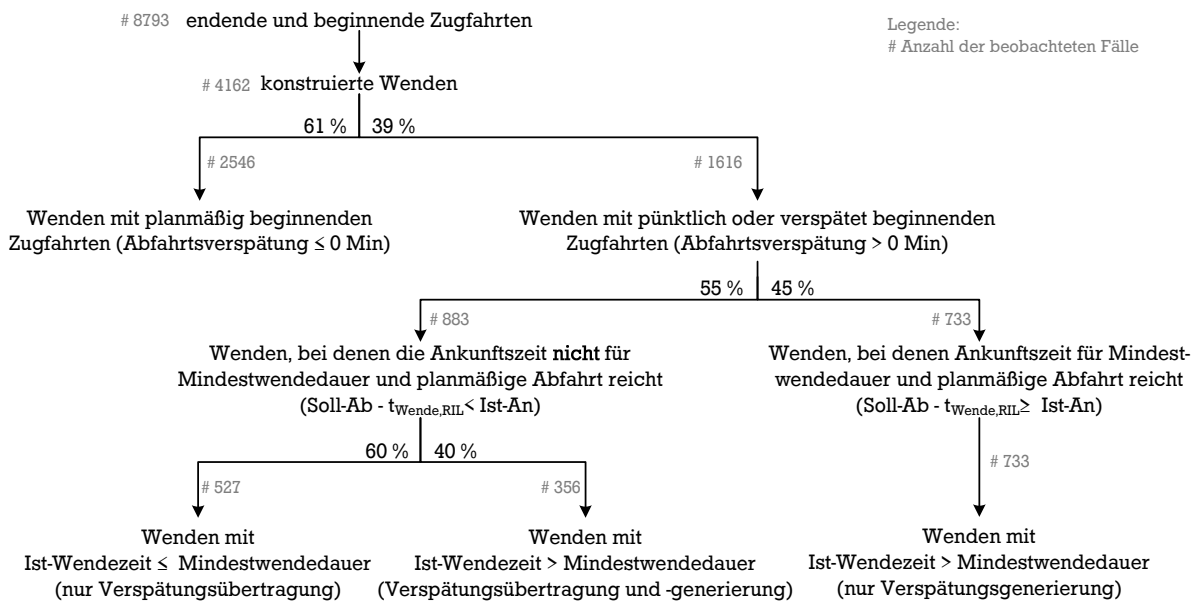


Abbildung 6.7: Überblick über die Analyseergebnisse

Ortsbezug der Verspätungsübertragung bei Wenden

Betrachtet man die Verteilung der Gründe für einen verspäteten Fahrtbeginn „reine Verspätungsübertragung“, „reine Verspätungsgenerierung“ sowie „Verspätungsübertragung und -generierung“ pro Bahnhofstyp, ergibt sich ein differenzierteres Bild über die Bedeutung der Verspätungsübertragung. Dabei lassen sich alle Aussagen für beide Städte Eins und Drei verallgemeinern.

In regulären Wendebahnhöfen (siehe Abbildung 6.8) sind die Anteile der verschiedenen Gründe in etwa gleichmäßig verteilt, wobei der Anteil der Verspätungsgenerierung etwas höher ist als die zwei anderen Anteile. In SFP-Wendebahnhöfen (siehe Abbildung 6.9) und in nicht als Wendebahnhöfen vorgesehenen Bahnhöfen (siehe Abbildung 6.10) kann die reine Verspätungsgenerierung deutlich als Hauptverspätungsursache identifiziert werden. Die den Auswertungen zugrunde liegenden Wertetabellen können Abschnitt F.3 entnommen werden.

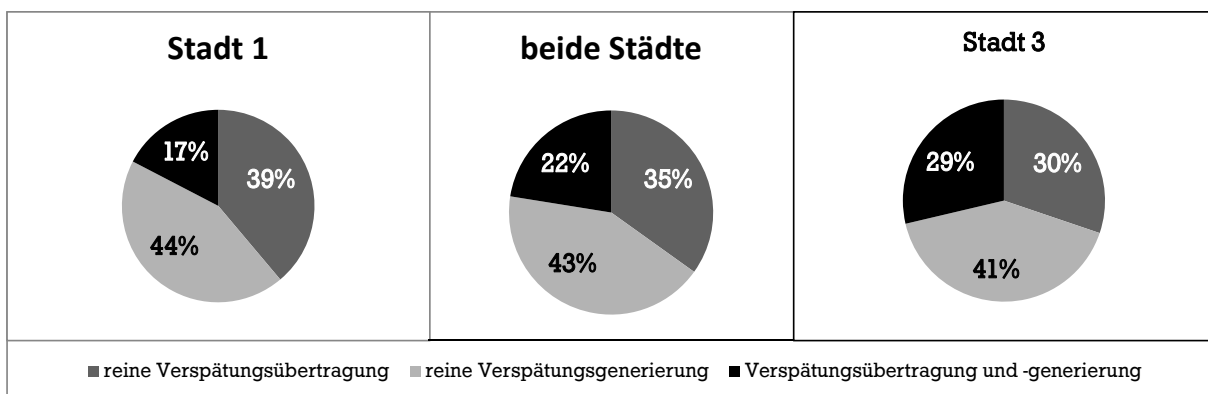


Abbildung 6.8: Anteile der Gründe für verspäteten Fahrtbeginn in regulären Wendebahnhöfen

Damit kann die Vermutung „Die Verspätungsübertragung erfolgt vorrangig bei Wenden an regulären Wendebahnhöfen.“ bestätigt werden.

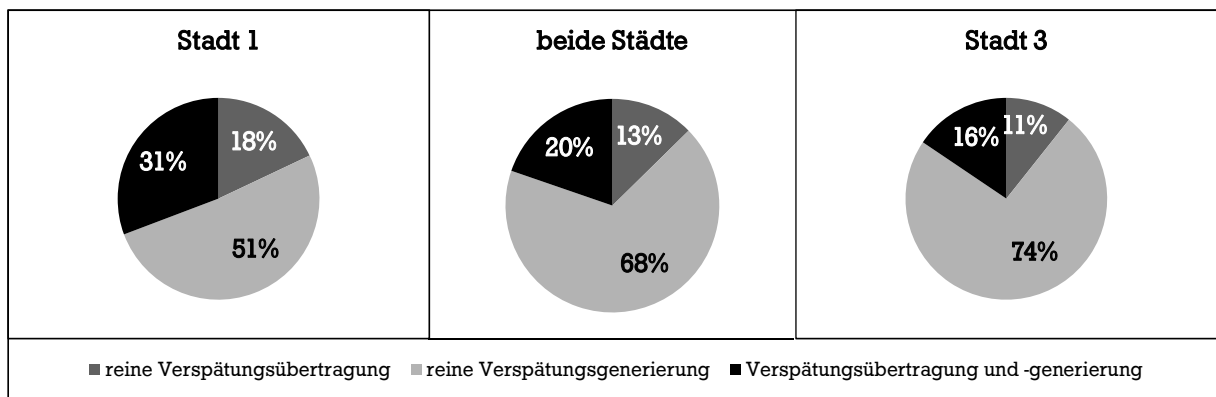


Abbildung 6.9: Anteile der Gründe für verspäteten Fahrtbeginn in SFP-Wendebahnhöfen

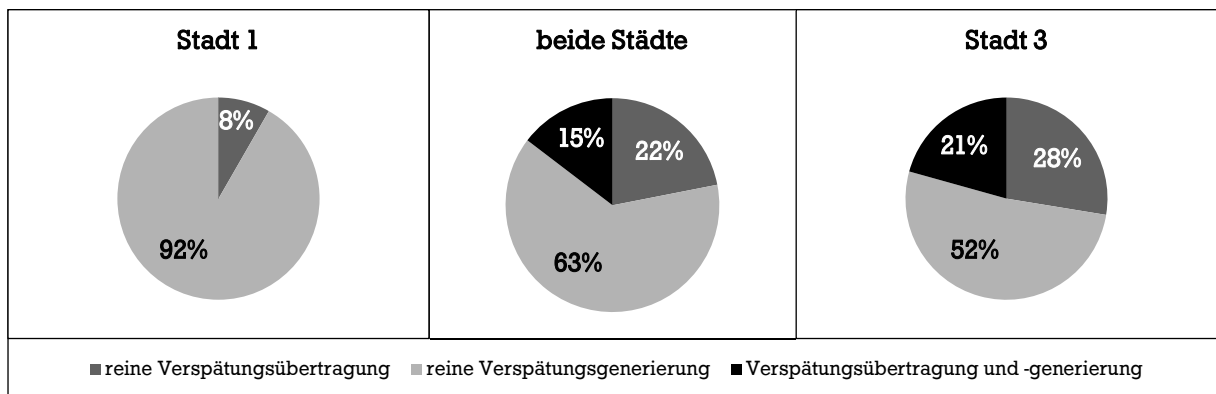


Abbildung 6.10: Anteile der Gründe für verspäteten Fahrtbeginn in nicht als Wendebahnhöfen vorgesehenen Bahnhöfen

Schlussfolgerungen

Mithilfe der Betriebsdatenanalyse konnte bestätigt werden, dass Wenden in Störungen nicht genauso lange, wie die eingeplante technische Mindestwendezeit dauern. Sie können kürzer oder länger als der geplante Wert sein. In der Regel dauern die Wenden in der Störung länger – dies ist am Erwartungswert von 6,56 Minuten für Wenden mit einem Triebfahrzeugführer und am Erwartungswert von 2,26 Minuten für Wenden mit zwei Triebfahrzeugführern zu erkennen, welche anhand der Ergebnisse der Analyse der Wendedauern berechnet werden konnten.

Weiterhin wurde zu Beginn der Analyse davon ausgegangen, dass diese längeren Wenden im Störfall vorrangig an SFP-Wendebahnhöfen und an nicht zur Wende vorgesehenen Bahnhöfen stattfinden und dass die so entstandenen Verspätungen nicht an den regulären Wendebahnhöfen abgebaut werden können. Die Ergebnisse der Analyse bestätigen diese Annahme. Jedoch zeigen die Analyseergebnisse auch, dass an regulären Wendebahnhöfen im Störfall nicht nur Verspätungen übertragen sondern bei rund einem Drittel der Fälle auch zusätzliche Verspätungen entstehen. Dies ist mit den Ergebnissen der allgemein längeren Wendedauer in Störungen kohärent.

Dauern die Wenden im Störfall jedoch i. d. R. länger als in den Planungen zugrunde gelegt, so hat dies zur Folge, dass die in der Störung entstehenden Verspätungen nicht oder nur teilweise abgebaut werden können. Das hat wiederum zur Folge, dass sich in einem Störfallprogramm gar nicht oder nur sehr langsam Pünktlichkeit einstellen kann.

Zur Lösung dieses Problems stehen grundsätzlich zwei Ansätze zur Verfügung. So kann man zum einen danach streben, durch Prozessverbesserungen die Schwankungen der Dauer zu verringern. Zum anderen besteht die Möglichkeit, die nachgewiesene mögliche längere Wendezeit in die Planungen mit einzubeziehen.

6.3 Ursachen für veränderte Wendezeiten in Störungen

Nachdem durch die Betriebsdatenanalyse nachgewiesen wurde, dass die Wendezeit in Störungen von der, den SFP-Planungen zugrunde liegenden, technischen Mindestwendezeit abweichen kann, sind die Gründe für diese Abweichungen zu betrachten, um mögliche Gegenmaßnahmen entwickeln zu können.

Im Allgemeinen liegen die Gründe für längere Prozessdauern in schlecht funktionierenden Abläufen, einer unzureichenden Ressourcenlage und/oder in umständlichen Kommunikationsprozessen. Betrachtet man jedoch die Fälle von Wenden, bei denen die Ankunftszeit nicht für die technische Mindestwendezeit und eine planmäßige Abfahrt ausreichen, so kann in den vorliegenden Fällen davon ausgegangen werden, dass alle betroffenen Mitarbeiter bemüht waren, die Wenden so schnell wie möglich durchzuführen.

Jedoch auch bei ausreichender Ressourcenlage und hoher Mitarbeitermotivation können sich Prozesse im Störfall verlängern. Dafür sind grundsätzlich viele verschiedene Ursachen denkbar, welche systematisch zusammengetragen und in Tabelle 6.3 dargestellt werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass SFP-Wenden länger dauern können, da die Situation der SFP-Wende Handlungen erfordert, welche von den alltäglichen Handlungen der Triebfahrzeugführer, Disponenten und Fahrdienstleiter abweicht. Aufgrund der ungewohnten Situation kann es beispielsweise zu Rückfragen kommen, wodurch der Wendevorgang an sich verzögert wird. Auch die in der Störung notwendigen Dispositionsentscheidungen oder SFP-Maßnahmen verändern das Umfeld und damit die Bedingungen unter denen die Prozesse ablaufen: So können andere Fahrwege und Abläufe wie bspw. der Halt an anderen Bahnsteigen technisch bedingt zu Prozessverlängerungen führen. Ebenso ist es z. B. aufgrund von Zugausfällen möglich, dass sich mehr Fahrgäste als üblich an einem Bahnsteig befinden, was wiederum zu längeren Fahrgastwechselzeiten des nächsten an dem Bahnhof haltenden Zuges führen kann. Diese Umstände können sich negativ bzw. verlängernd auf die Wendedauer auswirken.

Die Analysen zeigen jedoch auch, dass die technische Mindestwendezeit durch die Wendezeit im Betrieb unterboten werden kann. Demnach sind auch Prozessverkürzungen möglich: Hier sind bspw. sehr kurze Übergabegespräche, ein Beginn der Abschlussarbeiten durch den Triebfahrzeugführer bereits vor der Einfahrt in Bahnhof, ein schnellerer Wechsel des Triebfahrzeugführers vom Zugende zum Zuganfang sowie insgesamt vorausschauend und parallelisiert ausgeführte Handlungen aller beteiligten Mitarbeiter möglich.

Tabelle 6.3: Mögliche Ursachen für eine verlängerte Wendezeit im Störfall

Ursachenbereich	mögliche Ursachen
Kommunikation	Triebfahrzeugführer mit Fahrdienstleiter/BZ-Disponent/TP-Disponent – Warten bis Ansprechpartner für Tf bereit Rückfragen Fahrgäste an Triebfahrzeugführer
Triebfahrzeugführer	zusätzliche Aufgaben (Ersatzzugnummer bestimmen/erfragen, Ansa- gen für die Fahrgäste) Schreiben von Befehlen zeitlich längerer Laufweg von Zugangfang zu Zugende über vollen Bahnsteig Ablösung nicht anwesend oder verspätet (z. B. Verwirrung wegen abweichendem Gleis)
Fahrgäste	längere Wechselzeiten wegen hohen Fahrgastaufkommens Verzögerte Reisendeninformation durch Station&Service Bahnsteigwechselzeiten notwendig wegen abweichender Gleise
Dispositions- entscheidungen	Längere Ein- und Ausfahrzeiten durch Benutzung anderer Fahrstraßen Warten auf Überholungen Verzögerte Ein-/Ausfahrt aufgrund von Belegungskonflikten Vereinigen von Zügen
ungewohnte	langsamere Ausführung von Bedienhandlungen, da ungewohnte Wen- deorte
Situation	Fahrdienstleiter „vergisst“ Zug, da abweichend vom regulären Betrieb

6.4 Ermittlung eines Planungswertes $t_{SFPWende}$ für die Wendezeit in Störungen

Um die nachgewiesene Abweichung der Wendezeit in Störungen von der regulär angesetzten technischen Mindestwendezeit in die Planungen einbeziehen zu können, ist es notwendig, einen entsprechenden Planungswert festzulegen. Grundsätzlich gilt für die Ermittlung des Planungswertes für die Wendezeit in Störungen

$$t_{SFPWende} = t_{Wende,Ril} + t_{Wende,X}$$

Grundlage für die Festlegung des Zuschlags für die abweichende Wendezeit in Störungen $t_{Wende,X}$ sind die aus den Betriebsdaten gewonnene Wertetabelle der Wendezeiten sowie der aus den Betriebsdaten ermittelte Erwartungswert und die Standardabweichung. Die Wertetabellen für die Wendezeiten mit Einzelhäufigkeiten und kumulierter Häufigkeit der Wenden pro Wendezeit sind für beide Wendearten in Tabelle E.3 im Anhang zu finden. Die entsprechenden Erwartungswerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 6.2 zu finden.

Der Erwartungswert des Zuschlags $E(t_{SFPWende,X})$ beträgt ungefähr 0,5 Minuten bei Wenden mit einem Triebfahrzeugführer und ungefähr 1,5 Minuten bei Wenden mit zwei Triebfahrzeugführern. Die mit 3,3 und 2,3 Minuten ermittelten Standardabweichungen sind sehr groß – so betragen sie das Fünffache bzw. das Doppelte der errechneten Erwartungswerte. Aufgrund dieser sehr großen Standardabweichung ist ein pauschaler Zuschlag in Höhe des Erwartungswertes der abweichenden Wendezeit in Störungen auf die technische Mindestwendezeit, also $t_{Wende,X} = E(t_{Wende,X})$, nicht empfehlenswert.

Zur Festlegung des Wendezuschlags in Störungen sind zwei Herangehensweisen möglich:

1. Festlegung, wie viel Prozent aller zusätzlich möglichen Wendezeiten durch den Zuschlag erfasst werden sollen sowie Bestimmung des entsprechenden Zuschlags.
2. Festlegung, welcher Zuschlag erwünscht bzw. betrieblich machbar ist sowie Berechnung der durch diesen Zuschlag abgedeckten Fälle zusätzlicher Wendezeiten.

Für die erste vorgeschlagene Herangehensweise bietet sich die Wahl von für Anforderungslevel gängige Werte wie „90 Prozent und 95 Prozent Abdeckung aller Fälle“. Die sich aus beiden Herangehensweisen für die Betriebsdaten ergebenden Zuschläge sind in Tabelle 6.4 zu finden. Die zweite vorgeschlagene Herangehensweise ist eher pragmatischer Natur, welche sich an im Betrieb handhabbaren Zuschlägen orientiert. Mögliche Zuschlagswerte und die sich daraus ergebende Abdeckung aller Fälle sind in Tabelle 6.5 zu finden. Dementsprechend hängt die Wahl der Größe des Zuschlags $t_{Wende,X}$ von den der Betriebsplanung zugrunde liegenden Ansprüchen ab.

Tabelle 6.4: Aus Kriterien abgeleitete Störzuschläge je Wendeart

Kriterium	Wenden 1 Tf	Wenden 2 Tf
maximale Wendezeit, mit 90% Abdeckung der Werte	10 Min	5 Min
sich daraus ergebender Störzuschlag	4 Min	3 Min
maximale Wendezeit, mit 95% Abdeckung der Werte	12 Min	8 Min
sich daraus ergebender Störzuschlag	6 Min	6 Min

Entsprechend der sich aus den Betriebsdaten ergebenden Werte erscheint ein Zuschlag von drei Minuten sinnvoll – so werden für beide Wendearten jeweils ungefähr 90 Prozent der Fälle

Tabelle 6.5: Abdeckung der möglichen Fälle bei vorgegebenen Störzuschlägen je Wendart

$t_{Wende,X}$	$t_{SFPWende}$		Anteil Wenden kumuliert für	
	Wenden 1 Tf	Wenden 2 Tf	Wenden 1 Tf	Wenden 2 Tf
1 Min $\approx E(t_{Wende,X})$	7 Min	3 Min	75%	67%
2 Min	8 Min	4 Min	84%	81%
3 Min	9 Min	5 Min	89%	91%
4 Min $\approx \sigma_{t_{Wende,X}}$	10 Min	6 Min	91%	94%

abgedeckt. Daher wird für den weiteren Verlauf dieser Arbeit $t_{Wende,X} = 3$ Minuten als Richtwert verwendet.

Zu beachten ist jedoch, dass sich dieser aus den Betriebsdaten abgeleitete Zuschlag von drei Minuten aus einer relativ kleinen Stichprobe aus dem Betrieb von S-Bahn Netzen ergibt. Es ist anzunehmen, dass der Wert die Wendezeit in S-Bahn Netzen allgemein gut abdeckt, da sich in der nach Städten differenzierten Auswertung von $t_{Wende,X}$ nur kleine Unterschiede abzeichneten. Zur Beurteilung der Übertragbarkeit dieses Wertes auf Systeme mit Mischverkehr und anderen Fahrzeugen sind entsprechende Analysen vorzunehmen. Es ist jedoch anzunehmen, dass der Zuschlag baureihenunabhängig sein sollte, da sich eine Abweichung von der technischen Mindestwendezeit eher durch störungsbedingte Prozessverzögerungen ergibt.

Weiterhin ist zu beachten, dass durch den Zuschlag $t_{Wende,X}$ nur zusätzliche Handlungen, die aufgrund der Störung erforderlich sind, abgedeckt werden. Weiterhin können Verspätungen durch unorganisierte Abstimmungsprozesse oder unzureichend vorhandene Ressourcen entstehen, welche durch den Zuschlag jedoch nicht abgebildet wurden, da nur Zugfahrten analysiert wurden, die verspätet begannen oder deren Ankunftszeit nicht für eine planmäßige Abfahrt und die geplante technische Mindestwendezeit ausreichten.

6.5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

6.5.1 Zusammenfassung

Ausgehend von Ergebnissen aus Kapitel 4 wurde erkannt, dass die realisierte Wendezeit in Störungen von der geplanten technischen Mindestwendezeit abweicht. Mit Hilfe der Betriebsdatenanalyse konnte nachgewiesen werden, dass Wenden in Störungen i. d. R. länger als die geplante technische Mindestwendezeit dauern. Je nach Wendart ergab sich für die zusätzliche Wendezeit in Störungen ein Erwartungswert von +0,56 Minuten mit einer Streuung von 3,3 Minuten für Wenden mit einem Triebfahrzeugführer und für Wenden mit zwei Triebfahrzeugführern ein Erwartungswert von +1,31 Minuten mit einer Streuung von 2,3 Minuten.

Auf Basis der Analyseergebnisse wurden mögliche Ansätze zur Bestimmung eines Planungswertes $t_{SFPWende}$, welcher sich aus der technischen Mindestwendezeit $t_{Wende,RIL}$ und einem Zuschlag $t_{Wende,X}$ ergibt, für Wendezeiten in Störungen erläutert.

Es wird vorgeschlagen, für die Planung von Störfallprogrammen in S-Bahn Systemen einen pauschalen Zuschlag von drei Minuten auf die technische Mindestwendezeit zu verwenden. Mit einem Zuschlag dieser Höhe werden ungefähr 90 Prozent aller in der Störung realisierten Wendezeiten erfasst. Damit wird für den größten Teil der Wenden die Wahrscheinlichkeit einer

Verspätungsübertragung minimiert, was wiederum das Erreichen eines stabilen Störfallprogramms beschleunigt.

Mithilfe dieses Wertes für eine realistische Wendezeit im Störfall ist es nun möglich, die Gesamtbelegungszeit der Infrastruktur durch im Störfallprogramm wendende Züge zu quantifizieren um anschließend den Belegungsgrad der Infrastruktur in (SFP-)Wendebahnhöfen abzuschätzen (siehe Kapitel 9). Weiterhin ist die sich aus der Anwendung des Störfallprogramms ergebende Gesamtbelegungszeit in Wendebahnhöfen von der Anzahl der sich im jeweiligen Wendebahnhof befindlichen Züge abhängig. Deren Quantifizierung wird im nachfolgenden Kapitel 8 beschrieben.

6.5.2 Diskussion der Ergebnisse

Die sich aus den eingangs aufgestellten Vermutungen ergebenden Fragen über die Abweichung der Ist-Wendezeit im SFP-Fall von der regulär eingeplanten technischen Mindestwendezeit und über den Anteil von Verspätungsübertragungen als Verspätungsursachen wurden beantwortet. Wenn mit dem in Abschnitt 6.4 erarbeiteten Zuschlag von drei Minuten auf die technische Mindestwendezeit geplant wird, könnten die Verspätungsgründe für rund ein Drittel der nicht planmäßig begonnenen Zugfahrten reduziert, wenn nicht sogar eliminiert werden. Die vorgestellten Überlegungen haben demnach Relevanz.

Die Ortsabhängigkeit einer längeren Wendezeit sowie von unzureichend gestalteten Wendepuffern konnte anhand der Analysen nicht eindeutig nachgewiesen werden, wobei hier der geringe Stichprobenumfang eine Rolle spielen kann. Auch Aussagen zu längeren Wendezeiten im Störfall in Bezug auf andere Zuggattungen und auf Mischverkehrsstrecken sind aufgrund der ausschließlichen Analyse von S-Bahn Betriebsdaten nicht möglich. Jedoch war es möglich, verlängerte Wendezeiten im Störfall nachzuweisen und somit die Grundlage für eine präzisere Störfallprogrammplanung zu schaffen.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass es sich bei den Schwankungen der Wendezeiten um reguläre, störungsunabhängige Schwankungen handelt. Zur Erkundung dieser Fragestellung ist es nötig, die Wendezeiten von Betriebstagen ohne Störungen zu analysieren und die entsprechenden Kennwerte zu berechnen. Würden diese Analysen ergeben, dass die Schwankungen der Wendezeit im regulären Betrieb ebenso stark auftreten, wäre eine grundsätzliche Überprüfung aller Prozesse sowie der Umlaufplanung angebracht. Letzteres wäre vor allem in Netzen, in denen die technische Mindestwendezeit als Regelwendezeit angenommen wird, von großer Bedeutung für die realisierte Pünktlichkeit.

Der Ansatz, für Wenden in Störungen eine länger Wendezeit anzunehmen, ist mit der grundsätzlichen Forderung nach einer Anhebung der regulären Wendepuffer gleichzusetzen, da im SFP-Fall weiterhin die regulären Fahrpläne gelten, soweit sie mit den veränderten Wegen und reduzierten Takten vereinbar sind. An dieser Stelle ist die grundsätzliche Frage zu stellen, wie viel Unwirtschaftlichkeit – also zusätzliche Wendepuffer – im regulären Betrieb in Kauf genommen werden soll oder kann, um im Störfall ein schnelleres Einschwingen und damit einen stabileren Betrieb zu gewährleisten. Diese Frage hängt unter anderem von der Auftretenswahrscheinlichkeit der Störungen und den jeweiligen Betriebszielen ab und kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Zur Beantwortung der Frage wäre eine Quantifizierung der Kosten zusätzlicher Wendepufferzeiten im regulären Betrieb sowie eine Quantifizierung ihres Nutzens in der Störung hilfreich.



7 Veränderung von Fahrdauern bei Umleitungen in Störungen

7.1 Ursachen für längere Fahrdauern durch Umleitungen

7.1.1 Einleitung

Die in Kapitel 4 durchgeführte Analyse der Verspätungsursachen im Störfall und bei der Anwendung von Störfallprogrammen ergab unter anderem, dass Verspätungen bei der Nutzung von Umleitungen entstehen. So weisen die durch die Analyse gewonnenen Erkenntnisse darauf hin, dass die bisher bei der Erstellung von Störfallprogrammen angenommenen Fahrdauern nicht mit den tatsächlich im Betrieb realisierten übereinstimmen. Dadurch können Verspätungen entstehen, die im Fahrtverlauf nicht mehr kompensiert werden können und die sich gegebenenfalls auf andere Zugfahrten im Netz verbreiten.

Da Umleitungen eine der Hauptdispositionsmaßnahmen im Störfall darstellen, besteht das Ziel der Ausarbeitungen des vorliegenden Kapitels in der Verbesserung der Planungsgrundlage für die Dispositionsmaßnahme „Umleitung“. Dadurch sollen weniger Verspätungen während der Anwendung generiert und ein schnelleres Ende der Einschwingphase erreicht werden.

Dazu sollen die Einflüsse auf die Dauer zur Nutzung von Umleitungen systematisch identifiziert werden. Dies ist notwendig, da eine solche Aufstellung in der Fachliteratur fehlt. Um die theoretischen Überlegungen zu untermauern, werden Betriebsdaten von Störungen in Bezug auf die Umleitungsnutzung untersucht. Weiterhin wird ein allgemeines Vorgehen zur Quantifizierung einer realistischen Umleitungsdauer erarbeitet.

7.1.2 Mögliche Ursachen

Abgesehen von störungsbedingten Einflüssen und im Fahrplan integrierten Zuschlägen wird die Fahrdauer eines Zuges grundsätzlich durch die technischen und topologischen Eigenschaften der Infrastruktur sowie durch das Betriebsprogramm bestimmt (siehe DB Netz (405)). Dies gilt ebenfalls für die Fahrdauer auf Umleitungsstrecken.

Zu den technischen Infrastruktureigenschaften, welche die Fahrdauer auf der Umleitung beeinflussen, gehören die Länge der Strecke sowie die dort zulässige Geschwindigkeit. Je nach Ausprägung können diese Eigenschaften zu einer Verlängerung oder Verkürzung der Fahrdauer im Vergleich zur ursprünglichen Strecke führen. Die Anordnung von Gleisen, Weichen und Bahnhöfen sind Merkmale der topologischen Infrastruktureigenschaften. Hier wirken sich zusätzliche Fahrtrichtungswechsel zum Gelangen auf die, zum Fahren auf der und zum Verlassen der Umleitungsstrecke verlängernd auf die Fahrdauer aus. Auch ein notwendiges Kreuzen der durchgehenden Hauptgleise zum Gelangen auf die, während der Fahrt auf der und zum Verlassen der Umleitungsstrecke können die Fahrdauer verlängern, wenn hoch ausgelastete Strecken gekreuzt werden müssen. In diesen Fällen sind Wartezeiten wahrscheinlich.

Das Betriebsprogramm bestimmt die bereits bestehende Nutzung der Umleitungsstrecke sowie die Nutzung der Strecke durch den umgeleiteten Zug. So beeinflussen die Anzahl der geplanten

Halte des Zuges auf der Umleitungsstrecke die Fahrtdauer auf der Umleitung. Von größerem Einfluss ist jedoch die bereits bestehende Nutzung der Umleitungsstrecke. Ist der bestehende Belegungsgrad auf der Strecke bereits hoch bzw. wird der Belegungsgrad durch die umgeleiteten Zugfahrten auf ein kritisches Maß erhöht, kann dies allein bereits zu weiteren Verspätungen führen. Weiterhin bestimmen die Mischung der auf der Umleitungsstrecke verkehrenden Zuggattungen, die realisierten Zugfolgefälle und Mindestzugfolgezeiten und die zeitliche Verteilung der Zugfahrten auf der Strecke die gegebenenfalls realisierten Wartezeiten des umgeleiteten Zuges.

Weitere störungsbedingte Einflüsse, wie längere Haltezeiten aufgrund von längeren Fahrgastwechselzeiten und Wartezeiten aufgrund von Anschlusssicherung, führen ebenfalls zu einer verlängerten Fahrtdauer vor, während und nach dem Befahren der Umleitung.

7.1.3 Beobachtete Ursachen

Zur Überprüfung und ggf. Ergänzung der im vorherigen Abschnitt erarbeiteten Einflüsse auf die Fahrtdauer durch Umleitungsnutzung wurden Betriebsdaten von Störungen in Bezug auf die Umleitungsnutzung untersucht. Hierbei handelt es sich um die bereits in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Störungsdaten von zwei der vier analysierten S-Bahn Systeme. In einem der vier Netze spielen Umleitungen in den Störfallprogrammen nur eine untergeordnete Rolle, in einem weiteren der vier Netze sind Umleitungen im Störfall zwar vorgesehen, werden jedoch fast nie genutzt. Daher wird an dieser Stelle auf Ausführungen über die Netze dieser beiden Städte verzichtet.

Im ersten S-Bahn Netz werden im Störfall einige Linien um die Stammstrecke herumgeleitet. Verspätungen entstanden bei den analysierten Störfällen zum einen auf der Umleitungsstrecke, da aufgrund einer langfristigen Baumaßnahme Güterzüge ebenfalls auf diese Strecke umgeleitet wurden. Zum anderen entstanden systematische Verspätungen durch Fahrtrichtungswechsel in einem Kopfbahnhof, welcher im Verlauf der Umleitungsstrecke angefahren wurde. Einige wenige Verspätungen entstanden bei der Wiedereinfädelung umgeleiteter Züge am Ende der Umleitungsstrecke.

Für die Verspätungen am Punkt der Wiedereinfädelung im ersten S-Bahn Netz gibt es zwei mögliche Ursachen, die allein anhand der vorliegenden Daten nicht eindeutig beantwortet werden können. So ist es zum einen möglich, dass die Verspätungen aufgrund von Wartezeiten zur Wiedereinfädelung auf die reguläre Strecke entstehen. Weiterhin ist es möglich, dass der Grund für diese Wartezeiten darin liegt, dass sich an dem Wiedereinfädelungspunkt zusätzlich ein SFP-Wendebahnhof für eine weitere Linie befindet und dies aufgrund der Wenden zu Wartezeiten für die Einfahrt führt.

Im zweiten S-Bahn Netz verkehren die Züge zum größten Teil auf Mischverkehrsstrecken. Da die S-Bahnen nicht auf einem eigenen „abgeschlossenen“ Netz verkehren, sind viele Umleitungsmöglichkeiten außerhalb der vorgesehenen Linienverläufe der S-Bahnen möglich. Die Analyse dieser Netze ergab Verspätungszuwächse v. a. am Beginn und am Ende der jeweiligen Umleitungsstrecken (siehe auch Keck (2012)). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Züge verhältnismäßig stark belastete durchgehende Hauptgleise kreuzen um auf die Umleitungen zu gelangen bzw. um diese zu verlassen. Züge auf Umleitungen, die kein durchgehendes Hauptgleis kreuzten, wiesen durchschnittlich deutlich geringere Zusatzverspätungen auf.

Da aufgrund des geringen Taktes im diesem S-Bahn Netz nur wenige Zugfahrten analysiert werden konnten, sind die Ergebnisse unbedingt mit Augenmaß weiter zu verwenden und können quantitativ nicht verallgemeinert werden. Jedoch geben sie einen wichtigen Hinweis

auf die Bedeutung von Kreuzungen durchgehender Hauptgleise als Einfluss auf die Fahrdauer von Umleitungen.

Neben der durch die Belegung einer Strecke festgelegten Anzahl und Länge der Lücken, in denen ein umgeleiteter Zug fahren oder durchgehende Hauptgleise kreuzen kann, ist auch die zeitliche Lage dieser Lücken von Bedeutung. So wurde bei der Analyse der Störfälle im dritten S-Bahn Netz festgestellt, dass Züge bestimmter Linien bei der Umleitung immer zur gleichen Zeit und an der gleichen Stelle behindert wurden. Dies ist bei der Planung von Umleitungen im Rahmen von Störfallprogrammen entsprechend zu beachten.

7.1.4 Zusammenfassung der Ursachen

Ausgehend von den Überlegungen der vorhergehenden Unterabschnitte wurden alle Einflussfaktoren der Dispositionsmaßnahme „Umleitung“ auf die Fahrdauer kategorisiert und in Abbildung 7.1 auf der nachfolgenden Seite dargestellt.

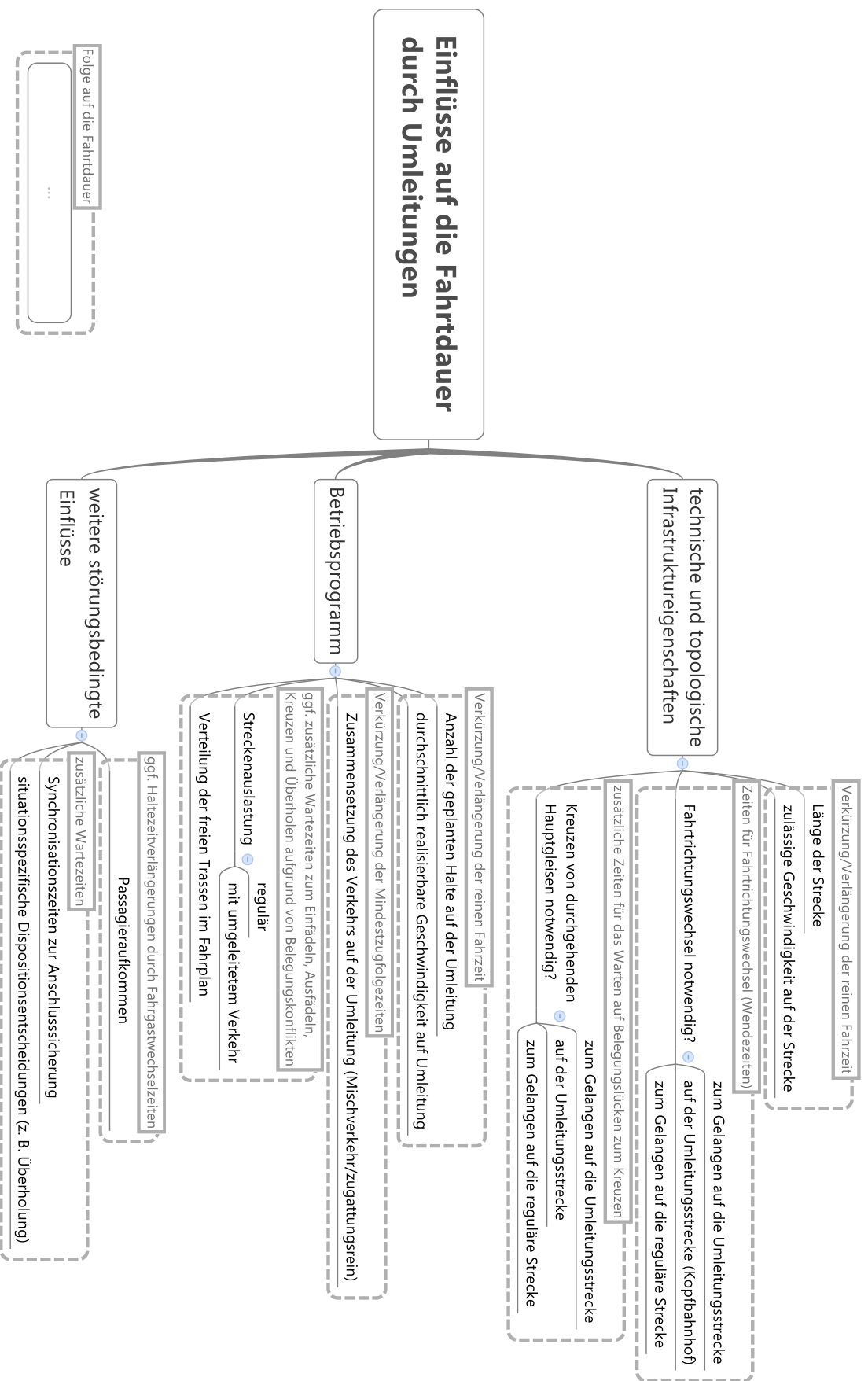


Abbildung 7.1: Einflüsse auf die Dauer zur Nutzung von Umleitungen (eigene Überlegungen nach DB Netz (405) und Keck (2012))

7.1.5 Schlussfolgerungen

Die Existenz der in diesem Abschnitt theoretisch ausgearbeiteten Ursachen für die Verlängerung von Fahrdauern auf Umleitungsstrecken wurde durch die Betriebsdatenanalyse nachgewiesen. Je nach Eigenschaften der vorhandenen Infrastruktur und dem darauf realisierten Betrieb konnten alle Ursachen in unterschiedlicher Ausprägung und Häufigkeit beobachtet werden. Auffällig ist hierbei, dass vor allem Ursachen, die auf das Betriebsprogramm zurückzuführen sind, beobachtet wurden. Expertengespräche zeigten jedoch, dass zusätzlich erforderliche Betriebsvorgänge, wie das Kreuzen von durchgehenden Hauptgleisen in Verbindung mit ausgelasteten Strecken, bisher nur wenig bis gar keinen Einfluss auf die Planung von Umleitungen im Rahmen der Erarbeitung von Störfallprogrammen haben (siehe Chu (2012a)). Eine Berücksichtigung dieser Einflüsse ist bei der Planung jedoch unabdingbar.

Da durch die Dispositionsmaßnahme Umleitung immer ad-hoc eine weitere Trasse zu einer bereits befahrenen Strecke hinzugefügt wird, erhöht sich grundsätzlich die Streckenauslastung. Ist die ursprüngliche Auslastung der Umleitungsstrecke bzw. von Strecken, die der umzuleitende Zug kreuzen muss, bereits mittel bis hoch, so wird die Umleitung eines Zuges mit großer Wahrscheinlichkeit zu Verspätungen führen. Daher ist es sinnvoll, mögliche ungeplante Zeitverbräuche im speziellen Fall des Einsatzes der Dispositionsmaßnahme „Umleitung“ als quasi-gegeben zu betrachten und damit bereits in der SFP-Planung einzubeziehen.

Dementsprechend ist für die Planung der Dispositionsmaßnahme Umleitung im Rahmen der Planung von Störfallprogrammen eine Vorgehensweise notwendig, die möglichst viele dieser ungeplanten Zeitverbräuche berücksichtigt.

