Algorithmen zur (teil-) automatisierten betrieblichen und verkehrlichen Bewertung von Störfallprogrammen

vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation von M.Sc. Anna-Katharina Brauner, geb. am 08.07.1987 in Pforzheim

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting, Darmstadt
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Ullrich Martin, Stuttgart

Tag der Einreichung: 22. Juni 2022
Tag der Disputation: 13. Oktober 2022

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik

Brauner, Anna-Katharina: Algorithmen zur (teil-)automatisierten betrieblichen und verkehrlichen Bewertung von Störfallprogrammen

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt
Jahr der Veröffentlichung auf Tuprints: 2023

Schriftenreihe der Institute für Verkehr
Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik

Heft B15
ISSN 1614-9300

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-236517
URI: https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/23651

Tag der mündlichen Prüfung: 13.10.2022

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International
https://creativecommons.org/licenses

für Margarete und Rudolf

Kurzfassung

Große Störungen – üblicherweise als „Störfalle“ bezeichnet - treten zufällig auf, sind in ihrem Auftreten oft nicht beeinflussbar, schränken die Infrastrukturverfügbarkeit ein und verändern die Betriebslage deutlich. Dabei stellen sie das Betriebspersonal vor große Herausforderungen und zwingen einen Teil der Fahrgäste, ihr Mobilitätsverhalten an die veränderte Betriebslage anzupassen.

Um den gestörten Betrieb zuverlässig abzuwickeln, Disponenten zu entlasten und Kunden zielgerichtet zu informieren, werden sog. „Störfallprogramme“ eingesetzt. Diese beinhalten für typische Störungen mit hohen verkehrlichen Auswirkungen eine meist linienspezifische Planung der betrieblichen Maßnahmen (insbes. (Teil-)Ausfälle mit vorzeitigen Wenden und Umleitungen). Durch die eingeschränkte Infrastrukturverfügbarkeit bei Störfällen führt ein Störfallprogramm zu einem im Vergleich zum Regelbetrieb reduzierten Fahrplan.

Störfallprogramme werden oftmals durch erfahrene Mitarbeiter erstellt, die mögliche Auswirkungen der Störung erkennen, passende betriebliche Maßnahmen planen, deren Auswirkungen im Betrieb abschätzen und auf diese Weise ein „Betriebskonzept“ für den Störfall mit großem Aufwand ex ante erstellen. Die sich aus den betrieblichen Maßnahmen ergebenden Auswirkungen auf die Fahrgäste können bei Erstellung eines Störfallprogramms in der Regel lediglich erfahrungsbasiert und implizit bei der Festlegung der betrieblichen Maßnahmen grob berücksichtigt werden.

Um auch im Störfall einen attraktiven öffentlichen Schienenpersonennahverkehr zu ermöglichen, sollten sich Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit nicht nur auf das Angebot des Betriebs beziehen, sondern auch auf die zugehörige Reisendenlenkung. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Begriff „Störfallprogramm“ daher nicht nur klassischerweise das „Betriebskonzept“ umfassen, sondern um die Reisendenlenkung im Rahmen eines „Verkehrskonzeptes“ ergänzt werden.

Die Konzeption eines kundenorientierten Störfallprogramms beginnt mit der Planung von betrieblichen Maßnahmen durch den Ersteller. Dieses Betriebskonzept ist anschließend zu bewerten und um die Auswirkungen auf den Fahrgast zu ergänzen. Das Ziel der Arbeit besteht daher in der Entwicklung einer (teil-) automatisierten Bewertung von Betriebskonzepten sowie Algorithmen zur Erstellung und Bewertung von entsprechenden Verkehrskonzepten, so dass in einer integrierten Planung kundenorientierte Störfallprogramme entstehen können.

Zwischen Betriebskonzept und Verkehrskonzept liegt jedoch ein Zielkonflikt vor. Dieser besteht zwischen dem schnellen Erreichen eines stabilen Betriebs durch das Ausstellen möglichst vieler Fahrzeuge im Betriebskonzept und dem Erhalt eines möglichst umfangreichen und damit attraktiven Verkehrsangebots im Verkehrskonzept, das ein möglichst attraktives Betriebskonzept mit wenig Zugausfällen erfordert. Die Arbeit adressiert diesen Zielkonflikt, indem in einer modularen Systemarchitektur nicht nur nach Betriebs- und Verkehrskonzept, sondern zusätzlich, innerhalb dieser Konzepte, in weitere Module und Submodule differenziert wird. Alle (Sub-)Module wurden basierend auf umfassend erhobenen Anforderungen problemadäquat spezifiziert. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf konsistente Algorithmen in den verschiedenen (Sub-)Modulen gelegt. So konnte beispielsweise ein kundenorientiertes Bewertungssystem, das zur verkehrlichen Maßnahmenauswahl, Verkehrskonzeptbewertung und Störfallprogrammbewertung Verwendung findet, entwickelt werden.

Im Weiteren wird das Vorgehen bei der Algorithmenentwicklung und deren Anwendung in der Praxis anhand von vier wesentlichen Schritten dargestellt. Dies sind:

1. die Bewertung eines Betriebskonzeptes, das die Grundlage für
2. die Erstellung eines Verkehrskonzeptes und
3. dessen anschließende Bewertung bildet.
4. Abschließend erfolgt eine kundenorientierte Bewertung des Störfallprogramms insgesamt.

Die Algorithmen berücksichtigen die unmittelbar nach Eintreten des Störfalls beginnende „Ermittlungs- und Entscheidungsphase“ und umfassen sowohl die nach Ausrufen des Störfallprogramms folgende „Einschwingphase“ als auch den eingeschwungenen Zustand, der als „stabile Phase“ bezeichnet wird.

Zunächst wird ein vom Ersteller konzipiertes **Betriebskonzept** anhand der einzelnen geplanten betrieblichen Maßnahmen und deren Wechselwirkungen auf die Funktionsfähigkeit in der *stabilen Phase* geprüft. Dazu werden die Netzelemente, an denen durch mindestens eine betriebliche Maßnahme auslastungserhöhende Veränderungen stattfinden, auf eine Einhaltung des Belegungsgrads des Regelbetriebs und nach UIC Kode 406-Grenzwert bewertet.

Unter Berücksichtigung der Fahrzeugstandorte bei Störungseintritt und des Erreichens von geplanten Standorten und Zugzahlen wird die *Einschwingphase* auf Ausschlusskriterien untersucht, die die Möglichkeit zur Erreichung der stabilen Phase verhindern könnten. Daran schließt sich die Entwicklung eines konstruktiven Verfahrens zur Berechnung der mittleren Einschwingdauer, die vergleichend und anhand einer Zielfunktion bewertet werden kann, an. Auch bei einer niedrigen Einschwingdauer kann dieser rein betriebliche Qualitätsmaßstab aufgrund des o. g. Zielkonflikts keine Aussage zur Kundenorientierung liefern.

Daher wird anschließend ein **Verkehrskonzept erstellt** und bewertet. Die Planung dieses Konzeptes ist darauf ausgerichtet, trotz Störfall so viele Fahrgäste wie möglich an ihr Ziel zu bringen und die negative Wahrnehmung der Angebotsveränderung durch die Fahrgäste möglichst gering zu halten. Die dazu entwickelte Bewertung wird einheitlich für nicht mehr verfügbare Verbindungen und unveränderte aber konfliktäre Verbindungen sowie die anschließende Bewertung des Störfallprogramms konsistent verwendet.

Für die *stabile Phase* werden Verbindungskonflikte, die durch das Störfallprogramm entstehen und ein abweichendes widerstandserhöhtes Mobilitätsverhalten erzeugen, ermittelt. Für diese werden anschließend verbindungsspezifische Alternativen ermittelt, bewertet und als individuelle, beste Lösung ausgewählt. Da über Lautsprecher und ähnliche Kommunikationskanäle, die sich an eine Vielzahl von Fahrgästen wenden, nur wenige Informationen übertragen werden können, werden zudem kollektive Lösungen ermittelt.

Das aus kollektiven und verbleibenden individuellen Lösungen bestehende Verkehrskonzept ist abschließend zu bewerten. Das Bewertungssystem bündelt die kundenrelevanten Eigenschaften des Verkehrskonzepts mit einer einzigen geschlossenen Zielfunktion. Bei einem als nicht ausreichend **bewerteten Verkehrskonzept** wird ein interaktiver Prozess zur Überarbeitung durch den Ersteller ausgelöst.

Die **kundenorientierte Bewertung des Störfallprogramms** insgesamt berücksichtigt zudem die verkehrlichen Auswirkungen in der *Einschwingphase*. Für die Einschwingphase werden zusätzliche und gegenüber der stabilen Phase veränderte Verbindungskonflikte, unter Verwendung der zusätzlichen Verspätungen in der Einschwingphase, bestimmt, bei Bedarf vereinfacht gelöst und anschließend

bewertet. So können abschließend die Auswirkungen von Betriebskonzept und Verkehrskonzept auf den Fahrgast in Einschwing- und stabiler Phase zusammengeführt werden.

Damit ist es gelungen, mit Algorithmen für die integrierte Planung von Störfallprogrammen, entsprechend der Zielsetzung, den o. a. Zielkonflikt aufzulösen, das geplante Betriebskonzept zu bewerten und um ein Verkehrskonzept zu erweitern. Ein Störfallprogramm stellt somit eine integrierte Planung aus Maßnahmen für Züge und Fahrgäste dar. Durch eine kundenorientierte Bewertung des Störfallprogramms anhand einer Zielfunktion wird sichergestellt, dass die Wahrnehmung der reduzierten Angebotsqualität durch den Fahrgast im Störfall umfassend in der Planung berücksichtigt werden kann, um so den Fahrgästen im Störfall ein zuverlässiges und attraktives Angebot anbieten zu können.

Abstract

Major disruptions in rail transport occur randomly, cannot be influenced concerning their time of occurrence, limit the availability of the infrastructure and change the operational situation significantly. In doing so, they challenge the personnel and force passengers to adapt their mobility behaviour to the changed operating situation.

In order to handle disrupted train operations reliably, reduce the dispatchers work overload and inform passengers appropriately, so called disruption programs are used. Those mostly consist of pre-planned train dispatching measures (in particular (partial)cancellations with premature turns and deviations) for characteristic disruptions with large impacts on traffic. Due to the reduced availability of infrastructure, a disruption program necessarily comprises a reduced timetable compared to regular train operations.

Disruption programs are usually designed by an experienced employee who detects the possible effects of the disruption, plans suitable operational measures, roughly assesses their effects on the network and thus creates a pre-planned operating concept in a very time-consuming manner. The resulting effects on passengers are usually considered solely experience-based and implicitly during the design of operational measures.

To offer an attractive local public train transport system even in the event of a disruption, availability and reliability should not only be limited to the train services only, but should also consider the associated passenger traffic holistically. In the context of this work, the term "disruption program" should therefore not only include the "operating concept" in the classic way, but should be supplemented by passenger guidance within the framework of a "passenger traffic concept".

The planning of passenger-oriented disruption programs starts with the design of the train dispatching measures by the creator. Subsequently, this operating concept is to be evaluated and to be enhanced by the effects on passengers. The aim of this work is the design of a (partially)automated evaluation of train operating concepts as well as algorithms to establish and evaluate corresponding passenger traffic concepts to support the integrated planning of customer-oriented disruption programs.