7.2 Quantifizierung von Verlängerungen der Fahrdauern bei Umleitungen

Wie bereits ausgeführt, ist es wichtig, dass im Prozess der SFP-Planung eine realistische Fahrdauer für die Umleitungsnutzung zugrunde gelegt wird. Die Bestimmung einer realistischen Fahrdauer über eine Umleitungsstrecke hängt stark von den technischen und topologischen Infrastruktureigenschaften und dem Betriebsprogramm auf der jeweiligen Strecke ab. Daher ist ein Ansatz mit festen Erwartungswerten analog zum Vorgehen in Abschnitt 5.3 nicht sinnvoll, da nicht allgemein verwendbar. Unter Berücksichtigung aller relevanten Faktoren der spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Strecke ergibt sich die Fahrdauer für eine Umleitungsnutzung $t_{SFPUmleitung}$ als:

$$t_{SFPUmleitung} = t_{reineFahrzeit,ges} + t_{Halt,ges} + t_{FaRiWe,ges} + t_{warten,ges}$$

Die Ansätze zur Bestimmung der einzelnen Elemente zur Berechnung der Fahrdauer der Umleitungsnutzung sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst und nachfolgend beschrieben.

Die Ermittlung der reinen Fahrzeit ist bei Kenntnis der Strecken- und Fahrzeugparameter durch herkömmliche Fahrzeitrechnungen möglich. Für die Haltedauer können die im Fahrplan hinterlegten üblichen Haltezeiten verwendet werden. Die Gesamthaltedauer $t_{Halt,ges}$ ergibt sich aus dem Produkt der Anzahl der Halte und der Dauer je Halt. Die Gesamtdauer für alle Fahrtrichtungswechsel auf der Umleitungsstrecke $t_{FaRiWe,ges}$ ergibt sich aus dem Produkt der Anzahl der notwendigen Fahrtrichtungswechsel und der Dauer je Fahrtrichtungswechsel (Wendezeit). Für die Dauer zum Fahrtrichtungswechsel kann die fahrzeugspezifische technische Mindestwendezeit verwendet werden. Hier ist jedoch zu bedenken, dass es sich nicht um Routinewenden handelt, weshalb es zu Verzögerungen kommen kann. Daher ist zu prüfen, ob

Tabelle 7.1: Überblick zur Berechnung der einzelnen Elemente der Fahrtdauer bei Umleitungsnutzung

Element		Parameter
$t_{reineFahrzeit}$	reine Fahrzeit	Weglänge, zulässige Geschwindigkeit
$t_{Halt,ges}$	Haltedauer	Anzahl der angefahrenen Halte, Haltezeiten nach Ril 405 oder Fahrplan; Anzahl der vorgesehenen Halte
$t_{FaRiWe,ges}$	Fahrtrichtungswechsel	Mindestwendezeit nach Ril 498 bzw. Zeit für Wenden in der Störung (siehe Kapitel 6); Anzahl der notwendigen Fahrtrichtungswechsel
$t_{warten,ges}$	Warten auf Ein- bzw. Ausfädeln von Umleitungen bzw. auf das Kreuzen von durchgehenden Hauptgleisen	Mindestzugfolgezeit für Kreuzen in diesem Fahrstraßenknoten oder Anzahl der Ein- und Ausfädelungspunkte; durchschnittliche Wartezeit in diesem Punkt oder Wartezeitzuschläge

die durchschnittliche Wendezeit für Wenden im Störfall (siehe Kapitel 6) zugrunde gelegt werden sollte.

Die Gesamtwartedauer zum Befahren der Umleitung $t_{warten,ges}$ ergibt sich aus dem Produkt der Anzahl der Ein- und Ausfädelungspunkte und der Wartezeit in diesem Punkt. Die Dauer, welche ggf. zum Warten auf die Einfädelung auf bzw. auf die Ausfädelung aus der Umleitung bzw. auf das Kreuzen eines durchgehenden Hauptgleises benötigt wird, kann auf verschiedenen Wegen abgeschätzt werden, wobei jede Art der Abbildung den stochastischen Eigenschaften dieser Größe unterschiedlich gerecht wird:

1. Abbildung als Mindestzugfolgezeit für das Kreuzen eines durchgehenden Hauptgleises bzw. für das Ein- oder Ausfädeln in diesem Fahrstraßenknoten oder
2. Abbildung als durchschnittliche Wartezeit in diesem Fahrstraßenknoten oder
3. Ableitung von pauschalen Wartezeitzuschlägen aus einer vorher ermittelten Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion.

Die Mindestzugfolgezeit für das Kreuzen in einem Fahrstraßenknoten ist für einzelne Zugfolgefälle einfach zu berechnen. Allerdings ist die Wartezeit von Zügen vor einer Abzweigstelle von mehr Faktoren als der Mindestzugfolgezeit in diesem Abschnitt abhängig. Weitere Eigenschaften der Umleitungsstrecke, wie Art des Verkehrs (Mischverkehr/gattungsreiner Verkehr), Auslastung der Strecke mit und ohne Umleitung sowie zeitliche Verteilung der Fahrten auf der Strecke, bestimmen Anzahl und Länge der verfügbaren Lücken. Diese Lücken sind notwendig, um ein Einfädeln, Fahren, Kreuzen und/oder Ausfädeln von umzuleitenden Zügen zu ermöglichen, weshalb eine Nichtbeachtung von Existenz und Verteilung der Lücken zu einer zu optimistischen Einschätzung führen kann.

Weiterhin besteht die Möglichkeit abzuschätzen, wie viele Züge pro Stunde maximal auf diese Strecke umgeleitet werden können, ohne die bestehende Betriebsqualität zu verringern. Mit der so abgeschätzten infrastrukturbezogenen Leistungsfähigkeit kann die durchschnittliche Wartezeit ebenfalls berechnet werden. Allerdings sollte in diesem Fall die zeitliche Verteilung

der Ankunft der ursprünglich geplanten Züge sowie der umgeleiteten Züge abgeglichen werden, um daraus entstehende Belegungskonflikte zu antizipieren.

Die durchschnittliche Wartezeit auf das Befahren der Umleitung als Summe aus den Produkten der Mindestzugfolgezeit je Zugfolgefall und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens je Zugfolgefall in diesem Fahrstraßenknoten bildet hingegen diese Zufälligkeit zumindest grundlegend ab. Jedoch ist dieses Vorgehen für den Praktiker im Betrieb relativ aufwendig, was für die Verwendung pauschaler Wartezeitzuschläge bzw. die Beschreibung der Wartezeit durch eine Verteilungsfunktion spricht. Für die Ermittlung der entsprechenden Verteilungsfunktion ist jedoch eine empirische Analyse der Wartezeiten am Fahrstraßenknoten notwendig, welche mit der für die vorliegende Arbeit zur Verfügung stehenden Datenmenge nicht möglich ist.

Welcher dieser drei Wege zur Abschätzung der Wartezeit auf Einfädelung bzw. Ausfädelung im SFP-Planungsprozess angewandt wird, hängt maßgeblich von den zur Verfügung stehenden Daten und dem leistbaren Aufwand ab. Grundsätzlich ist es wichtig, diese mögliche Wartezeit bei der Planung der Dispositionsmaßnahme „Umleitung“ überhaupt zu beachten. Da die mögliche zusätzlich durch eine Umleitungsstrecke aufnehmbare Zugzahl in jedem Fall abgeschätzt werden muss, empfiehlt es sich in diesem Schritt den Abgleich der zeitliche Ankunftsverteilung der ursprünglich geplanten Züge sowie der umgeleiteten Züge ebenfalls vorzunehmen.

7.3 Vorgehen zur Prüfung der Machbarkeit von Umleitungen

Die in den vorherigen Abschnitten erarbeiteten Einflussfaktoren auf die Fahrdauer von Umleitungen sind bereits während der SFP-Erstellung zu berücksichtigen. Dadurch können Verspätungen aufgrund ungenauer oder mangelhafter SFP-Planung minimiert werden. Damit alle Einflüsse berücksichtigt werden, wird das Vorgehen zur Prüfung der Machbarkeit einer möglichen Umleitung gemäß Abbildung 7.2 empfohlen.

Grundsätzlich ist der Nutzen der Umleitung für den Fahrgast zu prüfen. Hierzu sind die Quelle-Ziel-Beziehungen der Fahrgastströme zu betrachten: Liegen die meisten Quellen und Ziele örtlich vor oder nach der Umleitung, ist diese in jedem Fall sinnvoll. Liegt der Hauptanteil der Quellen und Ziele in dem Gebiet, welches durch die Umleitung umfahren wird, ist zu überlegen, wie wahrscheinlich die Nutzung der Umleitung durch die Fahrgäste ist. Eine tageszeitabhängige Betrachtung ist hierbei möglicherweise notwendig. Ist der verkehrliche Sinn der Umleitung nicht gegeben, so kann es trotzdem möglich sein, dass sie für einen flüssigeren Betriebsablauf sinnvoll ist um beispielsweise kritische Streckenabschnitte zu entlasten. Dies ist entsprechend zu prüfen. Anschließend werden zur reinen Fahrzeit über die Umleitungsstrecke Zeitzuschläge für die Umleitungsnutzung, wie bspw. Wartezeiten an neuralgischen Punkten und Zuschläge für notwendige Fahrtrichtungswechsel addiert.

Die so erhaltene Gesamtfahrdauer für die Umleitung ist mit der ursprünglich angenommenen Fahrdauer zwischen Umleitungsanfang und -ende zu vergleichen. Wird für die Umleitungsnutzung zusätzliche Zeit benötigt, so ist zu prüfen, ob diese durch Nutzung bestehender Wendepuffer bei Fahrtende oder anderer Puffer ausgeglichen werden kann. Ist dies der Fall, kann die Umleitung genutzt werden. Ist dies nicht der Fall, sollte von der Umleitungsnutzung abgesehen werden, da die so entstehenden systematischen Verspätungen die Durchführbarkeit des Störfallprogramms gefährden können – es sei denn, es liegen andere betriebliche Bedürfnisse vor, die dieses rechtfertigen.

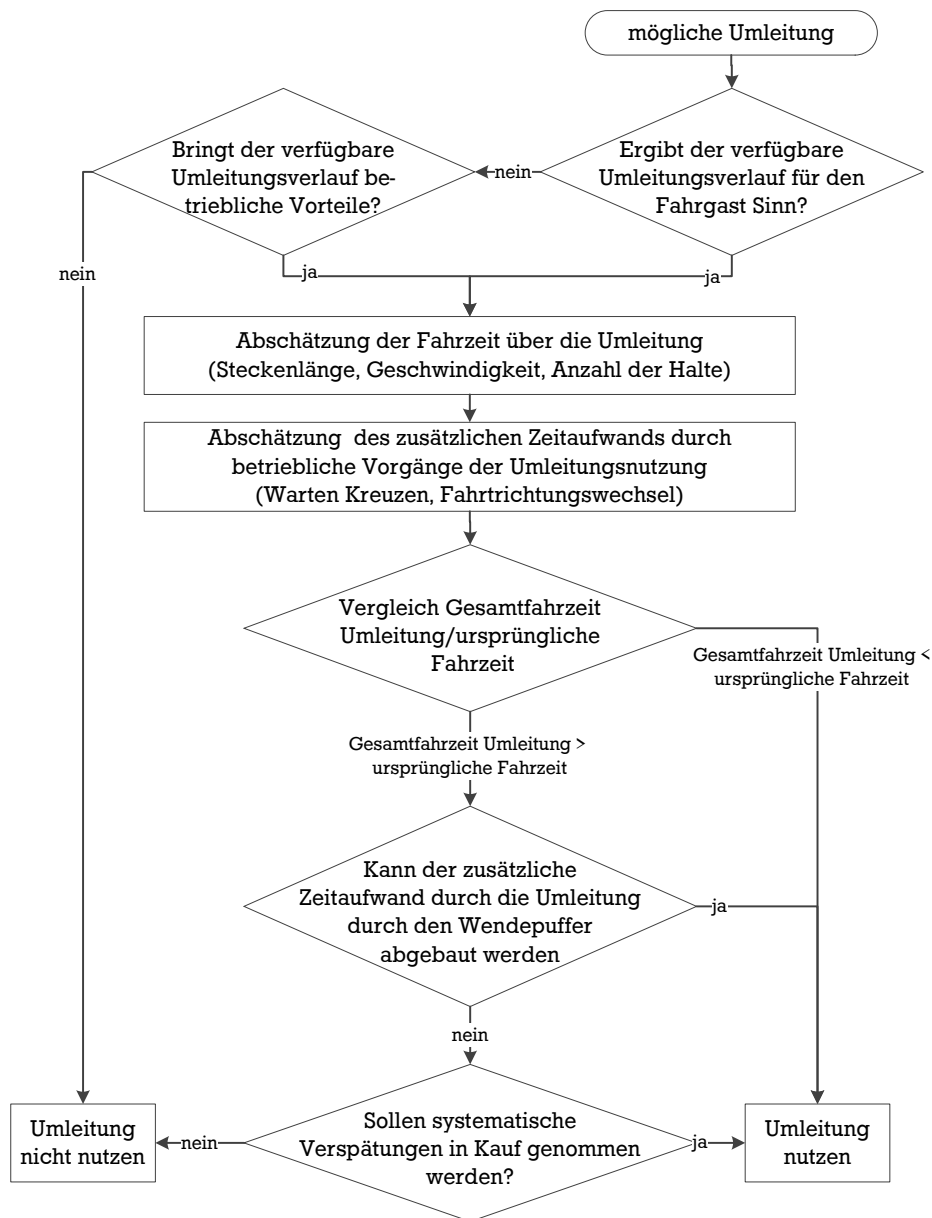


Abbildung 7.2: Vorgehen zur Prüfung der Machbarkeit von Umleitungen (nach Keck (2012))

7.4 Zusammenfassung, Diskussion und Forschungsbedarf

7.4.1 Zusammenfassung

Im vorliegenden Kapitel wurde dargestellt, dass die bisher praktizierte Abschätzung der Dauer von Umleitungen im Rahmen der SFP-Planung aufgrund vereinfachter Annahmen zu optimistisch ausfällt, was wiederum zu Problemen in der SFP-Umsetzung führen kann. So wurde mit Hilfe einer Betriebsdatenanalyse erarbeitet, dass vor allem das Warten auf das Kreuzen von durchgehenden Hauptgleisen bzw. das Warten auf Ein- oder Ausfädelung auf die Umleitung zu Verzögerungen führen kann. Auch die zusätzlich durch die Umleitung entstehende Belastung der Strecke kann zu Verspätungen führen.

Es wurde festgestellt, dass unplanmäßige Wartezeiten, die sich hauptsächlich aus dem Betriebsprogramm ergeben, bisher bei der SFP-Planung nicht beachtet wurden. Daher wird empfohlen, außerplanmäßige Wartezeiten, die sich aufgrund der topologischen Infrastruktureigenschaften und dem Betriebsprogramm ergeben, bereits während der SFP-Planung als „quasi-gegeben“ einzubeziehen sind. Hierzu wurde eine entsprechende Vorgehensweise vorgeschlagen sowie Beschreibungen der einzelnen Elemente erarbeitet.

Mit der Beschreibung der Dispositionsmaßnahme „Umleitung“ wurden alle Wirkungen auf die Belegungszeiten in Störungen durch bestimmte Dispositionsmaßnahmen und durch die Störung an sich dargestellt. Zusammen mit dem im folgenden Kapitel beschriebenen Teilmodell zur Beschreibung der schrittweisen Reduktion der Zugzahlen in der Einschwingphase (Kapitel 8) ist es nun möglich, die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase abzuschätzen.

7.4.2 Diskussion der Ergebnisse und weiterer Forschungsbedarf

Damit mögliche Verlängerungen der Fahrdauer durch eine Umleitungsnutzung in die SFP-Planung einbezogen werden können, ist eine Quantifizierung dieser notwendig. Dazu wurden die einzelnen Elemente der Umleitungsdauer identifiziert und Hinweise zur Ermittlung der entsprechenden Dauer gegeben. Dieses Vorgehen bildet eine erste Grundlage für weitere Forschungsarbeiten, bei denen sich folgender Problematik angenommen werden muss.

Da die Verlängerungen der Fahrdauer aufgrund von Umleitungsnutzung sehr ortsspezifisch sind, ist die Bestimmung der entsprechenden Dauern aufgrund des hohen Detailgrads aufwendig. Dies stellt vor allem für Praktiker von Eisenbahnverkehrsunternehmen ein Problem dar, da diese oft nicht über die entsprechenden Hilfsmittel und Informationen zur Berechnung der infrastrukturbezogenen Leistungsfähigkeit wie ein Eisenbahninfrastrukturunternehmen verfügen. Auch die stochastischen Eigenschaften der Wartezeiten, wie schwankende Dauern aufgrund von Überlagerungen verschiedener Einflüsse auf die Wartezeiten, werden durch den vorliegenden Ansatz noch nicht abschließend beschrieben.

Ein Ansatz zur Lösung dieser beiden Probleme besteht in der stochastischen Beschreibung der Wartewahrscheinlichkeit vor Kreuzungspunkten, Überleitstellen und Abzweigen in Funktion verschiedener Infrastrukturkonstellationen und Streckenauslastungen. Dafür können die bereits bekannten Methoden und Verfahren zur analytischen Leistungsfähigkeitsberechnung mit bedienungstheoretischem Ansatz verwendet werden. Allerdings sind für die Bestimmung einzelner Parameter empirische Daten von entsprechenden Wartezeiten notwendig. Sind diese Wartezeiten entsprechend stochastisch modelliert, ist daraus eine Ableitung von pauschalen Wartezeitzuschlägen möglich, welche wiederum einfach für den Praktiker zu handhaben sind.



8 Veränderung der Zugzahlen in der Einschwingphase

8.1 Einleitung

In Kapitel 4 wurde eine veränderte Gesamtbelegungszeit der Infrastruktur in der Einschwingphase als eine Ursache für Verspätungen identifiziert. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass im Rahmen der angewandten Störfallprogramme die im Netz befindlichen Zugzahlen reduziert werden, um die Störungssituation besser handhaben zu können. Eine Reduktion der sich im Netz befindlichen Züge erfolgt durch deren Abstellung. Obwohl die Entscheidung der Abstellung überzähliger Züge zeitgleich durch die Ausrufung des Störfallprogramms getroffen wird, erfolgt die tatsächliche Veränderung der Zugzahlen durch Abstellung nur schrittweise während der Einschwingphase, da die Züge erst zu den Abstellorten gelangen müssen. Dieser Umstand führt dazu, dass sich zu Beginn der Einschwingphase mehr Züge im System befinden als während des stabilen Störfallprogramms. Da sich die jeweils vorhandene Zugzahl direkt auf die Gesamtbelegungszeit und damit auf die Machbarkeit des Störfallprogramms auswirkt, muss beim Entwurf von Störfallprogrammen auch dem Umstand der veränderlichen Zugzahlen Rechnung getragen werden.

Ziel des vorliegenden Kapitels ist die Entwicklung eines einfachen Modellierungsvorschlags zur Beschreibung des Vorgangs der Reduktion der Zugzahlen in der Einschwingphase. Zum besseren Verständnis soll weiterhin ein Anwendungsbeispiel dienen, welches sich an den Gegebenheiten des S-Bahn Netzes einer deutschen Großstadt orientiert.

8.2 Problematik der schrittweise umgesetzten Reduktion der Zugzahlen in der Einschwingphase

Mit dem Ziel der Beherrschung des Betriebs in der Störungssituation, sehen Störfallprogramme i. d. R. geringere Zugzahlen als im regulären Betrieb vor. Diese Maßnahme verringert zum einen die Komplexität der Disposition. Zum anderen wird die, durch die im Regelfall nicht vorgesehenen SFP-Wenden, erhöhte Gesamtbelegungszeit in regulären Durchgangsstationen durch eine Verringerung der Anzahl der zu wendenden Züge kompensiert.

Die tatsächliche Verringerung der Zugzahlen erfolgt während der Einschwingphase jedoch nur schrittweise (siehe Abbildung 8.1), sodass sich zu Beginn der Einschwingphase mehr Züge im Netz befinden als es im Störfallprogramm geplant ist. Dies wiederum kann dazu führen, dass in der Einschwingphase noch Züge an Bahnhöfen ankommen, an denen sie entsprechend des Störfallprogramms nicht vorgesehen sind. Je länger demnach die Einschwingphase dauert, desto länger ist es möglich, dass Züge ungeplant an den Bahnhöfen ankommen. Dieser Umstand ließ sich auch bei der Auswertung der Betriebsdaten von Störungen beobachten (siehe Kapitel 4) und lässt sich durch die folgenden zwei Wirkzusammenhänge erklären:

1. Die Verringerung der Zugzahlen erfolgt i. d. R. durch Abstellung der taktverstärkenden Züge. Dabei ist die Zeit für eine Entscheidung über die Maßnahme „Abstellung“ gering, da die Maßnahme bereits im Störfallprogramm festgeschrieben ist. Jedoch erfordert die Durchführung der Abstellung Zeit und entsprechende verfügbare Infrastruktur um die

Züge zum Abstellort zu fahren. Gegebenenfalls kommt noch eine Wartezeit hinzu bis die Maßnahme durchgeführt werden kann. Während dieser Zeit befindet sich der Zug weiterhin im Netz und behindert gegebenenfalls andere Züge.

- Da die Ausrufung eines Störfallprogramms unabhängig von der Position der Züge im Netz erfolgt, ist es möglich dass sich Züge im Netz befinden, die nach Ausrufung eines Störfallprogramms gesondert disponiert werden müssen. Hierbei handelt es sich um Züge, welche sich bei Störungsbeginn bzw. zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung bereits hinter ihrem SFP-Wendebahnhof befinden. Weiterhin können sich Züge auf Fahrwegen befinden, auf denen im SFP-Fall kein Verkehr vorgesehen ist. Für diese Züge müssen Einzelfallentscheidungen getroffen werden – wie Abstellen, vor Ort wenden und in den SFP-Ablauf integrieren oder Überführen und an anderer Stelle im Netz verwenden. Hier kommt – zusätzlich zur Wartezeit auf und für die Durchführung der Maßnahme – eine entsprechende Entscheidungsdauer hinzu, während dieser sich der Zug im Netz befindet und gegebenenfalls andere Züge behindert.

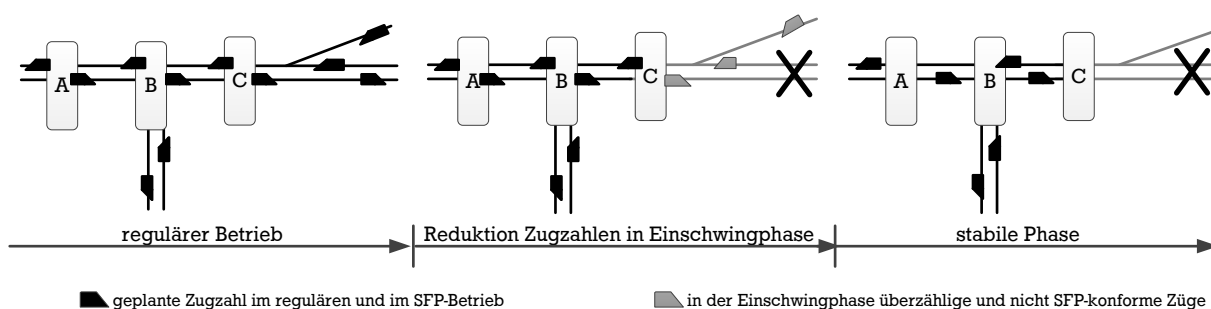


Abbildung 8.1: Schematische Darstellung der Zugzahlreduktion während der Einschwingphase

Durch die oben beschriebenen Wirkzusammenhänge ist es möglich, dass sich Züge an Bahnhöfen befinden oder an Bahnhöfen ankommen können, an denen sie sich nach Ausrufung des Störfallprogramms nicht befinden sollten. Diese Züge erhöhen die Gesamtbelegungszeit in den entsprechenden Bahnhöfen, was bei einer entsprechenden Überschreitung wiederum zu Rückstauungen und Verspätungen führen kann. Weiterhin ist es möglich, dass durch die SFP-Dispositionsmaßnahmen die planmäßige Reihenfolge der Züge verändert wird, was im schlimmsten Fall zu einer verlängerten Fahrzeit aufgrund von veränderten Mindestzugfolgezeiten und damit zu weiteren Verspätungen führen kann.

Wird die erhöhte Gesamtbelegungszeit durch die in der Einschwingphase erhöhte Zugzahl nicht bereits bei der SFP-Erstellung beachtet, ist es wahrscheinlich, dass die Einschwingphase nicht ohne zusätzliche Verspätungen vonstatten geht. Damit eine Betrachtung bereits während der SFP-Erstellung erfolgen kann, ist ein Modell zur Beschreibung der schrittweise umgesetzten Zugzahlreduktion während der Einschwingphase notwendig.

Da bisher jedoch keine Modelle zur Beschreibung dieses Effektes existieren, ist es notwendig ein entsprechendes Modell zu entwickeln, um die Wirkungen von SFP-Maßnahmen auf die Gesamtbelegungszeit und den Belegungsgrad abbilden zu können und um eine Beurteilung der Machbarkeit verschiedener Störfallprogramme zu ermöglichen.

8.3 Modellierung der schrittweise umgesetzten Reduktion der Zugzahlen in der Einschwingphase

8.3.1 Anforderungen an die Modellierung und Ansatz

Aus dem in Abschnitt 8.2 beschriebenen Sachverhalt der Reduktion von Zugzahlen während der Einschwingphase ergeben sich folgende Anforderungen an die Modellierung des Vorgangs. So müssen im Modell

- unterschiedliche Zugzahlen,
- unterschiedliche Dauern der Einschwingphase und
- unterschiedliche Ankunftsreihenfolgen der Züge in den betrachteten Bahnhöfen

abgebildet werden können. Dabei ist die unterschiedliche Reihenfolge der Ankunft verschiedener Züge nur bei der Betrachtung von Netzen in denen unterschiedliche Zugkategorien verkehren relevant.

Das Modell zur Abbildung der Zugzahlreduktion wird als Bestandteil des Prüfprozesses der Machbarkeit von Störfallprogrammen benötigt. Aus diesem Kontext der zukünftigen Verwendung des Modells ergeben sich weiterhin folgende allgemeine Anforderungen. Da es sich bei den Zugzahlen im Netz um eine von mehreren Eingangsgrößen des Prozesses handelt, ist es notwendig, die Zugzahlen schnell, einfach und ohne großen Aufwand bestimmen zu können. Weiterhin ist es denkbar, dass die Erstellung und somit auch die Prüfung von Störfallprogrammen durch das Eisenbahnverkehrsunternehmen erfolgt. Aus diesem Grunde ist hier besonderes Augenmerk auf eine vereinfachte Modellierung zu legen, da dem Eisenbahnverkehrsunternehmen i. d. R. nicht die Werkzeuge zur Modellierung des Betriebs zur Verfügung stehen, wie sie in einem Eisenbahninfrastrukturunternehmen zu finden sind.

Für die Darstellung der Parameter Anzahl und Reihenfolge der ankommenden Züge im SFP-Fall bieten sich zwei grundsätzliche Lösungswege an. Hier ist einerseits eine exakte Darstellung der Entwicklung der Parameter über die Zeit denkbar, wobei die abnehmenden Zugzahlen auf der Basis von ermittelten stochastischen Charakteristiken der Parameter ermittelt werden. Andererseits ist eine heuristische Herangehensweise mithilfe von Szenarien möglich, wobei die abnehmenden Zugzahlen, je nach Szenario, nach festen Regeln bestimmt werden. Ausgehend von der allgemeinen Anforderung eines einfachen und schnellen Verfahrens zur Modellierung der Reduktion der Zugzahlen in der Einschwingphase und der bislang fehlenden Kenntnis der exakten Parameter der Zugzahlreduktion bietet sich die Entwicklung eines heuristischen Verfahrens an.

Sollen die unterschiedlichen möglichen Zugzahlen nicht als kontinuierliche Entwicklung über die Zeit, sondern je Szenario nach einfachen festen Regeln bestimmt werden, ist eine Betrachtung für jede Betriebsstelle sinnvoll. In den Szenarien sind verschiedene Fälle für die maximal und minimal mögliche Zugzahl je betrachteter Betriebsstelle zu beachten sowie Zwischenstufen zu berücksichtigen, welche sich aus der Dauer der Einschwingphase ergeben. Zur Bildung dieser Szenarien sollen einfache Regeln entwickelt werden, die schnell und mithilfe weniger Informationen angewendet werden können.

8.3.2 Notwendige Szenarien und 15-Min-Heuristik

Wie vorangehend erläutert wurde, ist die Formulierung von verschiedenen Szenarien für die Bestimmung der Zugzahlen an bestimmten Bahnhöfen in den unterschiedlichen Phasen des Störfallprogramms zweckmäßig. Grundsätzlich werden mindestens drei verschiedene Szenarien benötigt:

- Ein *GrundszENARIO*, welches die Zugzahlen im regulären Betrieb abbildet (maximale im Netz vorgesehene Zugzahl),
- ein Szenario, welches die Zugzahlen im *stabilen Störfallprogramm* abbildet (minimale im Netz vorgesehene Zugzahl) und
- ein *Einschwingszenario*, welches die Zwischenstufen des Rückgangs der regulären Zugzahlen zu den im Störfallprogramm vorgesehenen Zugzahlen abbildet.

Die Betrachtung des *Grundszenarios* ist notwendig, um den entstehenden Unterschied zu den Zugzahlen in den einzelnen Szenarien abbilden zu können. Die Betrachtung der Zugzahlen eines stabilen SFP ist für die grundsätzliche Abschätzung der Machbarkeit eines Störfallprogramms notwendig (siehe Kapitel 10). Das GrundszENARIO – im Folgenden als *Szenario 0* bezeichnet – ergibt sich aus einer repräsentativen Stunde des regulären Fahrplans. Das Szenario für ein stabiles Störfallprogramm – im Folgenden als *Szenario 1* bezeichnet – ergibt sich aus Szenario 0, wobei nur Züge der Linien gezählt werden, welche im SFP-Fall noch im betrachteten Bahnhof verkehren.

Für die Bildung des *Einschwingszenarios* ist es sinnvoll, verschiedene Untervarianten zu bilden. Die Untervarianten ergeben sich aus verschiedenen Werten für die Dauer der Einschwingphase, also aus verschiedenen Dauern zwischen dem Zeitpunkt des Auftretens der Störung (Minute 0) und dem Zeitpunkt eines stabilen SFP-Betriebs (Minute X). Dies ist sinnvoll, da die Streuung der Dauer bis zum Abschluss der Einschwingphase sehr groß sein kann.

Zur Vereinfachung und mit dem Ziel einer vielseitigen Anwendbarkeit wird vorgeschlagen, die Dauer der Einschwingphase auf ein Vielfaches einer Viertelstunde festzulegen. Durch das Vorgehen der 15-Minuten-Heuristik (siehe auch Abbildung 8.2) wird die dynamische Reduzierung der Zugzahlen bis zum Ende der Einschwingphase durch eine statische Betrachtung von 15-Minuten-Intervallen angenähert.

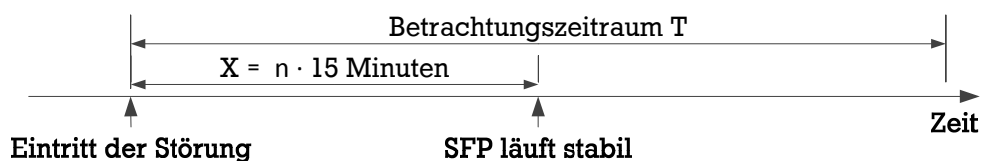


Abbildung 8.2: Einteilung des Betrachtungszeitraums in Vielfache einer Viertelstunde

Entsprechend dieser 15-Minuten-Heuristik existiert ein Szenario – im Folgenden *Szenario 2* genannt – bei dem die Anzahl der ankommenden Züge innerhalb der ersten Viertelstunde nach Eintritt der Störung dem regulären Fahrplan im betrachteten Bahnhof und danach dem stabilen Störfallprogramm entspricht. Weiterhin existiert ein Szenario – im Folgenden *Szenario 3* genannt – bei dem die Anzahl der ankommenden Züge innerhalb der ersten halben Stunde nach Eintritt der Störung dem regulären Fahrplan im betrachteten Bahnhof entsprechen. Dieser Logik folgend können weitere Szenarien mit einem Zeitpunkt für das Ende der Einschwingphase von 45, 60 Minuten und größer nach dem Auftreten der Störung formuliert werden. Im letzten Fall sollte der Betrachtungsraum von 60 Minuten entsprechend erweitert werden. In Tabelle 8.1 wird eine Übersicht über die Regeln zur Bestimmung der Zugzahlen in den verschiedenen Szenarien gegeben.

Tabelle 8.1: Übersicht über die Regeln zur Bestimmung der Zugzahlen in den einzelnen Szenarien

Szenario	Beschreibung	Regel zur Bestimmung der im Netz befindlichen Zugzahl
0	Regelbetrieb	Zugzahl laut Fahrplan im Betrachtungszeitraum T
1	sofortige Entlastung ab Störungsbeginn	Zugzahl laut Störfallprogramm im Betrachtungszeitraum T
2	Entlastung 15 Min nach Störungsbeginn	Zugzahl laut Fahrplan im Zeitraum der ersten 15 Minuten, danach Zugzahl laut Störfallprogramm im Zeitraum (T - 15 min)
3	Entlastung 30 Min nach Störungsbeginn	Zugzahl laut Fahrplan im Zeitraum der ersten 30 Minuten, danach Zugzahl laut Störfallprogramm im Zeitraum (T - 30 min)
(...)	Entlastung X Min nach Störungsbeginn	Zugzahl laut Fahrplan im Zeitraum der ersten X Minuten, danach Zugzahl laut Störfallprogramm im Zeitraum (T - X min, wobei $X = n \cdot 15$, mit $n \in \mathbb{N}$)

Eine Verkürzung des 15-Minuten-Grundintervalls ist grundsätzlich möglich. Es wurde sich jedoch dagegen entschieden, da eine Verkürzung des Intervalls zu einer ansteigenden Zahl an zu prüfenden Szenarien führt. Eine Dauer von 15 Minuten zwischen dem Eintritt der Störung und der vollständigen Durchsetzung eines SFP wird nur in sehr wenigen Fällen auftreten, weshalb auch ein Grundintervall von 30 Minuten in Frage kommt. Da sich das 30 Minutenintervall aus dem Grundintervall von 15 Minuten bilden lässt und da eine Dauer von 15 Minuten bis zur vollständigen Durchsetzung des Störfallprogramms möglich ist, wurde die ursprüngliche Idee des 15-Minuten-Intervalls beibehalten.

Für die Anwendung der 15-Minuten-Heuristik ist es hilfreich, wenn die Züge der betrachteten Linien regelmäßig verkehren und pro 15-Minuten-Intervall die gleichen Zugzahlen bewältigt werden müssen. Ist dies nicht der Fall, kann die Heuristik trotzdem angewendet werden, wobei für jedes 15-Minuten-Intervall gegebenenfalls unterschiedliche Zugzahlen einzubeziehen sind. Alternativ wird empfohlen, den Betrachtungszeitraum in Vielfache der im Netz vorherrschenden Taktzeit einzuteilen (z. B. 20-Minuten-Intervalle bei einem 20-Minuten-Takt).

Aufgrund der eingesetzten Dispositionsmaßnahmen ist es möglich, dass die Reihenfolge der im SFP-Fall verkehrenden Züge von der im Fahrplan vorgesehenen Reihenfolge abweicht. Dieser Umstand wirkt sich vor allem in Netzen mit Mischverkehr aufgrund der unterschiedlichen Mindestzugfolgezeiten auf den Belegungsgrad einer Infrastruktur aus, da hier durch ungünstige Konstellationen längere Mindestzugfolgezeiten als geplant eintreten können, wodurch Wartezeiten und damit längere Belegungszeiten entstehen können. In Netzen, in denen nur eine Zuggattung verkehrt, und in denen gleiche Mindestzugfolgezeiten realisiert werden, ist die vorgeschlagene Heuristik ohne Einschränkungen einsetzbar. Für Netze mit Mischverkehr wird zur Beachtung des Einflusses durch den Reihenfolgetausch in der Störung vorgeschlagen, die schlecht möglichste Reihenfolge der Züge für die Szenarienbildung zu Grunde zu legen.

8.3.3 Anwendungsbeispiel

Zur Verdeutlichung der Anwendung der 15-Minuten-Heuristik soll folgendes Anwendungsbeispiel dienen, welches der Betriebssituation eines realen deutschen S-Bahn Netz nachempfunden ist. Wie in Abbildung 8.3 dargestellt, durchfahren im regulären Betrieb Züge der Linien S1, S2, S3, S4, S5, S6, S8 und S9 den Bahnhof C. Die Züge der Linien S1, S2, S5 und S6 verkehren dabei in einem 15-Minuten-Takt, während die Linien S3, S4, S8 und S9 in einem 30-Minuten-Takt verkehren. Im SFP-Fall ist es vorgesehen, dass nur noch Züge der Linien S3, S4, S8 und S9 den Bahnhof C passieren, in Bahnhof E wenden und auf ihrem Rückweg erneut Bahnhof C durchfahren, wobei ihr 30-Minuten-Takt beibehalten wird. Züge der Linie S1 wenden in Bahnhof C, während die Züge der Linien S2, S5 und S6 bereits vor Bahnhof C wenden.

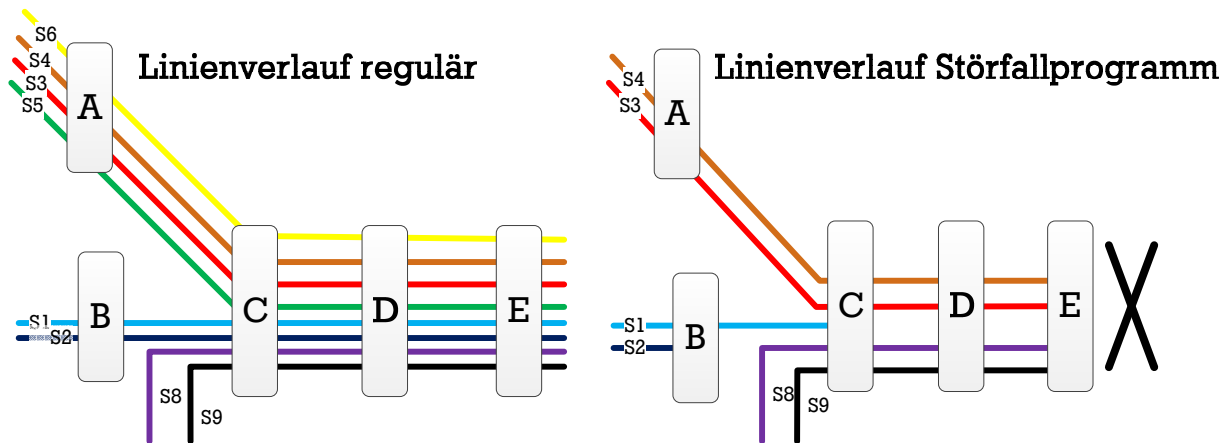


Abbildung 8.3: Linienerlauf im Regelbetrieb und im Störfallprogramm des Anwendungsbeispiels

Zur Überprüfung der Machbarkeit dieses Störfallprogramms soll der resultierende Belegungsgrad in Bahnhof C während der verschiedenen Szenarien bestimmt werden. Dazu ist eine Bestimmung der Zugzahlen notwendig. Deshalb sollen für Bahnhof C die Zugzahlen für die einzelnen Szenarien mithilfe der 15-Minuten-Heuristik bestimmt werden. Eine Übersicht über die Zugzahlen in den einzelnen Szenarien ist Tabelle 8.2 zu entnehmen.

Im Grundszenario 0 durchfahren alle Züge den Bahnhof C in ihren geplanten Takten. Dadurch ergibt sich eine Zugzahl von 24 Zügen pro Stunde und Richtung, welche im Mittel alle 2,5 Min in den Bahnhof C einfahren. Dies bedeutet, dass pro 15-Minuten-Abschnitt sechs Züge pro Richtung den Bahnhof C passieren.

Im Szenario 1 des stabilen Störfallprogramms durchfahren lediglich Züge der Linien S3, S4, S8 und S9 den Bahnhof C, wenden in Bahnhof E und passieren auf ihrem Rückweg erneut Bahnhof C. Züge der Linie S1 wenden in Bahnhof C, während Züge der Linien S2, S5 und S6 den Bahnhof C nicht mehr erreichen. Dies bedeutet, dass pro 15-Minuten-Abschnitt jeweils zwei Züge pro Richtung den Bahnhof C durchfahren und ein Zug im Bahnhof wendet.

Im Szenario 2 kommt im betrachteten Bahnhof während der ersten Viertelstunde nach Störungsbeginn die dem regulärem Fahrplan entsprechende Zugzahl an. Danach erreicht die im Störfallprogramm vorgesehene Zugzahl den Bahnhof. Dies bedeutet, dass in den ersten 15 Minuten nach SFP-Ausrufung jeweils ein Zug der Linien S2, S5 und S6 in Bahnhof C ankommt, obwohl dies nicht im Störfallprogramm vorgesehen ist. Diese Züge werden in Bahnhof C zusätzlich zum Zug der S1 gewendet. Züge der Linien S3, S4, S8 und S9 durchqueren den Bahnhof C weiterhin auf ihren Hin- und Rückwegen. Dies führt dazu, dass in der ersten Viertelstunde jeweils zwei Züge pro Richtung den Bahnhof C durchfahren und vier Züge im

Bahnhof wenden. Danach kommen die Züge wie im Störfallprogramm vorgesehen an (siehe Erläuterungen zu Szenario 1).

Im Szenario 3 kommt im betrachteten Bahnhof während der ersten halben Stunde nach Störungsbeginn die dem regulären Fahrplan entsprechende Zugzahl an. Auch hier erfolgt die Ankunft selbst mit großer Wahrscheinlichkeit verspätet. Danach kommt die im Störfallprogramm vorgesehene Zugzahl an. Dies bedeutet, dass in den ersten 30 Minuten nach Ausrufung des Störfallprogramms jeweils zwei Züge der Linien S2, S5 und S6 in Bahnhof C ankommen, obwohl dies nicht im Störfallprogramm vorgesehen ist. Diese Züge werden in Bahnhof C zusätzlich zum Zug der S1 gewendet. Züge der Linien S3, S4, S8 und S9 durchfahren den Bahnhof C weiterhin auf ihren Hin- und Rückwegen. Dies führt dazu, dass in den ersten zwei Viertelstunden jeweils zwei Züge pro Richtung den Bahnhof C passieren und vier Züge im Bahnhof wenden. Ab der dritten Viertelstunde kommen die Züge wie im Störfallprogramm vorgesehen an (siehe Erläuterungen zu Szenario 1).

Wie das Beispiel verdeutlicht, ist die Zahl der innerhalb einer Stunde im Bahnhof abzuarbeitenden Züge in den Szenarien 0 bis 3 sehr unterschiedlich (48, 20, 23 und 26 Züge), was sich auf die Gesamtbelegungszeit und damit auch auf den Belegungsgrad auswirkt. Zur allgemeinen Berechnung des Belegungsgrads in den einzelnen Szenarien wird auf Kapitel 9 und die Weiterführung des Anwendungsbeispiels in Abschnitt 9.3 und Abschnitt 10.5 verwiesen.

Tabelle 8.2: Beispiel zur Bestimmung der Zugzahlen in den verschiedenen Szenarien entsprechend der 15-Minuten-Heuristik für den Bahnhof C bei gattungsnem Verkehr

Szenario	Minute 0 bis 15	Minute 16 bis 30	Minute 31 bis 45	Minute 46 bis 60
s=0 Regelbetrieb				
hin	S6 S9 S4 S4 S1 S5 S2 S6 S8 S8 S3 S1 S5 S2 S2 S6 S6 S9 S9 S4 S1 S1 S5 S2 S6 S6 S8 S8 S3 S1 S1 S5 S2			
rück	S6 S9 S4 S4 S1 S5 S2 S6 S8 S8 S3 S1 S5 S2 S2 S6 S6 S9 S9 S4 S1 S1 S5 S2 S6 S6 S8 S8 S3 S1 S1 S5 S2			
s=1 komplette Entlastung/stabiles Störfallprogramm				
hin	S9 S4 S4 S1	S8 S3 S3 S1	S9 S4 S4 S1	S8 S3 S3 S1
rück	S9 S4 S4	S8 S3	S9 S4 S4	S8 S3 S3
s=2 Entlastung/stabiles Störfallprogramm nach 15 Min				
hin	S6 S9 S4 S4 S1 S1 S5 S2 S2 S8 S8 S3 S1 S1	S9 S9 S4 S4 S1	S8 S8 S3 S1	
rück	S9 S9 S4 S4	S8 S3	S9 S4 S4	S8 S8 S3 S3
s=3 Entlastung/stabiles Störfallprogramm nach 30 Min				
hin	S6 S9 S4 S4 S1 S1 S5 S2 S6 S6 S8 S8 S3 S1 S5 S2 S2 S9 S9 S4 S4 S1	S8 S8 S3 S1		
rück	S9 S9 S4 S4	S8 S3	S9 S4 S4	S8 S8 S3 S3

8.4 Zusammenfassung und Diskussion des Modells

8.4.1 Zusammenfassung

Im vorliegenden Kapitel wurde beschrieben, dass die im Störfallprogramm geplante Reduktion der Zugzahlen während der Einschwingphase nur schrittweise vonstatten geht, und die Ursache für die schrittweise erfolgende Reduktion erklärt. Die schrittweise Entfernung von überzähligen Zügen aus dem Netz sowie die notwendige individuelle Disposition von nicht SFP-konformen Zügen führt dazu, dass während der Einschwingphase Züge im Netz vorhanden sind, die im stabilen Störfallprogramm nicht vorgesehen sind. Dadurch kommt es zu einer erhöhten Gesamtbelegungszeit, welche wiederum zu Verspätungen und damit zu einer Behinderung/-Verzögerung der Einschwingphase führen kann.

Ausgehend von vorab definierten Anforderungen an das zu entwickelnde Modell zur schrittweisen Reduktion der Zugzahlen in der Einschwingphase wurden im Anschluss an die detaillierte Beschreibung der Problematik Anforderungen an ein entsprechendes Modell formuliert und ein Modellierungsvorschlag auf Basis von Szenarienbildung in Kombination mit einem heuristischen Ansatz zur Bestimmung der Zugzahlen beschrieben.

Grundgedanke der entwickelten Heuristik ist die Erstellung von verschiedenen Szenarien, welche die im System maximal und minimal mögliche Zugzahl sowie Zwischenstufen beschreiben. Dazu wird vereinfachend angenommen, dass die reduzierten Zugzahlen erst nach dem Ende der Einschwingphase im System verkehren und dass während der Einschwingphase Zugzahlen dem regulären Fahrplan entsprechen. Die Zwischenstufen der im System möglichen Zugzahlen während der Einschwingphase ergeben sich aus unterschiedlich lang angenommenen Einschwingdauern, deren Dauer einem Vielfachen von 15 Minuten entspricht.

Zur Erhöhung der Verständlichkeit des Vorgehens zur Erstellung der Szenarien ist den Erläuterungen ein ausführliches Beispiel angefügt.

Das so erarbeitete Teilmodell findet zusammen mit den Teilmodellen der veränderten und zusätzlichen Belegungszeiten in Störungen (siehe Kapitel 5 und Kapitel 6) im Gesamtmodell zur Ermittlung des Belegungsgrads in der Einschwingphase (siehe Kapitel 9) Verwendung.

8.4.2 Diskussion des Modells

Entsprechend der Merkmale einer Heuristik sind die in Abschnitt 8.3.1 aufgestellten Anforderungen einer einfach und schnell zu handhabenden Vorgehensweise zur Modellierung der reduzierten Zugzahlen erfüllt. Auch die Abbildung unterschiedlicher Zugzahlen, Reihenfolgen und Dauern der Einschwingphase ist durch die entwickelte Heuristik möglich.

Der Nachteil der entwickelten Heuristik liegt im Ansatz der Betrachtung der schlechtest möglichen Fälle in Bezug auf Zugzahl und Reihenfolge der Ankünfte der Züge. Dies führt bei der weiterführenden Berechnung des Belegungsgrads, der aufgrund der Anwendung eines Störfallprogramms entsteht, zur systematischen Überschätzung. So fiel bei der Betriebsdatenanalyse (siehe Kapitel 4) auf, dass sich während der Einschwingphase überschüssige Züge im System befinden. Jedoch tritt dieser Umstand nicht immer an allen SFP-Wendebahnhöfen gleichzeitig und in gleichem Maß auf. Weiterhin ist es nicht möglich, vorherzusagen, an welcher Betriebsstelle es wie wahrscheinlich ist, dass ein solcher „ungeplanter“ Zug auftaucht. Aus diesem Grund wurde der Ansatz der schlechtest möglichen Konstellation, also der Annahme, dass in den Bahnhöfen alle möglichen Züge ungeplant erscheinen, gewählt. Analoge Überlegungen gelten für die Verwendung des Ansatzes der schlecht möglichen Konstellation im Bezug auf die Reihenfolge der

Ankünfte der Züge. Allerdings wirkt sich diese Überschätzung nicht nachteilig auf die Stabilität eines auf diese Weise geprüften Störfallprogramms aus, da das Störfallprogramm dadurch für eine maximale resultierende Gesamtbelegungszeit ausgelegt wird, welche in den meisten Fällen nicht eintreffen wird.

Zur Verbesserung der vorgeschlagenen Methode existieren verschiedene Ansätze. So sollten die stochastischen Eigenschaften der Zugreihenfolge im SFP-Fall stärker einbezogen werden. Dies kann beispielsweise durch den Einbezug der Wahrscheinlichkeit von verschiedenen Zugfolgenfolgen erfolgen. Auch im Hinblick auf die im Betrieb notwendige Wirtschaftlichkeit sollte die entwickelte Heuristik in Bezug auf die Überschätzung angepasst werden. So wirkt die Überschätzung zwar positiv auf die Stabilität eines Störfallprogramms, kostet jedoch (ggf. unnötige) Reserven. Hier ist es denkbar, mit verschiedenen Anteilen an „überschüssigen“ Zügen zu rechnen, anstelle lediglich von der schlechtest möglichen Konstellation auszugehen.

9 Modell zur Berechnung des Belegungsgrads in Wendebahnhöfen

9.1 Einleitung

9.1.1 Motivation und Zielstellung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde dargestellt, dass dispositive und betriebliche Vorgänge im Störfall länger dauern können als im regulären Betrieb. Weiterhin wurde erarbeitet, dass die Einführung eines Störfallprogramms in mehreren Schritten abläuft, welche sich unter anderem in der Anzahl der sich im Netz befindlichen Züge unterscheiden. Aufgrund der höheren Zugzahlen in der Einschwingphase und aufgrund der zusätzlichen Belegungszeiten, die zu Beginn von Störungen und während der Störfallprogramme entstehen, ist es ersichtlich, dass die Gesamtbelegungszeit und damit der Belegungsgrad auf der Strecke und in den Stationen während der Einschwingphase größer ist als in der stabilen Phase. Dieser höhere Belegungsgrad kann zu Rückstaus während der Einschwingphase führen, welche die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase wesentlich verlängern und damit behindern bzw. verhindern. Dies ist möglich, wenn der Belegungsgrad eines Störfallprogramms während der Einschwingphase so hoch ist, dass aufgrund der dadurch entstehenden Wartezeiten Verspätungen aufgebaut werden, welche im Fahrtverlauf nicht abgebaut werden können und welche ggf. auf andere Zugfahrten übertragen werden. Deshalb ist es wichtig, das Funktionieren von Störfallprogrammen nicht nur in der stabilen Phase sondern auch während der Einschwingphase zu überprüfen.

Um den Betrieb im Störfall soweit wie möglich zu erhalten, bietet sich die Anwendung der Dispositionsmaßnahme „vorzeitige Wenden“, also des Teilausfalls anstelle eines Ausfalls der gesamten Linie an. Daher kommt der Dispositionsmaßnahme der vorzeitigen Wende in SFP-Wendebahnhöfen eine große Bedeutung zu. An den SFP-Wendebahnhöfen entstehen jedoch besonders häufig Rückstauungen (siehe Ergebnisse der Betriebsdatenanalyse in Kapitel 4). Es wird demnach eine Vorgehensweise benötigt, mit deren Hilfe der entstehende Belegungsgrad in den SFP-Wendebahnhöfen quantifiziert werden kann, um die Machbarkeit der Maßnahme und damit des Störfallprogrammes überprüfen zu können. Alle existierenden Verfahren zur Berechnung des Belegungsgrads oder anderer Leistungsfähigkeitskennzahlen haben jedoch gemeinsam, dass sie die o. g. Einflüsse bisher nicht berücksichtigen (siehe Abschnitt 2.5).

Ziel des vorliegenden Kapitels ist es daher, die in den vorangehenden Kapiteln erarbeiteten zusätzlichen Belegungszeitelemente aufgrund von Handlungen in Störungen sowie die in einzelnen Szenarien veränderliche Zugzahl zu einem Modell zur Quantifizierung des Belegungsgrads in SFP-Wendebahnhöfen zusammenzuführen. Anhand eines auf diese Weise quantifizierten Belegungsgrads soll es möglich werden, die Machbarkeit des Störfallprogramms an diesem Ort abzuschätzen.

9.1.2 Anforderungen an das Modell

Der erste Schritt für die Erarbeitung eines Modells zur Quantifizierung des Belegungsgrads in SFP-Wendebahnhöfen ist die Definition von Anforderungen an das Modell. Die Anforderungen können nach funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen unterschieden werden und sind sowohl für ein Modell zur Quantifizierung des Belegungsgrads in SFP-Wendebahnhöfen als auch für gegebenenfalls zu entwickelnde Modelle zur Quantifizierung des Belegungsgrads aufgrund anderer Dispositionsmaßnahmen gültig.

Aus dem zukünftigen Verwendungszweck – der Prüfung der Machbarkeit von Dispositionsmaßnahmen im Störfall – können folgende funktionale Anforderungen abgeleitet werden:

1. *Abbildung der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen:* Die in den vorangehenden Kapiteln erarbeiteten besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen müssen abgebildet werden können, d. h. Reduktion von Zugzahlen in der Einschwingphase, einmalige Zeitzuschläge für störungsbedingte Situationen sowie Zeitzuschläge für wiederkehrende Handlungen.
2. *Machbarkeitskennzahl:* Als Ergebnis der Berechnungen soll ein Wert entstehen, welcher im weiteren Verlauf als Kennzahl zur Beurteilung der Machbarkeit der dispositiven Maßnahme bzw. des Störfallprogramms verwendet werden kann.
3. *Zugreihenfolgeunabhängigkeit:* Im Hinblick auf die anzustrebende Allgemeingültigkeit der Ergebnisse sollte die Berechnung des Belegungsgrads vorrangig zugreihenfolgeunabhängig erfolgen. Zwar ist die Abbildung des Betriebsprogramms in der Störung vor allem in Bezug auf die Anzahl der Züge und ihrer Belegungszeiten wichtig, jedoch sollte das Berechnungsergebnis „machbar“ oder „nicht machbar“ nicht von der Reihenfolge der Züge abhängen, da diese vor allem in Störungen leicht von der geplanten Zugfolge abweichen kann.

Aus dem zukünftigen Verwendungszweck können weiterhin folgende nicht-funktionale Anforderungen abgeleitet werden, welche auch in den allgemeinen Anforderungen in Kapitel 3 formuliert wurden.

4. *Allgemeingültigkeit:* Das grundsätzliche Vorgehen sollte anerkannte Methoden zur Berechnung der Leistungsfähigkeit einbeziehen, wobei der Kern des Vorgehens zur Modellierung der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen unabhängig von der letztendlich gewählten Leistungskenngrößen und damit verbundenen Verfahren sein sollte.
5. *Übertragbarkeit:* Um eine breite Anwendbarkeit zu gewährleisten, ist eine Übertragbarkeit des Modells von gattungsreinem Verkehr auf Mischverkehr notwendig.
6. *Geringer Aufwand:* Da die Machbarkeitsabschätzung nur einen Teil der Erstellung von Störfallprogrammen darstellt, für die i. d. R. nur wenige Ressourcen zur Verfügung stehen, ist es wichtig, dass dieser Vorgang mit möglichst geringem Aufwand durchgeführt werden kann. Dazu ist es dienlich, wenn zur Berechnung möglichst wenige Hilfsmittel notwendig sind sowie eine (halb-)automatisierte Berechnung möglich ist.

9.1.3 Modellansatz und Vorgehen

Im Hinblick auf das Ziel der Allgemeingültigkeit wird für die Berechnung des Belegungsgrads in SFP-Wendebahnhöfen der allgemeine Ablauf zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit einer Infrastruktur zugrunde gelegt (siehe Abbildung 2.7), welcher anhand der Literaturrecherche in Kapitel 2 erarbeitet wurde. Dies umfasst die Schritte Modellierung der Infrastruktur, Modellierung des Betriebsprogramms, Ermittlung der Belegungszeiten und Berechnung der Mindestzugfolgezeiten sowie Berechnung der Leistungskenngrößen. Diese Schritte werden nacheinander bearbeitet und um die besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs sowie die SFP-spezifischen Eigenschaften erweitert.

Das Ergebnis der Ausführungen ist ein Modell, welches den Belegungsgrad von SFP-Wendebahnhöfen im Rahmen verschiedener Szenarien quantifiziert, und mit dessen Hilfe in einem weiteren Schritt die Machbarkeit der Einschwingphase eines Störfallprogramms bewertet werden kann. Abschließend erfolgt eine Weiterführung des in Kapitel 8 begonnenen Anwendungsbeispiels, in welchem für einen Störfallprogrammorschlag die Belegungsgrade in den verschiedenen Szenarien berechnet werden.

9.2 Entwicklung eines Modells zur Berechnung des Belegungsgrads in Wendebahnhöfen

9.2.1 Modellierung der Infrastruktur

Zur Berechnung des Belegungsgrads in Wendebahnhöfen ist es zweckmäßig, sich auf die Modellierung von Knoten zu beschränken (siehe Kapitel 2). Jedoch ist es nicht zielführend, einen Wendebahnhof auf Knotenebene zu betrachten. Da sich Betriebsprogramme in einzelnen Bahnsteiggleisen im Störfall wie auch im regulären Betrieb innerhalb eines Bahnhofs stark unterscheiden können, ist im vorliegenden Fall eine Einzelbetrachtung der jeweiligen Teile eines Knotens sinnvoller als eine Berechnung des Belegungsgrads auf Knotenebene.

Wie in Kapitel 2 beschrieben, ist eine Unterteilung von Knoten in Fahrstraßenknoten, Teilfahrstraßenknoten und Gleisgruppen möglich, deren Belegungszeiten im Zusammenhang oder einzeln betrachtet werden können. Die nicht-funktionale Anforderung des geringen Berechnungsaufwands steht jedoch der verketteten Betrachtung der Belegung von Gleisgruppen und Teilfahrstraßenknoten entgegen, da diese sehr aufwendig sind. Deshalb erfolgt eine getrennte Betrachtung auf der Ebene von Gleisgruppen und Teilfahrstraßenknoten.

Wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Teilfahrstraßenknoten eines Bahnhofs nur bei der Ein- und Ausfahrt von Zügen und nicht während der Halte- oder Wendezeit der Züge belegt sind und wird ebenfalls davon ausgegangen, dass die durch die Ein- und Ausfahrt entstehenden Belegungszeiten kürzer als die durch Halte oder Wenden entstehenden Belegungszeiten sind, so ergibt sich die Belegungszeit in den einzelnen Gleisgruppen eines Knotens als bestimmender Faktor für die Leistungsfähigkeit. Da die Belegungszeit einzelner Gleise je nach Betriebsprogramm und den im Störfall geltenden Dispositionsregeln unterschiedlich sein kann, ist es zweckmäßig, anstelle von Gleisgruppen alle verwendeten (Bahnsteig-)Gleise eines Bahnhofs einzeln zu betrachten.

Dementsprechend ist für die Modellierung der Infrastruktur des Bahnhofs die Anzahl der zu betrachteten Gleise i zu bestimmen:

i – Index für betrachtete Gleise, $i = 1, \dots, o$ (o = Anzahl Gleise).

9.2.2 Modellierung des Betriebsprogramms und der Disposition

Im Betriebsprogramm sind u. a. die Anzahl der Züge einer Zuggattung und ggf. einer Linie sowie deren Streckenverlauf festgelegt. Da sich die Zugzahlen in der Einschwingphase eines Störfallprogramms verändern, sind Szenarien mit verschiedenen Zugzahlen zu berücksichtigen (siehe Kapitel 8).

Entsprechend der existierenden Dispositionsregeln für den regulären Betrieb sowie für den SFP-Fall finden verschiedene Fahrttypen j durch einen Knoten statt. Je nach Betriebsprogramm und Dispositionsregeln ergibt sich eine entsprechende Anzahl an Zügen $z_{s,j}$, die einen Fahrttyp j innerhalb eines Szenarios s durchführen. Die Werte für die Anzahl der Züge bzw. Fahrten je Fahrttyp in einem Szenario s werden im Vektor \vec{z}_s zusammengefasst.

Dementsprechend sind für die Modellierung von Betriebsprogramm und Disposition im Bahnhof folgende Indizes und Variablen notwendig:

- s – Index für die Anzahl der Szenarien, $s = 0, \dots, 3$
- j – Index für mögliche Fahrttypen durch die Gleise, $j = 1, \dots, p$ (p =Anzahl Fahrttypen)
- \vec{z}_s – Vektor zur Anzahl aller Züge bzw. Zugfahrten je Fahrttyp j im Bahnhof je Szenario s
- $z_{s,j}$ – Anzahl der Zugfahrten eines Fahrttyps j innerhalb des Szenarios s mit $z_{s,j} \in \vec{z}_s$.

9.2.3 Ermittlung der Belegungszeiten

Belegungszeiten durch einzelne Fahrten

Die durch eine Fahrt des Fahrttyps j entstehende Belegungszeit eines Gleises i wird durch den Wert $t_{i,j}$ repräsentiert. Die Belegungszeiten aller Gleise durch die möglichen Fahrtentypen werden in der Belegungszeitmatrix F zusammengefasst, welche die Form (ixj) aufweist. Die Belegungszeit eines Gleises lässt sich je nach Art des Fahrttyps auf folgende Weisen bestimmen.

Für regulär in einem Bahnhof haltende und danach weiterfahrende Züge kann für die Belegungszeit der Gleise die für die aus dem Bahnhof führende Strecke geltende Mindestzugfolgezeit t_Z angesetzt werden. Diese Zeit umfasst die Zeit für das Ein- und Ausfahren sowie für die planmäßige Haltezeit t_H .

Die Belegungszeit für Fahrten mit vorzeitigen Wenden in dem betreffenden Bahnhof ergibt sich aus der Mindestzugfolgezeit t_Z abzüglich der planmäßigen Haltezeit t_H und zuzüglich der Wendezeit in Störungen $t_{SFP-Wende}$. Hierfür gilt die Annahme, dass eine Teilfahrstraßenauflösung existiert sowie dass die Fahrwegeinstellung für die Ausfahrt parallel zur Halte- bzw. zur Wendezeit erfolgt. Weiterhin ist es möglich, weitere Zuschläge zu den Belegungszeiten durch haltende und weiterfahrende Züge bzw. durch wendende Züge zu addieren. So ist es beispielsweise denkbar, zusätzliche Zeiten für den Fahrgastwechsel aufgrund eines hohen Fahrgastaufkommens in einigen Bahnhöfen mit einzubeziehen. Derzeit fehlen jedoch Grenzwerte für die Beurteilung „hoher“ und „niedriger“ Fahrgastaufkommen sowie auch Werte für die entsprechenden Haltezeitzuschläge, weshalb diese Betrachtungen in den weiteren Ausführungen nicht betrachtet werden.

Dementsprechend sind für die Modellierung der Belegungszeiten durch einzelne Fahrten im Wendebahnhof folgende Variablen notwendig:

- F – Belegungszeitenmatrix; Matrix der einzelnen Belegungszeiten der Gleise i , die durch alle vorkommenden Fahrttypen j entstehen
- $t_{i,j}$ – Zeit, die ein Gleis i durch eine Fahrt des Fahrttyps j belegt wird mit $t_{i,j} \in F$ und $t_{ij} = t_Z$ für Durchfahrten mit Halt sowie $t_{i,j} = t_Z - t_H + t_{SFP,Wende}$ für Wendungen im SFP-Fall, wobei $t_{SFP,Wende} = t_{Wende,Ril} + E(t_{Wende,X})$.

Einmalige Belegungszeitzuschläge

Wie in Kapitel 5 beschrieben ist es möglich, dass Züge nach dem Störungseintritt angehalten werden und bis zu dem Zeitpunkt, an dem eine Entscheidung getroffen und kommuniziert wurde und ggf. weitere Anweisungen erteilt wurden, nicht weiter fahren. Diese zusätzliche Belegungszeit pro Gleis i wird durch einen einmaligen Störungszuschlag $t_{Zu,s,i}$ abgebildet, welcher im Vektor $\vec{t}_{Zu,s}$ für alle Gleise zusammengefasst wird.

Die Höhe des einmaligen Belegungszeitzuschlags umfasst mindestens die Zeit, bis eine Entscheidung getroffen wurde sowie die Zeit, bis die Störfallprogramm-Information über das IT-System an alle Beteiligten gemeldet wurde. Gegebenenfalls muss auch die Zeit für die Durchführung eines Nothalts eingerechnet werden. Hierbei werden die Erwartungswerte für die einzelnen Dauern addiert (siehe Kapitel 5). Ebenso kann die Zeit zur Übermittlung individueller Anweisungen zum einmaligen Belegungszeitzuschlag einzelner Züge addiert werden.

Welchen Gleisen der Zuschlag zugerechnet wird, hängt von der zu modellierenden Situation ab: Handelt es sich um einen stark befahrenen Bahnhof, in dem Züge in allen Gleisen gleichzeitig halten, so ist für den schlechtesten Fall davon auszugehen, dass sich zum Eintrittszeitpunkt der Störung in jedem Gleis ein haltender Zug befindet. Dementsprechend ist zu den Belegungszeiten eines jeden Gleises ein einmaliger Zuschlag $t_{Zu,s,i}$ anzusetzen. In weniger stark befahrenen Bahnhöfen ist es möglich, dass sich zum Eintrittszeitpunkt der Störung nur in einem bestimmten Anteil der Gleise Züge befinden. In diesem Fall besteht jedoch die Frage, welchem Gleis dieser Belegungszeitzuschlag zugeordnet werden soll. Da die Machbarkeit von Störfallprogrammen für den ungünstigsten Fall geprüft werden soll, ist es auch an dieser Stelle zweckmäßig, einen einmaligen Belegungszeitzuschlag für alle betrachteten Gleise mit einzurechnen.

Dementsprechend sind für die Modellierung der einmaligen Belegungszeitzuschläge folgende Variablen erforderlich:

- $\vec{t}_{Zu,s}$ – Vektor der einmaligen Störungszuschläge aller Gleise im Szenario s
- $t_{Zu,s,i}$ – einmaliger Störungszuschlag im Szenario s zur Belegungszeit eines Gleises i mit $t_{Zu,s,i} \in \vec{t}_{Zu,s}$ und $t_{Zu,s,i} = E(t_{Nothalt}) + E(t_{Entsch}) + E(t_{Ueberm})$.

Weiterhin ist zu beachten, dass der Vektor $\vec{t}_{Zu,s}$ in den Szenarien „regulärer Betrieb“ ($s=0$) und „stabiles Störfallprogramm“ ($s=1$) den Wert Null aufweist, da die Zuschläge nur in Szenarien mit Einschwingphase realisiert werden.

$$\vec{t}_{Zu,s} = \vec{0}, \text{ für } s \leq 1 \text{ und } \vec{t}_{Zu} = \begin{pmatrix} t_{Zu,s,1} \\ \vdots \\ t_{Zu,s,0} \end{pmatrix}, \text{ für } s > 1.$$

Gesamtbelegungszeit

Die Gesamtbelegungszeit $t_{s,i}$ eines Gleises i in einem Szenario s ergibt sich aus der Anzahl der Fahrten je Fahrtyp j , welche das Gleis i belegen, multipliziert mit der Belegungszeit des jeweiligen Fahrtyps sowie dem einmaligen Störschlag für das entsprechende Gleis. Die Gesamtbelegungszeit aller Gleise wird im Gesamtbelegungszeitvektor \vec{t}_s zusammengefasst.

Dementsprechend sind für die Modellierung der Gesamtbelegungszeit folgende Variablen erforderlich:

- \vec{t}_s – Vektor der Gesamtbelegungszeiten aller Gleise im Szenario s
- $t_{s,i}$ – Gesamtbelegungszeit eines Gleises i im Szenario s mit $t_{s,i} \in \vec{t}_s$.

Daraus ergibt sich für die Berechnung der Gesamtbelegungszeit der Gleise je Szenario:

$$\vec{t}_s = F \cdot \vec{z}_s + \vec{t}_{Zu}, \text{ mit}$$

$$t_{s,i} = \sum_{j=1}^p t_{i,j} \cdot z_{s,j} + t_{Zu,i}.$$

9.2.4 Berechnung der Leistungsfähigkeit

Wahl der Berechnungsmethode

Nach der Modellierung von Infrastruktur, Betriebsprogramm, Disposition und Belegungszeiten stehen verschiedene Möglichkeiten zur Berechnung der Leistungsfähigkeit in SFP-Wendebahnhöfen zur Auswahl (Abschnitt 2.5). Betrachtet man die in Abschnitt 9.1.2 aufgestellten Forderungen, ergibt sich vor allem aus der dritten Anforderung der Zugreihenfolgeunabhängigkeit der Ausschlag für die Wahl der geeigneten Berechnungsmethode: Während simulative und konstruktive Verfahren zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit zugreihenfolgeunabhängig sind, ist dies bei analytischen Verfahren nicht der Fall (siehe Kapitel 2). Weiterhin spricht der für simulative und konstruktive Verfahren notwendige Modellerstellungsaufwand gegen eine Verwendung dieser ¹.

Da die analytische Berechnung der Leistungsfähigkeit zugreihenfolgeunabhängig ist und für die Berechnung lediglich die Zugzahlen und Belegungszeiten benötigt werden, wird sie an dieser Stelle verwendet. Hierbei sind grundsätzlich beide Arten der Berechnung – mit und ohne bedienungstheoretischem Ansatz – geeignet. In Ermangelung eines bedienungstheoretischen Modells für den Betrieb in Störungen wird jedoch auf die analytische Berechnung der Leistungsfähigkeit ohne bedienungstheoretisches Modell zurückgegriffen.

Dementsprechend wird die Berechnung des Belegungsgrads verwendet. Die Entscheidung, ob der verkettete oder der Einzelbelegungsgrad zu wählen ist, ergibt sich aus der bei der Modellierung der Infrastruktur getroffenen Entscheidung, nur die einzelnen Gleise zu betrachten: Werden die Gleise separat betrachtet, entfällt die Möglichkeit der Berechnung eines verketteten Belegungsgrads. Die Entscheidung für die Wahl der Betrachtung des Einzelbelegungsgrads ist konsistent mit der in Abschnitt 9.1.2 aufgestellten Forderung eines möglichst geringen Ermittlungsaufwandes, welcher durch die Betrachtung des verketteten Belegungsgrads stark ansteigen würde.

¹ Existiert jedoch bereits ein Simulationsmodell für die zu betrachtende Infrastruktur und den entsprechenden Betrieb und kann eine Abbildung des Störfallprogramms mit wenig Aufwand erfolgen, ist die Ermittlung der Leistungsfähigkeit durch Simulation in Erwägung zu ziehen.

Berechnung des Belegungsgrads

Die Belegungsgrade $\rho_{Bel,s,i}$ der einzelnen Gleise i im Szenario s werden im Belegungsgradvektor $\vec{\rho}_{Bel,s}$ zusammengefasst. Die Berechnung des Belegungsgrads ergibt sich entsprechend der Formel für den Einzelbelegungsgrad der Gleise nach DB Netz (405) und UIC (2004) als

$$\vec{\rho}_{Bel,s} = \frac{1}{t_U} \cdot \vec{t}_s, \text{ mit}$$

$$\rho_{Bel,s,i} = \frac{t_{s,i}}{t_U}.$$

Dementsprechend sind für die Modellierung des Einzelbelegungsgrads folgende Variablen erforderlich:

- $\vec{\rho}_{Bel,s}$ – Belegungsgradvektor aller Gleise im Szenario s
- $\rho_{Bel,s,i}$ – Belegungsgrad eines Gleises i im Szenario s , $\rho_{Bel,s,i} \in \vec{\rho}_{Bel,s}$
- t_U – Untersuchungszeitraum.

9.2.5 Zusammenfassung des Modells

Zur besseren Übersicht ist an dieser Stelle das vollständige Modell zur Berechnung des Belegungsgrads eines Störfallprogramms in einem Wendebahnhof in verschiedenen Szenarien zusammengefasst.

$$\vec{\rho}_{Bel,s} = \frac{1}{t_U} \cdot \vec{t}_s = \frac{1}{t_U} \cdot (F \cdot \vec{z}_s + \vec{t}_{Zu,s})$$

$$\rho_{Bel,s,i} = \frac{t_{s,i}}{t_U} \text{ mit } t_{s,i} = \sum_{j=1}^p t_{i,j} \cdot z_{s,j} + t_{Zu,i}$$

Indizes

- i – Index für betrachtete Gleise, $i = 1, \dots, o$ (o =Anzahl Gleise)
- j – Index für mögliche Fahrttypen durch die Gleise, $j = 1, \dots, p$ (p =Anzahl Fahrttypen)
- s – Index für die Anzahl der Szenarien $s = 0, \dots, 3$

Variablen

- $z_{s,j}$ – Anzahl der Zugfahrten eines Fahrttyps j innerhalb des Szenarios s
- \vec{z}_s – Vektor zur Anzahl aller Züge bzw. Zugfahrten je Fahrttyp j im Bahnhof je Szenario s
- $t_{i,j}$ – Zeit, die ein Gleis i durch eine Fahrt des Fahrttyps j belegt wird
- F – Belegungszeitenmatrix; Matrix der einzelnen Belegungszeiten der Gleise i , die durch alle vorkommenden Fahrttypen j entstehen
- $t_{Zu,s,i}$ – einmaliger Störungszuschlag im Szenario s zur Belegungszeit eines Gleises i
- $\vec{t}_{Zu,s}$ – Vektor der einmaligen Störungszuschläge aller Gleise im Szenario s
- $t_{s,i}$ – Gesamtbelegungszeit eines Gleises i im Szenario s
- \vec{t}_s – Vektor der Gesamtbelegungszeiten aller Gleise im Szenario s
- $\rho_{Bel,s,i}$ – Belegungsgrad eines Gleises i im Szenario s
- $\vec{\rho}_{Bel,s}$ – Belegungsgradvektor aller Gleise im Szenario s
- t_U – Untersuchungszeitraum
- t_Z – Mindestzugfolgezeit
- t_H – Haltezeit
- $t_{SFP,Wende}$ – Wendezeit in Störungen
- t_{RIL} – technische Mindestwendezeit laut Richtlinie
- $t_{Wende,X}$ – zusätzliche Wendezeit in Störungen

Annahmen

- $t_{Zu,s,i} = E(t_{Nothalt}) + E(t_{Entsch}) + E(t_{Ueberm})$
- $t_{ij} = t_Z$ für Durchfahrten mit Halt
- $t_{i,j} = t_Z - t_H + t_{SFP,Wende}$ für Wenden im SFP-Fall
- $t_{SFP,Wende} = t_{Wende,Ril} + E(t_{Wende,X})$

9.3 Anwendungsbeispiel Berechnung des Belegungsgrads eines SFP-Wendebahnhofs

9.3.1 Situationsbeschreibung und Vorgehen

Zur Verdeutlichung der entwickelten Vorgehensweise zur Berechnung des Belegungsgrads unter Beachtung der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen und der Einschwingphase im Speziellen wird das in Kapitel 8 begonnene Anwendungsbeispiel weitergeführt. Es handelt sich hierbei um die Berechnung des Belegungsgrads des Bahnhofs C, welcher im regulären Betrieb als Durchgangsbahnhof fungiert, während dort für den SFP-Fall die vorzeitige Wende der Linie S1 vorgesehen ist (siehe Abbildung 8.3). In Abbildung 9.1 ist die Topologie des Bahnhofs C dargestellt.

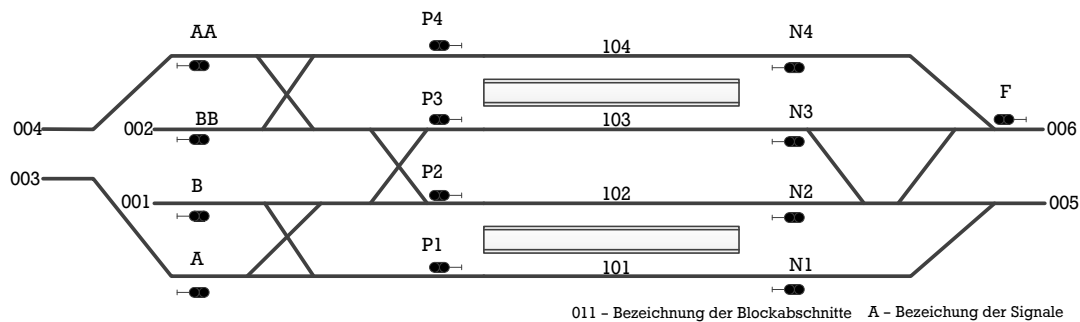


Abbildung 9.1: Topologie des SFP-Wendebahnhofs C

Für den vorliegenden Teil des Anwendungsbeispiels besteht das Ziel in der Berechnung des Belegungsgrads für die in Kapitel 8 aufgestellten Szenarien. Zur Berechnung wird die Abfolge der bereits beschriebenen Schritte Modellierung der Infrastruktur, Modellierung des Betriebsprogramms, Berechnung der Belegungszeiten und Berechnung des Belegungsgrads eingehalten.

9.3.2 Modellierung der Infrastruktur des Bahnhofs C

Im vorhergehenden Abschnitt 9.2 wurde beschrieben, dass der Belegungsgrad der Gleise, in denen Züge halten und/oder wenden, also der Bahnsteiggleise, von Interesse ist. Wie in Abbildung 9.2 dargestellt, verfügt der Bahnhof C über die Bahnsteiggleise 101 bis 104. Dementsprechend ist der Index i für betrachtete Gleise im vorliegenden Fall als $i = \{101, 102, 103, 104\}$ definiert.

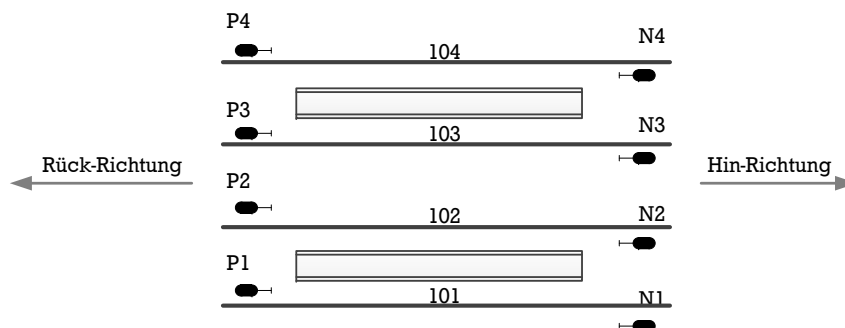


Abbildung 9.2: Für die Berechnung betrachtete Infrastruktur des SFP-Wendebahnhofs C

9.3.3 Modellierung von Betriebsprogramm und Disposition auf der Infrastruktur

Insgesamt sind im regulären Betrieb sowie im Störfall acht verschiedene Fahrttypen im Bahnhof C vorgesehen (siehe auch Tabelle 9.1). Dementsprechend ist der Index j für die Anzahl der Fahrttypen im vorliegenden Fall als $j = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ definiert.

Im Regelfall fungiert der Bahnhof C als Durchgangsbahnhof, wobei die Fahrten Eins bis Vier stattfinden und Fahrten in Hin-Richtung auf den Gleisen 101 und 102 sowie Fahrten in Rück-Richtung auf den Gleisen 103 und 104 halten. Im SFP-Fall ist vorgesehen, dass:

- Züge der Linien 3, 4, 8 und 9 weiterhin den Bahnhof C in beide Richtungen passieren aber auf anderen Bahnsteigen halten (Fahrttypen 1, 4, 5 und 8),
- Züge der Linie 1 auf dem Hinweg im Bahnhof C wenden (Fahrttyp 6) und
- Züge der Linien 2, 5 und 6 jeweils vor dem Bahnhof C wenden (und demnach im stabilen Störfallprogramm nicht mehr den Bahnhof C passieren).

Da sich in der Einschwingphase bereits Züge der Linien 2, 5, 6 in Hin-Richtung auf ihrem Weg zum Bahnhof C befinden können und diese Züge gegebenenfalls nicht mehr rechtzeitig vor dem Bahnhof C gewendet werden können, ist es möglich dass diese Züge in der Einschwingphase im Bahnhof C wenden (Fahrttypen 6 und 7). Weiterhin ist es möglich, dass Züge der Linien 1, 2, 5, 6 die Störstelle vor dem Eintritt der Störung noch passiert haben und sich auf dem Rückweg durch den Bahnhof C befinden (Fahrttypen 4 und 8). Eine kompakte Darstellung der verschiedenen Fahrttypen sowie der Zuordnung von Fahrttypen zu Szenarien ist in Tabelle 9.1 zu finden.