However, there is a conflict of objectives within any disruption program. On the one hand, the aim to achieve stable and delay-free train operations quickly can be reached by cancelling trains in the operating concept. On the other hand, one should maintain the widest possible and thus most attractive transport supply, which requires an attractive operating concept with only little train cancellations. This work deals with this conflict of objectives using a system architecture that not only differentiates between operating and passenger traffic concept but also diversifies within these concepts into modules and sub-modules. All (sub-)modules are specified based on a broad requirements analysis and particular attention was paid to consistent algorithms in the various (sub)modules. For example, a customer-oriented evaluation system, which is used for the selection of traffic-related measures, traffic concept evaluation and the assessment of the disruption program as a whole, was developed.

In the following, the development of the algorithms as well as their application in practice is presented using four essential steps. These are:

1. the evaluation of an operating concept that forms the basis for
2. the creation of a traffic concept and
3. its subsequent evaluation.
4. Concluding, a customer-oriented evaluation of the entire disruption program is carried out.

The algorithms consider the impacts of the "determination and decision phase" that begins immediately after the occurrence of the disruption and include both the "transitioning phase" that follows after the disruption program has been proclaimed and the settled state, which is referred to as the "stable phase".

Initially, an **operating concept** designed by the creator is checked on its functionality during the *stable phase* by evaluating individual operational measures and their interactions with each other. For this purpose, the network elements, on which at least one operational measure increases the utilization, are evaluated using the occupancy rate based on regular train operations as well as the limit given in the UIC code 406.

The *transitioning phase* is examined for the existence of exclusion criteria, which could hinder achieving the stable phase, taking into account the vehicle locations at the time of the disruption event and the attainment of the locations and numbers of trains planned in the disruption program. This is followed by the development of a constructive approach for calculating the duration of the transitioning phase, the so called “transitioning time”, which can be evaluated based on a target value. Even if the average transitioning time is low, this solely operational quality scale does not allow any statement about customer orientation.

Therefore, algorithms to **establish** and evaluate **a passenger traffic concept** are designed. The algorithms are designed such that as many customers as possible attain their destination and the passenger’s negative perception of the change in service, described by a resistance (negative utility) function is low. This developed evaluation is consistently used both for the unavailable connections and the modified connections as well as for the subsequent evaluation of the entire disruption program.

For *the stable phase*, connection conflicts that arise from the disruption program generate the need to adapt the mobility behaviour and therefore result in an increased resistance. For each detected connection conflict, possible connection alternatives are determined, evaluated and the best individual solution is selected. Since only little information can be communicated via loudspeakers and similar communication channels that address a large number of passengers, collective solutions are also determined.

The **passenger traffic concept**, which consists of collective and remaining individual solutions, is **evaluated** in such a way that the passenger traffic concept can be classified with a target function – and if the passenger traffic concept is assessed to be insufficient, an interactive process for revision by the creator is triggered.

Furthermore, the **concluding evaluation of the entire disruption program** considers the effects on passengers in the *transitioning phase*, by investigating the impacts of the delayed trains and applying a simplified conflict solution and finally the consistent evaluation system. In this way, the effects of the operating concept and the passenger traffic concept on the passengers can be brought together for the transitioning as well as the stable phase.

It has thus been possible to reach this work’s aim, with algorithms for an integrated planning of disruption programs, solving the conflict of objectives, evaluating the operating concept and enhancing it with a passenger traffic concept. In applying the algorithms, a disruption program represents an integrated planning of measures for trains and passengers. A customer-oriented assessment of the disruption program based on target functions ensures that the perception of the reduced service quality by the passenger can be taken into account in the planning of disruption programs, in order to be able to offer passengers a reliable and attractive service in the event of a disruption.

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting für die Möglichkeit der Promotion am Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik. Er hat mich konstant ermutigt meine Dissertation zu verfolgen und stand mir stets mit Rat und konstruktivem Feedback zur Seite. Herrn Prof. Dr.-Ing. Ullrich Martin möchte für die Übernahme des Zweitgutachtens der Arbeit ebenfalls ganz herzlich danken.

Allen ehemaligen und aktuellen Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik danke ich für das kreative, offene und freundliche Arbeitsumfeld, welches wir auch in der großen Herausforderung der Covid-19 Pandemie erhalten konnten. Ein besonderer Dank geht an die beiden Kollegen aus der Störfallforschung: Arturo Crespo Materna und Cedric Steinbach, die mich stets tatkräftig mit zielorientierten Diskussionen unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt meinen Freunden und meiner Familie. Sie haben mich durch alle Höhen und Tiefen begleitet und gerade in der Endphase auch viel auf mich verzichtet.

Ich danke meinen Eltern, die mir ein Studium ermöglicht haben und immer an mich geglaubt haben. Meinem Mann Andreas danke ich für die Geduld, die liebevolle Betreuung unserer Tochter Mara, die fachlichen Diskussionen und die grenzenlose Unterstützung auf diesem Weg.

Mein letzter Dank geht an meine Tochter Mara, die diese anspruchsvolle Zeit des Abschlusses einer Doktorarbeit während einer Pandemie verständnisvoll mitgetragen hat und mir immer ein Lächeln auf die Lippen zaubern konnte.

Anna-Katharina Brauner

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

1.1 Ausgangssituation und Motivation ... 1
1.2 Ziel der Arbeit ... 3

2 Stand des Wissens 5

2.1 Einleitung ... 5
2.2 Eisenbahnbetriebswissenschaft ... 6
2.2.1 Infrastrukturmodellierung ... 6
2.2.2 Betriebsprogramme ... 7
2.2.3 Zeiten ... 7
2.2.4 Leistungsfähigkeit und eisenbahnbetriebswissenschaftliche Verfahren ... 10
2.2.5 Konflikte: Arten, Erkennung und Lösung ... 14
2.3 Störfalldisposition ... 16
2.3.1 Modelle und Methoden der Entscheidungsunterstützung im Störfall ... 17
2.3.2 Phasen eines Störfalls ... 20
2.3.3 Akteure ... 21
2.3.4 Blick in die Praxis - Auswertung dreier Experteninterviews ... 22
2.4 Forschung zu Störfallprogrammen ... 24
2.5 Verkehrliche Aspekte ... 31
2.5.1 Angebot ... 31
2.5.2 Nachfrage ... 37
2.5.3 Verkehrliche Maßnahmen ... 39
2.6 Zusammenfassung ... 40

3 Problemstellung und Lösungsansatz 42

3.1 Aufgabenstellung und inhaltliche Abgrenzung ... 42
3.1.1 Zielsetzung ... 42
3.1.2 In- und out-of-scope ... 43
3.1.3 Grundlegende Herangehensweise ... 48
3.2 Systemarchitektur ... 48
3.3 Anforderungen an die Lösung ... 50
3.4 Methode ... 65
3.5 Vorgehensweise ... 67
3.6 Definition unterschiedlich verwendeter und neuer Begriffe ... 68
3.6.1 Betriebs- und Verkehrskonzept ... 68
3.6.2 Modellierung der Beziehungen im Netz in Abhängigkeit des Verwendungszwecks ... 68
3.6.3 Betriebskonzept ... 71
3.6.4 Verkehrskonzept ... 73

3.7 Zusammenfassung 74

4 Betriebskonzept 75

4.1 Einleitung 75
4.2 Bewertung des Betriebskonzepts 76
4.2.1 Methode und Vorgehensweise zur Bestimmung der Funktionsfähigkeit des Betriebskonzepts in der stabilen Phase 78
4.2.2 Methode und Vorgehensweise zur Bestimmung der Einschwingqualität 81
4.3 Modul 1: Machbarkeitsprüfung und Berechnung der veränderten Zugfahrt je Maßnahme 83
4.3.1 Einleitung 83
4.3.2 Methode 83
4.3.3 Vorgehensweise 85
4.3.4 Algorithmus 91
4.3.5 Zusammenfassung 99
4.4 Modul 2 und Modul 3: Validierung der Maßnahmen auf allen betroffenen Netzelementen in der stabilen Phase 99
4.4.1 Einleitung 99
4.4.2 Methode 100
4.4.3 Modul 2: Funktionsfähigkeit der betroffenen Kanten – Vorgehensweise 103
4.4.4 Modul 2: Funktionsfähigkeit der betroffenen Kanten – Algorithmus 105
4.4.5 Modul 3: Funktionsfähigkeit der betroffenen Knoten – Vorgehensweise 107
4.4.6 Modul 3: Funktionsfähigkeit der betroffenen Knoten – Algorithmus 109
4.4.7 Zusammenfassung 111
4.5 Modul 4: Überprüfung der Einschwingfähigkeit 111
4.5.1 Einleitung 111
4.5.2 Methode 111
4.5.3 Maßnahme Ausfall – Vorgehensweise 114
4.5.4 Maßnahme Ausfall – Algorithmus 116
4.5.5 Ermittlung der mittleren Auslegedauer – Vorgehensweise 117
4.5.6 Ermittlung der mittleren Auslegedauern zum Erreichen der geplanten Zugzahl – Algorithmus 119
4.5.7 Überprüfung des Belegungsgrads in Störungseinflussbereichen – Vorgehensweise 122
4.5.8 Überprüfung des Belegungsgrads in Störungseinflussbereichen – Algorithmus 122
4.5.9 Zusammenfassung 123
4.6 Modul 5: Ermittlung der mittleren Einschwingdauer 123
4.6.1 Einleitung 123
4.6.2 Methode 124
4.6.3 Vorgehensweise 128
4.6.4 Algorithmus 135
4.6.5 Zusammenfassung 140
4.7 Zusammenfassung 141

5 Verkehrskonzept 142

5.1 Einleitung ... 142
5.2 Problemgröße ... 142
5.3 Methode ... 145
5.4 Vorgehensweise ... 146
5.5 Kundenorientierte Bewertung eines Verkehrskonzepts und der verkehrlichen Maßnahmen ... 148
5.6 Modul 6: Verbindungskonflikterkennung ... 154
5.6.1 Einleitung ... 154
5.6.2 Methode ... 156
5.6.3 Vorgehensweise ... 159
5.6.4 Algorithmus ... 161
5.6.5 Zusammenfassung ... 164
5.7 Modul 7: Konfliktlösungsalternativensuche ... 164
5.7.1 Einleitung ... 164
5.7.2 Methode ... 166
5.7.3 Vorgehensweise ... 169
5.7.4 Algorithmus ... 174
5.7.5 Zusammenfassung ... 178
5.8 Modul 8: Verkehrskonzepterstellung ... 178
5.8.1 Einleitung ... 178
5.8.2 Methode ... 179
5.8.3 Vorgehensweise ... 181
5.8.4 Algorithmus ... 192
5.8.5 Zusammenfassung ... 196
5.9 Modul 9: Verkehrskonzeptbewertung ... 197
5.9.1 Einleitung ... 197
5.9.2 Methode ... 198
5.9.3 Vorgehensweise ... 201
5.9.4 Algorithmus ... 203
5.9.5 Zusammenfassung ... 204

6 Kundenorientierte Bewertung eines Störfallprogramms (Modul 10) 206

6.1 Einleitung ... 206
6.2 Methode ... 206
6.3 Vorgehensweise ... 210
6.4 Algorithmus ... 212
6.5 Zusammenfassung ... 215