Tabelle 9.1: Beschreibung der Fahrttypen sowie Zuordnung von Fahrttypen zu Szenarien

Typ j	Einfahrt		Ausfahrt		Belegung von Gleis	Linienverteilung bei	
	von	nach	von	nach		$s=0$	$s=1/2/3$
1	A	N1	N1	001	101	S3H, S4H, S5H, S6H	S3H, S4H
2	B	N2	N2	001	102	S1H, S2H, S8H, S9H	–
3	F	P3	P3	002	103	S1R, S2R, S8R, S9R	–
4	F	P4	P4	003	104	S3R, S4R, S5R, S6R	S3R, S4R, S5R, S6R
5	B	N1	N1	001	101		S8H, S9H
6	B	N2	P2	002	102		S1, S2 Wende
7	A	N3	P3	003	103		S5, S6 Wende
8	F	P4	P4	002	104		S8R, S9R, S1R, S2R

Den Ausgangspunkt für die Bestimmung der Zugzahlen je Fahrttyp j bilden die in Kapitel 8 aufgestellten Szenarien sowie die dafür ermittelten Zugzahlen je Linie. Entsprechend der in Tabelle 9.1 dargestellten Zuordnung von Linien zu Fahrttypen sowie der in Tabelle 8.2 ermittelten Zugzahlen je Linie ergibt sich für die einzelnen Szenarien folgende Zuordnung von Zugzahlen zu Fahrttypen:

$$\vec{z}_0 = \begin{pmatrix} 12 \\ 12 \\ 12 \\ 12 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{z}_1 = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 0 \\ 4 \\ 4 \\ 4 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix}, \vec{z}_2 = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 0 \\ 4 \\ 4 \\ 5 \\ 2 \\ 4 \end{pmatrix}, \vec{z}_3 = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 0 \\ 4 \\ 4 \\ 6 \\ 4 \\ 4 \end{pmatrix}.$$

9.3.4 Ermittlung der Belegungszeiten

Belegungszeiten durch einzelne Fahrten

Wie im vorangehenden Abschnitt beschrieben, kann die für die Strecke geltende Mindestzugfolgezeit t_Z für regulär in einem Bahnhof haltende und weiterfahrende Fahrten als Belegungszeit eines Gleises angesetzt werden. Im vorliegenden Beispiel handelt es sich hierbei um eine Mindestzugfolgezeit von 2,5 Minuten, welche als Belegungszeit der Gleise durch die Fahrttypen Eins bis Fünf sowie durch Fahrttyp Acht angesetzt werden kann.

Die Belegungszeit durch Fahrten mit vorzeitigen Wenden im Bahnhof C ergibt sich bei einer Mindestzugfolgezeit von zwei Minuten, einer planmäßigen Haltezeit von einer Minute sowie einer Wendezeit in Störungen von neun Minuten für eine Wende mit nur einem Triebfahrzeugführer (siehe Kapitel 6) aus

$$t_{i,j} = t_Z - t_H + t_{SFPWende} = 2,5 \text{ Minuten} - 1 \text{ Minute} + 9 \text{ Minuten} = 10,5 \text{ Minuten}.$$

Dementsprechend weist die Matrix F mit den Belegungszeiten der einzelnen Gleise (Zeile) durch die jeweils möglichen Fahrten (Spalten) folgende Form auf

$$F = \begin{pmatrix} 2,5 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 2,5 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 2,5 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 10,5 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 2,5 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 10,5 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 2,5 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 2,5 \end{pmatrix}.$$

Einmalige Belegungszeitzuschläge

Der Wert für die einmaligen Belegungszeitzuschläge umfasst mindestens die Zeit für die Durchführung eines Nothalts, die Zeit bis eine Entscheidung getroffen wurde sowie die Zeit, bis Störfallprogramm-Informationen über das IT-System an alle Beteiligten gemeldet wurden. Unter Annahme einer, für große S-Bahn Netze realistischen, Frist von zehn Minuten bis zur Entscheidung über eine SFP-Einführung nach einer Störung ergibt sich daraus folgender einmaliger Belegungszeitzuschlag pro Gleis (siehe Tabelle 5.2):

$$t_{Zu,s,i} = E(t_{Nothalt}) + E(t_{Entsch}) + E(t_{Ueberm}) = 1,5 + \frac{3 + 2 \cdot 10}{3} + 3,5 = 12,6 \approx 13 \text{ Minuten}$$

Der Zuschlagsvektor $\vec{t}_{Zu,s}$ der einmaligen Belegungszeitzuschläge für jedes Gleis weist dementsprechend folgende Form auf: $\vec{t}_{Zu,s} = \vec{0}$, für $s \leq 1$ und $\vec{t}_{Zu,s} = \begin{pmatrix} 13 \\ 13 \\ 13 \\ 13 \end{pmatrix}$, für $s \leq 1$.

Gesamtbelegungszeit

Entsprechend der Formel

$$\begin{pmatrix} t_{s,1} \\ \vdots \\ t_{s,o} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{1,1} & \dots & t_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{o,1} & \dots & t_{o,p} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} z_{s,1} \\ \vdots \\ z_{s,p} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_{Zu,s,1} \\ \vdots \\ t_{Zu,s,o} \end{pmatrix}$$

ergeben sich folgende Gesamtbelegungszeitvektoren \vec{t}_s mit den Gesamtbelegungszeiten je Gleis für die verschiedenen Szenarien s (alle Werte in Minuten):

$$\vec{t}_0 = \begin{pmatrix} 30 \\ 30 \\ 30 \\ 30 \end{pmatrix}, \vec{t}_1 = \begin{pmatrix} 20 \\ 42 \\ 0 \\ 20 \end{pmatrix}, \vec{t}_2 = \begin{pmatrix} 33 \\ 65,5 \\ 34 \\ 33 \end{pmatrix}, \vec{t}_3 = \begin{pmatrix} 33 \\ 76 \\ 55 \\ 33 \end{pmatrix}.$$

9.3.5 Berechnung des Belegungsgrads

Bei einem Betrachtungszeitraum von $t_U = 60$ Minuten und den für jedes Szenario berechneten Gesamtbelegungszeiten \vec{t}_s ergeben sich aus

$$\vec{\rho}_{Bel,s} = \frac{1}{t_U} \cdot \vec{t}_s$$

folgende Belegungsgradvektoren für die einzelnen Szenarien:

$$\vec{\rho}_{Bel,0} = \begin{pmatrix} 50\% \\ 50\% \\ 50\% \\ 50\% \end{pmatrix}, \vec{\rho}_{Bel,1} = \begin{pmatrix} 33\% \\ 70\% \\ 0\% \\ 33\% \end{pmatrix}, \vec{\rho}_{Bel,2} = \begin{pmatrix} 55\% \\ 109\% \\ 57\% \\ 55\% \end{pmatrix}, \vec{\rho}_{Bel,3} = \begin{pmatrix} 55\% \\ 127\% \\ 92\% \\ 55\% \end{pmatrix}.$$

9.4 Zusammenfassung und Diskussion des Modells

9.4.1 Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

Im vorliegenden Kapitel wurde eine Vorgehensweise entwickelt, welche die in den vorangehenden Kapiteln erarbeiteten besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen und das Einschwingverhalten von Störfallprogrammen in die Berechnung des Belegungsgrads von SFP-Wendebahnhöfen mit einbezieht.

Durch die Abarbeitung und entsprechende Anpassung der allgemeinen Vorgehensweise zur Modellierung von Infrastruktur, Betriebsprogramm, Disposition und Belegungszeiten konnten die besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen bei der Berechnung des Belegungsgrads für verschiedene Szenarien eines Störfallprogramms berücksichtigt werden. So wurde eine allgemeingültige Vorgehensweise zur Erstellung des Modells beschrieben, welche von der letztendlich zur Berechnung der Leistungsfähigkeit verwendeten Methode unabhängig ist. Zur Erläuterung der einzelnen Arbeitsschritte wurde die beschriebene Vorgehensweise anhand eines Anwendungsbeispiels demonstriert.

Auf Basis des beschriebenen Modells ist es nun möglich, den Einzelbelegungsgrad der Bahnsteiggleise von SFP-Wendebahnhöfen in Funktion verschiedener Phasen und Zugzahlkombinationen abzuschätzen. Auf dieser Grundlage lassen sich verschiedene SFP-Lösungen, u. a. für die SFP-Maßnahme „vorzeitige Wende“, bereits in der Planungsphase bewerten. Dazu soll dieser Wert im nachfolgenden Kapitel mit einer Machbarkeitseinschätzung verknüpft werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es sich bei der vorgestellten Vorgehensweise um das erste Modell zur Abbildung von Einschwingprozessen und ihrer Wirkungen auf den Belegungsgrad in SFP-Wendebahnhöfen handelt. So wurden zusätzliche und längere Belegungszeiten, welche sich aus der Störungssituation und der Einschwingphase ergeben, in die Berechnungen eingebunden und die sich aufgrund der schrittweisen Verringerung der Zugzahlen verändernde Gesamtbelegungszeit abgebildet. Die Berechnung des Einzelbelegungsgrads bietet ein verhältnismäßig einfach anzuwendendes erstes quantitatives Hilfsmittel, welches in Verbindung mit den im nachfolgenden Kapitel festgelegten Regeln und Grenzwerten zur Bewertung der Machbarkeit eines Störfallprogramms verwendet werden kann.

9.4.2 Diskussion des Modells

Vor der Erarbeitung des Modells zur Ermittlung des Belegungsgrads in SFP-Wendebahnhöfen wurden zu Beginn des Kapitels funktionale und nicht-funktionale Anforderungen an das Modell formuliert.

Die eingangs aufgestellten funktionalen Anforderungen der *Abbildung der SFP-Charakteristiken*, der *Machbarkeitskennzahl* sowie der *Zugreihenfolgeunabhängigkeit* wurden erfüllt. Allerdings muss trotz der Erfüllung auf Einschränkungen der inhaltlichen Gültigkeit hingewiesen werden. Da sich die Berechnung auf den Einzelbelegungsgrad der einzelnen Gleise beschränkt und Abhängigkeiten von Ein- und Ausfahrten über Teilfahrstraßenknoten zwischen den einzelnen Gleisen vernachlässigt werden, entsteht durch das beschriebene Vorgehen eine systematische Unterschätzung des Belegungsgrads. Weiterhin wurde auf die Betrachtung von zusätzlichen Pufferzeiten zwischen einzelnen Fahrten verzichtet. Dies führt zu einer Unterschätzung des Belegungsgrads, obwohl Pufferzeiten indirekt durch die bei SFP-Wenden auftretenden längeren Belegungszeiten beachtet werden. Dagegen steht jedoch, die in Kapitel 8 beschriebene Überschätzung des Belegungsgrads durch die Annahme, dass während der Einschwingphase alle Züge aller Linien in Bahnhöfen einfahren, in denen sie sich nicht befinden sollten. Aufgrund

praktischer Beobachtungen kann davon ausgegangen werden, dass die durch die Betrachtung des Einzelbelegungsgrads entstehende Unterschätzung durch diese Überschätzung zumindest teilweise ausgeglichen wird.

Die eingangs aufgestellte nicht-funktionale Anforderung der *Allgemeingültigkeit* des Modells zur Berechnung des Belegungsgrads in SFP-Wendebahnhöfen konnte erfüllt werden. Die Vorgehensweise beschreibt methodenunabhängig die Abbildung von im Störungsfall abweichenden Belegungszeiten und von unterschiedlichen Zugzahlen in der Einschwingphase. Auf dieser Grundlage können die für jede Methode erforderlichen Eingangsdaten, wie beispielsweise Sperrzeitentuppen oder Ankunftsdaten, abgeleitet oder ermittelt werden.

Auch die nicht-funktionale Anforderung der *Übertragbarkeit* des Modells auf Netze mit Mischverkehr ist im Grunde gegeben, da gattungsabhängige fahrdynamische Werte mithilfe unterschiedlicher Belegungszeiten abgebildet werden können. Jedoch wirkt sich eine geänderte Reihenfolge unterschiedlicher Züge in Mischverkehrssystemen stärker auf den Belegungsgrad aus als im betrachteten Beispiel eines S-Bahn Netzes. Dies kann beispielsweise durch den Einbezug einer mittleren Mindestzugfolgezeit ausgeglichen werden. Jedoch wiegt die fehlende Abbildung der Verkettung von Fahrten durch das vorliegende Modell im Kontext des Mischverkehrs schwerer, da es bei realisierten ungünstigen Zugfolgefällen zu einer noch stärkeren Abweichung des berechneten Einzelbelegungsgrads von den tatsächlich realisierten Belegungsgraden führen kann. Zur Verbesserung dieses Umstands empfiehlt es sich, für eine Übertragung auf Netze mit Mischverkehr das Modell um einen bedienungstheoretischen Ansatz zu erweitern.

Die nicht-funktionale Anforderung des *geringen Aufwands* konnte nur teilweise erfüllt werden. So wird zur Modellierung und zur Berechnung zwar keine spezielle Software benötigt, jedoch kann der Aufwand für die Formulierung des Modells – je nach Topologie des zu betrachtenden Bahnhofs und nach Komplexität der Dispositionsregeln – sehr schnell sehr groß werden. Dabei ist vor allem die Ermittlung der Werte für die Belegungszeitenmatrix F sowie für den Vektor zur Anzahl der Fahrten je Fahrtryp \vec{z}_i nur schlecht automatisierbar.

Eine weitere Grenze des Gesamtmodells ergibt sich aus den im Modell angesetzten Zeiten für die Dauer von im Störfall vorkommenden einmaligen und wiederkehrenden Handlungen. Mithilfe von Erwartungswerten wurde versucht, die Volatilität der einzelnen Zeiten abzubilden. Dementsprechend ist die Qualität der Ergebnisse von der Korrektheit der durch Erwartungswerte abgebildeten ermittelten Zeiten abhängig.

10 Gestaltung funktionsfähiger Störfallprogramme

10.1 Einleitung

Wie in der Problemstellung in Kapitel 3 beschrieben, ist es hilfreich, bereits während der Planung eines Störfallprogrammes einschätzen zu können, ob und wie gut dieses funktionieren kann. Durch das in Kapitel 9 erarbeitete Modell ist es möglich, den Belegungsgrad in Wendebahnhöfen unter Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen und der Einschwingphase zu quantifizieren. Anhand dieses Belegungsgrads sollen Aussagen über die Machbarkeit der Einschwingphase eines Störfallprogramms getroffen werden.

Ziel des vorliegenden Kapitels ist es, in Hinblick auf die sich in den einzelnen Szenarien ergebenden Belegungsgrade, eine Metrik zu entwickeln, anhand derer die Machbarkeit konkreter Störfallprogramme bereits in der Planungsphase eingeschätzt werden kann. Weiterhin soll aufgezeigt werden, welche Möglichkeiten der Anpassung und Verbesserung eines Störfallprogramms im Falle der Einschätzung „(wahrscheinlich) nicht machbar“ bestehen. Zur Verdeutlichung der zu entwickelnden Vorgehensweise werden die Betrachtungen für das bereits in Kapitel 8 und Kapitel 9 begonnene Anwendungsbeispiel weitergeführt.

10.2 Beurteilung der Machbarkeit eines Störfallprogramms anhand des Belegungsgrads

Das Ergebnis der Anwendung des im vorangegangenen Kapitel erarbeiteten Modells ist die Abschätzung des Belegungsgrads in Wendebahnhöfen unter Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen und der Einschwingphase. Anhand dieses Belegungsgrads soll analog zur Richtlinie 406 der UIC eine Aussage über die Machbarkeit eines Störfallprogramms getroffen werden können.

Die Grundannahme für alle weiteren Aussagen ist, dass der Regelbetrieb mit einer zufriedenstellenden Qualität abläuft. Unter dieser Bedingung sollten die für die verschiedenen Szenarien (siehe Kapitel 8) errechneten Belegungsgrade nicht größer sein als der Belegungsgrad im Regelfall, um eine Machbarkeit bei gleicher zufriedenstellender Qualität zu sichern. Daraus lässt sich die erste Aussage zur Machbarkeit von Störfallprogrammen ableiten:

Machbarkeitsaussage 1

Ein SFP-Szenario für $s > 0$ *funktioniert problemlos*, wenn die Belegungsgrade der betrachteten Gleise im Szenario den gleichen oder einen geringeren Belegungsgrad als den Belegungsgrad im regulären Betrieb ($s = 0$) aufweisen:

$$\rho_{Bel,s,i} \leq \rho_{Bel,0,i} , \text{ für } s > 0 \text{ und } i \in \{1, \dots, o\}$$

Allerdings wird der Belegungsgrad in den Bahnhofsgleisen, in denen vorzeitige Wenden stattfinden, in der Störung in den meisten Fällen höher als im Regelfall sein. Dies ist damit zu

begründen, dass während der Störung im Allgemeinen zwar weniger Züge verkehren, jedoch durch die Durchführung der vorzeitigen Wenden und Handlungen bei Störungsbeginn zusätzliche Belegungszeiten entstehen. Es ist also notwendig einen Grenzwert zu definieren, welcher den maximal machbaren Belegungsgrad bezeichnet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird vorgeschlagen, die Grenzwerte für den zulässigen Belegungsgrad nach UIC 406 zu verwenden. Entsprechend ergibt sich die zweite Aussage zur Machbarkeit von Störfallprogrammen:

Machbarkeitsaussage 2

Ein SFP-Szenario für $s > 0$ *funktioniert bedingt*, wenn die Belegungsgrade der betrachteten Gleise im Szenario über dem Belegungsgrad im regulären Betrieb ($s = 0$), aber unter dem UIC 406 Grenzwert liegen:

$$\rho_{Bel,0,i} < \rho_{Bel,s,i} \leq GW_{UIC406}, \text{ für } s > 0 \text{ und } i \in \{1, \dots, o\}$$

Dementsprechend ergibt sich die dritte Aussage zur Machbarkeit von Störfallprogrammen:

Machbarkeitsaussage 3

Ein SFP-Szenario für $s > 0$ *funktioniert nicht*, wenn die Belegungsgrade der betrachteten Gleise im Szenario über dem Belegungsgrad im regulären Betrieb ($s = 0$) und über dem UIC 406 Grenzwert liegen:

$$\rho_{Bel,s,i} > \max \left\{ \begin{array}{l} \rho_{Bel,0,i} \\ GW_{UIC406} \end{array} \right., \text{ für } s > 0 \text{ und } i \in \{1, \dots, o\}$$

Die Aussagen über die Machbarkeit anhand der Einschätzung des Belegungsgrads sind allgemeingültig zur Überprüfung von Dispositionsmaßnahmen einsetzbar. Obwohl sich im weiteren Verlauf des Kapitels wiederholt auf den Belegungsgrad von Wendebahnhöfen bezogen wird, ist festzustellen, dass sich das Prinzip der Machbarkeitsaussagen anhand eines Belegungsgrads ebenfalls zur Überprüfung von Umleitungen und anderen Dispositionsmaßnahmen eignet.

10.3 Grundsätze zur Gestaltung von Störfallprogrammen

Damit ein Störfallprogramm angewandt werden kann, sind entsprechend der o. g. Machbarkeitsaussagen zwei Anforderungen bei der Gestaltung von Störfallprogrammen zu erfüllen:

1. Ein Störfallprogramm muss mindestens im stabilen Zustand ($s = 1$) problemlos funktionieren.
2. Damit der stabile Zustand eines Störfallprogramms erreicht werden kann, müssen die Einschwingenszenarien ($s = 2, 3$) mindestens bedingt funktionsfähig sein.

Daraus ergibt sich die Bedingung: $\vec{\rho}_{Bel,1} \leq \vec{\rho}_{Bel,0} < \vec{\rho}_{Bel,2}, \vec{\rho}_{Bel,3} \leq GW_{UIC406}$.

Für die Szenarien $s=2$ und $s=3$ ergeben sich weiterhin folgende Überlegungen:

- Gilt $\vec{\rho}_{Bel,1} \leq \vec{\rho}_{Bel,0} < \vec{\rho}_{Bel,2} \leq GW_{UIC406} < \vec{\rho}_{Bel,3}$, so funktioniert die Einschwingphase nur, wenn der stabile Zustand innerhalb von 15 Min nach Eintritt der Störung erreicht ist. Es muss also realistisch abgewogen werden, ob die Disposition effizient genug ist, um diesen Zustand innerhalb von 15 Minuten zu erreichen. Weiterhin ist abzuwägen, ob das dann erhaltene und unter Umständen schlechte Qualitätsniveau vertretbar ist. Da der stabile

Zustand so nur schwer bzw. nicht in angemessener Zeit erreicht werden kann, ist das Störfallprogramm unbedingt anzupassen.

- Gilt $\vec{\rho}_{Bel,1} \leq \vec{\rho}_{Bel,0} < \vec{\rho}_{Bel,2}, \vec{\rho}_{Bel,3} \leq GW_{UIC406}$, so funktioniert die Einschwingphase nur, wenn der stabile Zustand innerhalb von 30 Min nach Eintritt der Störung erreicht wird. Bei gut funktionierenden Prozessen und auf die Situation passenden Störfallprogrammen ist eine Einschwingzeit von 30 Minuten realistisch.

10.4 Anpassung von Störfallprogrammen bei Nicht-Machbarkeit

10.4.1 Allgemeiner Prozess des SFP-Entwurfs und der Machbarkeitsabschätzung

Der Entwurf eines Störfallprogramms läuft iterativ ab. Basis dafür ist eine erste Lösung, welche aufgrund verkehrlicher und betrieblicher Anforderungen erarbeitet wird. Diese erste Lösung eines Störfallprogramms muss auf seine Machbarkeit in der Einschwingphase und in der stabilen Phase getestet werden.

Dazu werden die Belegungsgrade der Gleise in den einzelnen Szenarien mit den Grenzwerten verglichen. Ergibt die Prüfung, dass die entsprechenden Grenzwerte überschritten werden, so muss die erste Lösung angepasst werden. Hierbei gibt es die grundsätzlichen Lösungswege, die Anzahl der Wendungen je Bahnhof zu verringern, die Belastung durch Wendungen möglichst gleichmäßig über die vorhandene Infrastruktur zu verteilen sowie die Dauer einer Wende zu verkürzen. Der Vorgang zur Gestaltung machbarer Störfallprogramme ist in Abbildung 10.1 dargestellt.

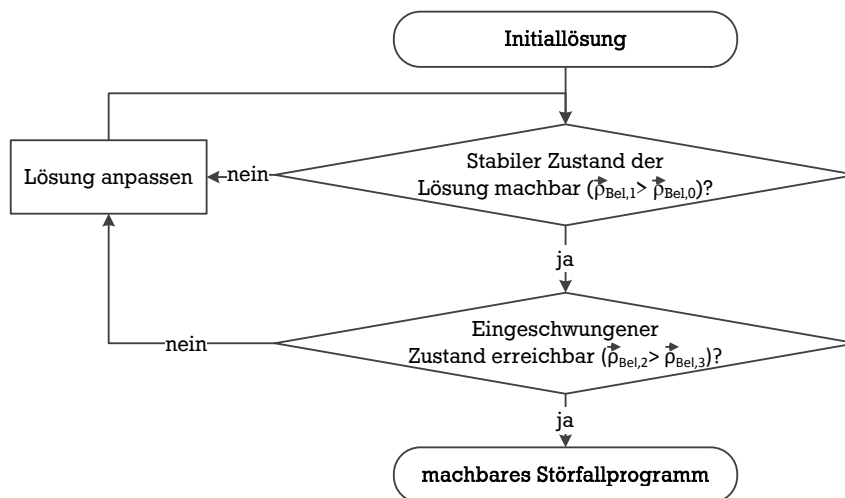


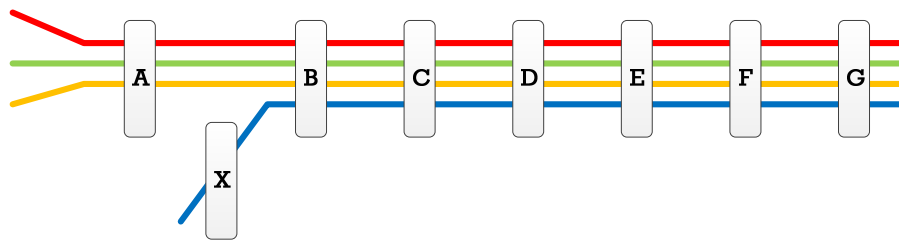
Abbildung 10.1: Prozess zum Entwurf funktionsfähiger Störfallprogramme

10.4.2 Störfalltrichter

Das Hauptinstrument der Anpassung nicht machbarer Störfallprogramme ist die Verlagerung von vorzeitigen Wendungen auf andere Bahnhöfe. Dies bedeutet, dass die Wendungen der einzelnen Linien auf mehrere Stationen vor der Störstelle verteilt werden. Dieses Prinzip wird in der Praxis als „Störfalltrichter“ bezeichnet, da die Anzahl der noch verkehrenden Linien immer geringer wird, je näher man sich im Netz auf die Störstelle zubewegt (siehe Abbildung 10.2 und Chu (2012a)).

Bei der Anwendung des Störfalltrichters ist jedoch folgender Zielkonflikt zu lösen. Aus betrieblicher Sicht ist es notwendig, dass auf stark befahrenen Strecken nicht alle Züge am

Linienerlauf regulärer Betrieb



„Störfalltrichter“ im SFP-Fall

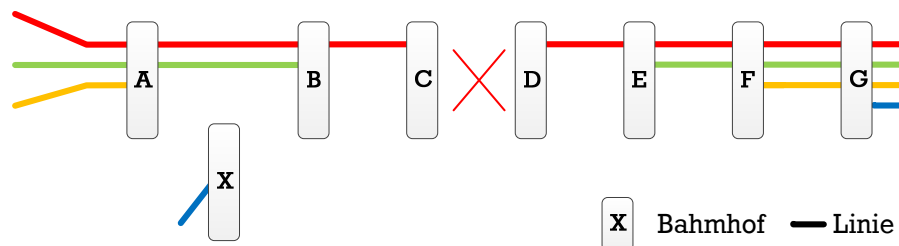


Abbildung 10.2: Prinzip des Störfalltrichters zur Festlegung von Wenderegeln

selben SFP-Wendebahnhof wenden. So kann ein flüssiger Betrieb besser gewährleistet werden. Dagegen steht aus verkehrlicher Sicht das Interesse, die Fahrgäste von beiden Seiten so nah wie möglich an die Störstelle heranzuführen, damit nur kleine Distanzen durch Busnotverkehr zu überbrücken sind bzw. ausfallen Chu (2012a). Daher gilt für die Auswahl von Wendebahnhöfen: „So wenig örtliche Verteilung wie möglich und so viel wie betrieblich nötig“.

10.4.3 Wahl der Wendebahnhöfe

Um zahlreiche Wiederholungen der in Abbildung 10.1 dargestellten Vorgehensweise zur Berechnung des Belegungsgrads eines SFP-Wendebahnhofs zu vermeiden, bietet eine „Rückwärtsanwendung“ des Modells zur Berechnung der Einzelbelegungsgrade bereits bei der Entwicklung der ersten Lösung Unterstützung. Die Anzahl der im Störfall in einem Bahnhof möglichen Wenden und Durchfahrten kann wie folgt berechnet werden. Betrachtet man von einem Untersuchungsraum t_U den Zeitanteil, welcher nach den Machbarkeitsgrenzwerten der UIC 406 zulässig ist, und dividiert diesen Wert durch die Summe aus der Dauer einer Wende bzw. einer Durchfahrt in Störfall sowie einer Pufferzeit t_p , erhält man (abgerundet) die Anzahl der in diesem Bahnhof möglichen Wenden $z_{SFP,Wende,Gl.}$ bzw. Durchfahrten $z_{SFP,Fahrt,Gl.}$ je verfügbarem Gleis im Störfall.

$$z_{SFP,Wende,Gl.} = \frac{t_U \cdot GW_{UIC406}}{t_{SFP,Wende} + t_p}$$

$$z_{SFP,Fahrt,Gl.} = \frac{t_U \cdot GW_{UIC406}}{t_Z + t_p}$$

Mit:

- $z_{SFP,Wende,Gl.}$ – Anzahl maximal möglicher Wendungen je verfügbarem Gleis im Störfall pro Untersuchungszeitraum
- $z_{SFP,Fahrt,Gl.}$ – Anzahl maximal möglicher Durchfahrten je verfügbarem Gleis im Störfall pro Untersuchungszeitraum
- t_U – Untersuchungszeitraum
- GW_{UIC406} – Grenzwert Belegungsgrad nach UIC 406
- $t_{SFP,Wende}$ – Wendezeit in Störungen (siehe Abschnitt 9.2.5)
- $t_p = t_z$ – Mindestwendezeit
- t_p – Pufferzeit je Vorgang, ggf. $t_p = 0$
- t_z – Mindestzugfolgezeit

Da sich die Überprüfung der Machbarkeit vorrangig auf die Einschwingphase fokussiert, gilt für den letzten Wendebahnhof vor dem Störungsort, dass die maximal mögliche Anzahl an Wendungen im Betrachtungszeitraum kleiner bzw. gleich der maximal im Szenario ($s=3$) ankommenden Zugzahl sein muss. Dies bedeutet, dass folgende Bedingung erfüllt sein muss:

$$z_{SFP,Wende,Gl.} \cdot n_{Gleise} \leq \sum_{j=1}^0 z_{s,j}, \text{ für } s = 3$$

Für Bahnhöfe, in denen Wendungen und Durchfahrten erfolgen, gilt entsprechend, dass die Summe der Belegungszeiten durch die maximal im Szenario ($s=3$) ankommende Zugzahl kleiner bzw. gleich der Leistungsfähigkeit des Bahnhofs sein muss. Dies bedeutet, dass folgende Bedingungen erfüllt sein müssen:

$$z_{SFP,Wende} + z_{SFP,Fahrt} \leq \sum_{j=1}^0 z_{s,j}, \text{ für } s = 3$$

und

$$n_{Gleise} \cdot t_U \cdot GW_{UIC406} = z_{SFP,Wende} \cdot (t_{SFP,Wende} + t_p) + z_{SFP,Fahrt} \cdot (t_z + t_p)$$

Mit:

- n_{Gleise} – Anzahl der im Bahnhof zur Verfügung stehenden Gleise
- $z_{SFP,Wende}$ – Anzahl Wendungen im Störfall pro Untersuchungszeitraum
- $z_{SFP,Fahrt}$ – Anzahl Durchfahrten im Störfall pro Untersuchungszeitraum
- $z_{s,j}$ – Anzahl der Zugfahrten eines Fahrttyps j innerhalb des Szenarios s

Ist in einem Bahnhof die Zahl der in den jeweiligen Szenarien ankommenden Züge größer als die im Störfallprogramm mögliche Zugzahl, so ist dort ein Störfalltrichter zu planen. Da es möglich ist, dass durch den Einsatz des Störfalltrichters an einem Bahnhof der Engpass auf den nachfolgenden Bahnhof verschoben wird, müssen alle SFP-Wendebahnhöfe dementsprechend überprüft werden.

10.4.4 Weitere Maßnahmen zur Herstellung der Machbarkeit

Da es sich bei der Maßnahme „vorzeitige Wende“ um das Hauptelement von Störfallprogrammen handelt, ist die Anwendung des Störfalltrichters, also die örtliche Verteilung wendender Linien auf mehrere Bahnhöfe, ebenfalls die vorzuziehende Maßnahme zur Sicherstellung der Machbarkeit von Störfallprogrammen. Eine konsequente Weiterführung dieses Prinzips ist der Ausfall ganzer Linien.

Allerdings ist ein Gesamtausfall von Linien verkehrlich selten zielführend, da dies nicht den Anforderungen der Fahrgäste gerecht wird. Deshalb muss ebenfalls die Möglichkeit der Verkürzung von Wendezeiten in Betracht gezogen werden. Diese vorrangig organisatorische Maßnahme umfasst die gezielte Bereitstellung von zusätzlichem Personal an entsprechenden SFP-Wendebahnhöfen, sodass Wenden anstelle von einem Triebfahrzeugführer durch zwei Triebfahrzeugführer in kürzerer Zeit erfolgen können.

Weiterhin ist es möglich, die Belegungszeiten durch vorzeitige Wendungen möglichst gleichmäßig auf die Infrastruktur des Wendebahnhofs aufzuteilen: So wendet eine Linie nicht nur auf einem Gleis, sondern auf verschiedenen Gleisen. Jedoch ist diese Maßnahme mit Bedacht und mit Rücksicht auf die örtlichen Gegebenheiten einzusetzen. So ist die Benutzung unterschiedlicher Gleise eines Inselbahnsteigs durch eine Linie unerheblich. Werden durch eine gleichmäßige Verteilung Bahnsteigwechsel über Unterführungen oder Brücken notwendig, ist diese Art der Anpassung i. d. R. nicht sinnvoll.

10.5 Anwendungsbeispiel

10.5.1 Machbarkeitsabschätzung

Zur Verdeutlichung der erläuterten Vorgänge zur Abschätzung der Machbarkeit eines Störfallprogramms, wird das in Kapitel 8 und Kapitel 9 begonnene Anwendungsbeispiel weitergeführt.

In Kapitel 9 wurden für das Störfallprogramm des Bahnhofs C in den unterschiedlichen Szenarien folgende Belegungsgrade errechnet:

$$\vec{\rho}_{Bel,0} = \begin{pmatrix} 50\% \\ 50\% \\ 50\% \\ 50\% \end{pmatrix}, \vec{\rho}_{Bel,1} = \begin{pmatrix} 33\% \\ 70\% \\ 0\% \\ 33\% \end{pmatrix}, \vec{\rho}_{Bel,2} = \begin{pmatrix} 55\% \\ 109\% \\ 57\% \\ 55\% \end{pmatrix}, \vec{\rho}_{Bel,3} = \begin{pmatrix} 55\% \\ 127\% \\ 92\% \\ 55\% \end{pmatrix}$$

In Tabelle 10.1 sind die entsprechenden Grenzwerte nach UIC 406 abgebildet. Da es sich bei dem Anwendungsbeispiel um den Verkehr eines S-Bahn Netzes handelt, ist die erste Zeile der Tabelle für „ausschließlich Vorort-Personenverkehr“ relevant. Obwohl für das Anwendungsbeispiel keine Tageszeit gegeben ist, kann davon ausgegangen werden dass das SFP eine außergewöhnliche Belastung für das Netz darstellt, weshalb die Wahl des Spitzenwerts für die Hauptverkehrszeit gerechtfertigt ist.

Vergleicht man die für die jeweiligen Szenarien errechneten Belegungsgrade mit dem entsprechenden Grenzwert von 85%, so ergeben sich folgende Aussagen:

- Das Störfallprogramm auf den Bahnsteiggleisen 101 und 104 funktioniert problemlos, da der Belegungsgrad im Szenario $s = 1$ unter dem regulären Belegungsgrad und in den Szenarien $s = 2$ und $s = 3$ unter dem UIC 406 Grenzwert liegen.

Tabelle 10.1: Grenzwerte für den zulässigen Belegungsgrad von Strecken (UIC, 2004)

Streckentyp	Hauptverkehrszeit	Gesamter Tag
Ausschließlich Vorort-Personenverkehr	85%	70%
Ausschließlich Hochgeschwindigkeitsverkehr	75%	60%
Mischverkehrsstrecken	75%	60%

- Das Störfallprogramm auf dem Bahnsteiggleis 103 funktioniert nur, wenn zwischen dem Eintritt der Störung und dem Erreichen des stabilen Zustands 15 Minuten liegen (Belegungsgrad Gleis 103 bei $s=1$ unter dem regulären Belegungsgrad, bei $s = 2$ unter dem UIC 406 Grenzwert und bei $s = 3$ über dem UIC 406 Grenzwert).
- Das Störfallprogramm auf dem Bahnsteiggleis 102 funktioniert nicht, da die Belegungsgrade für $s = 2$ und $s = 3$ über dem Grenzwert von 85% liegen. Dies bedeutet, dass es wahrscheinlich nicht möglich ist, im Gleis 102 in angemessener Zeit in den eingeschwungenen Zustand zu gelangen.
- Das Störfallprogramm auf dem Bahnsteiggleis 102 kann im eingeschwungenen Zustand nur unter Hinnahme von Qualitätseinbußen funktionieren, da der Belegungsgrad bei $s = 1$ über dem regulären Belegungsgrad von 50% liegt.

Da der Ansatz zur Berechnung des Belegungsgrads durch die Berücksichtigung von einmaligen Belegungszeitzuschlägen für jedes Gleis den Belegungsgrad systematisch überschätzt, wird vorsorglich der entstehende Belegungsgrad ohne die Beachtung einmaliger Belegungszeitzuschläge überprüft. Unter der ausschließlichen Berücksichtigung von im Störfall längeren Wendedauern ergeben sich folgende Werte:

$$\vec{\rho}_{Bel,0} = \begin{pmatrix} 50\% \\ 50\% \\ 50\% \\ 50\% \end{pmatrix}, \vec{\rho}_{Bel,1} = \begin{pmatrix} 33\% \\ 70\% \\ 0\% \\ 33\% \end{pmatrix}, \vec{\rho}_{Bel,2} = \begin{pmatrix} 33\% \\ 88\% \\ 35\% \\ 33\% \end{pmatrix}, \vec{\rho}_{Bel,3} = \begin{pmatrix} 55\% \\ 105\% \\ 70\% \\ 33\% \end{pmatrix}$$

Auch wenn nur die in der Störung längeren Wendezeiten bei der Berechnung des Belegungsgrads berücksichtigt werden, ergeben sich die gleichen Aussagen wie oben. Da der Belegungsgrad für das Bahnsteiggleis 102 im Szenario $s = 2$ etwas und im Szenario $s = 3$ deutlich über dem Grenzwert von 85% liegt, ist ein Einschwingen nur möglich, wenn zwischen dem Eintritt der Störung und dem Erreichen des stabilen Zustands nur 15 Minuten liegen. Eine solche Zeitspanne von 15 Minuten ist jedoch nicht realistisch durchzusetzen. Ziel bei der SFP-Erstellung ist es demnach, dass der Belegungsgrad für die Szenarien $s = 2$ und $s = 3$ unter dem Grenzwert von 85% liegt.

10.5.2 Maßnahmen zur Herstellung der Machbarkeit

Zuerst wird geprüft, ob die Anwendung des Störfalltrichters zu einer Machbarkeit des Störfallprogramms führt. Da im SFP-Fall jedoch nur noch die Linie S1 im Bahnhof C wendet, ist es wenig zielführend die Wende der Linie S1 auf den vorangehenden Bahnhof vorzuverlegen. Dies führt zwar zu einem Belegungsgrad unter dem Grenzwert für Gleis 102 in allen Szenarien, jedoch würde das Problem des hohen Belegungsgrads vollständig auf den vorangehenden Bahnhof B verlagert, also nicht gelöst.

Der Lösungsansatz, die Belastung durch die Wenden möglichst gleichmäßig über die vorhandene Infrastruktur in Bahnhof C zu verteilen, ist in dem vorliegenden Fall in Hinblick auf die Steuerung der Fahrgastströme nicht sinnvoll. Hier würde eine gleichmäßige Verteilung der Wenden dazu führen, dass Züge der Linie S1 auf den Bahnsteiggleisen 102 und 103 wenden würden. Da ein Wechsel von Bahnsteiggleis 102 zu 103 jedoch mithilfe von Treppen erfolgt, kann es dazu führen, dass Fahrgäste nicht in der Lage sind, rechtzeitig von einem Bahnsteiggleis zum anderen zu wechseln.

Verfolgt man den Lösungsansatz der Verkürzung von Wendezeiten, so entsteht bei einem Wechsel von Wenden mit einem Treibfahrzeugführer ($t_{SFP,Wende,1Tf} = 10,5$ Minuten) auf Wenden mit zwei Treibfahrzeugführern ($t_{SFP,Wende,2Tf} = 6,5$ Minuten) eine Einsparung von vier Minuten pro Wendevorgang (siehe auch Abschnitt 9.3). Daraus ergeben sich folgende Belegungsgrade in Bahnhof C:

$$\rho_{Bel,0} = \begin{pmatrix} 50\% \\ 50\% \\ 50\% \\ 50\% \end{pmatrix}, \rho_{Bel,1} = \begin{pmatrix} 33\% \\ 43\% \\ 0\% \\ 33\% \end{pmatrix}, \rho_{Bel,2} = \begin{pmatrix} 55\% \\ 76\% \\ 43\% \\ 55\% \end{pmatrix}, \rho_{Bel,3} = \begin{pmatrix} 55\% \\ 87\% \\ 65\% \\ 55\% \end{pmatrix}$$

Die Belegungsgrade für das Bahnsteiggleis 102 ergeben sich folgendermaßen:

- Bei $s = 1$ werden $4 \cdot 4$ Minuten eingespart, was zu einer Belegungszeit von 26 Minuten führt ($26/60 = 43\%$).
- Bei $s = 2$ werden $5 \cdot 4$ Minuten eingespart, was zu einer Belegungszeit von 45,5 Minuten führt ($45,5/60 = 76\%$).
- Bei $s = 3$ werden $6 \cdot 4$ Minuten eingespart, was zu einer Belegungszeit von 52 Minuten führt ($52/60 = 87\%$).

Die Belegungsgrade für das Bahnsteiggleis 103 ergeben sich analog. Betrachtet man die bei einer Verkürzung der Wendezeit entstehenden Belegungsgrade, so wird deutlich, dass die Kriterien für das Einschwingen ($\vec{\rho}_{Bel,s} \leq GW_{UIC406}$) für fast alle Szenarien erfüllt sind.

Selbstverständlich ist es auch an dieser Stelle wichtig, die dadurch entstehenden Belegungsgrade der umgebenden Bahnhöfe (siehe Abbildung 10.3) zu prüfen.

Den *Bahnhof A* durchfahren im SFP-Fall zwei Linien mit je zwei Zügen pro Stunde und Richtung. Bei zwei Bahnsteiggleisen entspricht dies im Szenario $s=1$ einer Belegungszeit von $4 \cdot 2,5$ Minuten = 10 Minuten und einem Belegungsgrad von $10/60 = 17\%$ pro Bahnsteig. Bei den Szenarien $s = 2$ bzw. $s = 3$ kommen noch eine bzw. zwei Wenden von 10,5 Minuten sowie der einmalige Störungszuschlag von 13 Minuten hinzu, was zu einer Belegungszeit von $10 + 10,5 + 13 = 33,5$ Minuten und einem Belegungsgrad von 56% führt. Die Bedingungen für die Machbarkeit des Störfallprogramms in diesem Bahnhof sind demnach erfüllt.

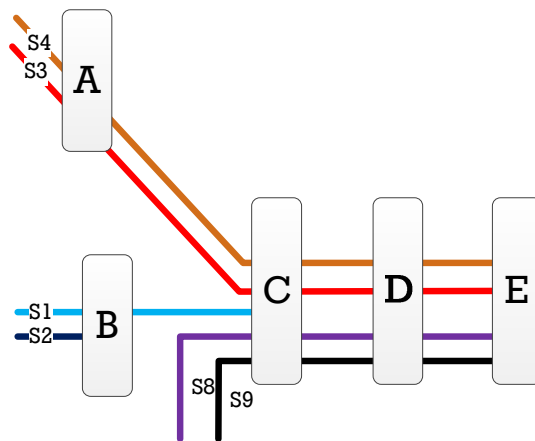


Abbildung 10.3: Weitere SFP-Wendebahnhöfe im Umkreis des SFP-Wendebahnhofs C

Den *Bahnhof B* durchfährt im SFP-Fall eine Linie auf dem ersten Bahnsteig mit vier Zügen pro Stunde und Richtung. Dies entspricht im Szenario $s = 1$ einer Belegungszeit von $8 \cdot 2,5$ Minuten = 20 Minuten und einem Belegungsgrad von $20/60 = 33\%$. Bei den Szenarien $s = 2$ bzw. $s = 3$ kommt der einmalige Störungszuschlag von 13 Minuten hinzu, was zu einer Belegungszeit von $20 + 13 = 43$ Minuten und einem Belegungsgrad von 72% führt. Weiterhin wendet im Bahnhof B im Störfall eine Linie mit vier Zügen pro Stunde an einem zweiten Bahnsteig. Dies entspricht im Szenario $s = 1$ einer Belegungszeit von $4 \cdot 10,5$ Minuten = 42 Minuten und einem Belegungsgrad von $42/60 = 70\%$. Bei den Szenarien $s = 2$ bzw. $s = 3$ kommt der einmalige Störungszuschlag von 13 Minuten hinzu, was zu einer Belegungszeit von $42 + 13 = 55$ Minuten und einem Belegungsgrad von 91% führt. Zwar liegt der Belegungsgrad im letzten Fall über dem Grenzwert von 85%, jedoch kann davon ausgegangen werden, dass die stabile Phase in den meisten Fällen erreicht wird, da es unwahrscheinlich ist, dass der einmalige Störungszuschlag von 13 Minuten zum Tragen kommt. Demnach sollte auch an diesem Bahnhof mit einer Verkürzung der Wendezeiten gearbeitet werden. Die Bedingungen für die Machbarkeit des Störfallprogramms in diesem Bahnhof sind demnach weitestgehend erfüllt.

Im *Bahnhof E* wenden vier Linien mit je zwei Zügen pro Stunde auf vier vorhandenen Bahnsteigen. Dies entspricht im Szenario $s=1$ einer Belegungszeit von $2 \cdot 10,5$ Minuten = 21 Minuten und einem Belegungsgrad von $21/60 = 35\%$. Bei den Szenarien $s=2$ bzw. $s=3$ kommt der einmalige Störungszuschlag von 13 Minuten hinzu, was zu einer Belegungszeit von $21 + 13 = 34$ Minuten und einem Belegungsgrad von 57% führt. Die Bedingungen für die Machbarkeit des Störfallprogramms in diesem Bahnhof sind demnach erfüllt.

Die Überprüfung der Belegungsgrade der den Bahnhof C umgebenden Bahnhöfe bestätigt demnach die Machbarkeit des Verbesserungsvorschlags, die Wendeschemata der einzelnen Linien beizubehalten, während die Wenden in Bahnhof C mit jeweils zwei Triebfahrzeugführern durchgeführt werden.

10.6 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

10.6.1 Zusammenfassung

Im vorliegenden Kapitel wurde erarbeitet, wie mithilfe des Belegungsgrads einzelner Gleise durch ein Störfallprogramm Aussagen zur Machbarkeit des Störfallprogramms getroffen werden können. Die Kernaussagen, dass der Belegungsgrad während der stabilen Phase nicht höher als der Belegungsgrad im regulären Betrieb sein sollte und dass die UIC 406 Grenzwerte während der Einschwingphase nicht überschritten werden sollten, liefern eine einfache und allgemeine Metrik zur Beurteilung der Machbarkeit. Damit steht nun zum ersten Mal eine Metrik zur Vorabbeurteilung der Machbarkeit eines Störfallprogramms zur Verfügung, welche am Beispiel von Wendebahnhöfen demonstriert wurde. Weiterhin wurden für den Fall einer Nichtmachbarkeit Lösungsansätze zur Verbesserung von Störfallprogrammen aufgezeigt.

Die Ergebnisse des vorliegenden Kapitels stellen somit eine erste Antwort in Bezug auf die Gesamtaufgabe der „Beurteilung von Störfallprogrammen anhand ihres Einschwingverhaltens“ dar. Neben Aussagen zur grundsätzlichen Machbarkeit sind zur Beurteilung eines Störfallprogramms jedoch auch Aussagen zur zu erwartenden Dauer der Einschwingphase notwendig. Dieser Fragestellung wird im nachfolgenden Kapitel 11 nachgegangen.

10.6.2 Diskussion der Ergebnisse

Im Zuge einer kritischen Auseinandersetzung mit der entwickelten Metrik zur Vorabbewertung ist auf folgende Punkte hinzuweisen:

- die Nichtbeachtung des verketteten Belegungsgrads,
- die Verwendung von UIC 406 Grenzwerten,
- die Modellannahme zur ausreichenden Qualität des regulären Betriebs,
- die stark eingeschränkte Qualitätsaussage sowie
- die fehlende Betrachtung verkehrlicher Aspekte.

Wie bereits am Ende von Kapitel 9 angemerkt, wird bei der Berechnung lediglich der Belegungsgrad einzelner Bahnsteiggleise ermittelt, ohne eine Verkettung der Ein- und Ausfahrten auf andere Bahnsteiggleise zu beachten. Weiterhin handelt es sich bei den für die Anwendung empfohlenen UIC 406 Grenzwerten um Belegungsgrade für einzelne Strecken und nicht für Knoten. Dies bedeutet, dass sowohl für die berechneten Belegungsgrade als auch für die Grenzwerte vereinfachte Annahmen zugrunde liegen, welche nicht vollkommen mit den realen Gegebenheiten übereinstimmen. Dementsprechend kann es sich bei der Beurteilung der Machbarkeit mithilfe des Belegungsgrads und der UIC 406 Grenzwerte nur um eine grobe Abschätzung handeln. Es ist anzumerken dass eine Aktualisierung der Richtlinie UIC 406 geplant ist (Stand 2013), in welcher Grenzwerte für Stationen erwartet werden.

Der Vergleich des Belegungsgrads des regulären Betriebs mit dem des SFP-Betriebs als Hinweis auf die Machbarkeit ist nur zulässig, wenn die Qualität im regulären Betrieb mindestens zufriedenstellend ist. Ist dies nicht der Fall, wiegt die durch die Störung entstehende Erhöhung des Belegungsgrads dementsprechend schwerer. Ein Zutreffen dieser Annahme sollte daher vor Anwendung der vorgeschlagenen Metrik in jedem Fall überprüft werden.

Mit der vorliegenden Metrik ist nur eine Machbarkeitsaussage, jedoch keine exakte Aussage über die betriebliche Qualität eines Störfallprogramms möglich. Dies ist darin begründet, dass in die Berechnung des Belegungsgrads lediglich Zugzahlen einbezogen und keine Aussagen über eintretende Verspätungen getroffen werden. Allerdings lässt sich die Betriebsqualität nur

sinnvoll anhand von entstehenden Verspätungen bewerten (siehe DB Netz (405)). Dementsprechend sind weitere Betrachtungen der entstehenden Folgeverspätungen und der Fähigkeit eines Systems, die Folgeverspätungen abzufangen für eine Qualitätsaussage notwendig. Daher ist es erforderlich, den vorliegenden Ansatz mit einem bedienungstheoretischen Modell zu erweitern.

Weiterhin ist anzumerken, dass der Fokus der vorgeschlagenen Metrik zur Beurteilung der Machbarkeit von Störfallprogrammen auf der betrieblichen Sinnhaftigkeit liegt und verkehrliche Aspekte, wie die Verkehrsnachfrage, nicht beachtet werden. Fehlt die Beachtung der Bedürfnisse der Fahrgäste, so kann es beispielsweise zu ungeplanten Ansammlungen von Fahrgästen an bestimmten Stationen kommen. Dies wiederum kann – aufgrund stark ansteigender Fahrgastwechseldauern – dazu führen, dass die bei der Überprüfung zugrunde gelegten Annahmen bezüglich der Belegungszeiten nicht zutreffen. Die Überprüfung der Machbarkeit kann dementsprechend nur einen Teilaspekt bei der Beurteilung von Störfallprogrammen darstellen.

Ungeachtet der vorgestellten Kritikpunkte und Erweiterungsmöglichkeiten ist es mit der in diesem Kapitel vorgestellten Metrik zum ersten Mal möglich, die Machbarkeit von Störfallprogrammen bereits bei der Erstellung abzuschätzen.



11 Abschätzung der Dauer bis zum Ende der Einschwingphase

11.1 Einleitung

11.1.1 Notwendigkeit der Abschätzung

Bisher wurde in Kapitel 4 erarbeitet, welche Vorgänge in der Einschwingphase stattfinden und in Kapitel 5 bis Kapitel 9, wie diese Vorgänge in die Berechnung des Belegungsgrads einer Infrastruktur einbezogen werden können. Daraufhin wurde in Kapitel 10 eine Metrik zur Beurteilung der Machbarkeit eines Störfallprogramms anhand des Belegungsgrads entwickelt. Jedoch ermöglicht diese Metrik keine Aussagen über die Qualität eines Störfallprogramms. Wie in Kapitel 4 bereits belegt, wirkt sich eine möglichst kurze Dauer bis zum Ende der Einschwingphase wesentlich auf die Betriebsqualität eines Störfallprogramms aus. Daher ist die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase, neben den im Betrieb entstehenden Folgeverspätungen und ggf. Kostenkriterien, eine zentrale Größe zur Beurteilung des Einschwingverhaltens von Störfallprogrammen.

Es werden deshalb im Hinblick auf die Auswahl zwischen verschiedenen, aber gleichermaßen machbaren, Störfallprogrammen Möglichkeiten der Abschätzung der Dauer bis zum Ende der Einschwingphase benötigt.

11.1.2 Ansatz

Bis zum Erreichen des Endes der Einschwingphase eines Störfallprogramms sind viele verschiedene Vorgänge notwendig, welche in Abbildung 11.1 dargestellt sind. So müssen nach dem Eintritt der Störung die Störungsursache ermittelt, Entscheidungen getroffen und diese kommuniziert werden. Diese sequentiellen Vorgänge wurden bereits in Kapitel 5 beschrieben und ihre Dauer quantifiziert.

Die Vorgänge zwischen dem Zeitpunkt der SFP-Ausrufung bis zur vollständigen Umsetzung der Maßnahmen, also bis zum Ende der Einschwingphase, lässt sich aus der Definition eines eingeschwungenen Störfallprogramms ableiten. „*Ein Störfallprogramm ist eingeschwungen, sobald alle Zugfahrten auf den im Störfallprogramm vorgesehenen Strecken in der vorgesehenen Anzahl pünktlich verkehren*“ (siehe Kapitel 2). Daher sind die folgenden, in Abbildung 11.1 genannten, betrieblichen Vorgänge abzuarbeiten: Zugzahlen reduzieren, Zugfahrten auf die vorgesehenen SFP-Wege führen und Pünktlichkeit sichern. Diese drei Vorgänge verlaufen größtenteils parallel zueinander, wobei sich die Gesamtdauer für alle drei Vorgänge aus der Dauer des jeweils längsten Vorgangs ergibt. Um die Länge der einzelnen Vorgänge zu quantifizieren, ist es denkbar diese, analog zum Vorgehen in Kapitel 5, in kleinere Vorgänge zu zerlegen und deren Dauern ggf. überschlägig zu bestimmen.

Da die Dauern dieser drei Vorgänge jedoch vom jeweiligen Netz, Betriebsprogramm, Störfallprogramm sowie Eintrittsort, -zeitpunkt und -dauer der Störung abhängen, ist eine zu Kapitel 5 analoge, allgemeingültige Bestimmung von Dauern einzelner Teilvorgänge nicht möglich. Daher wurde sich für die Erarbeitung einer allgemeingültigen Vorgehensweise zur Bestimmung der Gesamtdauer der drei Vorgänge entschieden.

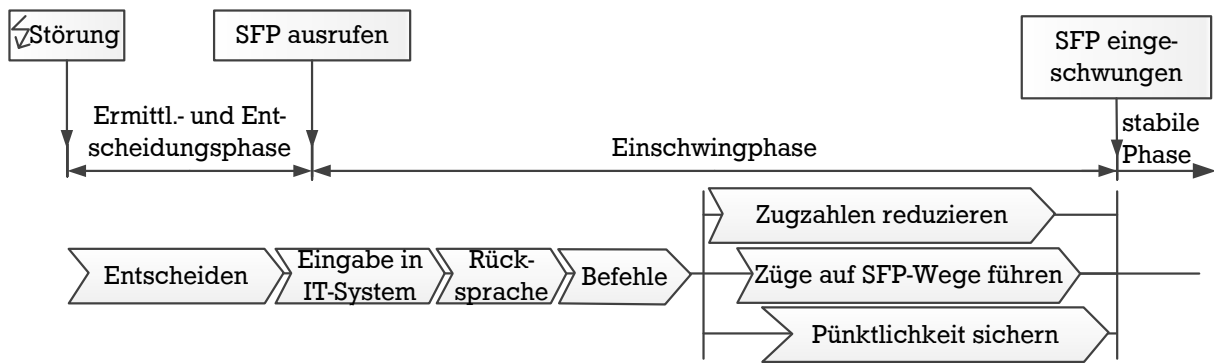


Abbildung 11.1: Abfolge der notwendigen Prozesse bis zum Ende der Einschwingphase

11.1.3 Vorabbemerkung

Grundsätzlich ist anzumerken, dass sich die Zeit, bis eine Dispositionsanweisung vollständig ausgeführt ist, aus der Dauer der eigentlichen Umsetzung und der Fahrzeit des Zuges bis zum Ort, an dem die Dispositionsmaßnahme durchgeführt werden soll, zusammensetzt.

Aufgrund des vorrangig zufälligen Eintritts einer Störung gibt es grundsätzlich drei mögliche Standorte des Zuges relativ zum Ort, an dem die Dispositionsmaßnahme umgesetzt werden soll:

1. Der Zug befindet sich vor dem für die Umsetzung vorgesehenen Ort und bewegt sich darauf zu.
2. Der Zug befindet sich am für die Umsetzung vorgesehenen Ort.
3. Der Zug befindet sich hinter dem für die Umsetzung vorgesehenen Ort und bewegt sich davon weg.

Je nach Kategorie werden i. d. R. andere Vorgänge notwendig, die unterschiedlich viel Zeit in Anspruch nehmen. Für die Möglichkeiten Eins und Drei sind zusätzliche Annahmen bezüglich der Entfernung bis zum für die Umsetzung vorgesehenen Ort zu treffen. Da es sich um Planungen für den Störfall handelt, sollte sicherheitshalber der Maximalansatz – also die maximal mögliche Entfernung – in die Berechnungen einbezogen werden. Weiterhin sollte ebenfalls die Betrachtung des wahrscheinlichsten Standortes berücksichtigt werden.

11.2 Abschätzung der Dauer, bis die vorgesehene Zugzahl erreicht ist

Oft wird bei der Planung von Störfallprogrammen eine, im Vergleich zum regulären Betrieb, geringere Zugzahl vorgesehen. Dies erfolgt vor dem Hintergrund, dass durch weniger Züge die Komplexität verringert wird und so eine bessere Handhabung durch die Disponenten möglich ist. Möglichkeiten zur Zugzahlreduktion sind der Ausfall ganzer Linien oder von Verstärkerzügen sowie die Abstellung von Zügen, welche den Zugang zur Störstelle blockieren.

Züge, die dem Störfallprogramm entsprechend aus dem Netz entfernt werden, müssen abgestellt werden. Die Dauer bis ein Zug abgestellt ist, setzt sich aus der Zeit für die Zuführung des Zuges zum Abstellort, ggf. aus der Zeit zum Warten auf Abstellung vor dem oder am Abstellort sowie aus der Zeit für den eigentlichen Abstellvorgang zusammen. Je nach Standort des Zuges relativ zum Störungsort und zum Abstellort werden unterschiedliche Dauern bis zur Zuführung zum Abstellort in Anspruch genommen. Zur Bestimmung der Dauer für die Abstellung eines Zuges wurde ein Vorgehen entwickelt, welches in Abbildung 11.2 dargestellt ist und im Folgenden beschrieben wird.

Soll ein Zug abgestellt werden, da er sich im Umkreis des Störungsortes befindet und den Zugang blockiert, ist zuerst die Wartezeit einzurechnen, bis dieser Zug selbst nicht mehr blockiert ist. Danach wird die Zeit zur Ausfahrt aus dem Umkreis der Störung benötigt. Befindet sich der Zug im direkten Umfeld der Störung, können zusätzliche Handlungen wie beispielsweise Wenden und Ausfahrten im Gegengleis erforderlich werden, was wiederum zusätzliche Zeit beansprucht.

Für alle abzustellenden Züge ist weiterhin die Entscheidung zu treffen, ob auf der Fahrt zwischen dem Standort zum Zeitpunkt der Abstellentscheidung und dem Abstellort Fahrgäste befördert werden sollen. Ist dies der Fall, so ist zur Gesamtdauer die Zeit für die Fahrt vom Standort bis zum letzten Bahnhof vor dem Abstellort hinzuzurechnen. Soll ein Zug sofort geräumt werden, so ist die Fahrt vom Standort bis zum nächstmöglichen Ausstiegsbahnhof bzw. -ort einzurechnen. In beiden Fällen ist weiterhin die Zeit zum Ausstieg der Fahrgäste am Ausstiegsbahnhof sowie die Zeit für die Fahrt vom Ausstiegsbahnhof bis zum Abstellort einzurechnen.

Die jeweils zu berechnenden Fahrtdauern ergeben sich zum einen aus der zurückzulegenden Weglänge, wobei der oben beschriebene Maximalansatz beachtet werden sollte. Zum anderen ist während der Fahrt mit störungsbedingten Verzögerungen zu rechnen. Hierbei sind je nach Lage des Zugs zur Störung zwei Fälle mit unterschiedlichen Verzögerungswahrscheinlichkeiten zu unterscheiden. Bewegt sich der Zug von der Störung weg, so sind Verzögerungen aufgrund der Störung weniger wahrscheinlich, als wenn sich der Zug bei seiner Fahrt zum Abstellort auf die Störung zubewegt.

Für die Dauer, bis die vorgesehene reduzierte Zugzahl erreicht ist, ist nicht nur die Dauer für die Abstellung eines einzelnen Zuges von Bedeutung, sondern auch die Anzahl der abzustellenden Züge. Diese geht aus dem geplanten Störfallprogramm hervor. Anschließend kann die Gesamtdauer, bis die vorgesehene reduzierte Zugzahl erreicht ist, durch Multiplikation von Anzahl der abzustellenden Züge und Dauer je Abstellvorgang abgeschätzt werden.

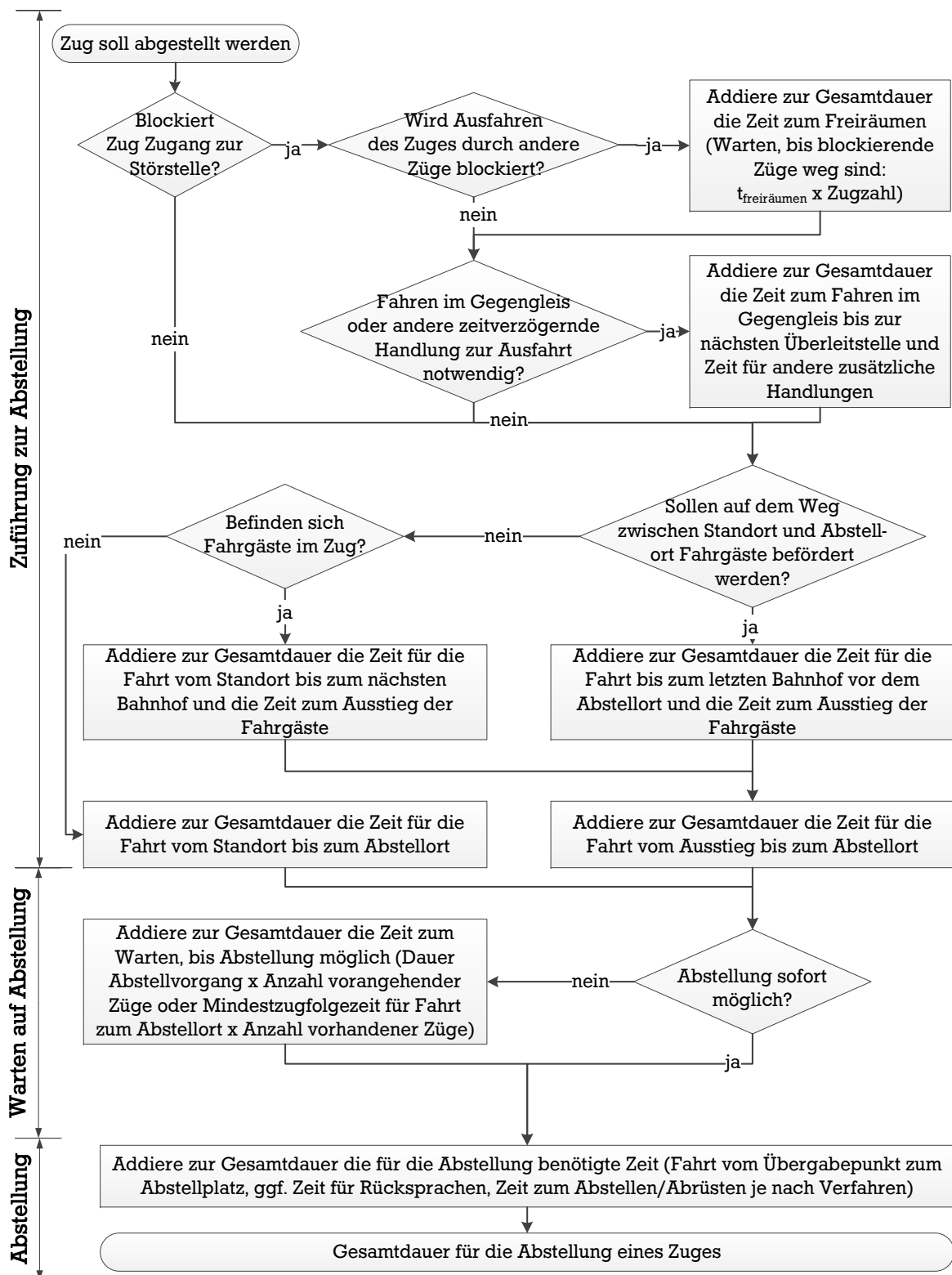


Abbildung 11.2: Verfahren zur Bestimmung der Dauer zum Abstellen eines Zuges

11.3 Abschätzung der Dauer, bis alle Züge auf den im Störfallprogramm vorgesehenen Fahrwegen verkehren

Ein Störfallprogramm zeichnet u. a. aus, dass kürzere oder andere Fahrwege als im regulären Betrieb vorgesehen sind. Aufgrund des zufälligen Störungseintritts ist es möglich, dass sich Züge auf Fahrwegen befinden, welche nicht im Störfallprogramm vorgesehen sind. Deshalb sind Vorgänge notwendig, die einen Zeitbedarf aufweisen, bis die Züge auf den im Störfallprogramm vorgesehenen Fahrwegen verkehren.

Für diese „falschen“ Fahrwege gibt es je nach Standort des Zuges bei Ausrufung des Störfallprogramms unterschiedliche Fälle, welche in Abbildung 11.3 für die Dispositionsmaßnahmen „vorzeitige Wende“ und „Umleitung“ dargestellt sind.

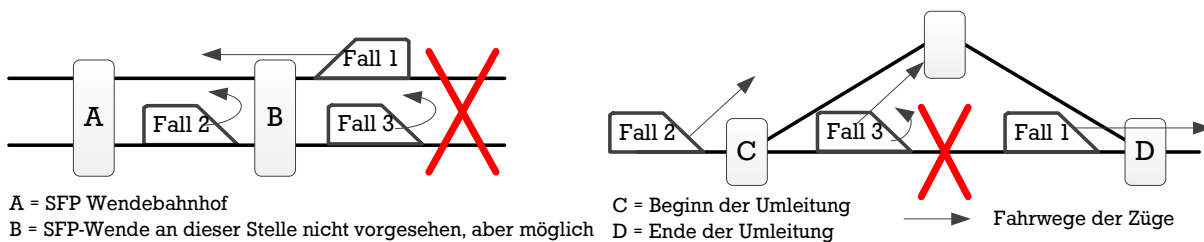


Abbildung 11.3: Fälle von Zügen, die sich nicht auf den vorgesehenen SFP-Wegen befinden – für die Dispositionsmaßnahmen „vorzeitige Wende“ (links) und „Umleitung“ (rechts)

Für die im linken Teil der in Abbildung 11.3 dargestellte Situation der Dispositionsmaßnahme „vorzeitige Wende“ sind folgende Fälle möglich:

1. Der Zug befindet sich zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung direkt hinter dem Störungsort und bewegt sich vom Störungsort weg. Bis der Zug sich auf dem regulären SFP-Weg befindet, vergeht die Zeit, die er benötigt um von seinem Standort bis zum SFP-Wendebahnhof zu gelangen. In diesem Fall sind keine weiteren dispositiven Handlungen notwendig.
2. Der Zug hat zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung bereits den SFP-Wendebahnhof passiert, zwischen dem Zug und der Störstelle befindet sich jedoch ein weiterer Bahnhof in welchem Wenden möglich sind. Bis sich der Zug auf dem regulären SFP-Weg befindet, vergeht die Zeit, die der Zug benötigt um von seinem Standort bis zu diesem Bahnhof zu gelangen, dort eine außerplanmäßige Wende vorzunehmen und bis zum geplanten SFP-Wendebahnhof weiterzufahren.
3. Der Zug befindet sich zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung direkt vor dem Störungsort und bewegt sich darauf zu. Bis er sich auf dem regulären SFP-Weg befindet, vergeht die Zeit in welcher der Zug auf freier Strecke gewendet wird und sich im Gegengleis von der Störstelle bis zur nächsten Überleitmöglichkeit fortbewegt sowie die Zeit, die der Zug benötigt um von seinem Standort bis zum SFP-Wendebahnhof zu gelangen.

Für die im rechten Teil der in Abbildung 11.3 dargestellte Situation der Dispositionsmaßnahme „Umleitung“ sind folgende Fälle möglich:

1. Der Zug befindet sich zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung direkt hinter der Störung und bewegt sich vom Störungsort weg. Bis er sich auf dem regulären SFP-Weg befindet, vergeht die Zeit, die der Zug benötigt um von seinem Standort bis zum Ende der Umleitung zu gelangen. In diesem Fall sind keine weiteren dispositiven Handlungen notwendig.
2. Der Zug hat zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung den Beginn der Umleitung noch nicht passiert. Bis er sich auf der Umleitung befindet, vergeht die Zeit, die der Zug benötigt um von seinem Standort bis zum Umleitungsbeginn zu gelangen.

-
3. Der Zug befindet sich zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung direkt vor dem Störungsort und bewegt sich auf die Störung zu. Bis er sich auf dem regulären SFP-Weg befindet, vergeht die Zeit in welcher der Zug auf freier Strecke gewendet wird und sich im Gegengleis von der Störstelle bis zur nächsten Überleitmöglichkeit fortbewegt sowie die Zeit, die der Zug benötigt um von seinem Standort bis zum Beginn der Umleitung zu gelangen.

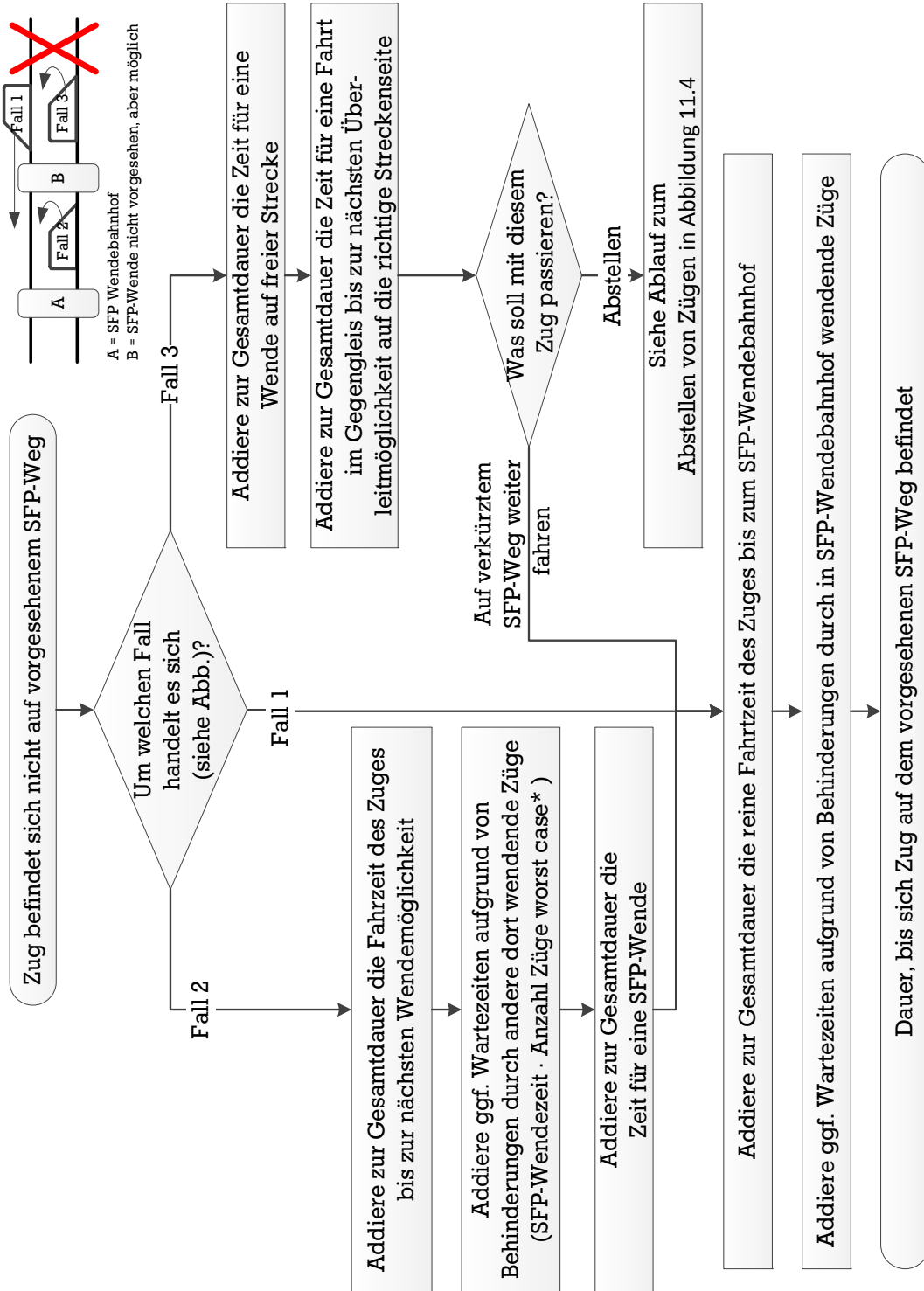
Aus den erforderlichen Vorgängen je Fall ergibt sich die Zeit, die benötigt wird um einen Zug auf den vorgesehenen SFP-Weg zu(rück-)zuführen. Für die Dispositionsmaßnahme „vorzeitige Wende“ wurde beispielhaft ein Ablaufschema zur Ermittlung der Dauer der Vorgänge entwickelt, welches in Abbildung 11.4 zu finden ist. Der Ablauf zur Ermittlung der Dauer zur Nutzung einer Umleitung durch einen Zug gestaltet sich analog.

Auch die Dauer des Gesamtvorgangs, bis alle Züge auf den im Störfallprogramm vorgesehenen Fahrwegen verkehren hängt nicht nur von der Dauer für einen einzelnen Zug, sondern auch von der Anzahl der betroffenen Züge ab. Zur Bestimmung dieser Zahl sind zwei Ansätze möglich.

Der erste Ansatz beinhaltet die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, dass einer der oben beschriebenen Fälle auf einen Zug zutrifft. Dazu kann aus der Taktzeit und der Fahrtdauer für eine Strecke die Anzahl der Züge, die sich pro Richtung und Linie im Netz befinden, berechnet werden. Setzt man die Länge der Strecke zwischen Störung und Eingriffspunkt (Umleitungsbeginn oder SFP-Wendebahnhof) ins Verhältnis zum Gesamtweg, so ergibt sich das gleiche Verhältnis zwischen der Anzahl der sich wahrscheinlich auf dem betroffenen Streckenabschnitt befindlichen Züge und der Gesamtzahl der Züge pro Linie im Netz.

Im zweiten Ansatz wird pauschal angenommen, dass sich pro Linie jeweils ein Zug in der jeweils relevanten Situation befindet. Dementsprechend ergibt sich die Anzahl der Züge an dieser Stelle aus der Anzahl der Linien die dort verkehren. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die maximale Anzahl der Züge aus der Anzahl der Blöcke zwischen Störung und Eingriffspunkt besteht, sobald Züge im Blockabstand aufeinander verkehren.

Anschließend kann die Gesamtdauer, bis alle Züge auf den im Störfallprogramm vorgesehenen Fahrwegen verkehren, je relevantem Netzabschnitt durch Multiplikation von Zugzahlen und der Vorgangsdauer abgeschätzt werden.



* Anzahl der Blöcke bis zum nächsten Bahnhof der Strecke, in denen sich ein Zug befinden kann.

11.4 Abschätzung der Dauer, bis alle Züge pünktlich verkehren

Aufgrund der Vorgänge während der Störung und durch die Störung selbst entstehen Ursprungs- und/oder Zusatzverspätungen für einzelne Züge. Störungsbedingte Verspätungen bei Zügen, die durch einen Nothaltevorgang zum Stehen kommen, erfahren bspw. mindestens eine Verspätung in Höhe der Zeit vom Störungseintritt bis zur Kommunikation des Störfallprogramms an alle Beteiligten t_{ges} (siehe Abschnitt 5.4).

Ein Störfallprogramm ist jedoch erst eingeschwungen, wenn Anzahl und Fahrwege der Züge stimmen und diese pünktlich verkehren. Die durch die Störung entstehenden Ursprungs- und Zusatzverspätungen müssen also im weiteren Fahrtverlauf abgebaut werden, wobei ggf. weitere Verspätungen hinzukommen können. Um die Dauer abschätzen zu können, bis alle Züge im Störfallprogramm pünktlich verkehren, ist es notwendig die Situationen zu identifizieren, an denen Verspätungen entstehen und abgebaut werden können. Dies ist im Störungskontext grundsätzlich bei Wenden am Netzende, während der Fahrt und bei SFP-Wenden vor der Störungsstelle bzw. an SFP-Wendebahnhöfen möglich und kann bei Kenntnis der Ist-Daten auf folgende Weise berechnet werden:

- Bei Wenden am Netzende ist die sich aus der Ist-Ankunftszeit t_{istan} und der Soll-Abfahrtszeit t_{sollab} ergebende Dauer für eine Wende mit planmäßiger Abfahrt der in Störungen benötigten Wendedauer $t_{Wende,SFP}$ gegenüberzustellen.

$$\Delta_{Wende} = t_{Wende,SFP} - (t_{sollab} - t_{istan})$$

- Während der Fahrt ist die Ist-Fahrzeit $t_{fahrtist}$ der Soll-Fahrzeit $t_{fahrtsoll}$ gegenüberzustellen.

$$\Delta_{Fahrt} = t_{fahrtist} - t_{fahrtsoll}$$

- Bei SFP-Wenden ist die zur Verfügung stehende Wendezeit, welche sich aus der Ist-Ankunftszeit des Zuges in Hin-Richtung $t_{istan,hin}$ und der Soll-Abfahrtszeit des Zuges in Rück-Richtung $t_{sollab,rueck}$ ergibt, der in Störungen benötigten Wendedauer $t_{Wende,SFP}$ gegenüberzustellen.

$$\Delta_{Wende,SFP} = t_{Wende,SFP} - (t_{sollab,rueck} - t_{istan,hin})$$

Da die Dauer der einzelnen Vorgänge jedoch bereits während der Erstellung des Störfallprogramms abgeschätzt werden soll, stehen keine Ist-Daten zur Verfügung. Aus diesem Grunde ist zur Abschätzung die Verwendung durchschnittlicher Verspätungen am Endbahnhof $t_{MWVerspEndBhf}$ und auf der Strecke $t_{MWVerspStrecke}$ notwendig, welche netz- oder streckenspezifisch zu ermitteln sind. Dementsprechend können die durchschnittlich entstehenden Abweichungen wie folgt berechnet werden:

$$\Delta_{Wende} = t_{Wende,SFP} - (t_{Wende,Ril} - t_{MWVerspEndBhf})$$

$$\Delta_{Fahrt} = t_{MWVerspStrecke}$$

$$\Delta_{Wende,SFP} = t_{Wende,SFP} - (t_{sollab,rueck} - t_{sollan,hin})^1$$

¹ Für den Fall, dass $t_{MWVerspStrecke}$ in beiden Richtungen gleich ist.
Sonst gilt $\Delta_{Wende,SFP} = t_{Wende,SFP} - (t_{sollab,rueck} + t_{MWVerspStrecke,rueck}) - (t_{sollan,hin} + t_{MWVerspStrecke,hin})$.

Folglich ergibt sich als Verspätungszuwachs oder -abbau pro Umlauf eines Zuges Δ_{Umlauf}

$$\Delta_{Umlauf} = \Delta_{Wende} + \Delta_{Fahrt} + \Delta_{WendeSFP}$$

wobei für alle Δ gilt:

- wenn $\Delta > 0$, dann Verspätungszuwachs,
- wenn $\Delta = 0$, dann keine Änderung und
- wenn $\Delta < 0$, dann Verspätungsabbau.