7 Anwendungsbeispiel 216

7.1 Einleitung ... 216
7.2 Betriebskonzept ... 218
7.2.1 Modul 1: Machbarkeitsprüfung und Berechnung der veränderten Zugfahrt je Maßnahme ... 218
7.2.2 Modul 2: Funktionsfähigkeit der betroffenen Kanten ... 219
7.2.3 Modul 3: Funktionsfähigkeit der betroffenen Knoten ... 219
7.2.4 Modul 4: Überprüfung der Einschwingfähigkeit ... 220
7.2.5 Modul 5: Ermittlung der mittleren Einschwingdauer ... 224
7.3 Verkehrskonzept ... 228
7.3.1 Modul 6: Verbindungskonflikterkennung ... 228
7.3.2 Modul 7: Konfliktlösungsalternativensuche ... 231
7.3.3 Modul 8: Verkehrskonzepterstellung ... 233
7.3.4 Modul 9: Verkehrskonzeptbewertung ... 234
7.4 Kundenorientierte Bewertung eines Störfallprogramms ... 235
7.5 Zusammenfassung ... 237

8 Abschluss der Arbeit 238

8.1 Wesentliche Ergebnisse ... 238
8.2 Methode und Anforderungen ... 240
8.3 Erkenntnisse und Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten ... 243
8.4 Ausblick ... 244

Verzeichnisse 245

Abbildungsverzeichnis ... 245
Tabellenverzeichnis ... 247
Abkürzungsverzeichnis ... 249
Literaturverzeichnis ... 255

Anlagen 261

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Beeinflussbare wie auch nicht beeinflussbare Vorkommnisse innerhalb und außerhalb des Systems Bahn entstehen zufällig und wirken als Störungen im Bahnbetrieb, da durch deren Auftreten kurzfristig Strecken teilweise oder ganz gesperrt sowie Knoten nicht mehr oder nur noch teilweise befahrbar sind.

Nach DB Fernverkehr AG (2010a, S. 1) sind Großstörungen (im Personenverkehr) Vorkommnisse mit Betriebs- und Infrastruktureinschränkungen großen Ausmaßes, bei denen nicht mehr alle erforderlichen Dispositionsmaßnahmen zeitnah durchgeführt und dokumentiert werden können und eine zugbezogene Fahrgastinformation entsprechend den Standards aus DB Fernverkehr AG (2010b, S. 5) nicht leistbar ist.

Diese Situationen stellen das Betriebspersonal, wie bspw. Disponenten, Kundenbetreuer und Triebfahrzeugführer, vor große Herausforderungen. Eine Ad-hoc-Bearbeitung von Störungen erzeugt einen Arbeitsaufwand für die zuständigen Disponenten, der mit der Größe der Störung wächst und bei großen Störungen, genannt Großstörungen oder Störfälle, aufgrund der Komplexität des Systems nicht mehr ad hoc handhabbar ist.

Das System Bahn gliedert sich klassischerweise in die Komponenten Fahrzeug, Fahrweg und Betrieb, die das Verkehrsangebot für die Fahrgäste bereitstellen, wie in Abbildung 1-1 dargestellt. Im weiteren Verlauf werden die technischen Komponenten Fahrweg (Infrastrukturangebot) und Fahrzeug (Infrastrukturnutzer) zur Infrastruktur zusammengefasst, sodass die drei Einheiten Infrastruktur, Betrieb und Verkehr betrachtet werden.

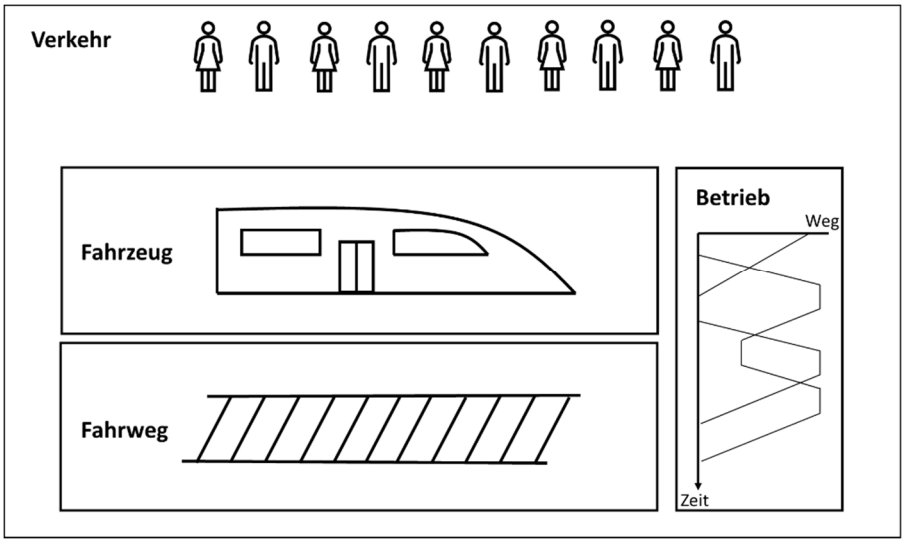


Abbildung 1-1: Komponenten des Systems Bahn (eigene Darstellung)

Umfassende Störfälle in diesem System bewirken massive Einschränkungen des Eisenbahnbetriebs und somit der Mobilität der Fahrgäste. Diese Störfälle können nicht verhindert werden, aber um weiterhin ein attraktives Verkehrsangebot zu erhalten, muss es ermöglicht werden, im Betrieb kontrolliert damit umzugehen. Um Nachteile sowohl für Betriebspersonal als auch Fahrgäste zu reduzieren, ist es notwendig, für das Eintreten von Störungen Vorgehensweisen vorzuhalten, die schnell umgesetzt werden können. Dieses Störfallmanagement unter Verwendung von Störfallprogrammen (SFP) soll es ermöglichen, den Betrieb mit vorher definierter Qualität aufrechtzuerhalten.

Ein vorgeplantes Störfallprogramm beinhaltet die Zugdispositionen nahezu vollständig und erleichtert die Arbeit der Disponenten, da der Störbetriebsablauf bekannt ist und anhand des SFP zügig Maßnahmen ergriffen werden können. Die vorhergehende Planung des Störbetriebs als Störfallprogramm unterstützt die Kommunikation und das Verständnis aller Beteiligten für den gestörten Betrieb.

Die eingeplanten Maßnahmen erzeugen Anpassungen des Betriebs auf der Infrastruktur durch die Veränderung einzelner Zugfahrten und Linien und verändern so auch den Verkehr. Für die Realisierung einer Zugfahrt sind vielfältige Voraussetzungen in Infrastruktur und Betrieb nötig. Durch die Anpassung einzelner Zugfahrten im Störfall entstehen verkehrliche Änderungen. Deren Ausmaße und die verbleibende verkehrliche Qualität sind nicht maßgebend relevant für den Betrieb in einer Störung, aber für die Kundenorientierung eines Störfallprogramms.

Es wird somit bereits in einer vorherigen Planung koordiniert, wie der Störungsbetrieb erfolgen soll. Dies soll den unzuverlässigen Zustand und seine Auswirkungen nach Störungseintritt beschränken, da alle Beteiligten den Zielzustand als Störfallprogramm für den geplanten Störfall kennen.

Aktuell werden Störfallprogramme meist durch erfahrene Mitarbeiter erstellt, die mögliche Auswirkungen der Störung erfassen, passende betriebliche Maßnahmen planen und deren Auswirkungen im Betrieb abschätzen. Ein stabiler – reibungsloser, gegenüber dem SFP planmäßiger und zuverlässiger – Störbetrieb kann aber nur dann erreicht werden, wenn dieser tatsächlich funktionsfähig geplant wurde. Dies kann bisher lediglich durch den Mitarbeiter erfahrungsbasiert abgeschätzt werden. Die Planung der betrieblichen Maßnahmen im Störfall gestaltet sich sehr aufwendig, daher beschränken sich Störfallprogramme meist auf die Betriebsführung, während die Reisendenlenkung im Hintergrund bleibt.

Die Störfallprogramme bilden den nach dem unzuverlässigen Zustand zu Störungseintritt angestrebten stabilen Zustand ab, in dem die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) dem Fahrgast weiterhin ein zuverlässiges betriebliches Angebot zur Verfügung stellen können. Um Zuverlässigkeit zu erreichen, besteht die Konzeption von Störfallprogrammen aber durch die Einschränkung der Infrastrukturverfügbarkeit notwendigerweise auch aus der Reduktion des Betriebes, da dieser entweder technisch nicht mehr machbar ist oder die betriebliche Leistungsfähigkeit aufgrund der Einschränkungen nicht mehr der aus dem Regelbetrieb entspricht.

Ein Störfallprogramm plant somit einen reduzierten Betrieb, der im Störfall funktionieren soll. Durch die Abhängigkeiten von Infrastruktur, Fahrplan, Anschlüssen und Umläufen können die Wechselwirkungen, die eine Maßnahme im Netz erzeugt, bisher bei Erstellung nicht auf einfache Art und Weise durch den Ersteller überprüft werden. Ob die Planung auch tatsächlich funktionieren kann, ist daher meist nur eine auf Erfahrung basierende Abschätzung. Entsprechendes gilt für die Auswirkungen auf den Fahrgast, die aufgrund der Einschränkungen des Betriebes entstehen.

Da bereits die vorhergehende Strukturierung der gestörten Betriebssituation sehr aufwendig ist, begrenzen sich die Inhalte eines Störfallprogramms meist auf die Betriebssituation und die Reisendenlenkung bleibt eher untergeordnet.

Der öffentliche Nahverkehr spielt jedoch eine bedeutsame Rolle bei Förderung und Erhalt von Mobilität und soll zudem im Sinne der Umwelt ausgeweitet und attraktiver gestaltet werden. Fahrgäste nutzen ihn sowohl im beruflichen als auch im privaten Alltag und verlassen sich auf dessen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit zur Umsetzung ihres Mobilitätsbedürfnisses. Ein attraktiver öffentlicher Nahverkehr sollte diese Eigenschaften auch im Störfall ermöglichen. Hierbei sind Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit

nicht nur auf das Angebot des Zugbetriebs einzugrenzen, sondern es ist auch die zugehörige Reisendenlenkung zu berücksichtigen.

Daher sollte der Fahrgast mit seinen Bedürfnissen nicht nur im Hintergrund eine Rolle spielen. Im Sinne von Kundenorientierung ist es wichtig, auch in den Störungen ein Verkehrsangebot zu ermöglichen, das dem Fahrgast eine Durchführung seiner Reise ermöglicht. Bisher ist aber nicht bekannt, wie umfassend die Fahrgäste trotz des betrieblichen Störfallprogramms eingeschränkt sind.

Auch wenn der Nutzen der Störfallprogramme klar erkennbar ist, so benötigt deren Erstellung viel Aufwand und Erfahrung. Die Auswirkungen der Störung und der geplanten Maßnahmen sowie deren Machbarkeit müssen durchdacht, abgeschätzt und gegeneinander aufgewogen werden. Ein Mitarbeiter kann zum aktuellen Zeitpunkt nur dann ein Störfallprogramm erstellen, wenn er über viel Kompetenz und Erfahrung verfügt. Selbst dann ist aber aufgrund der Komplexität des Bahnsystems nicht sichergestellt, dass das Störfallprogramm im spezifischen Störfall schnell und reibungslos ein- und durchführbar ist. Einen reibungslosen Betriebsablauf im Störungsfall können Störfallprogramme aber nur dann gewährleisten, wenn eine tatsächlich umsetzbare und erreichbare Betriebssituation (= stabiler Störzustand, der pünktlich und zuverlässig ist) geplant wurde, auf deren Basis der Fahrgast und das verbleibende Verkehrsangebot Berücksichtigung finden sollten.

1.2 Ziel der Arbeit

Durch die vielfältigen externen Einflüsse kann der Bahnbetrieb nicht gänzlich vor Störungen geschützt werden. Da diese kleinen und größeren Einschränkungen der Infrastrukturverfügbarkeit klassischerweise zu Abweichungen vom geplanten Betrieb führen, erzeugt dies dann auch zwangsweise Auswirkungen auf die Angebotsqualität und deren Wahrnehmung durch den Fahrgast. Dieser erwartet auch in Störungssituationen eine Aufrechterhaltung seiner Mobilität und benötigt dazu zuverlässige Angebote und Informationen.

Ein Eisenbahnverkehrsunternehmen sollte daher im Störungsfall bestrebt sein, den Betrieb so gut wie möglich aufrechtzuhalten und dabei die verkehrlichen Auswirkungen zu begrenzen. Im Falle einer Störung ist es bisher möglich, den zuständigen Disponenten die Arbeit durch vorgegebene betriebliche Maßnahmen in Störfallprogrammen für bestimmte Störfallsituationen zu erleichtern. Deren Anwendung hat sich bewährt, aber ihre Erstellung ist aufwendig und nicht umfassend in Bezug auf die Bewertung der Funktionsfähigkeit und der Auswirkungen auf die Fahrgäste.

Die Planung dieser Störfallprogramme ist weiterzuentwickeln, sodass neben der Steuerung des Betriebs auch die Auswirkungen auf den Fahrgast berücksichtigt werden, mit dem Ziel, ohne großen Aufwand kundenorientierte Störfallprogramme planen zu können. Der Ersteller eines Störfallprogramms benötigt für diese umfassende Problemgröße (teil-)automatisierte Unterstützung. Der Disponent soll bei der Anwendung nur wenige Anpassungen am Störfallprogramm vornehmen müssen, sodass der Fahrgast auch im Störfall weiterhin ein zufriedenstellendes Mobilitätserlebnis erfahren kann.

Aufgrund der aktuellen manuellen, vorhergehenden Planung der gestörten Betriebssituationen wird eine Unterstützung bei der Erstellung und Bewertung von Störfallprogrammen für den deutschen Schienennahverkehr benötigt, was eine Reduzierung des großen händischen Aufwandes der Erstellung von Störfallprogrammen erreicht und sicherstellt, dass das jeweilige Störfallprogramm eine tatsächlich umsetzbare und erreichbare Betriebssituation abbildet und zudem eine Erweiterung um Maßnahmen zur Reisendenlenkung ermöglicht.

Daher konzentriert sich der nun folgende Stand des Wissens nicht nur auf die Möglichkeiten des Störfallmanagements, im Besonderen der Störfallprogramme, in betrieblicher Hinsicht, sondern

erweitert den Blick vom Betrieb auf den Verkehr und die Auswirkungen sowie die Wahrnehmung durch den Fahrgast.

2 Stand des Wissens

2.1 Einleitung

Welche Ereignisse als Störung gelten, ist je nach Bahnsystem und -betreiber unterschiedlich, wobei sie sich im Kern alle darauf beziehen, dass Störungen zu Abweichungen vom Regelbetrieb führen (Schranil und Weidmann 2012, S. 44). Ereignisse innerhalb und außerhalb des Systems erzeugen Störungen der Infrastrukturverfügbarkeit bspw. durch liegengebliebene Züge, Fahrwegstörungen, Unfälle oder auch Witterung (Chu und Fornauf 2011, S. 3). Forschungsarbeiten zum Krisenmanagement zeigen, dass diese Vorkommnisse nicht zu vermeiden sind und es Branchen und Unternehmen gibt, die grundsätzlich Risiken für Störungen ausgesetzt sind, und daher das generelle Ziel besteht, durch aktives Handeln und Vorplanen diese nicht zu umfassend werden zu lassen (Davies und Walters 1998). Dies gilt auch im komplexen System Bahn. Dort erzeugen Störungen ineffiziente Auslastung, Verspätungen und sinkende Kundenzufriedenheit (Chu und Fornauf 2011, S. 1).

Kleinere Abweichungen vom Regelbetrieb erfordern ein dispositives, ausgleichendes Eingreifen, wohingegen Störfälle so starke Abweichungen vom geplanten Regelbetrieb erzeugen, dass sie den Betriebsfluss massiv behindern (Nielsen et al. 2012, S. 496). Diese können beispielsweise massive Verspätungen und Ausfälle zur Folge haben. Das dann notwendige Eingreifen durch die Disposition erfordert umfassende betriebliche Maßnahmen, die in sich und ihren Wechselwirkungen deutlich komplexer sind.

Die ressourcenorientierte Definition von Störungen, gleich welchen Ursprungs, nach Schranil (2013) lautet: „Eine Störung ist ein vom Regelbetrieb abweichender Zustand, dessen Behebung ausserplanmäßige Ressourcen erfordert.“ Diese außerplanmäßigen Ressourcen entsprechen dabei den planmäßigen Ressourcen aus den Bereichen Fahrzeuge, Infrastruktur, Information, Personal und Betrieb. Für den Fahrgast sind dies entsprechend Zeit, Geld und Komfort (Schranil 2013, S. 33).

In diesen umfassenden Störfällen treten meist drei große Handlungsfelder für die Disposition auf: Fahrplan, Fahrzeugumläufe sowie Personal (Jespersen-Groth et al. 2009, S. 404).

Eine Möglichkeit zum Umgang mit Störungen besteht in der fortgesetzten Disposition durch den Disponenten anhand seines Wissens und seiner persönlichen Berufserfahrung, um den Betrieb während der Störung weiter aufrechtzuerhalten und Auswirkungen einzudämmen. Die Berufserfahrung des Disponenten und sehr gute Kenntnisse des Netzes zur Abschätzung der Auswirkungen der Maßnahmen erscheinen dabei erfolgsentscheidend.

Auch für einen erfahrenen Disponenten stellt dies klassischerweise eine große Belastung dar. Dauerhaft hohe Konzentration sowie ständiges Abwägen und Entscheiden sind sehr fordernd und aufwendig und reduzieren möglicherweise die Anzahl und die Qualität der getroffenen Entscheidungen sowie die verfügbare Zeit für die Kundenkommunikation.

Die Qualität der Maßnahmen für Betrieb und Kommunikation hat jedoch einen großen Einfluss auf die betriebliche Funktionsfähigkeit des Netzes und die Intensität der Auswirkungen auf den Fahrgast. Es ist daher festzuhalten, dass für große Abweichungen vom Regelbetrieb, die einem Störfall entsprechen, eine zumindest (teil-)automatisierte Unterstützung für den Disponenten erforderlich wird, um einen zuverlässigen Betrieb zu ermöglichen. Möglichkeiten hierfür werden im anschließenden Abschnitt 2.2 zur Eisenbahnbetriebswissenschaft dargestellt. Abschnitt 2.3 gibt einen Überblick zur Störfalldisposition, während der folgende Abschnitt 2.4 sich auf die Forschung zu Störfallprogrammen konzentriert. In Abschnitt 2.5 die verkehrlichen Aspekte im Störfall erhoben und abschließend erfolgt in Abschnitt 2.6 die Zusammenfassung unter Beschreibung der erkannten Forschungslücken.

2.2 Eisenbahnbetriebswissenschaft

Die Eisenbahnbetriebswissenschaft und ihre zugehörigen Verfahren bilden die Grundlage für betriebliche und wirtschaftliche Entscheidungen bei Netzplanung, Fahrplanung und Betriebsführung. Dabei erzeugen sie einen Zusammenhang zwischen der Auslastung der Infrastruktur und der Fahrplan- oder der Betriebsqualität.

Wechselwirkungen zwischen betrieblicher Infrastruktur, Betriebsprogramm und Beförderungs- bzw. Transportqualität sind Grundlage der Dimensionierung nach Nießen und Schaer (2012) und werden daher im Folgenden kurz dargestellt.

2.2.1 Infrastrukturmodellierung

Infrastrukturmodelle basieren in der Regel auf einer graphentheoretischen Modellierung aus Knoten und Kanten: Ein Knoten stellt dabei einen beliebigen Punkt im Netz dar, der durch eine Kante mit einem anderen Knoten verbunden sein kann (Hansen und Pachl 2014, S. 48 ff.). Diese Modelle können mit unterschiedlicher Granularität aufgebaut sein. Klassischerweise kann es makroskopisch oder mikroskopisch aufgebaut sein, zudem gibt es die Zwischenform der mesoskopischen Modellierung.

Mikroskopische Modellierung

Ein mikroskopisches Modell bildet die Knoten und Kanten in dem Detaillierungsgrad ab, wie es für die zu untersuchende Problemstellung benötigt wird. Sie eignen sich besonders für exakte Berechnungen zu Fahrzeiten, Fahrplanerstellungen und Simulationen sowie zur Konflikterkennung und -lösung, allerdings erzeugen sie einen hohen Daten- und Rechenzeitbedarf und werden daher eher kleinräumig angewendet (Hansen und Pachl 2014; Oetting et al. 2017).

Makroskopische Modellierung

Ein makroskopisches Modell besteht aus aggregierten Informationen, die neben Netzteilen auch das gesamte Netz abbilden könnten. Durch die geringere Anzahl von Kanten und Knoten im Vergleich zur mikroskopischen Modellierung ist die Rechenzeit geringer, dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass durch das Fehlen von exakten Werten, bspw. Geschwindigkeit oder Neigung, keine exakte Fahrzeit berechnet werden kann (Hansen und Pachl 2014, S. 53).

Diesem Problem haben sich Oetting et al. (2017) angenommen, da sie den Mehrwert von netzweiten Aussagen bei attraktiven Rechenzeiten mit Toleranz für kleine Ungenauigkeiten bis zu etwa einer Minute als nutzenbringend für bspw. Gelegenheitsverkehre und weiträumige Linienkonzepte einstufen. Hierzu erarbeiten sie einen makroskopischen Ansatz für Infrastruktur- und Zugmodellierung mit möglichst hoher Genauigkeit, der aber die Vorzüge von geringeren Anforderungen an Datenmenge und -pflege und dem Auslassen von vielen notwendigen Schätzungen für fehlende Daten aufrechterhält.

Um dies zu erreichen, wird eine einheitliche Zwischenebene zwischen Eingangsdaten und makroskopischen Tools eingezogen, in der die Daten unabhängig von Granularität und Bearbeiter einheitlich verwertet werden. Durch die dort erfolgende Fahrzeiten- und Mindestzugfolgezeitenrechnung ist darauf aufbauend eine davon getrennte Konflikterkennung und -lösung möglich.

Dies soll mit einem einheitlichen Infrastrukturmodell und einheitlicher Zugmodellierung realisiert werden. Im graphentheoretischen Modell wird dazu eine Kante nur zwischen betrieblich relevanten Knoten gebildet und nur zwischen Knoten, an denen eine Reihenfolgeänderung möglich ist: Bahnhof, Abzweigstelle, Ausweichanschlussstelle, Anschlussstelle, Bahnhofsteil oder Brechpunkt (Oetting und

Griese 2016, S. 3). Die restlichen nicht kantenbegrenzenden Knoten werden als sogenannte Merkmalsknoten der Kante zugeschrieben.