Indem die bereits vor der Störung bestehende Verspätung des Zuges t_v und die aufgrund von Störungseintritt und Ausrufung des Störfallprogramms entstehende Ur- oder Zusatzverspätung des Zuges t_{ges} mit dem Verspätungsabbau pro (verkürztem) Umlauf eines Zuges ins Verhältnis gesetzt wird, lässt sich die Anzahl der Umläufe bis zum Erreichen der Planmäßigkeit berechnen. Da in der Störung die Pünktlichkeit der Züge (und nicht unbedingt die Planmäßigkeit) im Fokus steht, kann von den Verspätungen der Wert für die jeweilige im System geltende Pünktlichkeitsgrenze t_{puektl} abgezogen werden, womit sich die Anzahl der Umläufe, bis ein Zug pünktlich ist, wie folgt ergibt:

$$\text{Anzahl Umläufe, bis Zug pünktlich} = \frac{t_v + t_{ges} - t_{puektl}}{\Delta_{Umlauf}}$$

Aus dieser (aufgerundeten) Anzahl benötigter Umläufe bis zum Erreichen der Pünktlichkeit lässt sich durch Multiplikation mit der geplanten Dauer pro (verkürztem) Umlauf die Gesamtdauer berechnen.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der oben beschriebenen Prinzipien soll das Beispiel in Abbildung 11.5 dienen. Dort sind die Zeit-Wege-Linien einer Strecke in drei verschiedenen Situationen abgebildet, wobei auf der waagerechten Achse der Weg und auf der senkrechten Achse die Zeit abgetragen ist. Die Halte der Züge auf den Unterwegsbahnhöfen wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen:

- Im linken Bild sind die Zeit-Wege-Linien für zwei Züge einer Linie abgebildet, welche im regulären Betrieb zwischen den Bahnhöfen A und E pendeln.
- Im mittleren Bild sind die Zeit-Wege-Linien dieser Züge im stabilen Störfallprogramm dargestellt. Im Störfallprogramm ist vorgesehen, dass die Züge bei Störungen in der Streckenmitte vorzeitig an den Bahnhöfen X und Y wenden. Die Besonderheit dieses Programms liegt darin, dass die planmäßige Abfahrtszeit des Zugs in Gegenrichtung in Bahnhof Y für die Dauer einer Wende im Störfall ausreicht, die Zeit dafür in Bahnhof X jedoch nicht genügt. Im Bahnhof X werden also bei jeder vorzeitigen Wende systematisch Verspätungen aufgebaut. Da im regulären Wendebahnhof A jedoch genügend Wendepufferzeit vorgesehen ist, kann insgesamt pro Umlauf ein Verspätungsabbau erfolgen. Dabei wird davon ausgegangen, dass während der Fahrt Verspätungen weder auf- noch abgebaut werden.
- Im rechten Bild sind die Zeit-Wege-Linien der Züge in der Einschwingphase dargestellt. Aufgrund von Störungseintritt und Ausrufung des Störfallprogramms erhalten die Züge eine Urverspätung t_{ges} , welche erst nach vier verkürzten Umläufen zwischen Bahnhof A und X und nach drei verkürzten Umläufen zwischen Bahnhof Y und E kompensiert ist.

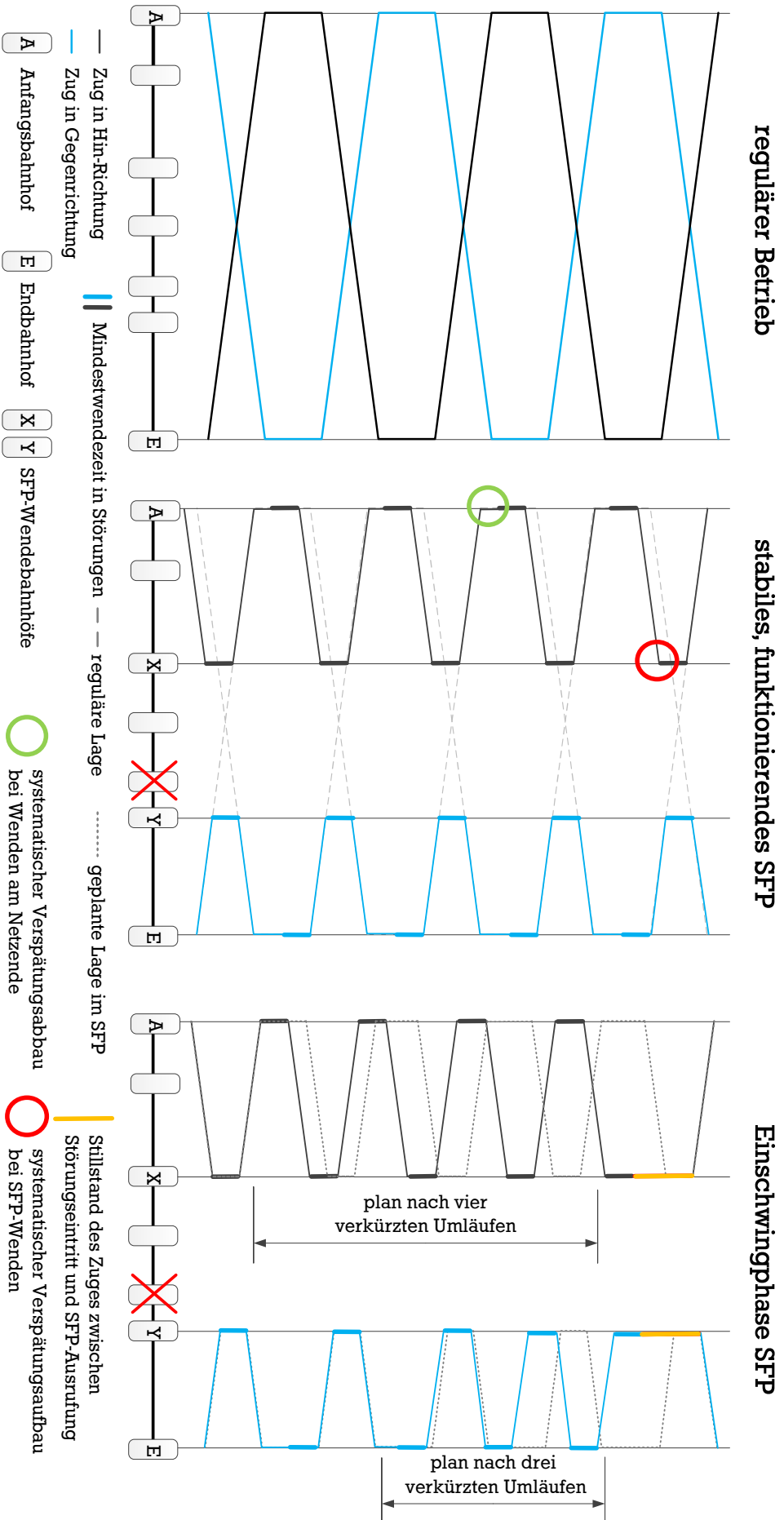


Abbildung 11.5: Zeit-Wege-Linien für einen Pendelverkehr im regulären Betrieb, im stabilen Störfallprogramm und während der Einschwingphase

11.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im vorliegenden Kapitel wurden Vorgehensweisen zur Abschätzung der Dauer für die Umsetzung von Dispositionsmaßnahmen entwickelt. Wie eingangs beschrieben, ist eine allgemeingültige Quantifizierung der Dauer von der SFP-Ausrufung bis zum Ende der Einschwingphase nicht möglich, da sie sehr stark von der eigentlichen Störung abhängt. Mit diesen Vorgehensweisen ist es jedoch möglich – zusammen mit den in Kapitel 5 erarbeiteten Werten für die Dauer vom Störungseintritt bis zur Ausrufung des Störfallprogramms – die Gesamtdauer bis zum Ende der Einschwingphase konkreter Störfallprogrammen abzuschätzen. Diese Gesamtdauer ist für die Betriebsqualität eines Störfallprogramms wesentlich und somit auch ein wichtiges Beurteilungskriterium, dessen Größenordnung nun abgeschätzt werden kann. Dadurch wird eine bessere Vorhersage des betrieblichen Verhaltens von Störfallprogrammen möglich, was wiederum die Grundlage zur Planung von Störfallprogrammen verbessert.

Weiterhin konnten aus der Erarbeitung der Vorgehensweisen Lehren für die Erstellung von Störfallprogrammen gezogen werden. So zeigt die detaillierte Beschreibung der Abläufe und Wirkzusammenhänge beispielsweise für den Vorgang des Abstellens, wie stark Abstellstrategien und das Vorhandensein von zentralen Abstellmöglichkeiten die Umsetzungsdauer der Maßnahme „Zugzahlreduktion“ beeinflussen können.

Auch die Betrachtung der Vorgänge zur Wiederherstellung der Pünktlichkeit während der Störung brachte den erneuten Nachweis der Notwendigkeit präziser berechneter Belegungszeiten, welche aufgrund von Wenden im SFP-Fall entstehen. So muss nicht nur die längere Wendedauer in Störungen beachtet werden, sondern auch besonders das Vorhandensein von Wendepuffern zum Abbau der zu Beginn der Störung entstandenen Verspätungen. Weiterhin kommt dem Vorgang der Wiederherstellung der Pünktlichkeit eine große Bedeutung zu, da dieser Vorgang durch die notwendigen Umläufe besonders viel Zeit benötigt, auch wenn es bei der Durchführung keine Probleme geben sollte.

Im Hinblick auf die mögliche systematische Verspätungsentstehung während der vorzeitigen Wenden im Störfallprogramm ist es auch möglich, die gewonnenen Erkenntnisse für eine Überprüfung des regulären Fahrplans zu nutzen. So können gegebenenfalls andere, ebenfalls geeignete, Bahnhöfe als SFP-Wendebahnhöfe gewählt werden, um die systematische Entstehung von Verspätungen zu vermeiden und somit die Robustheit des Störfallprogramms bereits in der Planung zu verbessern.



12 Zusammenfassung und Ausblick

12.1 Zusammenfassung

12.1.1 Ergebnisse

Ausgehend von der identifizierten Problemstellung des fehlenden Wissens über Eigenschaften des Eisenbahnbetriebs in Störungen und den Faktoren, die das Einschwingverhalten von Störfallprogrammen bestimmen, wurden in Kapitel 3 drei Forschungsfragen gestellt. Diese Fragen wurden in der vorliegenden Arbeit, wie nachfolgend zusammengefasst, beantwortet.

Forschungsfrage 1: Welche Faktoren haben welchen Einfluss auf das Einschwingverhalten von Störfallprogrammen?

Neben wichtigen Einflüssen, wie Prozessqualität, Schulungsstand der Mitarbeiter und Vorhandensein von Reserven im Störfall, konnte die Bedeutung von Auswahl und Gestaltung der entsprechenden Dispositionsmaßnahmen eines Störfallprogramms für ein schnelles Erreichen des stabilen Störungszustandes und für die erfolgreiche Umsetzung von Störfallprogrammen nachgewiesen werden (siehe Kapitel 4).

Forschungsfrage 2: Welche besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen sind bei der Vorhersage des Einschwingverhaltens zu beachten und wie können diese Eigenschaften modelliert werden?

Mithilfe einer allgemeinen Beschreibung und einer Analyse der erforderlichen betrieblichen und dispositiven Handlungen in Störungen sowie bei der Anwendung von Störfallprogrammen konnten die besonderen Eigenschaften längerer Belegungszeiten in Störungen und einer schrittweise umgesetzten Reduktion von Zugzahlen im Netz identifiziert werden. Dies führte zur Formulierung zusätzlicher Belegungszeitanteile sowie zur Beschreibung des Vorgangs der Reduktion der Zugzahlen während der Einschwingphase. Hierbei ist zu bemerken, dass Formulierung und Modellierung unabhängig von den möglichen Verfahren zur Ermittlung von Leistungskenngrößen erarbeitet wurden. Durch diese allgemeingültige Formulierung ist eine Weiterverwendung der Erkenntnisse in weiteren Modellen, wie beispielsweise in Betriebssimulationen oder in noch zu entwickelnden analytischen Modellen mit bedientheoretischem Ansatz, möglich. Zusammenfassend werden nachfolgend die erarbeiteten Ergebnisse zu zusätzlichen Belegungszeitanteilen und zum Vorgang der Reduktion der Zugzahlen in der Einschwingphase aufgeführt:

- Fünf zusätzliche Belegungszeitanteile für Nothaltevorgang, Ermittlung und Entscheidung, Ausrufung des Störfallprogramms über die IT-Systeme, Rücksprachen und Befehlerteilung wurden identifiziert, stochastisch anhand einfacher Verteilungsfunktionen beschrieben sowie in Form von Erwartungswerten quantifiziert (siehe Kapitel 5).
- Eine im Störfall längere Wendedauer konnte anhand einer Betriebsdatenanalyse nachgewiesen und quantitativ beschrieben werden (siehe Kapitel 6). Zur Abbildung dieser Eigenschaft bei der Planung von Störfallprogrammen wurde als Kompromiss zwischen betrieblicher Handhabbarkeit und 90 % Abdeckung der möglichen Fälle ein allgemeiner Zuschlag von drei Minuten für Wendedauern in Störungen vorgeschlagen.

- Die Einflüsse der Infrastruktureigenschaften und des Betriebsprogramms auf die Fahrt-dauer bei Umleitungen wurden umfassend zusammengestellt und in einer entwickelten Vorgehensweise zur präziseren Planung der Maßnahme „Umleitung“ verarbeitet (siehe Kapitel 7).
- Die Eigenschaft der schrittweise erfolgenden Reduktion von Zugzahlen während der Einschwingphase wurde beschrieben und eine heuristische Vorgehensweise in Form verschiedener Szenarien (15-Minuten-Heuristik) zur Abbildung dieser Eigenschaft erarbeitet (siehe Kapitel 8).

Die besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen in Form der längeren Belegungszeiten und der schrittweise erfolgenden Reduktion der Zugzahlen werden im Modell zur Berechnung des Belegungsgrads in Wendebahnhöfen zusammengeführt (siehe Kapitel 9). Es wurde ebenfalls aufgezeigt, dass diese Eigenschaften im Störfall und speziell während der Einschwingphase zu einem Anstieg der Gesamtbelegungszeit der Infrastruktur führen können, woraus wiederum Rückstaus und Verspätungen folgen. Im ungünstigsten Fall führen diese besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen und in der Einschwingphase dazu, dass das Störfallprogramm erst nach sehr langer Zeit pünktlich ist, d. h. vollständig einschwingt.

Forschungsfrage 3: Wie kann das Einschwingverhalten von Störfallprogrammen, also die Machbarkeit und die zu erwartende Einschwingdauer, abgeschätzt bzw. bewertet werden, damit eine verbesserte Gestaltung der Einschwingphase von Störfallprogrammen möglich wird?

Der berechnete Einzelbelegungsgrad einzelner Gleise in Wendebahnhöfen unter Berücksichtigung der oben beschriebenen besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen bietet sich als Kennzahl zur Beurteilung verschiedener SFP-Lösungsmöglichkeiten an. In Verbindung dieses Einzelbelegungsgrads mit den ebenfalls entwickelten Regeln und Richtwerten zur Funktionsfähigkeit von Störfallprogrammen ist es nun möglich, die Machbarkeit einzelner SFP-Lösungen bereits bei der SFP-Planung abzuschätzen sowie diese Lösungen miteinander zu vergleichen (siehe Kapitel 10). Weiterhin wurden Handlungsmöglichkeiten für den Fall eines negativen Prüfergebnisses erarbeitet.

Der erarbeitete Ansatz zur Abschätzung der Dauer der Gesamtvorgänge bis zum Ende der Einschwingphase vervollständigt die Arbeit (siehe Kapitel 11). Hier wird die bereits begonnene Quantifizierung von Teilvorgängen nach Beginn der Störung fortgesetzt. Die Besonderheit der entwickelten Vorgehensweise zur Bestimmung der Dauer bis zum Ende der Einschwingphase liegt in der allgemeinen Formulierung. Diese ist notwendig, da die Dauern der zu quantifizierenden Vorgänge zu stark von dem jeweiligen Störfallprogramm abhängen, als dass feste allgemeingültige Richtwerte für die Dauern sinnvoll bestimmt werden können.

Für die Bearbeitung der Forschungsfragen wurden neben der Allgemeingültigkeit des Ansatzes die nicht-funktionalen Anforderungen „*Übertragbarkeit der Modelle auf Mischverkehrsstrecken, quantitative Modelle, möglichst einfache Parametrisierung und geringer Berechnungsaufwand*“ formuliert. So wurden in entsprechenden Kapiteln wiederholt Überlegungen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse angestellt und Hinweise für gegebenenfalls notwendige Weiterentwicklungen gegeben. Zur quantitativen Beschreibung wurden Betriebsdaten, Verteilungsfunktionen und Erwartungswerte verwendet. Das Ergebnis der Arbeit ist die Entwicklung eines Modells für die Berechnung des Belegungsgrads und für die Bestimmung der Gesamtdauer von Vorgängen bis zum Ende der Einschwingphase.

Die Verwendung einfacher Parameter in den Modellen wurde ebenfalls beachtet. Die für die Berechnung des Belegungsgrads und für die Abschätzung der Gesamtdauer von Vorgängen notwendigen Eingangsgrößen, wie Zugzahlen und Obergrenzen für die Dauer von Entscheidungen,

können anhand einfacher Überlegungen und aus der Anwendung der erarbeiteten Planungswerte ermittelt werden. Die Anforderung des geringen Aufwands konnte nur teilweise erfüllt werden. Aufgrund der erarbeiteten Planungsparameter, Ablaufschemata und einfacher Rechenoperationen und Modellierungen kann der Berechnungsaufwand für die Machbarkeitsprüfung als verhältnismäßig gering bezeichnet werden, jedoch ist er für den Schritt der Modellierung der Dispositionsregeln und den sich daraus ergebenden Belegungszeiten aufwendig. Zusätzlich hängt der Bearbeitungsaufwand von der Komplexität der zugrundeliegenden Infrastruktur und des Betriebsprogramms ab.

Nicht zuletzt wurden in der vorliegenden Arbeit einheitliche und systematische Begrifflichkeiten für die Störfallmanagementforschung im Schienenverkehr geschaffen, indem der Störungszyklus als Grundlage zur Einordnung von Ansätzen des Störfallmanagements und das Konzept der Störfallprogramme definiert wurden. So dient die Niederschrift der Prinzipien und Grundlagen der betrieblichen und dispositiven Abläufe in Störungsfällen auch als Basis zur Wissensvermittlung.

12.1.2 Bedeutung der Ergebnisse

Bisher wurde die Übergangsphase von einer Störung zum geregelten Störungsbetrieb im Allgemeinen eher unzureichend sowie die Einschwingphase von Störfallprogrammen im Speziellen weder in der Forschung noch in der Praxis behandelt. In der vorliegenden Arbeit wurden zum ersten Mal die besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen und die Vorgänge in der Einschwingphase beschrieben und modelliert.

Durch die vorliegende Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass die besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen zu einem Anstieg der Gesamtbelegungszeit führen, welches zu Rückstaus und Verspätungen führt und wiederum das Erreichen der stabilen Phase behindern bzw. verzögern kann. Dies bedeutet zum einen, dass die bisher in der Praxis verwendeten Vorgehensweisen („Das Prüfen der Machbarkeit der stabilen Phase ist ausreichend.“) und Annahmen, wie die Verwendung von Planungswerten des Regelbetriebs im Störfall, nicht unbedingt der Realität entsprechen und nicht mehr bzw. nicht ohne Weiteres verwendet werden sollten. Zum anderen belegen die beobachteten Auswirkungen der längeren Belegungszeiten in Störungen und der schrittweise erfolgenden Reduktion der Zugzahlen in der Einschwingphase, dass die Vorgänge in der Einschwingphase für das Erreichen der stabilen Phase relevant sind und daher in den bestehenden und zu entwickelnden Modellen zur Betriebsoptimierung und Dispositionsunterstützung (siehe auch Abschnitt 2.2) nicht vernachlässigt werden sollten.

Die Erstellung von Störfallprogrammen kann durch die vorliegenden Ergebnisse deutlich verbessert werden. Während die Machbarkeit von Störfallprogrammen bisher nur mithilfe von Expertenwissen abgeschätzt wurde, existiert nun ein transparentes überschlüssiges Verfahren zur quantitativen Beurteilung der Machbarkeit. Durch die Möglichkeit der Vorab einschätzung der Machbarkeit verringert sich der Anteil der „Versuch-Irrtum“-Vorgehensweise bei der Entwicklung und ersten Umsetzung konkreter Störfallprogramme. Resultate sind eine verkürzte Lernphase bei der Umsetzung, eine bessere Betriebsdurchführung auch in Störungen sowie eine größere Akzeptanz des Konzeptes der Störfallprogramme. Letztendlich wird dadurch die Attraktivität des Schienenpersonenverkehrs gesteigert, weshalb die vorliegende Arbeit auch einen (kleinen) Beitrag zur Verlagerung des Verkehrs auf die Schiene leistet.

12.2 Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden unter Beachtung verschiedener, in Kapitel 3 beschriebener, Eingrenzungen erzielt. Die Haupteingrenzung lag in der reinen Betrachtung der Bewertung der Einschwingphase von Störfallprogrammen. Im Hinblick auf eine Gesamtbetrachtung ist nicht nur eine Ergründung der Vorgänge der Ausschwingphase angezeigt, um auch hier mithilfe zu entwickelnder Modelle den Verlauf der Ausschwingphase vorherzusagen und damit besser planen zu können. Auch für die Bewertung der stabilen Phase eines Störfallprogramms sind die existierenden Bewertungsansätze weiter auszuarbeiten. Hierbei sollte ein Fokus auf der Bewertung der Eignung verschiedener Dispositionsmaßnahmen liegen und neben rein betrieblichen Kriterien auch beispielsweise wirtschaftliche Kriterien in die Bewertung einfließen.

Eine weitere Einschränkung lag in der Fokussierung auf betriebliche Abläufe im Schienenpersonennahverkehr mit dem Schwerpunkt von S-Bahn Netzen. Folglich liegt weiteres Forschungspotential in einer Erweiterung dieses Betrachtungsrahmens. So ist die im Rahmen der Arbeit ansatzweise erfolgte Übertragung der Betrachtungen auf Schienennetze mit Mischverkehr in jedem Fall auszuweiten um den Einsatz von Störfallprogrammen im gesamten Schienennetz zu verbessern.

Zur Modellierung der Dauer der einzelnen Teilvorgänge während der Einschwingphase wurden einfache Dreiecks- und Rechteckverteilungen sowie Expertenwissen und Zeitstudien verwendet. Dies bietet zum ersten Mal die Möglichkeit, die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase unter der Beachtung stochastischer Eigenschaften abschätzen zu können. Aufgrund der einfachen Modellierung kann es sich jedoch nur um eine Abschätzung handeln. Für eine exaktere Abschätzung ist eine empirische Bestimmung der Dauer der einzelnen dispositiven Vorgänge während Störungen auf Grundlage von automatisierten Zeitmessungen vonnöten. Letztere könnten bisher jedoch nur unter großen Kosten in einer ausreichend großen Menge zur Verfügung gestellt werden, da diese Zeiten mit den zur Steuerung des Eisenbahnbetriebs vorhandenen IT-Systemen derzeit nicht automatisiert erhoben werden können. Daher ist die Entwicklung von Methoden der wirtschaftlichen Erhebung dieser Zeiten eine Bedingung für weitere Verbesserungen der vorgestellten Arbeit.

Weiterhin kann anhand der vorliegenden Arbeit die Machbarkeit von Störfallprogrammen abgeschätzt werden. Bei der Auswahl verschiedener SFP-Varianten ist bei gleicher Machbarkeit jedoch auch die jeweils erreichbare Qualität des Betriebsablaufes von Interesse. Da Qualitätsausagen anhand des Belegungsgrads, also anhand von analytischen Verfahren ohne bedienungstheoretischen Ansatz, nicht möglich sind, sollten in Zukunft die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit in analytischen Verfahren mit bedienungstheoretischem Ansatz verarbeitet werden. Dies ist auch im Hinblick auf die Übertragung des Modells auf Mischverkehrsstrecken sinnvoll, da ohne bedienungstheoretischen Ansatz das zufällige Auftreten verschiedener Zugfolgefälle bei heterogenem Verkehr nur über die Gewichtung unterschiedlicher Mindestzugfolgezeiten abgebildet wird. Für die analytische Modellierung mit bedienungstheoretischem Ansatz werden – z. B. zur Modellierung von Bedienraten – ebenfalls zusätzliche empirische Werte von Vorgangsdauern in Störungen benötigt, deren Erhebung noch aussteht (s. o.).

Aufbauend auf der vorliegenden Möglichkeit der quantitativen Beurteilung der Machbarkeit von Störfallprogrammen ist die Erstellung von Betriebssimulationen von Störungen und Störfallprogrammen sinnvoll, da Simulationen vielfältigere Möglichkeiten der Analyse und Vorhersage von Betriebszuständen bieten. Jedoch wurde der Übergang zwischen Beginn der Störung zum stabilen Störungszustand allgemein bzw. der Einschwingphase im Speziellen bisher noch nicht in eisenbahnbetrieblichen Simulationen abgebildet. Mithilfe der hier erarbeiteten Erkenntnisse über Vorgänge und besondere Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen

und in der Einschwingphase ist dies nun möglich. Auch im Hinblick auf das langfristige Ziel einer Automatisierung trivialer Dispositionstätigkeiten sollte eine Abbildung der besonderen Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen in bestehende Dispositionsunterstützungs- und -optimierungsmodelle erfolgen.

Aus der Aufzählung der weiteren Forschungsfelder wird ersichtlich, dass die erarbeiteten Ergebnisse erste Beiträge zur Beschreibung und Modellierung des Eisenbahnbetriebs in Störungen darstellen und ein neues, breites Forschungsfeld eröffnen.



Literaturverzeichnis

- [Ahuja u. a. 2009] AHUJA, Ravindra ; MÖHRING, Rolf ; ZAROLIAGIS, Christos: *Lecture Notes in Computer Science*. Bd. 5868: *Robust and Online Large-Scale Optimization*. Springer Berlin / Heidelberg, 2009
- [Alexander 2002] ALEXANDER, David E.: *Principles of Emergency Planning and Management*. erste. Oxford University Press, USA, 2002
- [Andersson u. a. 2013] ANDERSSON, Emma ; PETERSON, Anders ; TÖRNQUIST-KRASEMANN, Johanna: Introducing a New Quantitative Measure of Railway Timetable Robustness Based on Critical Points. In: *Tagungsband des 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen)*, Kopenhagen, Dänemark, 2013
- [Andree u. a. 2001] ANDREE, Rolf ; BOLTZE, Manfred ; JENTSCH, Jeiko: Entwicklung von Strategien für ein dynamisches Verkehrsmanagement. In: *Straßenverkehrstechnik* 45 (2001), Nr. 12, S. 610–620
- [Anemüller u. Jacobs 2013] ANEMÜLLER, Stefan ; JACOBS, Peter: Extern verursachte Störungen kundenorientiert managen. In: *Verkehr und Technik* 66 (2013), Nr. 6, S. 209 – 216
- [Bässe 2012] BÄSSE, Kerstin: *Strategien von Schienenverkehrsunternehmen bei Betriebsstörungen – Empirische Analyse und Bewertung*, Technische Universität Dresden, Fakultät Friedrich List, Institut für Wirtschaft und Verkehr, Diplomarbeit, 2012
- [Bokranz u. Landau 2006] BOKRANZ, Rainer ; LANDAU, Kurt: *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen: MTM-Handbuch*. Schäffer-Poeschel Verlag, 2006
- [Boltze u. Fornauf 2013] BOLTZE, Manfred ; FORNAUF, Leif: A Method to Develop Dynamic Traffic Management Strategies for Cases of Incidents. In: *Tagungsband des 13th World Congress on Transportation Research, WCTR2013, July 2013, Rio de Janeiro, Brasilien*, 2013
- [Cadarsó u. a. 2013] CADARSO, Luis ; MARIN, Angel ; MAROTI, Gabor: Recovery of Disruptions in Rapid Transit Networks. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 50 (2013), S. 15–33
- [Castro u. Oliveira 2011] CASTRO, Antonio J. ; OLIVEIRA, Eugenio: A New Concept for Disruption Management in Airline Operations Control. In: *Tagungsband der Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2011, S. 269 – 290
- [Chen 2012] CHEN, Lei: *Real Time Traffic Management in Junction Areas and Bottleneck Sections on Mainline Railways*, University of Birmingham, Diss., 2012
- [Chen u. a. 2010] CHEN, Lei ; SCHMID, Felix ; DASIGI, Meena ; NING, Bin ; ROBERTS, Clive ; TANG, Tao: Real-Time Train Rescheduling in Junction Areas. In: *Tagungsband der Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2010
- [Chu 2012a] CHU, Friederike: *Ergebnisse von Expertengesprächen und Besprechungen über Störfallprogramme und Dispositionspraktiken im Störfall bei DB Regio*. 2012. – Ergebnisse aus den Workshops mit Leitern der Transportleitungen der S-Bahnen Frankfurt am Main, Hannover, München und Stuttgart sowie zwei ausgebildeten Triebfahrzeugführern der S-Bahn Frankfurt am Main. Unveröffentlicht.

- [Chu 2012b] CHU, Friederike: *Zusammenfassung der Experteninterviews über Störfallprogramme bei DB Regio*. 2012. – Interviews der Leiter der Transportleitungen der S-Bahnen Frankfurt am Main, Hannover, München und Stuttgart. Unveröffentlicht.
- [Chu u. a. 2013] CHU, Friederike ; BÖHME, Aline ; WOLTERS, Achim: Störfallprogramme betrieblich umsetzen. In: *Deine Bahn* 6 (2013), S. 20–25
- [Chu u. Fornauf 2011] CHU, Friederike ; FORNAUF, Leif: Vom Katastrophen- und vom dynamischen Straßenverkehrsmanagement lernen – Störfallprogramme bei Betriebsstörungen im Schienenverkehr. In: *Tagungsband der HEUREKA '11 – Optimierung in Verkehr und Transport* Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2011
- [Chu u. a. 2012] CHU, Friederike ; FORNAUF, Leif ; BÖHME, Aline ; WOLTERS, Achim: Methode zur Erarbeitung von Störfallprogrammen. In: *Deine Bahn* 7 (2012), S. 45–48
- [Clausen 2007] CLAUSEN, Jens: Disruption Management in Passenger Transportation – from Air to Tracks. In: LIEBCHEN, Christian (Hrsg.) ; AHUJA, Ravindra K. (Hrsg.) ; MESA, Juan A. (Hrsg.): *Tagungsband des 7th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems (ATMOS'07)* Bd. 7. Dagstuhl, Germany : Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2007 (OpenAccess Series in Informatics (OASIs))
- [Clausen u. a. 2010] CLAUSEN, Jens ; LARSEN, Allan ; LARSEN, Jesper ; REZANOVA, Natalia: Disruption Management in the Airline Industry – Concepts, Models and Methods. In: *Comput. Oper. Res.* 37 (2010), Mai, Nr. 5, S. 809–821
- [Corman 2010] CORMAN, Francesco: *Real-time Railway Traffic Management: Dispatching in Complex, Large and Busy Railway Networks*, Technische Universiteit Delft, Diss., 2010
- [Corman u. a. 2011c] CORMAN, Francesco ; D'ARIANO, Andrea ; HANSEN, Ingo A. ; PACCIARELLI, Dario ; PRANZO, Marco: Dispatching Trains During Seriously Disrupted Traffic Situations. In: *Tagungsband des 8th IEEE International Conference on Network, Sensors and Control, April 2011, Delft, Niederlande*, 2011
- [Currie u. a. 2013] CURRIE, Graham ; JONES, Adam ; WOOLLEY, Janet: The Travel Demand Management Program for the London 2012 Olympic Games – Impacts and Lessons. In: *Tagungsband des 13th World Congress in Transportation Research, Rio de Janeiro, Brasilien*, 2013
- [DB Netz 405] DB NETZ, AG: *Richtlinie 405 – Fahrwegkapazität*. Richtlinie, 405
- [DB Netz 408] DB NETZ, AG: *Richtlinie 408 – Züge fahren und Rangieren*. Richtlinie, 408
- [DB Netz 420] DB NETZ, AG: *Richtlinie 420 – Betriebszentralen DB Netz AG, Modul 420.9001 – Kodierliste von Verspätungsursachen*. Richtlinie, 420
- [DB Netz SNB] DB NETZ, AG: *Schienenetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG 2014 (SNB 2014)*. http://www.db-netz.de/file/2951758/data/snb_2014.pdf. Version: SNB
- [DB Regio 498] DB REGIO, AG: *Richtlinie 498 – Zugpersonal planen und disponieren*. 498
- [DB Regio 615] DB REGIO, AG: *Richtlinie 615 – Transportleitung Personenverkehr*. 615
- [Delorme u. a. 2009] DELORME, Xavier ; GANDIBLEUX, Xavier ; RODRIGUEZ, Joaquin: Stability Evaluation of a Railway Timetable at Station Level. In: *European Journal of Operational Research* 195 (2009), S. 780–790

- [Dewilde u. a. 2013] DEWILDE, Thijs ; SELS, Peter ; CATTRYSSE, Dirk ; VANSTEENWEGEN, Pieter: Robust Railway Station Planning: an Interaction Between Routing, Timetabling and Platforming. In: *Tagungsband des 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen)*, Kopenhagen, Dänemark, 2013
- [DIN 2002] DIN, Normenausschuss G.: *Transport – Logistik und Dienstleistungen. Öffentlicher Personenverkehr; Definition, Festlegung von Leistungszielen und Messung der Servicequalität. Deutsche Fassung EN 13816:2002*. 2002
- [Dobritz u. Weidmann 2012] DOBRITZ, Robert ; WEIDMANN, Ulrich: Auswirkungen schwerer Störungen auf Bahnnetze. In: *ZEVrail 136* (2012), Nr. 6+7, S. 212–225
- [Dündar u. Sahin 2013] DÜNDAR, Selim ; SAHIN, Ismail: Train Re-scheduling with Genetic Algorithms and Artificial Neural Networks for Single-track Railways. In: *Transportation Research Part C 27* (2013), S. 1–15
- [EU 2001] EU, Europäische G.: *Richtlinie 2001/12/EG des EUROPäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2001 zur Änderung der Richtlinie 91/440/EWG des Rates zur Entwicklung der Eisenbahnunternehmen der Gemeinschaft*. Februar 2001
- [Fachgebiet Bahnsysteme 2012a] FACHGEBIET BAHNSYSTEME, und B.: *Skript Verkehr 1 (A) – Teil Bahnsysteme und Bahntechnik*. 2012. – Vorlesungsunterlagen zur Lehrveranstaltung Verkehr 1 (A)
- [Fachgebiet Bahnsysteme 2012b] FACHGEBIET BAHNSYSTEME, und B.: *Skript Verkehr 2 (A) – Teil Bahnsysteme und Bahntechnik*. 2012. – Vorlesungsunterlagen zur Lehrveranstaltung Verkehr 2 (A)
- [Fechner u. Rothe 2012] FECHNER, Carola ; ROTHE, Irene: Betrachtung der Fahrwegkapazität und Prüfung der Fahrplanrobustheit in der Praxis. In: *ETR Eisenbahntechnische Rundschau 61* (2012), Nr. 10, S. 20–28
- [FGSV 2003] FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen FGSV: *Hinweise zur Strategieentwicklung im dynamischen Verkehrsmanagement*. 2003
- [FGSV 2009] FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen FGSV: *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*. 2009. – Ausgabe 2001 in der Fassung von 2009
- [FGSV 2010a] FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen FGSV: *Beispielsammlung zu den Richtlinien für Lichtsignalanlagen*. 2010
- [FGSV 2010b] FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen FGSV: *Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr*. 2010
- [FGSV 2012] FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen FGSV: *Begriffsbestimmungen – Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb*. 2012
- [Fischer 2009] FISCHER, M.: *Alarm- und Ereignis Assistent*. Vortrag. http://www.zuehlke.com/fileadmin/pdf/events/vortraege/2a_Fischer_ALEA.pdf. Version: 08 2009. – Vortrag zur softwareseitigen Unterstützung beim Einsatz von Störfallprogrammen durch ALEA
- [Göwert 2008] GÖWERT, Thomas: Internationales Störungsmanagement. In: *Deine Bahn 36* (2008), Nr. 6, S. 31 – 35
- [Hansen u. Pachl 2008] HANSEN, Ingo A. (Hrsg.) ; PACHL, Jörn (Hrsg.): *Railway Timetable & Traffic. Analysis – Modelling – Simulation*. Eurail press, 2008

- [Hauenstein u. a. 2004] HAUENSTEIN, Andreas ; KIRCHHOFF, Peter ; WEHNER, Peter: Rechnergestütztes Störfallmanagement in Schnellbahnsystemen. In: *ETR Eisenbahntechnische Rundschau* 55 (2004), Nr. 10, S. 679–685
- [Heister u. a. 2009] HEISTER, Gert ; KUHNKE, Jörg ; LINDSTEDT, Carsten ; POMP, Roswitha ; SCHAER, Thorsten ; SCHILL, Thomas ; SCHMIDT, Stephan ; WAGNER, Norbert ; WEBER, Wolfgang: *Eisenbahnbetriebstechnologie*. Eisenbahn-Fachverlag, 2009 (DB-Fachbuch)
- [Hessen 2013] HESSEN, Mobil: *Verkehrsmanagement Region Frankfurt RheinMain – Leitfaden zur Anwendung*. online, 08 2013
- [Iffländer 2009] IFFLÄNDER, Helmut: *Arbeitsmaterial des UA itcs, Projektarbeitsteam Störungsmanagement, VDEV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmer*. Internet, 2009
- [Jacobs 2008] JACOBS, Jürgen: Rescheduling. In: HANSEN, Ingo A. (Hrsg.) ; PACHL, Jörn (Hrsg.): *Railway Timetable & Traffic. Analysis – Modelling – Simulation*. Eurailpress, 2008, Kapitel Rescheduling, S. 182 –191
- [Jespersen-Groth 2008] JESPERSEN-GROTH, Julie: *Decision Support for the Rolling Stock Dispatcher*, Technical University of Denmark, Diss., 2008
- [Jespersen-Groth u. Clausen 2006] JESPERSEN-GROTH, Julie ; CLAUSEN, Jens: Optimal Reinsertion of Cancelled Train Lines / Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, DTU. Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, DTU, 2006. – Forschungsbericht
- [Jespersen-Groth u. a. 2009] JESPERSEN-GROTH, Julie ; POTTHOFF, Daniel ; CLAUSEN, Jens ; HUISMAN, Dennis ; KROON, Leo ; MARÓTI, Gábor ; NIELSEN, Morten N.: Disruption Management in Passenger Railway Transportation. In: AHUJA, Ravindra (Hrsg.) ; MÖHRING, Rolf (Hrsg.) ; ZAROLIAGIS, Christos (Hrsg.): *Robust and Online Large-Scale Optimization* Bd. 5868. Springer Berlin / Heidelberg, 2009, S. 399–421
- [Keck 2012] KECK, Anna-Katharina: *Einschwingstrategien für Störfälle in S-Bahn-Systemen mit geringem Takt auf stark befahrenen Mischverkehrsstrecken*. November 2012. – Master Thesis TU Darmstadt
- [Keller u. Busch 2004] KELLER, Hartmut ; BUSCH, Fritz: Verkehrsmanagement Straßenverkehr für München und sein Umland - Rahmenkonzept im Auftrag der BMW AG, München / Technische Universität München. 2004. – Forschungsbericht
- [Kellermann u. a. 2005] KELLERMANN, Astrid ; KÖLLE, Matthias ; BRUMMER, Albert ; MUTZBAUER, Johannes: Störfallmanagement Petueltunnel München – Ein integrativer Ansatz für die optimierte Verkehrslenkung im Hauptstraßennetz. In: *Strassenverkehrstechnik* 49 (2005), Nr. 9, S. 458–463
- [Kliwer u. Suhl 2011] KLIEWER, Natalia ; SUHL, Leena: A Note on the Online Nature of the Railway Delay Management Problem. In: *Networks* 57 (2011), S. 28–37
- [Kohl u. a. 2007] KOHL, Niklas ; LARSEN, Allan ; LARSEN, Jesper ; ROSS, Alex ; TIOURINE, Sergey: Airline Disruption Management – Perspectives, Experiences and Outlook. In: *Journal of Air Transport Management* 13 (2007), Nr. 3, S. 149 – 162
- [Kösters u. a. 2007] KÖSTERS, Daniel ; LIMMER, Beate ; REICHMUTH, Johannes ; WENDLER, Ekkard: Kapazitätsmanagement im Schienen- und Luftverkehr. In: *Internationales Verkehrswesen* 59 (2007), Nr. 3, S. 70–76