Oetting et al. (2017) konnten durch eine umfassende Sensitivitätsanalyse ermitteln, dass bei Knoten besonders das Vorhandensein von Alttechnik, Veränderungen der Vorsignalabstände, die Reduzierung der Geschwindigkeiten, verschiedene Zugfolgefälle und die Teilauflösung einflussnehmend auf die Mindestzugfolgezeiten sind. Bei den Kanten sind Fahrzeiten besonders beeinflusst durch Geschwindigkeits- und Neigungsänderungen (insbesondere für den Güterverkehr) und die Mindestzugfolgezeiten durch die Änderung der Geschwindigkeit des ranghöchsten Zuges, die Sicherung durch elektronische Stellwerke (ESTW) statt Alttechnik sowie Veränderungen von Blocklängen und Überholungsabständen.

2.2.2 Betriebsprogramme

Das Betriebsprogramm beschreibt die Zugfahrten eines Untersuchungsraums in unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Dieser reicht vom konkreten Fahrplan bis hin zu gröberen Kenntnissen durch die Beschreibung von Modellzügen.

Fahrplan

Ein Fahrplan legt den Fahrtverlauf eines Zuges vorausschauend fest und beinhaltet Verkehrstage, Laufweg, Gleisbenutzung in den Betriebsstellen, zulässige Geschwindigkeit auf den einzelnen Abschnitten des Laufweges, erforderliches Bremsvermögen, Ankunft -, Abfahr- und Durchfahrzeiten auf den Betriebsstellen sowie sonstige, für die Führung des Zuges erforderliche Angaben. Die Zugnummer kennzeichnet einen durch das Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) zu erstellenden Fahrplan und eine Zugfahrt darf ohne selbigen nicht stattfinden (Pachl 2013, S. 568).

Modellzüge

Der Modellzug ist definiert als Zug, der hinsichtlich seiner Eigenschaften repräsentativ für eine Zugfamilie ist, sodass alle Züge dieser Familie mit gleichen Eigenschaften behandelt werden.

Die Kriterien der Modellzugbildung sind von der erforderlichen Genauigkeit und dem Anwendungsfall abhängig. Nach DB Netz AG (2008e, S. 7 f) ist mindestens zu differenzieren in Zugarten, Laufwege im Betrachtungsraum, den häufigsten Höchstgeschwindigkeiten, Haltemustern im Betrachtungsraum und LZB-Fähigkeit. Zudem können auch Takt, Fahrdynamik, Zuglänge, Zuggattung und sonstige Kriterien miteinbezogen werden. Ein Modellzug sollte aus nicht weniger als drei Zügen gebildet werden.

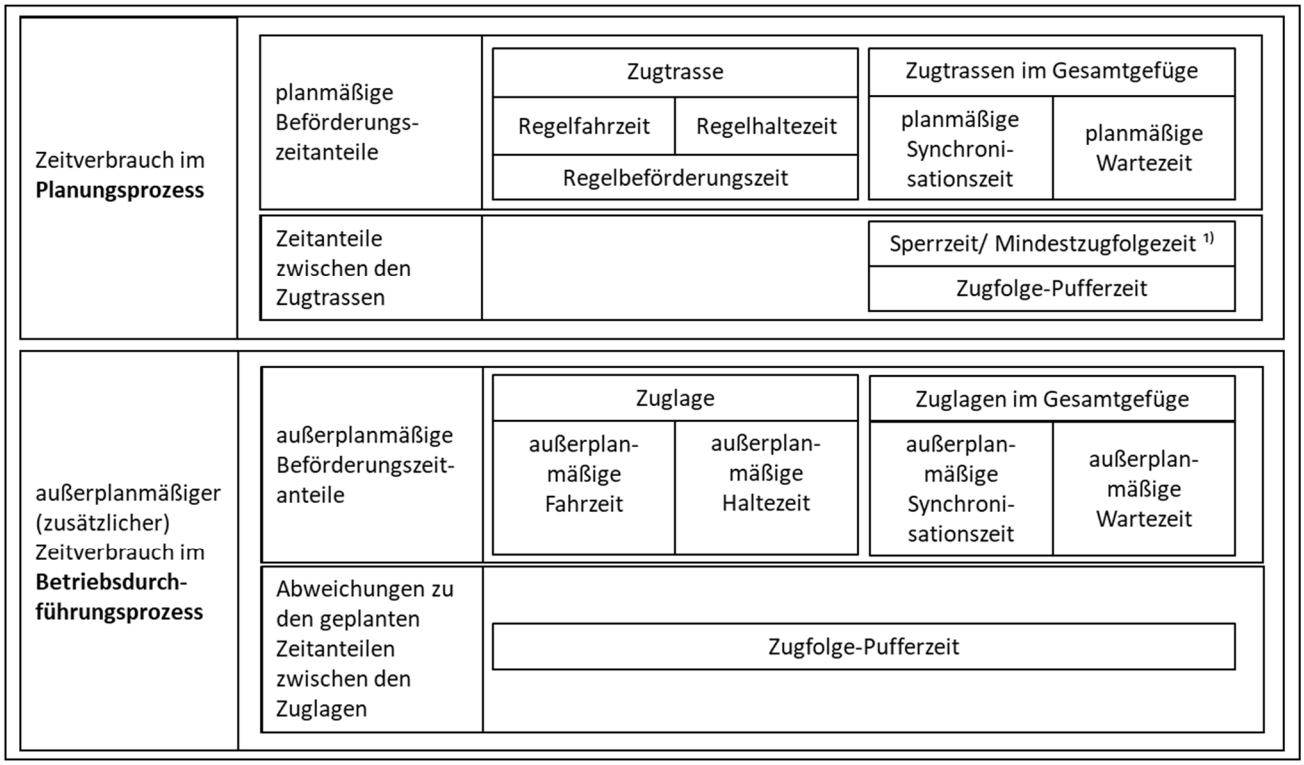
Oetting et al. (2017) erzeugen die Modellzüge anhand des Fahr- und Haltezeitenkonzepts kantenspezifisch – für den Personenverkehr anhand der Fahrzeiten der Kante und für den Güterverkehr anhand der Höchstgeschwindigkeit. Dabei ergeben sich bis zu sechs Modellzüge: ein bis zwei für den Personenfernverkehr, ein bis zwei für den Personennahverkehr und für schnellen und langsamen Güterverkehr.

2.2.3 Zeiten

Abbildungen der Infrastruktur und des Betriebsprogramms werden je nach Aufgabenstellung und verfügbaren Daten unterschiedlich aufbereitet und dienen u. a. als Grundlage zur Ermittlung der in Abbildung 2-1 dargestellten Zeiten.

Planung und Betrieb benötigen für jede Zugtrasse und -lage sowie die Abstimmung innerhalb des Trassen- bzw. Zuggefüges Zeitenanteile. Diese beeinflussen die Nutzung und somit den Verbrauch der Fahrwegkapazität. Sofern nicht im weiteren Verlauf der Arbeit Anpassungen oder Ergänzungen

notwendig sind, gilt die Definition entsprechend der in Abbildung 2-1 zitierten Richtlinie. Weitere Definitionen zu den folgenden Ausführungen sind zudem auch DB Netz AG (2008a) zu entnehmen.



1) Nur der Teil, der nicht zur Fahrzeit gehört

Abbildung 2-1: Überblick über die Zeitverbräuche innerhalb des Planungs- und Betriebsdurchführungsprozesses nach DB Netz AG (2008b, S. 4)

Die Mindestzugfolgezeit z_{ij} ist eine kapazitätsbestimmende Einflussgröße bei Strecken und die dichtest mögliche Zugfolge, mit der ein nachfolgender Zug j einem vorausfahrenden i auf dem gemeinsam benutzten Fahrweg behinderungsfrei folgen kann (DB Netz AG 2008a, S. 12). Maßgebend ist die größte der Mindestzugfolgezeiten, die sich bei Betrachtung der einzelnen Überholungsabschnitte ergibt. Für den maßgebenden Block setzt sich die Mindestzugfolgezeit wie folgt zusammen (Wendler und Nießen 2005, S. 12):

$$z_{ij} = t_{Sp} = t_{fb} + t_s + t_{ai} + t_f + t_r + t_{fa}$$

mit:

z_{ij} Mindestzugfolgezeit vorausfahrender Zug i und nachfolgender Zug j,
t_{fb} Fahrstraßenbildezeit,
t_s Sichtzeit,
t_{ai} Annäherungsfahrzeit,
t_f Fahrzeit im Blockabschnitt,
t_r Räumfahrzeit und
t_{fa} Fahrstraßenauflösezeit.

Diese sind in Abbildung 2-2 als Zeit-Wege-Diagramm dargestellt.

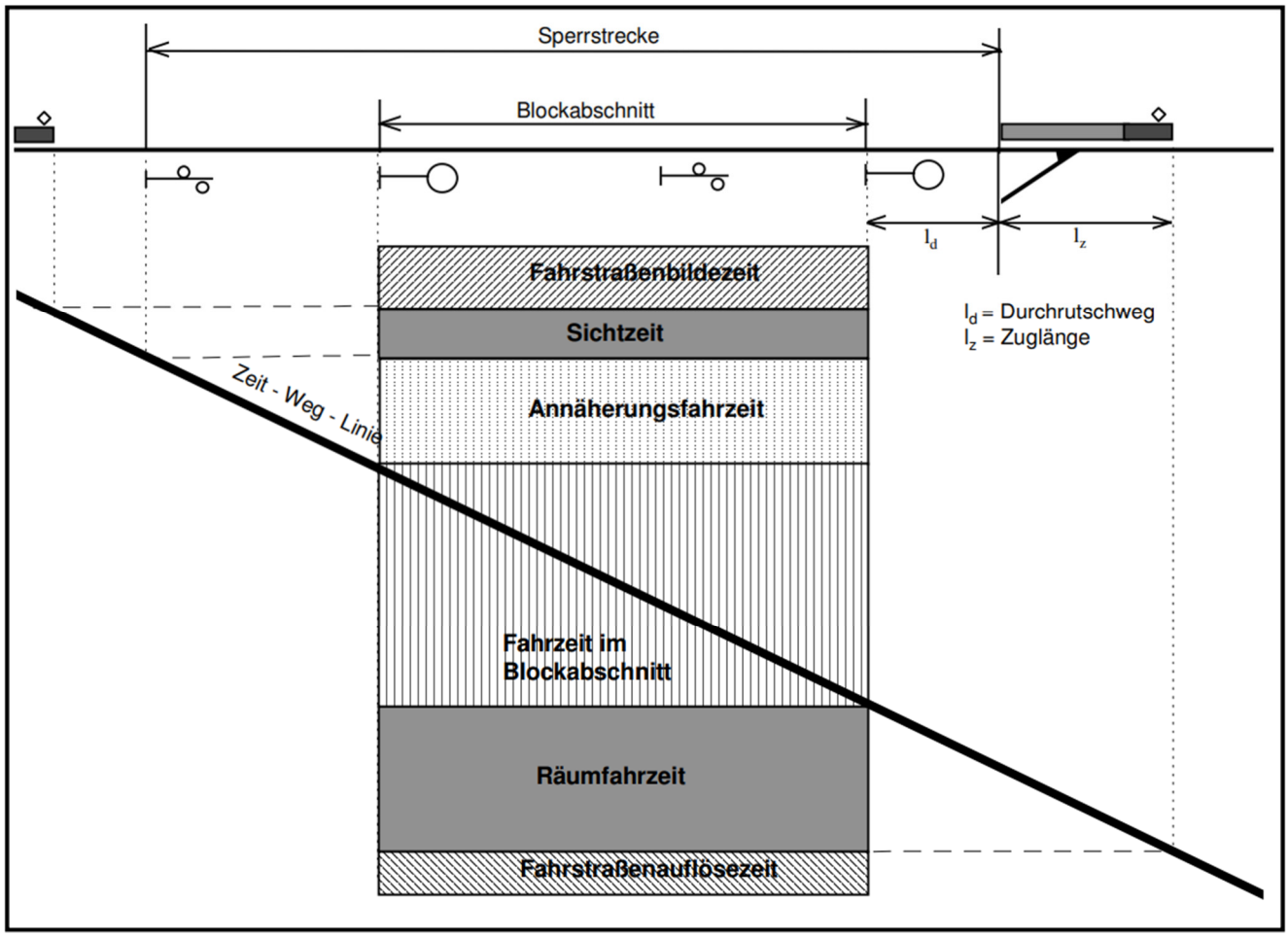


Abbildung 2-2: Sperrzeitanteile eines durchfahrenden Zuges nach DB Netz AG (2008b, S. 12)

Zwischen den Sperrzeiten der beiden Züge im für die Mindestzugfolgezeit maßgebenden Block wird im Regelfall eine Zugfolge-Pufferzeit t_p dazwischen eingeplant. Diese entspricht „der Zeitdauer, um die ein vorausfahrender Zug verspätet sein könnte, ohne den nachfolgenden Zug zu behindern“ (DB Netz AG 2008b, S. 16). So soll ein Verspätungsübertrag des vorausfahrenden Zuges auf den folgenden Zug in Höhe der Pufferzeit verhindert und im besten Fall ein behinderungsfreier Betrieb erhalten werden.

Um die Belastung eines Abschnitts zu ermitteln, kann der Belegungsgrad, der Grad der zeitlichen Auslastung eines Fahrwegabschnitts, durch Sperrzeiten ermittelt werden (Pachl 2013, S. 143). Hierzu ist zunächst die mittlere Mindestzugfolgezeit zu berechnen, wobei der Zusammenhang gilt: Wenn die mittlere Mindestzugfolgezeit sinkt, steigt die Leitungsfähigkeit. Diese ergibt sich als Mittel aus den Zugfolgefällen, deren Auftretenswahrscheinlichkeit und den zugehörigen Mindestzugfolgezeiten der Zugfolgefälle:

$$\bar{z} = \sum (z_{ij} \cdot p_{ij})$$

mit:

$\bar{z}$ mittlere Mindestzugfolgezeit,

z_{ij} Mindestzugfolgezeit des Zugfolgefalls Zug i vor Zug j und

p_{ij} relative Häufigkeit des Zugfolgefalls Zug i vor Zug j.

2.2.4 Leistungsfähigkeit und eisenbahnbetriebswissenschaftliche Verfahren

Nachdem die für die Ermittlung der Zeiten benötigten Eingangsgrößen dargestellt wurden, wird nun auf deren Aufbereitung zur Untersuchung des Leistungsverhaltens eingegangen.

Die Leistungsfähigkeit wird ermittelt, um die Abwicklung von Betriebsprogrammen auf einer Infrastruktur zu prüfen, um entweder die Infrastruktur passend zu dimensionieren oder um das Betriebsprogramm für die verfügbare Infrastruktur durchführbar zu gestalten. Je mehr Zugfahrten verkehren, desto eher kann es zur Behinderungen kommen, die zu Wartezeiten führen (Weigand et al. 2016, S. 295).

Wartezeiten können in planmäßige und außerplanmäßige differenziert werden (siehe Abbildung 2-1). Planmäßige entstehen bei Fahrplankonstruktion, außerplanmäßige entstehen durch Verspätungen im Betrieb. Für die Unterscheidung von Verspätungsarten kann bspw. auf DB Netz AG (2008f, S. 1) und Heister et al. (2006, S. 296 f.) verwiesen werden.

Die auftretenden Wartezeiten sind ein Maßstab für die Betriebsqualität und ergeben sich für das untersuchte Netzelement in Abhängigkeit von der Belastung, sodass eine Wartezeitfunktion das Leistungsverhalten beschreibt (Pachl 2013, S. 129). Die Belastung ist dabei der Durchsatz von Zügen je Zeiteinheit, dabei gibt der Belegungsgrad die zeitliche Auslastung eines Fahrwegabschnitts durch Sperrzeiten aus (Pachl 2013, S. 254). Der Belegungsgrad kann als Einzelbelegungsgrad (für einen Fahrwegabschnitt, der insgesamt freizumelden ist) oder als verketteter Belegungsgrad (nacheinander betrieblich beanspruchte Fahrwegabschnitte, die getrennt freizumelden sind) berechnet werden (DB Netz AG 2008c, S. 27). Daher ergibt sich der Einzelbelegungsgrad als Verhältnis aus der Summe aller Sperrzeiten des Auswertezeitraums zu diesem und der verkettete Belegungsgrad entsteht aus dem Verhältnis aus der Summe aller Mindestzugfolgezeiten des Auswertezeitraums zu diesem. In DB Netz AG (2008c) und International Union of Railways (2013) werden Richtwerte für zulässige verkettete Belegungsgrade empfohlen. Der Belegungsgrad erlaubt keinen direkten Schluss auf die tatsächlich zu erwartende Betriebsqualität, kann jedoch als grober Richtwert verwendet werden (DB Netz AG 2008c, S. 28).

Für eine kundengerechte Betriebsqualität bei optimaler Auslastung ist ein Bereich innerhalb der Wartezeitfunktion zu bestimmen, in dem die reale Belastung des Systems liegen sollte. Die Wartezeitensumme im Betrieb wird auf eine geforderte Betriebsqualität begrenzt. Diese tolerierten Wartezeiten stellen sich bei der Nennleistung ein. Die Nennleistung stellt die Anzahl fahrbarer Züge im betrachteten Zeitraum, auf verfügbarer Infrastruktur, innerhalb einer Fahrplanstruktur und mit Reservezeiten, die unter Einhaltung der gewünschten Qualität planmäßig einlegbar sind, dar (Weigand et al. 2016, S. 296).

Für die Berechnung der Wartezeiten, die sowohl in der Planung (planmäßige Wartezeiten) als auch im Betrieb (außerplanmäßige Wartezeiten) auftreten können, gibt es unterschiedliche eisenbahnbetriebswissenschaftliche Verfahren.

Für Analyse und Datenerhebungen gibt es die *statistisch/deterministische Methode*, die oftmals vorbereitend zu den anderen Methoden eingesetzt wird. Daten (z. B. Infrastruktur- und Betriebsprogrammdaten, Zugströme, bauliche und betriebliche Hauptgleiskonfliktzahlen) können für

einen Ist-Zustand erfasst und aufbereitet werden, sodass in Teilen Qualitätsaussagen möglich (z. B. bei Verspätungsanalysen) sind. Aussagen zur Leistungsfähigkeit oder zur Bemessung ergeben sich bei dieser Methode jedoch nicht (DB Netz AG 2008d, S. 2).

Für Planungen, bei denen der Fahrplan bereits feststeht oder in Grundzügen bekannt ist, können *konstruktive Verfahren und Simulationen* eingesetzt werden (Nießen 2008, S. 17).

Die *konstruktive* Methode verwendet Sperrzeiten und Sperrzeitentreppen, die sich aus den Zeitverbräuchen der Zugfahrten bzw. Rangierfahrten ergeben. Hierbei werden Konflikte als Überlagerungen dargestellt. Kenngrößen beziehen sich daher im Wesentlichen auf die Zeitverbräuche und die Anzahl der erkannten Konflikte. Ergebnisse gelten immer ausschließlich für den untersuchten Raum und die engen Rahmenbedingungen, die für die Untersuchung festgelegt wurden (DB Netz AG 2008d, S. 7).

Als konstruktive Methode zur Ermittlung des Kapazitätsverbrauchs ist die Kompressionsmethode nach International Union of Railways (2013) geläufig. Dabei werden die Sperrzeiten komprimiert (aneinandergeschoben) und so die Gesamtbelegung ermittelt. Diese kann ins Verhältnis zum Untersuchungszeitraum gesetzt werden und bildet somit einen verketteten Belegungsgrad ab. Die Richtlinie legt zudem empfohlene Maximalwerte fest und bildet so lediglich einen indirekten Qualitätszusammenhang ab. Für den Kapazitätsverbrauch wird zur Sicherung der Betriebsqualität eine Zusatzzeitrate ergänzt. Der Belegungsgrad ergibt sich somit als:

$$\rho_{UIC} = \frac{t_B \cdot (1 + \text{Zusatzzeitrate})}{t_U}$$

mit:

ρ_{UIC} Belegungsgrad nach UIC-Kodex 406,
t_B Belegungszeit und
t_U festgelegter Untersuchungszeitraum.

Für die Zusatzzeitraten wird unterschieden in Knoten und Strecke sowie in Teilen in Spitzenzeit (4 Stunden) und 24 Stunden.

Tabelle 2-1: vorgeschlagene Grenzwerte nach International Union of Railways (2013, S. 29 f.)

		Zusatzzeitrate		**verketteter Belegungsgrad**	
Knoten	Weichenbereich	67 % - 25 %		60 % - 80 %	
	Gleisbereich	150 % - 100 %		40 % - 50 %	
		Spitzenzeit	24 h	Spitzenzeit	24 h
Strecken	reine Vororte-Personenverkehrsstrecke	18 %	43 %	85 %	70 %
	reine Hochgeschwindigkeitsstrecke & Mischverkehrsstrecke	33 %	67 %	75 %	60 %

Eine *Simulation* kann synchron oder asynchron erfolgen. Bei einer synchronen Simulation wird der Betrieb anhand aller Zugfahrten gleichzeitig in Zeitschritten betrachtet. Bei der asynchronen Simulation

werden Rangordnungen verwendet. Je nach Tool können beliebige Betriebsprogramme, unterschiedliche Variationsarten und Dispositionsvorgehen simuliert und auf Konflikte untersucht werden (DB Netz AG 2008d, S. 9).

Bei mittel- und langfristigen Planungshorizonten liegt ein Fahrplan meist nicht vor, sodass hierfür *analytische Modelle* eingesetzt werden (Ferchland und Körner 2004, S. 500). Hier wird nur mit prognostizierten Zugzahlen gearbeitet, aus denen dann im Planungsprozess verschiedene Fahrpläne erzeugt werden können. Es können dabei Kenngrößen, wie bspw. die Auslastung der Infrastruktur und die Fahrplan-/Betriebsqualität auf Netzelementen (ein-/zweigleisige Strecke, (Teil-)Fahrstraßenknoten und Gleisgruppen), ermittelt werden (Weigand et al. 2016, S. 301 f.). Sie basieren auf der Bedientheorie oder der Wahrscheinlichkeitstheorie (Vakhtel 2002, S. 51).