-
- [Kroon u. Huisman 2009] KROON, Leo ; HUISMAN, Dennis: Algorithmic Support for Railway Disruption Management / Econometric Institute, Erasmus School of Economics, Erasmus University, The Netherlands. 2009 (EI2009-50). – Forschungsbericht
- [Kunimatsu u. a. 2013] KUNIMATSU, Taketoshi ; SAKAGUCHI, Takashi ; ISHIHARA, Yusuke: Evaluation of Facility Improvements from the Viewpoints of Service Level Robustness for Passengers. In: *Tagungsband des 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen), Kopenhagen, Dänemark, 2013*
- [Kuster u. a. 2009] KUSTER, Jürgen ; JANNACH, Dietmar ; FRIEDRICH, Gerhard: Extending the RCPSM for Modeling and Solving Disruption Management Problems. In: *Applied Intelligence* 31 (2009), Nr. 3, S. 234–253
- [Lindner 2011a] LINDNER, Tobias: Applicability of the Analytical Compression Method for Evaluating Node Capacity. In: *Tagungsband des 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailRome2011), Rom, Italien, 2011*
- [Maister 1985] MAISTER, David: The Psychology of Waiting Lines. In: CZEPIEL, John A. (Hrsg.) ; SOLOMON, Michael R. (Hrsg.) ; SURPRENANT, Carol F. (Hrsg.): *The Service Encounter – Managing Employee/Customer Interaction in Service Businesses*. D.C. Heath and Company, Lexington Books, 1985
- [Martin u. Schmidt 2010] MARTIN, Ullrich ; SCHMIDT, Christine: Erhöhung der Effektivität und Transparenz bei Leistungsuntersuchungen mit Simulationsverfahren. In: *ETR Eisenbahntechnische Rundschau* 59 (2010), Nr. 7+8, S. 463–468
- [Meier u. Okun 2010] MEIER, Werner ; OKUN, Bernd: Verkehrsmanagement als Netzwerk – Erfahrungen am Beispiel Mosaique. In: *Der Nahverkehr* 28 (2010), Nr. 7–8, S. 35 – 39
- [Monecke 2010] MONECKE, Lars: *Verfahren zur Behebung der betrieblichen Auswirkungen von Störfällen bei Stadtbahnen*, Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb, Technische Universität Carlo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., 2010
- [Moosbrugger 2008] MOOSBRUGGER, Roland: Disposition und Störfallmanagement bei der DB Netz AG. In: *Tagungsband zum Eisenbahntechnischen Kolloquium „Disposition und Störfallmanagement“, Darmstadt, Deutschland, 2008*
- [Nakamura u. a. 2011] NAKAMURA, Tatsuya ; HIRAI, Chikara ; NISHIOKA, Yasuki: A Practical Train Rescheduling Algorithm Using Three Predetermined Factors. In: *Tagungsband des 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailRome2011), Rom, Italien, 2011*
- [Oetting u. a. 2013] OETTING, Andreas ; RITTNER, Michael ; FEY, Sebastian: Synchronal Algorithms for Determination and Evaluation of Conflict Resolution Scenarios for Real-time Rescheduling. In: *Tagungsband des 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen), Kopenhagen, Dänemark, 2013*
- [Pachl 2011] PACHL, Jörn: *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. Bd. 6., überarb. Aufl. Vieweg & Teubner, 2011
- [Pänke u. Klimmt 2012] PÄNKE, Ingo ; KLIMMT, Andreas: Leitsysteme in Betriebszentralen – Vernetzung von Technologie und Anwenderwissen. In: *Deine Bahn* 40 (2012), March, Nr. 3, S. 44–47

- [Pender u. a. 2013] PENDER, Brendan ; CURRIE, Graham ; DELBOSC, Alexa ; SHIWAKOTI, Nirajan: Bus Bridging – Roles in Managing Unplanned Passenger Rail Service Disruptions. In: *Tagungsband des 13th World Congress in Transportation Research, Rio de Janeiro, Brasilien, 2013*
- [Pfister 2011] PFISTER, Ulrich: Fahrgast 2.0 – Sein Bedürfnis nach Information. In: *Der Nahverkehr* 29 (2011), S. S.6
- [Potthoff 1962] POTTHOFF, Gerhart ; BÖTTCHER, Harald (Hrsg.): *Verkehrsströmungslehre Band 1*. Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 1962
- [Radtke 2008] RADTKE, Alfons: Infrastructure Modelling. In: HANSEN, Ingo A. (Hrsg.) ; PACHL, Jörn (Hrsg.): *Railway Timetable & Traffic. Analysis – Modelling – Simulation*. Eurailpress, 2008, S. 43–57
- [Rao u. a. 2013] RAO, Xiaolu ; MONTIGEL, Markus ; WEIDMANN, Ulrich: Methods to Improve Railway Capacity by Integration of Automatic Train Operation with Centralized Traffic Management. In: *Tagungsband des 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen), Kopenhagen, Dänemark, 2013*
- [Rey u. a. 2007] REY, Georges ; ELK, Thomas ; NEUHÄUSER, René: Störfallmanagement der S-Bahn München und Vorschläge für den Infrastrukturausbau. In: *ETR Eisenbahntechnische Rundschau* 56 (2007), Nr. 11, S. 696–703
- [Sahin 1999] SAHIN, Ismail: Railway Traffic Control and Train Scheduling Based on Inter-train Conflict Management. In: *Transportation Research Part B* 33 (1999), S. 511–534
- [SBB 2012] SBB, Schweizerische B.: *RCS ALEA+ Fact Sheet. The Alarm and Event Assistant*. Internet. https://www.sbb.ch/content/dam/sbb/en/pdf/en_sbb-konzern/en_sbb-als-geschaeftpartner/en_angebote-fuer-evus/en_onestopshop/FS_RCS_ALEA_En.pdf. Version: 2012
- [Schaer u. a. 2005] SCHAER, Thorsten ; JACOBS, Jürgen ; SCHOLL, Susanne ; KURBY, Stephan: DisKon : Laborversion eines flexiblen, modularen und automatischen Dispositionsassistenzsystems. In: *ETR Eisenbahntechnische Rundschau* 56 (2005), Nr. 12, S. 809–821
- [Schranil u. Weidmann 2012a] SCHRANIL, Steffen ; WEIDMANN, Ulrich: Betrieblicher Umgang mit Störeignissen in der Bahnproduktion. In: *Der Eisenbahningenieur* 63 (2012), Nr. 7, S. 44–48
- [Schranil u. Weidmann 2012b] SCHRANIL, Steffen ; WEIDMANN, Ulrich: Monitoring des Störgeschehens in Bahnsystemen. In: *Verkehr und Technik* 65 (2012), Nr. 3, S. 83–87
- [Schwanhäußer 1974] SCHWANHÄUSSER, Wulf: *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn.*, Verkehrswissenschaftliches Institut der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen, Diss., 1974
- [Siefer 2008] SIEFER, Thomas: Simulation. In: HANSEN, Ingo A. (Hrsg.) ; PACHL, Jörn (Hrsg.): *Railway Timetable & Traffic. Analysis – Modelling – Simulation*. Eurailpress, 2008, S. 155–169
- [Steger 2008] STEGER, Regina: Notfallprogramme für Stammstreckensperrungen. In: *Tagungsband zum Eisenbahntechnischen Kolloquium „Disposition und Störfallmanagement“ Darmstadt, Deutschland, 2008*
- [Tamura u. a. 2013] TAMURA, Kei ; TOMII, Norio ; SATO, Keisuke: An Optimal Rescheduling Algorithm from Passengers Viewpoint Based on Mixed Integer Programming Formulation. In: *Tagungsband des 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen), Kopenhagen, Dänemark, 2013*

- [Täubler 2010] TÄUBLER, Hans: Weiterentwicklung des Notfallmanagements am Beispiel der Ö-Infrastruktur AG. In: *SIGNAL + DRAHT* 102 (2010), Nr. 5, S. 16–19
- [Teichmann 2010a] TEICHMANN, Christian: Abschlussbericht zum Forschungsprojekt RePlan – Die stochastische Modellierung von Ur- und Einbruchsverspätungen. / Technische Universität Darmstadt. Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. 2010. – Forschungsbericht. – Unveröffentlicht
- [Tormo u. a. 2013] TORMO, Julia ; PANOU, Konstantinos ; TZIEROPOULOS, Panos: Evaluation and Comparative Analysis of Railway Perturbation Management Methods. In: *Tagungsband des 13th World Congress in Transportation Research, Rio de Janeiro, Brasilien*, 2013
- [Törnquist 2006] TÖRNQUIST, Johanna: *Railway Traffic Disturbance Management*, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Schweden, Diss., 2006
- [Törnquist-Krasemann 2012] TÖRNQUIST-KRASEMANN, Johanna: Design of an Effective Algorithm for Fast Response to the Re-scheduling of Railway Traffic During Disturbances. In: *Transportation Research Part C* 20 (2012), S. 62–78
- [UIC 2004] UIC: *UIC Code 406 – Capacity*. 6 2004
- [Vakhtel 2002] VAKHTEL, Sergey: *Rechnerunterstützte analytische Ermittlung der Kapazität von Eisenbahnnetzen*, Rheinisch- Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diss., 2002
- [Vogt 2007] VOGT, Konrad: Das Notfallmanagement der Deutschen Bahn. In: *Notfallvorsorge* 36 (2007), Nr. 4, S. 16 –17
- [Weigand 2012] WEIGAND, Werner: Von der Angebotsplanung über den Langfristfahrplan zur Weiterentwicklung der Infrastruktur. In: *ETR Eisenbahntechnische Rundschau* 61 (2012), Nr. 7+8, S. 18–22
- [Wendler u. Nießen 2008] WENDLER, Ekkard ; NIESSEN, Nils: Stochastische Modelle in der Eisenbahnbetriebswissenschaft. In: *ZEVrail Glasers Annalen* 132 (2008), S. 40–48
- [Wolters u. Böhme 2009] WOLTERS, Achim ; BÖHME, Aline: Aus- und Weiterbildung für Disponenten der Transportleitungen und Leitstellen. In: *Deine Bahn* 37 (2009), Nr. 8, S. 22–25
- [Wolters u. a. 2011] WOLTERS, Achim ; BÖHME, Aline ; BRÜNING, Lars ; GAHR, Rüdiger ; HARTWIG, Dennis ; KILDAU, Hermann ; POHL, Rainer ; BOLTZE, Manfred ; FORNAUF, Leif ; OETTING, Andreas ; CHU, Friederike: *Leitfaden zur Erstellung von Störfallprogrammen*. 2011. – Beschreibung der im Projekt SturM erarbeiteten Methodik zur Erstellung von Störfallprogrammen. Unveröffentlicht.
- [Zeng u. a. 2011] ZENG, A ; DURACH, C ; FANG, Y: Collaboration Decisions on Disruption Recovery Service in Urban Public Tram Systems. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 48 (2011), Nr. 3, S. 578–590

Alle Internetquellen wurden zuletzt am 28.12.2013 geprüft.



Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht über mögliche Störungen für kritische Infrastrukturen und den Bahnverkehr (Dobritz u. Weidmann, 2012)	1
1.2	Wirkung von Störungen im Schienenverkehr am Beispiel der entstehenden betriebswirtschaftlichen Folgekosten	3
2.1	Einteilung von Störungen nach Problem- und Auswirkungsbereich (Wolters u. a., 2011)	6
2.2	Phasen des Störungszyklus (Chu u. Fornauf, 2011)	7
2.3	Phasen der Anwendung von Störfallprogrammen (Chu u. a., 2013)	11
2.4	Meldekette im Störfall (Schranil u. Weidmann, 2012a)	21
2.5	Einordnung der verschiedenen Leistungsfähigkeitsbegriffe – eigene Darstellung in Anlehnung an die Inhalte von DB Netz (405), Modul 0102 und 0104A02	24
2.6	Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit und Qualität – eigene Darstellung nach Inhalten von DB Netz (405), Modul 0102 und 0104	26
2.7	Allgemeiner Ablauf zur Berechnung von Leistungskenngrößen – eigene Darstellung nach (DB Netz, 405), (Heister u. a., 2009) und (Hansen u. Pacht, 2008)	27
3.1	Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften des Bahnbetriebs in Störungen und dem Einschwingverhalten von Störfallprogrammen	32
3.2	Inhaltliche Abgrenzung des Forschungsgebietes	34
3.3	Aufbau der Arbeit	36
4.1	Auswirkungen von Störungseigenschaften und Eigenschaften des Dispositionsprozesses auf die Auslastung der Disponenten im Störfall	40
4.2	Schematische Darstellung von Netzstruktur und Linienverlauf der analysierten S-Bahn Netze	51
4.3	Vorgehen bei der Analyse auf Verspätungsursachen und -orte	55
4.4	Anteil Verspätungsgründe je S-Bahn Netz	56
4.5	Anteil Verspätungsgründe über alle Netze aggregiert	56
4.6	Orte, an denen Zusatzverspätungen von > 2 Minuten auftraten; nach Funktion im Störfallprogramm bzw. nach Lage im Netz (über alle drei S-Bahn Netze kumuliert)	58
4.7	Anteil der Fahrten, welche nach Ausrufung des Störfallprogramms plan, pünktlich bzw. verspätet beginnen	59
4.8	Bahnhöfe, an denen Zugfahrten nach Ausrufung des Störfallprogramms verspätet beginnen – kategorisiert nach Funktion	60
4.9	Durch die Betriebsdatenanalyse identifizierte Einflüsse auf die Einschwingphase	61
5.1	Ablauf der Dispositionsphasen Ermittlung, Entscheidung und Umsetzung anhand von Beispielen für die zeitliche Abfolge betrieblicher und dispositiver Handlungen nach dem Eintritt einer Störung (Tf= Triebfahrzeugführer)	66
5.2	Schematische Darstellung der Blockbelegungszeiten eines Streckenabschnitts mit Durchfahrten (oben) und Wenden (unten, in den Blockabschnitten 4 und 41) im regulären Betrieb	69

5.3	Schematische Darstellung der Blockbelegungszeiten eines Streckenabschnitts während einer Störung mit Nothalt – Stillstand von Zug Zwei und SFP-Wenden in den Blockabschnitten 4 und 41	70
5.4	Vorgehen der Quantifizierung der zusätzlichen Belegungszeitelemente	71
5.5	Wahrscheinlichkeit der Gesamtdauer zum Erteilen von n Befehlen hintereinander	76
6.1	Vorgehen zur Erarbeitung eines Wertes für die durchschnittliche Wendedauer bei Störungen	87
6.2	Unterteilung der vorhandenen Datensätze zur Überprüfung der Vermutungen	93
6.3	Verteilung der Abweichungen $t_{Wende,X}$ von der geplanten technischen Mindestwendezeit für die Städte 1 und 3 – Wenden mit einem Triebfahrzeugführer	96
6.4	Verteilung der Abweichungen $t_{Wende,X}$ von der geplanten technischen Mindestwendezeit für die Städte 1 und 3 – Wenden mit zwei Triebfahrzeugführern	96
6.5	Bahnhöfe an denen Abweichungen von der technischen Mindestwendezeit auftreten – geordnet nach Typ, für Wenden mit einem Triebfahrzeugführer (Städte 1 und 3)	98
6.6	Bahnhöfe an denen Abweichungen von der technischen Mindestwendezeit auftreten – geordnet nach Typ, für Wenden mit zwei Triebfahrzeugführern (Städte 1 und 3)	98
6.7	Überblick über die Analyseergebnisse	99
6.8	Anteile der Gründe für verspäteten Fahrtbeginn in regulären Wendebahnhöfen	99
6.9	Anteile der Gründe für verspäteten Fahrtbeginn in SFP-Wendebahnhöfen	100
6.10	Anteile der Gründe für verspäteten Fahrtbeginn in nicht als Wendebahnhöfen vorgesehenen Bahnhöfen	100
7.1	Einflüsse auf die Dauer zur Nutzung von Umleitungen (eigene Überlegungen nach DB Netz (405) und Keck (2012))	110
7.2	Vorgehen zur Prüfung der Machbarkeit von Umleitungen (nach Keck (2012))	114
8.1	Schematische Darstellung der Zugzahlreduktion während der Einschwingphase	118
8.2	Einteilung des Betrachtungszeitraums in Vielfache einer Viertelstunde	120
8.3	Linienverlauf im Regelbetrieb und im Störfallprogramm des Anwendungsbeispiels	122
9.1	Topologie des SFP-Wendebahnhofs C	135
9.2	Für die Berechnung betrachtete Infrastruktur des SFP-Wendebahnhofs C	135
10.1	Prozess zum Entwurf funktionsfähiger Störfallprogramme	143
10.2	Prinzip des Störfalltrichters zur Festlegung von Wenderegeln	144
10.3	Weitere SFP-Wendebahnhöfe im Umkreis des SFP-Wendebahnhofs C	149
11.1	Abfolge der notwendigen Prozesse bis zum Ende der Einschwingphase	154
11.2	Verfahren zur Bestimmung der Dauer zum Abstellen eines Zuges	156
11.3	Fälle von Zügen, die sich nicht auf den vorgesehenen SFP-Wegen befinden – für die Dispositionsmaßnahmen „vorzeitige Wende“ (links) und „Umleitung“ (rechts)	157
11.4	Verfahren zur Bestimmung der Dauer, bis Züge auf dem vorgesehenen Weg verkehren – am Beispiel der Dispositionsmaßnahme „vorzeitige Wende“	159
11.5	Zeit-Wege-Linien für einen Pendelverkehr im regulären Betrieb, im stabilen Störfallprogramm und während der Einschwingphase	162

Tabellenverzeichnis

2.1	Unterscheidung der Ziele und Aufgaben von Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) – eigene Darstellung nach (Heister u. a., 2009), S. 146-172, (DB Netz, 420), Modul 0100 und (DB Regio, 615), Modul 0101	20
2.2	Grenzwerte für den zulässigen Belegungsgrad auf Strecken (UIC, 2004)	26
2.3	Auswahl der geeigneten Methode hinsichtlich der Anwendbarkeitsgrenzen (DB Netz (405), Modul 0202)	30
4.1	Dispositionsmaßnahmen im SFP-Fall (siehe auch Abschnitt 2.4.3) sowie mögliche Auswirkungen auf die Belegungszeiten der Infrastruktur	43
4.2	Zusammenstellung der Einflüsse auf die Dauer bis zum Ende der Einschwingphase sowie Beurteilung der Steuerbarkeit dieser Einflüsse	45
4.3	Übersicht über den Aufbau des Datensatzes „Zuglaufmeldungen“ nach Teichmann (2010a)	48
4.4	Erläuterungen Fortschaltstatus nach Teichmann (2010a)	49
4.5	Übersicht der analysierten Störfälle sowie der Größenordnung der zur Verfügung stehenden Datensätze (HVZ=Hauptverkehrszeit, NVZ=Nebenverkehrszeit, ZLM=Zuglaufmeldung)	52
5.1	Überblick der zusätzlichen Belegungszeiten im Störfall (Verallgemeinerung von Abbildung 5.1)	67
5.2	Überblick über die Erwartungswerte der zusätzlichen Blockbelegungszeiten im Störfall (n = Anzahl der Züge)	79
5.3	Überblick über die bei der Faltung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen variierten Parameter	81
5.4	Übersicht über Erwartungswerte und Standardabweichungen der Dauer der Gesamtvorgänge – alle Werte in Minuten	82
6.1	Übersicht der in Bezug auf Wendezeiten analysierten Störfälle sowie der Größenordnung der zur Verfügung stehenden Datensätze (HVZ=Hauptverkehrszeit, NVZ=Nebenverkehrszeit, ZLM=Zuglaufmeldung)	89
6.2	Ergebnisse der Wendezeitenanalyse im Störfall nach Wendeart	97
6.3	Mögliche Ursachen für eine verlängerte Wendezeit im Störfall	102
6.4	Aus Kriterien abgeleitete Störzuschläge je Wendeart	103
6.5	Abdeckung der möglichen Fälle bei vorgegebenen Störzuschlägen je Wendeart	104
7.1	Überblick zur Berechnung der einzelnen Elemente der Fahrtdauer bei Umleitungs- nutzung	112
8.1	Übersicht über die Regeln zur Bestimmung der Zugzahlen in den einzelnen Szenarien	121
8.2	Beispiel zur Bestimmung der Zugzahlen in den verschiedenen Szenarien entsprechend der 15-Minuten-Heuristik für den Bahnhof C bei gattungsreinem Verkehr	124
9.1	Beschreibung der Fahrttypen sowie Zuordnung von Fahrttypen zu Szenarien	136

10.1	Grenzwerte für den zulässigen Belegungsgrad von Strecken (UIC, 2004)	147
C.1	Verspätungsfälle und beobachtete Verspätungsgründe aus der Betriebsdatenanalyse	193
C.2	Orte, an denen Verspätungszuwächse von > 2 Minuten auftraten – nach Lage im Netz	193
D.1	Darstellung der einzelnen Elemente des Nothaltevorgangs und ihrer berechneten Dauer	195
D.2	Ermittlung der Bremszeitzuschläge für einzelne Zugarten	197
D.3	Befehlsinhalte	198
E.1	Wertetabellen für die Wahrscheinlichkeit der Dauer der einzelnen Vorgänge	199
E.2	Wertetabellen für die Dauer und Wahrscheinlichkeit der Ereigniskombinationen .	200
E.3	Wertetabelle für die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Gesamtdauern	200
E.4	Wertetabellen für die Wahrscheinlichkeit der Dauer der einzelnen Vorgänge	201
E.5	Wertetabellen für die Dauer und Wahrscheinlichkeit der Ereigniskombinationen .	201
E.6	Wertetabelle für die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Gesamtdauern	201
E.7	Werte für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Einzeltvorgänge (Dauer in Minuten)	202
E.8	Werte für die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Dauer der Gesamtvor- gänge – 2 Vorgänge: $t_{Entsch} + t_{Ueberm}$; 3 Vorgänge: $t_{Entsch} + t_{Ueberm} + t_{Befehl}$	204
F.1	Mittelwerte der Abweichungen von der technischen Mindestwendezeit $t_{Stoerung,X}$ für die Städte 1 und 3, nach BST-Typ, Wende mit einem Triebfahrzeugführer	209
F.2	Mittelwerte der Abweichungen von der technischen Mindestwendezeit $t_{Stoerung,X}$ für die Städte 1 und 3, nach BST-Typ, Wende mit zwei Triebfahrzeugführern	210
F.3	Übersicht über Einzelhäufigkeiten und kumulierte Häufigkeit der Wenden pro aufgetretener Wendedauer	212
F.4	Anzahl der Verspätungsarten pro Bahnhofstyp für die Städte 1 und 3 (Typ 1 = regulärer Wendebahnhof, Typ 2 = SFP-Wendebahnhof, Typ 3 = für SFP-Wenden nicht vorgesehener Bahnhof)	213
F.5	Anzahl der Verspätungsarten pro Bahnhofstyp für die Stadt 1 (Typ 1 = regulärer Wendebahnhof, Typ 2 = SFP-Wendebahnhof, Typ 3 = für SFP-Wenden nicht vorgesehener Bahnhof)	213
F.6	Anzahl der Verspätungsarten pro Bahnhofstyp für die Stadt 3 (Typ 1 = regulärer Wendebahnhof, Typ 2 = SFP-Wendebahnhof, Typ 3 = für SFP-Wenden nicht vorgesehener Bahnhof)	213

Abkürzungsverzeichnis

dgH	durchgehendes Hauptgleis
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
Fzg	Fahrzeug
HVZ	Hauptverkehrszeit
KiN	Kundenbetreuer im Nahverkehr
LeiDis	Leitsystem Netzdisposition
NVZ	Nebenverkehrszeit
RIS	Reisendeninformationssystem
Ril	Richtlinie
SFP	Störfallprogramm
Tf	Triebfahrzeugführer
UIC	Union Internationale des Chemins de fer
ZLM	Zuglaufmeldung
ZuB	Zugbegleiter



Anhang



A Fragenkatalog für die Experteninterviews

A.1 Abfrage Netzcharakteristiken

- Länge des Streckennetzes
- Anzahl der Verkehrsstationen
- Anzahl der Fahrgäste pro Tag
- Anzahl der gefahrenen Zugkilometer pro Jahr
- Anzahl zur Verfügung stehenden Fahrzeuge
- Anzahl der Zugfahrten im Netz pro Tag
- Anzahl der Trassen pro Stunde in der Stammstrecke pro Richtung
- Anzahl diensthabenden Disponenten pro Schicht

A.2 Abfrage des aktuellen Stands der Störfallprogrammanwendung

1. Seit wann werden bei Ihnen Störfallprogramme angewandt?
2. Für welche Störfälle wurden Störfallprogramme erarbeitet?
3. Wie oft werden Störfallprogramme im Durchschnitt angewendet (pro Monat, pro Jahr)?
4. War die Einführung von Störfallprogrammen ein Gewinn?
5. Wie werden Störfallprogramme bei Ihnen dokumentiert?
6. Gibt es Regeln zur Anwendung der Störfallprogramme? Welche?
7. Wie sind Melde- und Kommandokette in der Störung und bei der SFP-Ausrufung gestaltet?
8. Gibt es dedizierte Abstellorte im SFP-Fall?
9. Wie wird das an Störfallprogrammen beteiligte Personal geschult?
10. Sollte die Anwendung von Störfallprogrammen häufiger als bisher geschult werden?

A.3 Inhaltliche Fragen

11. Anhand welcher Kriterien treffen Sie die Einschätzung, dass der Betrieb gut/schlecht läuft?
12. Was ist wichtig, damit der Betrieb während eines Störfallprogramms gut läuft?
13. Was läuft bei Ihnen bei der Anwendung von Störfallprogrammen gut?
14. Was läuft bei Ihnen bei der Anwendung von Störfallprogrammen schlecht bzw. was könnte (noch) besser laufen?
15. Was würde helfen, damit es (noch) besser läuft?
16. Unter welchen Bedingungen klappt Einschwingen bei Ihnen gut?
17. Unter welchen Bedingungen klappt Ausschwingen bei Ihnen gut?
18. Kommt es vor, dass nach einer Streckensperrung der Betrieb für ca. 10 Min flüssig läuft und sich dann „Knoten“ bilden, die noch weitere drei Stunden „aufgeräumt“ werden müssen?
19. Befassen Sie sich derzeit gezielt mit Verbesserungen, wie man vom gestörten in den SFP-Zustand kommt, bzw. vom SFP-Zustand in den Regelzustand? Haben Sie für die Zukunft etwas in Planung?
20. Wie lange schätzen Sie die Dauer zwischen der SFP-Ausrufung und dem tatsächlichem Reagieren bzw. dem Ende der Umsetzung des ausgerufenen Störfallprogramms?
 - Zeit zwischen dem Treffen der Entscheidung und bis die Informationen an alle kommuniziert sind.
 - Zeit zur Nachrichtenübermittlung (technisch).
 - Zeit zwischen dem Punkt, an dem die Informationen bei allen Beteiligten angekommen ist und die ersten Anweisungen vollständig umgesetzt sind.
21. Was kann zwischen der SFP-Ausrufung und der tatsächlichen dispositiven Umsetzung passieren?
22. Was sollte man Ihrer Meinung nach mit Zügen machen, die sich nach der SFP-Ausrufung hinter den SFP-Wendebahnhöfen befinden und sich auf die Störung zubewegen? Was sind die Regeln?
23. *„Störfallprogramme sind stabiler, je länger sie laufen.“*
 - Stimmen Sie zu?
 - Würden Sie daraufhin den Ansatz befürworten, ein Störfallprogramm auch über einen Störungsgrund hinaus zu betreiben, damit aus einem stabilen Zustand ausgeschwungen werden kann? D. h., sollte bei Wegfall des Störungsgrunds während der Einschwingphase das Störfallprogramm bis zur stabilen Phase weiter betrieben (=künstlich verlängert) und dann erst ausgeschwungen werden?
24. *„Je weniger Züge im Netz sind, desto besser ist die Situation beherrschbar“*
 - Stimmen Sie zu?
 - Würden Sie daraufhin den Ansatz befürworten, die Ausschwingphase in Stufen durchzuführen?
25. Was wollen Sie mir noch auf den Weg geben?

B Dokumentation der SQL-Abfragen zu den Analysen in Kapitel 4 und 6

Im Nachfolgenden werden die Abfragen anonymisiert und beispielhaft wiedergegeben. Dementsprechend ist in den Originalabfragen anstelle der Platzhalter eine Uhrzeit oder ein Datum zu finden ('1999-01-01' anstelle SFPDatum und '19:19' anstelle Ausrufungsuhrzeit). In den Abfragen werden folgende Parameter variiert:

- SFPDatum – Tag, an dem das Störfallprogramm ausgerufen wurde
- Ausrufungsuhrzeit – Uhrzeit, zu der das Störfallprogramm ausgerufen wurde
- Aufhebungsuhrzeit – Uhrzeit, zu der das Störfallprogramm aufgehoben wurde
- Tabellename – Tabelle mit den entsprechenden Zuglaufmeldungen

B.1 Identifikation der Züge, deren Fahrt verspätet beginnt

```
SELECT *
FROM <Tabellename>
WHERE FSSTAT=2 AND ((BTG='SFPDatum1' AND
  ist>'Ausrufungsuhrzeit1' AND Verspätung>0)
OR (BTG='SFPDatum2' AND ist<'Ausrufungsuhrzeit2')
OR (BTG='SFPDatumX' AND ist>'AusrufungsuhrzeitX') )
ORDER BY Verspätung
```

B.2 Identifikation der Züge, deren Fahrt verspätet endet

```
SELECT *
FROM <Tabellename>
WHERE FSSTAT=1 AND ((BTG='SFPDatum1' AND
  ist>'Ausrufungsuhrzeit1' AND Verspätung>0)
OR (BTG='SFPDatum2' AND ist<'Ausrufungsuhrzeit2')
OR (BTG='SFPDatumX' AND ist>'AusrufungsuhrzeitX')
)
ORDER BY Verspätung
```

B.3 Identifikation der Züge, die sich bei SFP-Ausrufung im Netz befinden.

Auswahl der Züge, die am Störungstag um die Ausrufungszeit im System gemeldet wurden unter Angabe der Maximal- und der Endverspätung dieser Züge sowie Größe am Störungstag und Ort des maximalen Sprungs der Zusatzverspätung.

```
SELECT temp.*, ABS(TIMEDIFF('Ausrufungsuhrzeit', temp.ist))
AS diff, mitte.VerspMax, ende.VerspZiel, sprung.SprungMax, rechts.BST
FROM
  (SELECT *
   FROM 'Tabellename' AS a
   ORDER BY a.ist DESC
  ) AS temp

LEFT JOIN
(SELECT ZN,BTG ,Verspätung AS VerspZiel
FROM 'Tabellename' AS b
WHERE FSSTAT=1
ORDER BY ZN, BTG, soll
) AS ende
ON ende.ZN = temp.ZN AND temp.BTG = ende.BTG

LEFT JOIN
(SELECT ZN,BTG ,MAX(Verspätung) AS VerspMax
FROM 'Tabellename' AS c
GROUP BY BTG, ZN) AS mitte
ON mitte.ZN = temp.ZN AND temp.BTG = mitte.BTG

LEFT JOIN
(SELECT ZN,BTG,MAX(ZUSVSP) AS SprungMax
FROM 'Tabellename' AS b
GROUP BY BTG, ZN
) AS sprung #mittlere Tabelle
ON sprung.ZN = temp.ZN AND temp.BTG = sprung.BTG

LEFT JOIN
(SELECT ZN,BTG,BST, ZUSVSP
FROM 'Tabellename' AS c
) AS rechts #rechte Tabelle
ON sprung.ZN = rechts.ZN AND rechts.BTG = sprung.BTG
AND rechts.ZUSVSP = sprung.SprungMax
WHERE temp.ist BETWEEN 'Ausrufungsuhrzeit - 2 Stunden' AND
'Ausrufungsuhrzeit' AND temp.BTG
BETWEEN ('SFPDatum') AND ('SFPDatum')
GROUP BY temp.ZN
ORDER BY temp.ZN, diff;
```

B.4 Identifikation der Züge, deren Fahrt nach der SFP-Ausrufung beginnt

Auswahl der Züge, die die am Störungstag nach der SFP-Ausrufung losgefahren sind unter Angabe der Verspätungen bei Beginn und am Ende der Fahrt sowie Größe und Ort des maximalen Sprungs der Zusatzverspätung.

```
SELECT temp.*, mitte.VerspMax, ende.VerspZiel,
sprung.SprungMax, rechts.BST
FROM
    (SELECT *
    FROM 'Tabellenname' AS a
    ORDER BY a.ist DESC
    ) AS temp

LEFT JOIN
(SELECT ZN,BTG ,Verspätung AS VerspZiel
FROM 'Tabellenname' AS b
WHERE FSSTAT=1
ORDER BY ZN, BTG, soll
) AS ende
ON ende.ZN = temp.ZN AND temp.BTG = ende.BTG

LEFT JOIN
(SELECT ZN,BTG ,MAX(Verspätung) AS VerspMax
FROM 'Tabellenname' AS c
GROUP BY BTG, ZN) AS mitte
ON mitte.ZN = temp.ZN AND temp.BTG = mitte.BTG

LEFT JOIN
(SELECT ZN,BTG,MAX(ZUSVSP) AS SprungMax
FROM 'Tabellenname' AS b
GROUP BY BTG, ZN
) AS sprung #mittlere Tabelle
ON sprung.ZN = temp.ZN AND temp.BTG = sprung.BTG

LEFT JOIN
(SELECT ZN,BTG,BST, ZUSVSP
FROM 'Tabellenname' AS c
) AS rechts #rechte Tabelle
ON sprung.ZN = rechts.ZN AND rechts.BTG = sprung.BTG
AND rechts.ZUSVSP = sprung.SprungMax
WHERE temp.ist >'Ausrufungsuhrzeit'
AND temp.BTG BETWEEN ('SFPdatum') AND ('SFPdatum') AND FSSTAT=2
GROUP BY temp.ZN
ORDER BY temp.ist;
```

B.5 Abfrage zur Ermittlung aller Zusatzverspätungen über 120 Sekunden

Auswahl der Zuglaufmeldungen mit einer Ist-Verspätung über Minuten und einer Zusatzverspätung von über 120 Sekunden aus allen Zugfahrten, die nach der SFP-Ausrufung im Netz stattfinden.

```
SELECT *
FROM   'Tabellenname'
WHERE  ist >'Ausrufungsuhrzeit' AND
BTG BETWEEN ('SFPDatum') AND ('SFPDatum')
AND Versp >'5' AND ZUSVSP >'120';
```

B.6 Abfrage zur Ermittlung von Wendungen

Auswahl aller Zugfahrten, die nach SFP-Ausrufung an einem Bahnhof enden (FSSTAT=1) oder beginnen (FSSTAT=2), geordnet nach Tage (BTG), Betriebsstelle (BST), Ist-Gleis (IGLS) und Ist-Zeitpunkt der Messung.

```
SELECT *
FROM 'Tabellenname'
WHERE
(BTG='SFPDatum1' AND Ist >='Ausrufungsuhrzeit1'
AND Ist <='Aufhebungsuhrzeit1' )
OR
(BTG='SFPDatum2' AND Ist >='Ausrufungsuhrzeit2'
AND Ist <='Aufhebungsuhrzeit2' )
OR
(BTG='SFPDatumX' AND Ist >=AusrufungsuhrzeitX
AND Ist <='AufhebungsuhrzeitX')
AND
(FSSTAT='1' OR FSSTAT='2')
ORDER BY BST, BTG, IGLS, Ist;
```

C Werte der Betriebsdatenanalyse aus Kapitel 4

C.1 Verspätungsfälle und beobachtete Verspätungsgründe

Tabelle C.1: Verspätungsfälle und beobachtete Verspätungsgründe aus der Betriebsdatenanalyse

ID	Gründe	Netz 1	Netz 2	Netz 3	Gesamt
1	Betriebsablauf/schleichender Rückstau	3	16	56	75
2	Rückstau mit Sprungverspätung	17	11	57	85
3	Warten auf einen entgegenkommenden Zug	0	0	4	4
4	Zug in die gleiche Richtung vorgelassen	0	1	9	10
5	Verspätung aus vorheriger Fahrt/kein Zug da	3	0	6	9
6	in Sperrzone bzw. Nothalt	26	5	4	35
7	Umleitung	3	19	0	22
8	Sonstiges (kein Rückstau etc. erkennbar bzw. andere Gründe, wie bspw. Bauarbeiten)	13	20	42	75
Gesamt		65	72	178	315

C.2 Orte, an denen Verspätungen auftreten

Tabelle C.2: Orte, an denen Verspätungszuwächse von > 2 Minuten auftraten – nach Lage im Netz

Typ	Fälle	Anteil	Zusatzverspätungen	
			in Minuten	
1	SFP-Wendebahnhof	350	27%	2045
2	regulärer Wendebahnhof	339	26%	1941
3	Abzweigstelle auf Strecke bzw. Bahnhof, in dem Strecke abzweigt	184	14%	848
4	auf SFP-Umleitungsstrecke	33	3%	159
5	im Zulauf auf SFP-Wendebahnhof oder anderen SFP-Eingriffspunkt	130	10%	845
6	in Stammstrecke SFP-Wendebahnhof	24	2%	86
7	keine dieser Eigenschaften	243	19%	1114
Gesamt		1303		7038



D Quantifizierung zusätzlicher Belegungszeitanteile im Störfall

D.1 Dauer Nothaltvorgang in einem S-Bahn-Netz

Da ein Nothalt nicht im echten Betrieb simuliert werden kann um die Dauer zu ermitteln, erfolgt die Bestimmung der Dauer des Nothalts mithilfe eines Systems vorbestimmter Zeiten, der Methods Time Measurement Methode (MTM, siehe dazu Bokranz u. Landau (2006)). Dazu werden Abläufe in einzelne Arbeitsschritte untergliedert, deren Dauer im System MTM UAS hinterlegt ist. Dabei entspricht 1 TMU = 0,036 s.

Für die Dauer des Nothalts in einem S-Bahn-Netz wurde mittels MTM-UAS eine Zeit von 65 Sekunden errechnet.

Tabelle D.1: Darstellung der einzelnen Elemente des Nothaltevorgangs und ihrer berechneten Dauer

Nr.	Element	Dauer
0	Gefahr erkennen	–
1	Alle Tätigkeiten zum Halten	
1a	Fahrbremsschalter bzw. -hebel in „Schnellbremsstellung“	1 s
1b	Führerbremssventil in „Schnellbremsstellung“ (falls vorhanden)	1 s
1c	Schalter „Sanden“ betätigen (wird i.d.R. durch „Schnellbremsstellung“ automatisch ausgelöst, aber z.B. bei der S-Bahn Frankfurt Vorschrift)	1 s
2	Notsignal Zp 5 geben (3 kurze Töne mehrmals hintereinander – 9 x Schalter betätigen)	9 s
3	Betätigen der Notrufeinrichtung (Hörer aufnehmen und Notruftaste drücken)	3 s
4	Nothaltauftrag sprechen: „Betriebsgefahr, alle Züge sofort anhalten! Ich wiederhole: Betriebsgefahr, alle Züge sofort anhalten! Hier (Tätigkeit und Name des Meldenden).“	11 s
1	Tätigkeiten der anderen Triebfahrzeugführer zum Halten (s.o.)	3 s
5	Zeit zum Bremsen (Zugartspezifisch, siehe Tabelle D.2)	

D.1.1 Erklärungen zu den Berechnungen der einzelnen Elemente

Element 1 bis 3

- BA2 Einfache Betätigung ohne besondere Kontrolle oder zusätzliche Bewegung aus 20 bis 50 cm Entfernung (Stellteil mit Finger, Hand oder Fuß betätigen oder Hebel bewegen) 25 TMU = 0,9 s \approx 1 s
- AB2 leichtes Aufnehmen eines allein liegenden Gegenstands unter 1 kg aus 20 bis 50 cm Entfernung 45 TMU = 1,62 s \approx 2 s
- Hörer aufnehmen und Notruftaste drücken = 2 s + 1 s = 3 s

Element 4

- Kode VA mit 15 TMU zum Sprechen und (Vor-)Lesen von bis zu drei Zeichen, Ziffern oder Buchstaben, von Wörtern bis zu drei Silben sowie einfachen Symbolen.
- „Betriebsgefahr, alle Züge sofort anhalten! Ich wiederhole: Betriebsgefahr, alle Züge sofort anhalten! Hier Theodor Häuser, Triebfahrzeugführer.“
= 4 + 2 + 2 + 2 + 3 + 1 + 4 + 4 + 2 + 2 + 2 + 3 + 1 + 3 + 2 + 5 Silben,
entspricht (2 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 2 + 2 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 2) · 15
= 20 · 15 TMU = 300 TMU = 10,8 s \approx 11 s

Element 5

Alle Züge bremsen mehr oder weniger gleichzeitig. Daher ist die Bremszeit des ungünstigsten Bremsfalls, d. h. des schnellsten Zuges maßgebend. „Bei Zugverbänden unterscheidet man zwischen unterschiedlichen Bremsarten, welche sich vorrangig durch ihre Bremsverzögerung unterscheiden:

- Bremsart I (R/P) ohne Magnetschienenbremse für Schnellzüge/Personenzüge – erreichbare Bremsverzögerung von etwa $0,8 \frac{m}{s^2}$
- Bremsart I (R/P) mit Magnetschienenbremse für Schnellzüge/Personenzüge – erreichbare Bremsverzögerung von etwa $1,0 \frac{m}{s^2}$
- Bremsart II (G) für Güterzüge – erreichbare Bremsverzögerung von etwa $0,5 \frac{m}{s^2}$
- Straßenbahnen – erreichbare Bremsverzögerung von etwa $1,0 \frac{m}{s^2}$ bei einer Regelmäßigkeit und etwa $2,5 \frac{m}{s^2}$ im Gefahrenfall

Durch das Bremsen müssen Fahrzeitverlängerungen durch Zuschläge berücksichtigt werden. Der Bremszeitzuschlag bei einer Geschwindigkeitsverminderung ergibt sich dabei aus:

$$t'_{br} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2 \cdot a_{br}} v_1$$

mit: t'_{br} = Bremszeitzuschlag in s, v_1 = Anfangsgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$, v_2 = Endgeschwindigkeit nach der Bremsung in $\frac{m}{s}$ und a_{br} = Bremsverzögerung in $\frac{m}{s^2}$.“ (Siehe Fachgebiet Bahnsysteme (2012a))

Unter Berücksichtigung der Angaben in Fachgebiet Bahnsysteme (2012a) ergeben sich für $v_2 = 0 \frac{km}{h}$ die in Tabelle D.2 dargestellten Zeiten.

Tabelle D.2: Ermittlung der Bremszeitzuschläge für einzelne Zugarten

Zuggattung	Maximale Geschwindigkeit in $\frac{km}{h}$	Bremsverzögerung in $\frac{m}{s^2}$	Bremszeit von v_{max} auf $0 \frac{km}{h}$, inkl. 10% Zuschlag in s, gerundet
S-Bahn BR 644	140	1,2	36
ICE 1	280	1	86
Gz	120	0,5	73

D.2 Ermittlung der Dauer zum Erteilen schriftlicher Befehle

Zum Erteilen schriftlicher Befehle gilt nachfolgend dargestelltes Vorgehen (siehe auch DB Netz (408)):

1. Der Fahrdienstleiter diktiert den Befehl, während der Triebfahrzeugführer den entsprechenden Vordruck ausfüllt.
2. Der Triebfahrzeugführer liest vor was er notiert hat.
3. Der Fahrdienstleiter überprüft und bestätigt.
4. Der Triebfahrzeugführer unterzeichnet anstelle des Fahrdienstleiter und der Fahrdienstleiter unterzeichnet anstelle des Triebfahrzeugführers.
5. Der Triebfahrzeugführer führt den Befehl aus.

Zur Überprüfung der Expertenschätzungen erfolgten Zeitstudien unter folgenden Randbedingungen:

- Da die Dauer zur Übermittlung von schriftlichen Befehlen vom Umfang des Befehls abhängig ist, wurden die Zeitstudien am Beispiel von zwei im Störfall typischen Befehlen durchgeführt (Befehl 2 – Vorbeifahrt am haltzeigenden Signal; Befehl 4 – Ausfahrt auf dem Gegengleis). Die Inhalte der Befehle sind Tabelle D.3 zu entnehmen.
- Es wurde der laut DB Netz (408) in Deutschland zu verwendende Vordruck eingesetzt.
- Die Durchführung erfolgte durch das Zusammenspiel eines geübten Triebfahrzeugführers und einer ungeübten Person.
- Das Befehlsdiktat wurde insgesamt viermal durchgeführt mit gemessenen Zeiten von 110, 100, 110 und 100 Sekunden.
- Vor der Befehlsübermittlung ist es üblich, dass der Fahrdienstleiter den Befehl vorschreibt. Hierfür wurden in den Versuchen durchschnittlich 40 s benötigt.

Damit ergibt sich eine durchschnittliche Zeit für das Befehlsdiktat von 105 s + 40 s Vorschreiben = 145 s = 2,4 min = 2,5 min. Dieser ermittelte Wert ist ein Wert unter Laborbedingungen für die reine Befehlsübermittlung. I. d. R. sprechen Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter miteinander und tauschen Informationen aus. Aus diesen Gründen wird der ermittelte Wert von 2,5 Minuten als Untergrenze und der von Experten geschätzte Wert von 4 Minuten als Obergrenze für die Dauer angesetzt.

Tabelle D.3: Befehlsinhalte

Schritt	Beschreibung
Befehl 2	
1	Diktieren (aus Sicht des Triebfahrzeugführers, über Funk) Fahrdienstleiter diktiert, Triebfahrzeugführer schreibt mit
1.1	Kopf des Vordrucks ausfüllen Sperrfahrt – Schiebetriebfahrzeug für Zug + Zugnummer 47011 Vordruck: 1 von 1 Vordruck(en) Standort: km / Signal N1 in RGL / Ggl / Gl 1
1.2	Befehl 2 ausfüllen ankreuzen X Sie dürfen - vorbeifahren – weiterfahren nach Vorbeifahrt - am / an
1.3	Personalien ausfüllen Asig N1 des Bf Käfertal Käfertal, 16.04.2013, Unterschrift Triebfahrzeugführer
2	Wiederholen
3	Abschließen
3.1	Personalien ausfüllen 10:47, gez Name Fahrdienstleiter, i.A. Unterschrift Fahrdienstleiter
3.2	Übermittlungscode Übermittlungscode: 151515; X ZF
Befehl 4	
1	Diktieren (aus Sicht des Triebfahrzeugführers, über Funk, sinnvollerweise in Kombination mit Ersatzsignal Zs 1) Fahrdienstleiter diktiert, Triebfahrzeugführer schreibt mit
1.1	Kopf ausfüllen Sperrfahrt – Schiebetriebfahrzeug für Zug + Zugnummer 47012 Vordruck: 1 von 1 Vordruck(en) Standort: km / Signal N4 in RGL / Ggl / Gl 4
1.2	Befehl 4 ausfüllen ankreuzen X Sie fahren auf dem Gegengleis von Wilhelmstal bis Käfertal
1.3	Personalien ausfüllen Wilhelmstal, 16.04.2013, Unterschrift Triebfahrzeugführer
2	Wiederholen
3	Abschließen
3.1	Personalien ausfüllen 10:54, gez Name Fahrdienstleiter, i.A. Unterschrift Fahrdienstleiter
3.2	Übermittlungscode Übermittlungscode: 151516; X ZF

E Erläuterungen und Berechnungen zur Ermittlung der Gesamtdauer

E.1 Vorgang der Faltung zweier Funktionen

E.1.1 Allgemeiner Ablauf

1. Ermittlung der möglichen Gesamtdauern in Spanne $t_{Min} = t_{11} + t_{21}$ bis $t_{Max} = t_{1n} + t_{2m}$
2. Ermittlung aller für die jeweilige Gesamtdauer günstigen Ereigniskombinationen aus t_{1i} und t_{2j}
3. Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten für die jeweils günstigen Ereigniskombinationen aus $p_{1i2j} = p_{1i} \cdot p_{2j}$
4. Berechnung der Wahrscheinlichkeit je möglicher Gesamtdauer durch Addieren der Wahrscheinlichkeiten der jeweils günstigen Ereigniskombinationen

Ergebnis: Angabe der Verteilungsfunktion für die Gesamtdauer der beiden Vorgänge hintereinander.

E.1.2 Beispiel zur Ermittlung der Dauer von zwei Vorgängen

Gegeben:

- Vorgang 1 mit Dauer von 3 bis 6 Minuten, dreiecksverteilt
- Vorgang 2 mit Dauer von 3 oder 4 Minuten, gleichverteilt
- Werte siehe Tabelle E.1

Es ergeben sich die in Tabelle E.2 angegebenen Ereigniskombinationen.

Aus den gegebenen Werten lassen sich die in Tabelle E.3 angegebenen Gesamtdauern und ihre Auftrittswahrscheinlichkeit berechnen.

Tabelle E.1: Wertetabellen für die Wahrscheinlichkeit der Dauer der einzelnen Vorgänge

Vorgang 1		Vorgang 2	
t_{1i} in Min	P_{1i} in %	t_{2i} in Min	P_{2i} in %
$t_{11} = 3$	0,0%	$t_{21} = 3$	50,0%
$t_{12} = 4$	16,7%	$t_{22} = 4$	50,0%
$t_{13} = 5$	50,0%		
$t_{14} = 6$	33,3%		

Tabelle E.2: Wertetabellen für die Dauer und Wahrscheinlichkeit der Ereigniskombinationen

Gesamtdauer Ereigniskombination			Eintrittswahrscheinlichkeit Ereigniskombination		
	t_{21}	t_{22}		P_{21}	P_{22}
t_{11}	6	7	P_{11}	0,00%	0,00%
t_{12}	7	8	P_{12}	8,33%	8,33%
t_{13}	8	9	P_{13}	25,00%	25,00%
t_{14}	9	10	P_{14}	16,67%	16,67%

Tabelle E.3: Wertetabelle für die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Gesamtdauern

Gesamtdauer	günstige Ereigniskombinationen	Eintrittswahrscheinlichkeit
6	11_21	0,00%
7	12_21; 11_22	8,33%
8	13_21; 12_22	33,33%
9	14_21; 13_22	41,67%
10	12_22	16,67%

E.2 Vorgang der Faltung von drei Funktionen

E.2.1 Allgemeiner Ablauf

1. Ermittlung der möglichen Gesamtdauern in Spanne $t_{Min} = t_{11} + t_{21} + t_{31}$ bis $t_{Max} = t_{1n} + t_{2m} + t_{3o}$
2. Ermittlung aller für die jeweilige Gesamtdauer günstigen Ereigniskombinationen aus t_{1i} und t_{2j} und t_{3o}
3. Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten für die jeweils günstigen Ereigniskombinationen aus $P_{1i2j} = P_{1i} \cdot P_{2j} \cdot P_{3o}$
4. Berechnung der Wahrscheinlichkeit je möglicher Gesamtdauer durch Addieren der Wahrscheinlichkeiten der jeweils günstigen Ereigniskombinationen

Ergebnis: Angabe der Verteilungsfunktion für die Gesamtdauer der beiden Vorgänge hintereinander.

E.2.2 Beispiel zur Ermittlung der Dauer von drei Vorgängen

Gegeben:

- Vorgang 1 mit Dauer von 3 bis 6 Minuten, dreiecksverteilt
- Vorgang 2 mit Dauer von 3 oder 4 Minuten, gleichverteilt
- Vorgang 3 mit Dauer von 3 oder 4 Minuten, gleichverteilt
- Werte siehe Tabelle E.4

Es ergeben sich die in Tabelle E.5 angegebenen Ereigniskombinationen.

Aus den gegebenen Werten lassen sich die in Tabelle E.6 angegebenen Gesamtdauern und ihre Auftrittswahrscheinlichkeit berechnen.

Tabelle E.4: Wertetabellen für die Wahrscheinlichkeit der Dauer der einzelnen Vorgänge

Vorgang 1		Vorgang 2		Vorgang 3	
t_{1i} in Min	P_{1i} in %	t_{2i} in Min	P_{2i} in %		
$t_{11} = 3$	0,0%	$t_{21} = 3$	50,0%	$t_{31} = 3$	50,0%
$t_{12} = 4$	16,7%	$t_{22} = 4$	50,0%	$t_{32} = 4$	50,0%
$t_{13} = 5$	50,0%				
$t_{14} = 6$	33,3%				

Tabelle E.5: Wertetabellen für die Dauer und Wahrscheinlichkeit der Ereigniskombinationen

Gesamtdauer Ereigniskombination	Eintrittswahrscheinlichkeit Ereigniskombination				
	t_{31}	t_{32}		P_{31}	P_{32}
$t_{11_} t_{21}$	9	10	$P_{11_} P_{21}$	0,0%	0,0%
$t_{12_} t_{21}$	10	11	$P_{12_} P_{21}$	4,2%	4,2%
$t_{13_} t_{21}$	11	12	$P_{13_} P_{21}$	12,5%	12,5%
$t_{14_} t_{21}$	12	13	$P_{14_} P_{21}$	8,3%	8,3%
$t_{11_} t_{22}$	10	11	$P_{11_} P_{22}$	0,0%	0,0%
$t_{12_} t_{22}$	11	12	$P_{12_} P_{22}$	4,2%	4,2%
$t_{13_} t_{22}$	12	13	$P_{13_} P_{22}$	12,5%	12,5%
$t_{14_} t_{22}$	13	14	$P_{14_} P_{22}$	8,3%	8,3%

Tabelle E.6: Wertetabelle für die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Gesamtdauern

Gesamtdauer	günstige Ereigniskombinationen	Eintretenswahrscheinlichkeit
9	$t_{11_} t_{21_} t_{31}$	0,00%
10	$t_{12_} t_{21_} t_{31}$; $t_{11_} t_{21_} t_{32}$; $t_{11_} t_{22_} t_{31}$	4,17%
11	$t_{13_} t_{21_} t_{31}$; $t_{12_} t_{21_} t_{32}$; $t_{12_} t_{22_} t_{31}$; $t_{11_} t_{22_} t_{32}$	20,8%
12	$t_{14_} t_{21_} t_{31}$; $t_{13_} t_{21_} t_{32}$; $t_{13_} t_{22_} t_{31}$; $t_{12_} t_{22_} t_{32}$	37,5%
13	$t_{13_} t_{22_} t_{31}$; $t_{14_} t_{21_} t_{32}$; $t_{14_} t_{22_} t_{31}$	29,2%
14	$t_{14_} t_{22_} t_{32}$	8,3%

E.3 Wertetabellen für die durchgeführten Berechnungen

Tabelle E.7: Werte für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Einzelvorgänge (Dauer in Minuten)

Dauer	ID 1	ID 2	ID 3	ID 4	ID 5	ID 6	ID 7	ID 8	ID 9	ID 10
2										
2,5		25,0%								
3	33,3%	25,0%					0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3,5	33,3%	25,0%					0,4%	0,1%	0,1%	0,0%
4	33,3%	25,0%					1,2%	0,4%	0,2%	0,1%
4,5							2,0%	0,7%	0,4%	0,2%
5			6,3%				2,8%	1,0%	0,5%	0,3%
5,5			12,5%				3,6%	1,3%	0,7%	0,4%
6			18,8%				4,4%	1,6%	0,9%	0,5%
6,5			25,0%				5,2%	1,9%	1,0%	0,6%
7			18,8%	1,6%			6,0%	2,2%	1,2%	0,7%
7,5			12,5%	4,7%			6,7%	2,5%	1,3%	0,8%
8			6,3%	9,4%			7,5%	2,8%	1,5%	0,9%
8,5				15,6%			8,3%	3,1%	1,6%	1,0%
9				18,8%			9,1%	3,4%	1,8%	1,1%
9,5				18,8%			9,9%	3,7%	1,9%	1,2%
10				15,6%	0,4%		10,7%	4,0%	2,1%	1,3%
10,5				9,4%	1,6%		9,7%	4,3%	2,2%	1,4%
11				4,7%	3,9%		6,9%	4,6%	2,4%	1,5%
11,5				1,6%	7,8%		4,2%	4,9%	2,6%	1,6%
12					12,1%		1,4%	5,2%	2,7%	1,7%
12,5					15,6%	0,1%		5,5%	2,9%	1,8%
13					17,2%	0,5%		5,8%	3,0%	1,8%
13,5					15,6%	1,5%		6,1%	3,2%	1,9%
14					12,1%	3,4%		6,4%	3,3%	2,0%
14,5					7,8%	6,3%		6,7%	3,5%	2,1%
15					3,9%	9,9%		7,0%	3,6%	2,2%
15,5					1,6%	13,2%		6,3%	3,8%	2,3%
16					0,4%	15,1%		4,5%	3,9%	2,4%
16,5						15,1%		2,7%	4,1%	2,5%
17						13,2%		0,9%	4,3%	2,6%
17,5						9,9%			4,4%	2,7%
18						6,3%			4,6%	2,8%
18,5						3,4%			4,7%	2,9%
19						1,5%			4,9%	3,0%
19,5						0,5%			5,0%	3,1%
20						0,1%			5,2%	3,2%
20,5									4,6%	3,3%
21									3,3%	3,4%

(wird fortgesetzt)

Tabelle E.7: (Fortsetzung)

Dauer	ID 1	ID 2	ID 3	ID 4	ID 5	ID 6	ID 7	ID 8	ID 9	ID 10
21,5									2,0%	3,5%
22									0,7%	3,6%
22,5										3,6%
23										3,7%
23,5										3,8%
24										3,9%
24,5										4,0%
25										4,1%
25,5										3,6%
26										2,6%
26,5										1,6%
27										0,5%

ID 1	technische Übermittlung	ID 6	5 Befehle hintereinander
ID 2	1 Befehl	ID 7	Entscheidungsdauer bei a=3, c=10, b=12
ID 3	2 Befehle hintereinander	ID 8	Entscheidungsdauer bei a=3, c=15, b=17
ID 4	3 Befehle hintereinander	ID 9	Entscheidungsdauer bei a=3, c=20, b=22
ID 5	4 Befehle hintereinander	ID 10	Entscheidungsdauer bei a=3, c=25, b=27

Tabelle E.8: Werte für die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Dauer der Gesamtvorgänge – 2 Vorgänge: $t_{Entsch} + t_{Ueberm}$; 3 Vorgänge: $t_{Entsch} + t_{Ueberm} + t_{Befehl}$

Dauer	2 Vorgänge		3 Vorgänge 10 min		3 Vorgänge 15 min		3 Vorgänge 20 min		3 Vorgänge 25 min			
	10 min	15 min	3 Bef.	4 Bef.	3 Bef.	4 Bef.	3 Bef.	4 Bef.	3 Bef.	4 Bef.	5 Bef.	5 Bef.
6												
6,5												
7												
7,5												
8												
8,5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
9	0,40%	0,15%	0,08%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%
9,5	1,19%	0,45%	0,23%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%
10	1,98%	0,74%	0,39%	0,24%	0,24%	0,24%	0,24%	0,24%	0,24%	0,24%	0,24%	0,24%
10,5	2,78%	1,04%	0,54%	0,33%	0,33%	0,33%	0,33%	0,33%	0,33%	0,33%	0,33%	0,33%
11	3,57%	1,34%	0,70%	0,43%	0,43%	0,43%	0,43%	0,43%	0,43%	0,43%	0,43%	0,43%
11,5	4,37%	1,64%	0,85%	0,52%	0,52%	0,52%	0,52%	0,52%	0,52%	0,52%	0,52%	0,52%
12	5,16%	1,93%	1,01%	0,62%	0,62%	0,62%	0,62%	0,62%	0,62%	0,62%	0,62%	0,62%
12,5	5,95%	2,23%	1,16%	0,71%	0,71%	0,71%	0,71%	0,71%	0,71%	0,71%	0,71%	0,71%
13	6,75%	2,53%	1,32%	0,80%	0,80%	0,80%	0,80%	0,80%	0,80%	0,80%	0,80%	0,80%
13,5	7,54%	2,83%	1,47%	0,90%	0,90%	0,90%	0,90%	0,90%	0,90%	0,90%	0,90%	0,90%
14	8,33%	3,13%	1,63%	0,99%	0,99%	0,99%	0,99%	0,99%	0,99%	0,99%	0,99%	0,99%
14,5	9,13%	3,42%	1,78%	1,09%	1,09%	1,09%	1,09%	1,09%	1,09%	1,09%	1,09%	1,09%
15	9,92%	3,72%	1,93%	1,18%	1,18%	1,18%	1,18%	1,18%	1,18%	1,18%	1,18%	1,18%
15,5	10,71%	4,02%	2,09%	1,28%	1,28%	1,28%	1,28%	1,28%	1,28%	1,28%	1,28%	1,28%
16	9,72%	4,32%	2,24%	1,37%	1,37%	1,37%	1,37%	1,37%	1,37%	1,37%	1,37%	1,37%
16,5	6,94%	4,61%	2,40%	1,47%	1,47%	1,47%	1,47%	1,47%	1,47%	1,47%	1,47%	1,47%
17	4,17%	4,91%	2,55%	1,56%	1,56%	1,56%	1,56%	1,56%	1,56%	1,56%	1,56%	1,56%

(wird fortgesetzt)

Tabelle E.8: (Fortsetzung)

Dauer	2 Vorgänge			3 Vorgänge 10 min			3 Vorgänge 15 min			3 Vorgänge 20 min			3 Vorgänge 25 min		
	10 min	15 min	20 min	3 Bef.	4 Bef.	5 Bef.	3 Bef.	4 Bef.	5 Bef.	3 Bef.	4 Bef.	5 Bef.	3 Bef.	4 Bef.	5 Bef.
17,5	1,39%	5,21%	2,71%	2,44%	0,02%	0,91%	0,01%	0,48%	0,00%	0,29%	0,00%	0,00%	0,29%	0,00%	0,00%
18	0,00%	5,51%	2,86%	3,19%	0,06%	1,20%	0,02%	0,62%	0,01%	0,38%	0,01%	0,00%	0,38%	0,01%	0,00%
18,5		5,80%	3,02%	3,97%	0,15%	1,49%	0,05%	0,77%	0,03%	0,47%	0,02%	0,00%	0,47%	0,02%	0,00%
19		6,10%	3,17%	4,76%	0,31%	1,79%	0,12%	0,93%	0,06%	0,57%	0,04%	0,00%	0,57%	0,04%	0,00%
19,5		6,40%	3,33%	5,56%	0,59%	2,08%	0,22%	1,08%	0,11%	0,66%	0,07%	0,00%	0,66%	0,07%	0,00%
20		6,70%	3,48%	6,35%	0,98%	2,38%	0,37%	1,24%	0,19%	0,76%	0,12%	0,00%	0,76%	0,12%	0,00%
20,5		6,99%	3,64%	7,13%	1,50%	2,68%	0,56%	1,39%	0,29%	0,85%	0,18%	0,00%	0,85%	0,18%	0,00%
21		6,25%	3,79%	7,87%	2,13%	2,98%	0,80%	1,55%	0,42%	0,95%	0,25%	0,01%	0,95%	0,25%	0,01%
21,5		4,46%	3,95%	8,48%	2,84%	3,27%	1,06%	1,70%	0,55%	1,04%	0,34%	0,02%	1,04%	0,34%	0,02%
22		2,68%	4,10%	8,82%	3,59%	3,57%	1,35%	1,86%	0,70%	1,14%	0,43%	0,03%	1,14%	0,43%	0,03%
22,5		0,89%	4,26%	8,72%	4,37%	3,87%	1,64%	2,01%	0,85%	1,23%	0,52%	0,06%	1,23%	0,52%	0,06%
23		0,00%	4,41%	8,09%	5,16%	4,17%	1,93%	2,17%	1,01%	1,33%	0,62%	0,10%	1,33%	0,62%	0,10%
23,5			4,57%	6,93%	5,95%	4,46%	2,23%	2,32%	1,16%	1,42%	0,71%	0,16%	1,42%	0,71%	0,16%
24			4,72%	5,40%	6,73%	4,76%	2,53%	2,48%	1,32%	1,52%	0,80%	0,22%	1,52%	0,80%	0,22%
24,5			4,88%	3,77%	7,46%	5,06%	2,83%	2,63%	1,47%	1,61%	0,90%	0,30%	1,61%	0,90%	0,30%
25			5,03%	2,32%	8,08%	3,10%	3,13%	2,79%	1,63%	1,70%	0,99%	0,39%	1,70%	0,99%	0,39%
25,5			5,19%	1,23%	8,47%	3,80%	3,42%	2,94%	1,78%	1,80%	1,09%	0,48%	1,80%	1,09%	0,48%
26			4,61%	0,55%	8,53%	4,55%	3,72%	3,10%	1,93%	1,89%	1,18%	0,57%	1,89%	1,18%	0,57%
26,5			3,29%	0,19%	8,14%	5,35%	4,02%	3,25%	2,09%	1,99%	1,28%	0,66%	1,99%	1,28%	0,66%
27			1,97%	0,05%	7,29%	6,21%	4,32%	3,41%	2,24%	2,08%	1,37%	0,76%	2,08%	1,37%	0,76%
27,5			0,66%	0,01%	6,05%	7,05%	4,61%	3,56%	2,40%	2,18%	1,47%	0,85%	2,18%	1,47%	0,85%
28			0,00%		4,61%	7,80%	4,91%	3,72%	2,55%	2,27%	1,56%	0,95%	2,27%	1,56%	0,95%
28,5			3,74%		3,18%	8,33%	4,55%	3,87%	2,71%	2,37%	1,66%	1,04%	2,37%	1,66%	1,04%
29			3,84%		1,97%	8,52%	3,51%	4,02%	2,86%	2,46%	1,75%	1,14%	2,46%	1,75%	1,14%

(wird fortgesetzt)

Tabelle E.8: (Fortsetzung)

Dauer	2 Vorgänge			3 Vorgänge 10 min			3 Vorgänge 15 min			3 Vorgänge 20 min			3 Vorgänge 25 min		
	10 min	15 min	20 min	25 min	3 Bef.	4 Bef.	5 Bef.	3 Bef.	4 Bef.	5 Bef.	3 Bef.	4 Bef.	5 Bef.	3 Bef.	4 Bef.
29,5				3,93%	1,08%	8,30%	2,44%	5,76%	3,87%	4,18%	3,02%	2,01%	2,56%	1,85%	1,23%
30				4,02%	0,51%	7,63%	1,50%	5,95%	4,17%	4,33%	3,17%	2,17%	2,65%	1,94%	1,33%
30,5				4,12%	0,20%	6,59%	0,79%	6,02%	4,46%	4,49%	3,33%	2,32%	2,75%	2,04%	1,42%
31				3,65%	0,06%	5,31%	0,35%	5,89%	4,76%	4,62%	3,48%	2,48%	2,84%	2,13%	1,52%
31,5				2,60%	0,01%	3,96%	0,13%	5,50%	5,06%	4,70%	3,64%	2,63%	2,94%	2,23%	1,61%
32				1,56%	0,00%	2,71%	0,03%	4,84%	5,34%	4,66%	3,79%	2,79%	3,03%	2,32%	1,70%
32,5				0,52%		1,68%		3,97%	5,60%	4,45%	3,95%	2,94%	3,13%	2,41%	1,80%
33						0,94%		3,00%	5,80%	4,02%	4,10%	3,10%	3,22%	2,51%	1,89%
33,5						0,46%		2,06%	5,90%	3,38%	4,26%	3,25%	3,31%	2,60%	1,99%
34						0,20%		1,27%	5,84%	2,60%	4,40%	3,41%	3,41%	2,70%	2,08%
34,5						0,07%		0,69%	5,56%	1,80%	4,53%	3,56%	3,50%	2,79%	2,18%
35						0,02%		0,33%	5,05%	1,10%	4,62%	3,72%	3,60%	2,89%	2,27%
35,5						0,00%		0,13%	4,33%	0,59%	4,61%	3,87%	3,69%	2,98%	2,37%
36						0,00%		0,04%	3,47%	0,26%	4,46%	4,02%	3,77%	3,08%	2,46%
36,5						0,00%		0,01%	2,58%	0,09%	4,13%	4,18%	3,80%	3,17%	2,56%
37						0,00%		0,00%	1,76%	0,02%	3,61%	4,32%	3,75%	3,27%	2,65%
37,5						0,00%			1,09%	0,00%	2,95%	4,45%	3,57%	3,36%	2,75%
38						0,00%			0,60%		2,22%	4,54%	3,21%	3,46%	2,84%
38,5									0,29%		1,52%	4,55%	2,69%	3,55%	2,93%
39									0,12%		0,94%	4,45%	2,06%	3,64%	3,03%
39,5									0,04%		0,51%	4,20%	1,43%	3,71%	3,12%
40									0,01%		0,24%	3,78%	0,87%	3,75%	3,22%
40,5									0,00%		0,10%	3,23%	0,46%	3,72%	3,31%
41									0,00%		0,03%	2,58%	0,21%	3,58%	3,41%

(wird fortgesetzt)

Tabelle E.8: (Fortsetzung)

Dauer	2 Vorgänge		3 Vorgänge 10 min		3 Vorgänge 15 min		3 Vorgänge 20 min		3 Vorgänge 25 min			
	10 min	15 min	20 min	25 min	3 Bef.	4 Bef.	5 Bef.	3 Bef.	4 Bef.	5 Bef.		
41,5					0,00%			0,01%	1,91%	0,07%	3,30%	3,50%
42								0,00%	1,30%	0,02%	2,88%	3,59%
42,5								0,00%	0,80%	0,00%	2,35%	3,66%
43								0,00%	0,45%		1,76%	3,71%
43,5								0,00%	0,22%		1,21%	3,69%
44								0,00%	0,07%		0,74%	3,59%
44,5								0,00%	0,00%		0,40%	3,37%
45									0,00%		0,19%	3,03%
45,5									0,00%		0,08%	2,57%
46											0,02%	2,05%
46,5											0,01%	1,52%
47											0,00%	1,03%
47,5												0,64%
48												0,35%
48,5												0,17%
49												0,07%
49,5												0,03%
50												0,01%
50,5												0,00%



F Werte der Betriebsdatenanalyse aus Kapitel 6

F.1 Abweichungen von der technischen Mindestwendezeit für die Städte 1 und 3

Tabelle F.1: Mittelwerte der Abweichungen von der technischen Mindestwendezeit $t_{Stoerung,X}$ für die Städte 1 und 3, nach BST-Typ, Wende mit einem Triebfahrzeugführer

BST-Typ	BST	Mittelwert	Minimum	Maximum	Anzahl Fälle
1	3_19	32,0	32	32	1
	1_5	7,5	5	10	2
	1_8	3,5	1	6	2
	3_23	3,0	3	3	1
	3_4	2,9	-3	10	13
	3_22	2,8	-1	14	5
	3_26	2,8	-2	20	12
	1_19	2,3	-3	9	23
	1_10	2,1	-3	9	19
	3_5	1,7	-1	6	12
	1_21	1,6	-3	21	47
	3_8	1,5	-2	7	13
	3_12	1,4	-2	9	27
	1_12	1,3	-1	5	3
	3_3	0,7	0	2	3
	3_7	0,6	-3	13	56
	3_6	0,5	-3	16	68
	1_14	0,4	-3	3	23
	1_6	0,2	-2	3	14
	1_11	0,2	-3	9	15
	1_7	0,1	-3	13	31
	3_25	0,0	-3	11	32
	3_1	0,0	0	0	1
	3_2	0,0	0	0	1
	1_2	-0,1	-3	7	45
	1_3	-0,3	-3	14	52
	3_9	-0,5	-2	1	2
	3_13	-0,5	-3	5	26
	1_1	-0,7	-3	3	46
	1_15	-0,9	-3	1	44
	1_18	-1,0	-2	0	4

(wird fortgesetzt)

Tabelle F.1: (Fortsetzung)

BST-Typ	BST ID	Mittelwert in Min	Minimum in Min	Maximum in Min	Anzahl Fälle
	1_17	-1,1	-3	4	44
	3_17	-1,1	-3	1	8
2	3_10	9,0	5	13	2
	1_4	3,3	-3	11	3
	3_21	2,4	-1	6	10
	1_9	2,3	-3	11	3
	3_18	2,3	-3	16	6
	1_20	1,7	0	3	3
	3_20	1,7	-3	7	6
	3_11	1,0	1	1	1
	1_13	-2,5	-3	-2	2
3	3_24	5,6	0	14	5
	3_14	4,0	4	4	1
	3_15	0,0	0	0	1
	3_27	-0,3	-1	1	3
	3_16	-0,8	-2	0	4
	1_16	-1,0	-1	-1	1

Tabelle F.2: Mittelwerte der Abweichungen von der technischen Mindestwendezeit $t_{Stoerung,X}$ für die Städte 1 und 3, nach BST-Typ, Wende mit zwei Triebfahrzeugführern

BST-Typ	BST ID	Mittelwert in Min	Minimum in Min	Maximum in Min	Anzahl Fälle
1	3_17	4,7	0	14	9
	3_13	1,8	0	8	56
	1_21	1,3	0	3	3
	1_17	0,7	-1	2	7
	1_15	0,2	-1	2	12
	3_28	0,0	0	0	1
	3_4	0,0	0	0	1
	3_29	0,0	0	0	3
	3_30	0,0	0	0	17
	1_3	0,0	0	0	1
	3_6	0,0	0	0	1
	1_10	0,0	0	0	2
	3_22	-2,0	-2	-2	1
2	3_21	4,5	0	9	2
	1_22	-2,0	-2	-2	1
	3_20	-2,0	-2	-2	1

F.2 Wendedauern der Städte 1 und 3

Diese Ergebnisse umfassen alle Wenden mit pünktlich oder verspätet beginnenden Zugfahrten, bei denen die Ankunftszeit nicht für die geplante technische Mindestwendezeit und eine planmäßige Abfahrt ausreicht.

Zu beachten ist, dass sich die Wendedauern aus Subtraktionen von in LeiDis nur minutengenau erfassten Ankunfts- und Abfahrtszeiten ergeben, welches zu Ungenauigkeiten führt. So kann eine Wendedauer von 2 Minuten aus beispielsweise aus einer Ankunftszeit von 21:53:05 Uhr und einer Abfahrtszeit von 21:55:58 Uhr (173 Sekunden) oder aus einer Ankunftszeit von 21:53:01 Uhr und einer Abfahrtszeit von 21:54:58 Uhr (117 Sekunden) entstehen. Dieser Umstand führt dazu, dass Wenden mit einer Dauer von 0 Minuten verzeichnet werden (es ist davon auszugehen, dass diese Wenden ungefähr eine Minute dauern).

Tabelle F.3: Übersicht über Einzelhäufigkeiten und kumulierte Häufigkeit der Wenden pro aufgetretener Wendedauer

Dauer in Minuten	Häufigkeit von Wenden mit 1 Tf		Häufigkeit von Wenden mit 2 Tf	
	absolut	kumuliert	absolut	kumuliert
0	0	0,00%	3	2,54%
1	0	0,00%	5	6,78%
2	0	0,00%	46	45,76%
3	63	8,43%	25	66,95%
4	105	22,49%	17	81,36%
5	153	42,97%	11	90,68%
6	148	62,78%	4	94,07%
7	90	74,83%	1	94,92%
8	71	84,34%	1	95,76%
9	33	88,76%	1	96,61%
10	19	91,30%	1	97,46%
11	17	93,57%	2	99,15%
12	10	94,91%	0	99,15%
13	9	96,12%	0	99,15%
14	4	96,65%	0	99,15%
15	8	97,72%	0	99,15%
16	2	97,99%	1	100,00%
17	4	98,53%	0	100,00%
18	0	98,53%	0	100,00%
19	3	98,93%	0	100,00%
20	3	99,33%	0	100,00%
21	0	99,33%	0	100,00%
22	2	99,60%	0	100,00%
23	0	99,60%	0	100,00%
24	0	99,60%	0	100,00%
25	0	99,60%	0	100,00%
26	1	99,73%	0	100,00%
27	1	99,87%	0	100,00%
28	0	99,87%	0	100,00%
29	0	99,87%	0	100,00%
30	0	99,87%	0	100,00%
und größer	1	100,00%	0	100,00%

F.3 Verteilung der Gründe für einen verspäteten Fahrtbeginn pro Bahnhofstyp

Tabelle F.4: Anzahl der Verspätungsarten pro Bahnhofstyp für die Städte 1 und 3 (Typ 1 = regulärer Wendebahnhof, Typ 2 = SFP-Wendebahnhof, Typ 3 = für SFP-Wenden nicht vorgesehener Bahnhof)

Verspätungsart	Typ 1	Typ 2	Typ 3
reine Verspätungsübertragung	500	18	9
reine Verspätungsgenerierung	611	96	26
Verspätungsübertragung und -generierung	322	28	6
Anzahl Fälle je Typ	1433	142	41
Gesamt	1616		

Tabelle F.5: Anzahl der Verspätungsarten pro Bahnhofstyp für die Stadt 1 (Typ 1 = regulärer Wendebahnhof, Typ 2 = SFP-Wendebahnhof, Typ 3 = für SFP-Wenden nicht vorgesehener Bahnhof)

Verspätungsart	Typ 1	Typ 2	Typ 3
reine Verspätungsübertragung	304	7	1
reine Verspätungsgenerierung	343	20	11
Verspätungsübertragung und -generierung	136	12	0
Anzahl Fälle je Typ	783	39	12
Gesamt	834		

Tabelle F.6: Anzahl der Verspätungsarten pro Bahnhofstyp für die Stadt 3 (Typ 1 = regulärer Wendebahnhof, Typ 2 = SFP-Wendebahnhof, Typ 3 = für SFP-Wenden nicht vorgesehener Bahnhof)

Verspätungsart	Typ 1	Typ 2	Typ 3
reine Verspätungsübertragung	196	11	8
reine Verspätungsgenerierung	267	76	15
Verspätungsübertragung und -generierung	186	16	6
Anzahl Fälle je Typ	649	103	29
Gesamt	781		



G Arbeitsschritte zur Durchführung einer betrieblichen Wende

G.1 Exemplarische Abfolge von abschließenden und vorbereitenden Aufgaben für eine betriebliche Wende mit einem Triebfahrzeugführer

1. Bremsen komplett füllen (Bremsstellung Vollbremsung – Bremsventil betätigen)
2. Bremsen abschließen (Bremsventil auf Nullstellung, Schlüssel entnehmen)
3. Zugschluss umstellen (ein Schalter)
4. Funk abmelden
5. Richtungsschalter auf „0“ und abziehen (Hebel herausnehmen und weglegen)
6. Zugzielanzeiger weiterdrehen (Kurbel)
7. Sifa ausschalten (Hebel in Klappe im Führerstand)
8. Aussteigen und Führerstand abschließen
9. Zugschluss (und Zugziel) kontrollieren
10. Zum Zugangfang laufen
11. Aufschließen des Führerstands
12. Richtungsschalter einstecken und auf „vorwärts“ verlegen
13. Bremsventil aufschließen
14. Fahrplan in EBULA laden
15. Funk anmelden (mit Zugnummer)
16. Zugzielanzeiger weiterdrehen (Kurbel)
17. Sifa einschalten
18. Bremsprobe durchführen (ca. 6 Schritte)
19. Spitzenlicht umstellen (ein Schalter)
20. Spitzenlicht von außen kontrollieren
21. PZB-Daten eingeben (Zugnummer, Nummer des Triebfahrzeugführers, Mindestbrems-
hundertstel)
22. Bis zur Abfahrt eingebremst stehen bleiben

G.2 Exemplarische Abfolge von abschließenden und vorbereitenden Aufgaben für eine betriebliche Wende mit zwei Triebfahrzeugführern

Abfolge der Aufgaben des ersten Triebfahrzeugführers

1. Bremsen komplett füllen (Bremsstellung Vollbremsung – Bremsventil betätigen)
2. Bremsen abschließen (Bremsventil auf Nullstellung, Schlüssel entnehmen)
3. Zugschluss umstellen (ein Schalter)
4. Funk abmelden
5. Richtungsschalter auf „0“ und abziehen (Hebel herausnehmen und weglegen)
6. Zugzielanzeiger weiterdrehen (Kurbel)
7. Sifa ausschalten (Hebel in Klappe im Führerstand)
8. Per Führerstand-Führerstand-Verbindung mit dem zweiten Triebfahrzeugführer ein Übergabegespräch führen
9. Aussteigen und Abschließen des Führerstands
10. Zugschluss (und Zugziel) kontrollieren

Abfolge der Aufgaben des zweiten Triebfahrzeugführers

1. Aufschließen des Führerstands
2. Per Führerstand-Führerstand-Verbindung mit ersten Triebfahrzeugführer ein Übergabegespräch führen
3. Richtungsschalter einstecken und auf „vorwärts“ verlegen
4. Bremsventil aufschließen
5. Fahrplan in EBULA laden
6. Funk anmelden (mit Zugnummer)
7. Zugzielanzeiger weiterdrehen (Kurbel)
8. Sifa einschalten
9. Bremsprobe durchführen (ca. 6 Schritte)
10. Spitzenlicht umstellen (ein Schalter)
11. Spitzenlicht von außen kontrollieren
12. PZB-Daten eingeben (Zugnummer, Nummer des Triebfahrzeugführers, Mindestbremswertstellung)
13. Bis zur Abfahrt eingebremst stehen bleiben

H Schriftenverzeichnis

Folgende Veröffentlichungen wurden im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Bahnsysteme erarbeitet.

1. Friederike Chu, Aline Böhme, Achim Wolters. *Störfallprogramme betrieblich umsetzen. Deine Bahn*, 6:20–25, 2013.
2. Friederike Chu, Andreas Oetting. *Quantifying Infrastructure Capacity Consumption while Transitioning to Steady Operations during Disruptions in Passenger Rail Transport*. In: *Tagungsband des 5th International Seminar on Railway Operations Modeling and Analysis – RailCopenhagen, IAROR2013, May 2013, Kopenhagen, Dänemark*. 2013. Auszeichnung – eines der 10 besten Conference Paper.
3. Friederike Chu, Andreas Oetting. *Modeling Capacity Consumption Considering Disruption Program Characteristics and the Transition Phase to Steady Operations During Disruptions*. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 3(3):54 – 67, 2013. Robust Rescheduling and Capacity Use.
4. Andreas Oetting, Friederike Chu. *Disruption Programs in Passenger Rail Transport – Ensuring steady operations during disruptions*. In: *Tagungsband des 13th World Congress on Transportation Research, WCTR2013, July 2013, Rio de Janeiro, Brasilien*. 2013.
5. Friederike Chu, Leif Fornauf, Aline Böhme, Achim Wolters. *Methode zur Erarbeitung von Störfallprogrammen. Deine Bahn*, 7:45–48, 2012.
6. Constanze Streitzig, Anselmo Stelzer, Sebastian Schön, Friederike Chu. *TU Darmstadt – research, training and more besides. EURAILmag Business & Technology*, 26(26):152–159, 2012.
7. Friederike Chu, Leif Fornauf. *Vom Katastrophen- und vom dynamischen Straßenverkehrsmanagement lernen – Störfallprogramme bei Betriebsstörungen im Schienenverkehr*. In: *Tagungsbericht zur HEUREKA '11 – Optimierung in Verkehr und Transport, Stuttgart, Deutschland*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2011.



I Lebenslauf

Aus Gründen des Datenschutzes ist der Lebenslauf nur in der gebundenen Ausgabe enthalten.