Bei analytischen Modellen mit Bedientheorie wird ein Zusammenhang zwischen Auslastung und Wartezeiten durch Stauerscheinungen erzeugt (Janecek et al. 2012, S. 33). Bei den Warteschlangenmodellen werden als „Kenngrößen die mittlere Wartezeit oder die Wartewahrscheinlichkeit der Forderungen bestimmt“ (Nießen 2008, S. 17). Für die Beschreibung der Wartesysteme wird klassischerweise die Kendall-Notation verwendet, die Ankunftsprozess, Bedienprozess, Anzahl der Bedienstellen und die Anzahl der Plätze im Warteraum enthält (Hansen und Pachl 2014, S. 118).

Bei einer fahrplanunabhängigen Berechnung errechnet sich der Belegungsgrad als Verhältnis aus Ankunftsrate λ und Bedienrate μ:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}.$$

Berechnung der Ankunftsrate:

$$\lambda = \frac{1}{t_{Am}}.$$

Liegt unter Berücksichtigung aller verkehrenden Linien ein gleichbleibender Takt auf der Strecke vor, so ergibt sich eine gleichmäßige Ankunftsverteilung, wodurch $t_{Am} = t_{Takt} = \frac{T_U}{n}$ gelten.

Wenn die Ankünfte am Bahnhof nicht gleichbleibend vertaktet sind, ergeben sich unterschiedlich kleine und große Ankunftsabstände und somit verschiedene Zeitfenster für die Bedienung. Bei einer ungleichen Ankunftsverteilung ist daher ein Mittel zu bilden, es gilt:

$$t_{Anm} = \sum_{F=1}^{n} \frac{x_{t_{U,F_n}} \cdot t^2_{Am,F_n}}{t_U},$$

dabei gilt

$$\sum_{F=1}^{n} \frac{x_{T_{U,F_n}} \cdot t_{AmFn}}{t_U} = 1$$

mit:

λ Ankunftsrate,

t_{Am} mittlerer Ankunftsabstand,

$t_{Am,Fn}$ Ankunftsabstand des Folgefalls F_n,

n Anzahl der vorhandenen Folgefälle F und

$x_{t_{U},F}$ Anzahl des Auftretens der Ankunft des Folgefalls F im Zeitraum t_U.

Berechnung der Bedienrate:

$$\mu = \frac{1}{t_{Bm}}.$$

Steht nur ein Gleis zur Bedienung zur Verfügung, müssen alle Fahrten jeglicher Art (Wende, Halt und Durchfahrt) dort abgewickelt werden, und es gilt:

$$t_{Bm} = \sum_{L=1}^{n} \frac{x_L}{\sum_{L=1}^{n} x_L} \cdot t_{Bm,L}.$$

Stehen mehrere Gleise i zur Bedienung zur Verfügung, so kann eine Aufteilung erfolgen und es gilt somit:

$$t_{Bm} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{N} \left(\sum_{L=1}^{n} \frac{x_{L,i}}{\sum_{L=1}^{n} x_{L,i}} \cdot t_{Bn,L,i} \right)$$

dabei gilt:

$$\sum_{L=1}^{n} \frac{x_L}{\sum_{L=1}^{n} x_L} = 1$$

mit:

t_{Bm} mittlere Bediendauer,

$t_{Bm,L}$ Bediendauer der Linie L,

n Anzahl der verkehrenden Linien L,

N Anzahl der verfügbaren Wendegleise i und

x_L Anzahl des Auftretens der Bedienung der Linie L im Zeitraum t_U.

Für das *Wartesystem* M/G/1/∞ wird nach Schwanhäußer (1974, S. 49) die mittlere Wartezeit wie folgt bestimmt:

$$t_{Wm} = \frac{1}{2} \cdot t_{Bm} \cdot \frac{\rho}{(1-\rho)} \cdot (1 + V_B^2)$$

mit:

t_{Wm} mittlere Wartezeit und

V_B Variationskoeffizient.

2.2.5 Konflikte: Arten, Erkennung und Lösung

Konflikte entstehen, wenn die Bindung zwischen zwei Zugfahrten oder der Zugfahrt und der Infrastruktur nicht wie im Rahmen der Planung vorgesehen oder für den Betrieb eigentlich geplant realisiert werden kann.

Konfliktarten

Nach Pferdmenges und Schaefer (1995) gibt es Bindungen zwischen Zugfahrten und Infrastruktur, aus denen vier Konfliktarten – Verfügbarkeits-, Belegungs-, Anschluss-, Umlauf- bzw. Personalumlaufkonflikte – resultieren können, die durch das Nichteinhalten der Bindungszeit entstehen.

Verfügbarkeitskonflikte treten auf, wenn Züge ein nicht zugängliches oder befahrbares Netzelement nutzen sollen. Die Bindungszeit ist hierbei die Mindestzugfolgezeit (bzw. die Sperrzeit).

Die anderen drei Konfliktarten entstehen durch die Bindung zweier Züge.

Belegungskonflikte treten auf, wenn die Belegungszeit des zweiten Zuges für ein Netzelement vor dem Ende der Belegungszeit des ersten Zuges beginnen soll. Die Bindungszeit ist hierbei die Mindestzugfolgezeit (bzw. die Sperrzeit) + Pufferzeit.

Anschlusskonflikte entstehen, wenn der geplante Übergang von Fahrgästen vom Zubringer auf den Abbringerzug nicht möglich ist. Hierbei wird die Ankunft des Zubringers soweit verzögert, dass die Bindungszeit, die der Mindestübergangszeit der Reisenden entspricht, nicht verfügbar ist.

Umlauf- bzw. Personalkonflikte entstehen, wenn der geplante Übergang von Fahrzeug oder Personal nicht möglich ist. Hierbei wird die Ankunft des Zubringers soweit verzögert, dass die Bindungszeit, die der Mindestwendezeit oder -übergangszeit der Fahrzeuge oder Personale entspricht, nicht verfügbar ist.

Konflikterkennung

Die *Konflikterkennung* wird für einen ausgewählten Untersuchungszeitraum durchgeführt, wobei ein Konflikt vorliegt, wenn die oben genannten Bindungszeiten nicht eingehalten werden oder Wartezeiten nach Pferdmenges und Schaefer (1995) entstehen.

Konfliktlösung

Für die *Konfliktlösung* (KL) bei Bindung zweier Züge bestehen die grundlegenden Möglichkeiten der zeitlichen und der räumlichen Konfliktlösung sowie den (Teil-)Ausfällen. Hierzu findet sich bspw. in Kümmling (2014) eine Zusammenstellung der Möglichkeiten.

Konflikte treten sowohl im Betrieb als auch in der Planung von Fahrplänen auf. Die Fahrplanerstellung befasst sich mit der Planung von Zeiten und Reihenfolgen für Güter- und Personenzüge auf der Grundlage von gewählten Routen. In Abhängigkeit von bspw. Netzstruktur, Verkehrsmenge oder beteiligter Zugarten wird die Anzahl der Lösungen sehr umfangreich, sodass die Konfliktlösung als NP-schweres Problem gilt (D'Ariano 2008, S. 31). Kroon et al. (1997, S. 491) weisen bspw. nach, dass das Routing im Knoten NP-vollständig ist, sobald ein Zug drei Fahrtmöglichkeiten hat. Für NP-schwere Probleme wird allgemein angenommen, dass diese nicht in polynomieller (NP) Zeit exakt lösbar sind (Dorigo und Stützl 2004). Selbst kleine Probleme dieser Komplexität sind somit durch deterministische Rechner nicht mehr in überschaubarer Zeit lösbar.

Methoden zur Bearbeitung NP-schwerer Probleme

Einfache Heuristiken wurden problemspezifisch entwickelt und sind nur für diese oftmals sehr eng gefassten Problemstellungen anwendbar und werden klassischerweise in Konstruktions- und Verbesserungsverfahren aufgeteilt. Metaheuristiken hingegen sind Lösungsstrategien und Konzeptsammlungen, die grundsätzlich auf jede Problemstellung angepasst werden können und sich dabei einfachen oder problemspezifischen Heuristiken bedienen sowie ein angepasstes Lösungsverfahren in Form eines problemspezifischen Algorithmus durch den Lösungsraum steuern (Hillier und Lieberman 2001, S. 617). Es finden sich unterschiedliche Kategorisierungen der Metaheuristiken, so werden sie häufig bspw. in individuenbasierte und populationsbasierte Verfahren aufgeteilt (Deroussi 2016, S. 39).

Einfluss auf das Finden einer optimalen Lösung nimmt die Balance zwischen Verwendung bekannter Informationen bspw. aus vorhergehenden Iterationsschritten (Exploitation) und der freien Suche im Lösungsraum (Exploration). Eine zu starke Gewichtung der Exploitation kann zum Verfangen in einem lokalen Optimum führen und eine zu starke Gewichtung der Exploration erzeugt eine ungerichtete Zufallssuche. Eine ausgewogene Balance zwischen diesen beiden Extremen unterstützt die gezielte und effiziente Suche (Lukas 2012, S. 13).

Viele *individuenbasierte* Metaheuristiken verwenden eine lokale Suche. Diese beginnt mit einer initialen Lösung L und versucht wiederholt, die bestehende Lösung durch lokale Veränderungen im Rahmen der definierten, problemspezifischen Nachbarschaft N zu verbessern. Die genaue Untersetzung hängt vom vorliegenden Problem und dem gewählten Verfahren ab, wobei für alle Metaheuristiken, ebenso wie für Heuristiken, gilt, dass zu den gefundenen Lösungen nicht bekannt ist, ob diese nur lokal-optimal oder global-optimal sind. Zu den bekannten Verfahren gehören bspw. der Bergsteigeralgorithmus, Tabu Search und Simulated Annealing.

Der Bergsteigeralgorithmus sucht immer nach einem höheren Wert. Wenn er keinen mehr findet, beendet er die Suche mit dem gefundenen lokalen Optimum. Um das Verfangen im lokalen Optimum zu vermeiden, können mehrere Startpunkte verwendet oder zufällige Mutationen in beliebige Richtungen vorgenommen werden.

Tabu Search legt eine Liste nicht zu berücksichtigender Züge oder Lösungen für den aktuellen Lauf an, um Wiederholungen zu vermeiden. Nach Abschluss des Laufs wird die Liste nach Bedarf und Vorgabe aktualisiert.

Simulated Annealing erlaubt zu Beginn erst größere und später dann nur noch kleinere Verschlechterungen der neu gefundenen Lösung, um so lokalen Optima zu entfliehen.

Weitergehend sind diese Heuristiken bspw. in Hillier und Lieberman (2001, S. 617 ff.) beschrieben.

Zudem gibt es naturinspirierte *populationsbasierte* Metaheuristiken mit evolutionären Algorithmen, die u. a. Schwarmintelligenz nachbilden, wie bspw. Ameisenalgorithmen, die das Wegsuchverhalten der Ameisen modellieren. Diese Art von Algorithmen verwendet statt einer Nachbarschaft eine Fitnessfunktion, die die gefundenen Mutationen bewertet.

Grundsätzlich gilt für alle Metaheuristiken, dass sie auf das vorliegende Problem anzupassen sind, da es nach dem No-Free-Lunch-Theorem von Wolpert und Macready (1997) keinen Algorithmus gibt, der über die Menge aller Probleme hinweg betrachtet besser sein kann als eine zufällige Suche. Es gilt danach auch, dass, wenn ein Verfahren in einem Teilproblem besser funktioniert, es in einem anderen schlechter sein muss.

Den Verfahren ist somit gemein, dass sie problemspezifisch anzupassen sind und nicht generisch für das gesamte vorliegende Problem eine Lösung finden können. Es lässt sich zudem erkennen, dass zur

rechenzeitarmen Bearbeitung von komplexen Problemen klassischerweise folgende Methoden einzeln und kombiniert verwendet werden:

- grobe Modellierung des Inputs: Je gröber der Input ist, desto weniger kleinteilige Kombinationen ergeben sich für die Modellierung einer Lösung.
- Begrenzung des Lösungs(zeit)raums: Um NP-schwere Problemen zu lösen, werden potenzielle Lösungen ausgeschlossen. Bei einer Begrenzung des Lösungsraums können durch Analogschlüsse die Strukturen von Teillösungen für die Gesamtlösung genutzt werden.
- Heuristiken, um den Lösungs(zeit)raum nur teilweise zu durchsuchen: Hierzu gehört bspw., dass bei vielen Lösungsansätzen statt der Möglichkeit der globalen Suche eine lokale Suche verwendet wird, die nur in der unmittelbaren Nachbarschaft nach einer Lösung sucht.
- Aufteilung in Teilprobleme: Zerteilung des Problems in Teilmengen, basierend auf der Annahme, dass je kleiner das zu untersuchende Problem ist, desto eher wird eine Lösung in adäquater Zeit gefunden.
- Einschränkung der zu berücksichtigenden Lösungsarten: Ähnlich einer Inkrementalanalyse können durch Variationen nur einer oder weniger Variablen Verbesserungen einer Lösung erreicht werden. Die anderen Lösungsarten oder Variablen werden nicht untersucht und somit die Rechenzeit verkürzt.
- Festlegung von Abbruchbedingungen: Um eine adäquate Rechenzeit zur Problemlösung zu erhalten, kann der Algorithmus durch festgelegte Kriterien nach Abschluss einer Iteration auf diese überprüft und terminiert werden. Hierzu gehören u. a.:
  - Anzahl Iteration: garantiert eine vorhersehbare Länge des Laufs, wobei die Resultate des Laufs nicht berücksichtigt werden
  - Zeitlimit: festgelegte Zeitspanne, die zur Verfügung steht, sodass nach Abschluss einer vollständigen Generation terminiert wird
  - Fitnessänderung: Läufe werden abgebrochen, wenn sich die beste Lösung seit einer bestimmten Anzahl an Generationen nicht mehr um einen festgelegten Schwellenwert verbessert hat.

2.3 Störfalldisposition

Das Ziel in Störfallen besteht darin, „die Fahrgastinformation zu gewährleisten, den Überblick über betroffene Züge und Ressourcen zu behalten und eine schnellstmögliche Rückführung der Situation in einen (angepassten) Regelbetrieb bzw. ein robustes Grundangebot zu koordinieren“ (DB Fernverkehr AG 2010a, S. 2).

Dazu steht für die Disposition eine Vielfalt an Maßnahmen zur Verfügung, siehe Tabelle 2-2, über deren Einsatz situationsabhängig zu entscheiden ist. Diese Maßnahmen können bei einer Störung mit vollständiger Einschränkung der Verfügbarkeit, aber auch bei verbleibender Eingleisigkeit, angewendet werden.

Tabelle 2-2: betriebliche Maßnahmen nach DB Regio AG (2013b, S. 38)

Maßnahmenkategorie		Maßnahmen
betriebliche Entscheidungen	umfahren	Umleitung von Zügen (Umfahren einer Teilstrecke bzw. Fahren einer anderen Strecke)
		anderer Fahrweg (z. B. Weiche umfahren; im Gegengleis fahren; andere Bahnsteige benutzen; Halte bleiben wie geplant bestehen)
	weniger Verkehr	Linie streichen (Totalausfall aller Züge)
		Linie verkürzen (fährt nicht bis zu Endbahnhof)
		Linie brechen (Linie an einem Punkt geteilt; einige Betriebsstellen der Linie werden nicht bedient)
		Ausfall von bestimmten Halten (Zug fährt vorbei, aber hält dort nicht, z. B. wegen Überfüllung, Sicherheit, Zeitgründen (letzte Möglichkeit))
		Kapazitätsanpassung (Taktausdünnung – systematischer Ausfall von Zügen unter Berücksichtigung parallel verlaufender Linien)
		Zugausfall (einzelner Zug fällt auf der gesamten Strecke aus)
		Flügeln/Zusammenlegen von Zügen auf gestörten Streckenabschnitten
		Zugteilausfall (einzelner Zug fällt auf Teilen der Strecke aus; wenn alle Züge der Linie betroffen sind, dann siehe „Linie brechen“ bzw. „Linie verkürzen“)
	mehr Verkehr	zusätzliche Halte (Zug hält, obwohl er sonst vorbeifährt)
		Kapazitätsanpassung (Sonderzüge, Zusatzzüge, Taktverdichtung)
		Kapazitätsanpassung (mehr Wagen am bestehenden Zug)

Da die Situation im Störfall komplex und unübersichtlich sein kann, gibt es mehrere Ansätze, um die Disponenten in diesen Situationen zu unterstützen.

2.3.1 Modelle und Methoden der Entscheidungsunterstützung im Störfall

Modelle und Methoden, die eine Entscheidungsunterstützung der Disposition bei Abweichungen vom Regelbetrieb ermöglichen sollen, können entsprechend der einschlägigen Literatur unterteilt werden in echtzeitbasierte Modelle und in vorgeplante Rückfallkonzepte.

Cacchiani et al. (2014) geben einen umfassenden Überblick über Modelle und Algorithmen zur Umplanung in Echtzeit. In dieser Übersicht wird die Literatur in zwei Arten von Abweichungen vom Regelbetrieb (klein und groß) und zwei Modellierungsarten (mikro- und makroskopisch) eingeteilt.

In der Arbeit wird zu dem Schluss gelangt, dass sich die meisten Entscheidungsunterstützungsmodelle auf die kleineren Abweichungen konzentrieren und dabei oftmals auf mikroskopischer Ebene erstellt werden. Aufgrund der Problemgröße konnten jedoch wenige Referenzen ermittelt werden, die sich mit

großen Abweichungen, somit Störfällen, befassen, in denen eine Vielzahl von Dispositionsentscheidungen abzubilden wäre. Zum einen können da die Ansätze genannt werden, die sich nur auf eine sehr spezifische, eingeschränkte Problemstellung als Störfall beziehen, wie bspw. Albrecht et al. (2013) für das Auftreten von Instandhaltungsarbeiten, die länger als geplant benötigen und somit Verspätungen erzeugen oder Narayanaswamia und Rangaraj (2013), die eine partielle Störung einer eingleisigen Strecke betrachten. Eine umfassendere Problemstellung nutzt bspw. der mikroskopische Ansatz von Corman et al. (2011), wobei sowohl der entwickelte zentrale als auch der verteile Ansatz in Experimenten mit zunehmenden Zeithorizonten nicht in ausreichend kurzer Zeit, die in der echtzeitbasierten Modellierung notwendig ist, machbare Fahrpläne erzeugen konnten. Das makroskopische Modell von Nakamura et al. (2011) verwendet die drei vorgegebene Eigenschaften von Zuggruppen, Zugausfallbereichen und Wendemustern. So können innerhalb von fünf Minuten Fahrpläne erstellt werden, deren Effizienz anhand der auf Fahrgastunzufriedenheit durch Verspätungen beurteilt wird. Wenn die echtzeitbasierten Ansätze in kurzer Zeit Lösungen ermitteln wollen, so nutzen sie dazu eine starke Einschränkung des betrachteten Problems. Um das Problem umfassender zu betrachten, gibt es daher die vorgeplanten Rückfallkonzepte, bei denen nicht innerhalb weniger Minuten die Lösung erarbeitet sein muss.

Ghaemi et al. (2017) kritisieren, dass vorgeplante Rückfallkonzepte zu statisch sind und streben eine mikroskopische Modellierung von Störfall und Netz an. Dazu ordnen sie Modelle und Algorithmen, entsprechend ihrer Anwendbarkeit in drei von ihnen festgelegten Störfallphasen in Form eines Badewannenmodells zu und berücksichtigen dabei die Modellierungsart und Ergebnisform.

Dieses Badewannenmodell unterteilt die Störung in

- eine erste Phase zu Beginn, in der der Betrieb zunächst stark abnimmt und ein Plan zum Übergang vorliegt, gefolgt von
- einer zweiten Phase mit Verkehr auf einem gleichbleibend niedrigen Niveau und einem betrieblichen Rückfallkonzeptfahrplan und abschließend
- einer dritten Phase mit Plan zum Übergang zurück in den Regelbetrieb.

Für die erste Phase werden die Erkenntnisse von Chu und Oetting (2013a) betrachtet, die eine Untersuchung des Kapazitätsverbrauchs bei Wenden durchgeführt haben. Der dort nicht adressierte Kapazitätsverbrauch im Knoten wird als wichtig erachtet und durch Ghaemi et al. (2017) aufgearbeitet. Umfassender untersucht allerdings Crespo Materna (2020) die Möglichkeiten zur Entscheidungsunterstützung in der ersten Phase.

Ghaemi et al. (2017) verweisen für die Umsetzung und ggfs. die Notwendigkeit der Anpassung des Rückfallkonzepts an eine von der Vorplanung abweichende Lage auf die alle drei Phasen umfassenden Modelle von Nakamura et al. (2011), die anstreben, eine Verspätungsverbreitung zu verhindern, und auf das Modell von Veelenturf et al. (2015), das eine Verspätungsminimierung und Reduktion von Ausfällen enthält. Erweiternd dazu sind vor allem Steinbach und Crespo Materna (2021) zu nennen, die die Möglichkeiten zur integrierten Anpassung aller geplanten Maßnahmen des Rückfallkonzepts an infrastrukturelle Abweichungen adressieren.

Für die dritte Phase und die Umsetzung einer Rückführung in den Regelbetrieb werden verschiedene Modelle vorgeschlagen, die dazu dienen, in Kombination einen Überblick für die Rückführung zu erreichen. Dazu wird für die Umlauf- und Personalplanung das Modell von Jespersen-Groth et al. (2009) vorgeschlagen und aus den drei Phasen-Modellen können die ausgestellten und verkürzten Fahrten abgeleitet werden. Es wird allerdings kein Modell zur dezidierten Entscheidungsunterstützung vorgestellt. Ergänzend ist Pilot (2012) zu erwähnen, der in seiner Arbeit die Herausforderungen dieser

Phase erfasst und erste umfassende Lösungsvorschläge anhand von Datenauswertungen aus dem deutschen S-Bahnnetz ableitet. Insgesamt ist diese Störfallphase kaum in der Literatur repräsentiert.

Insgesamt ist bei den Ansätzen kein umfassendes System auszumachen, dass zur Disposition von Störfällen tatsächlich Anwendung findet. Die genannten Ansätze beziehen sich zudem auf die tatsächliche Disposition eines Störfalls. Die Forschungsansätze adressieren somit maßgeblich die abschließende Zeile in Abbildung 2-3, wobei sie dazu meist einen großen Fokus auf die linke, betriebliche Spalte der Zeile Durchführung legen. Sie erstellen somit keine Vorabplanung des Störfalls und bilden die rechte Spalte mit den Auswirkungen auf den Verkehr meist, wenn überhaupt, eher rudimentär ab.

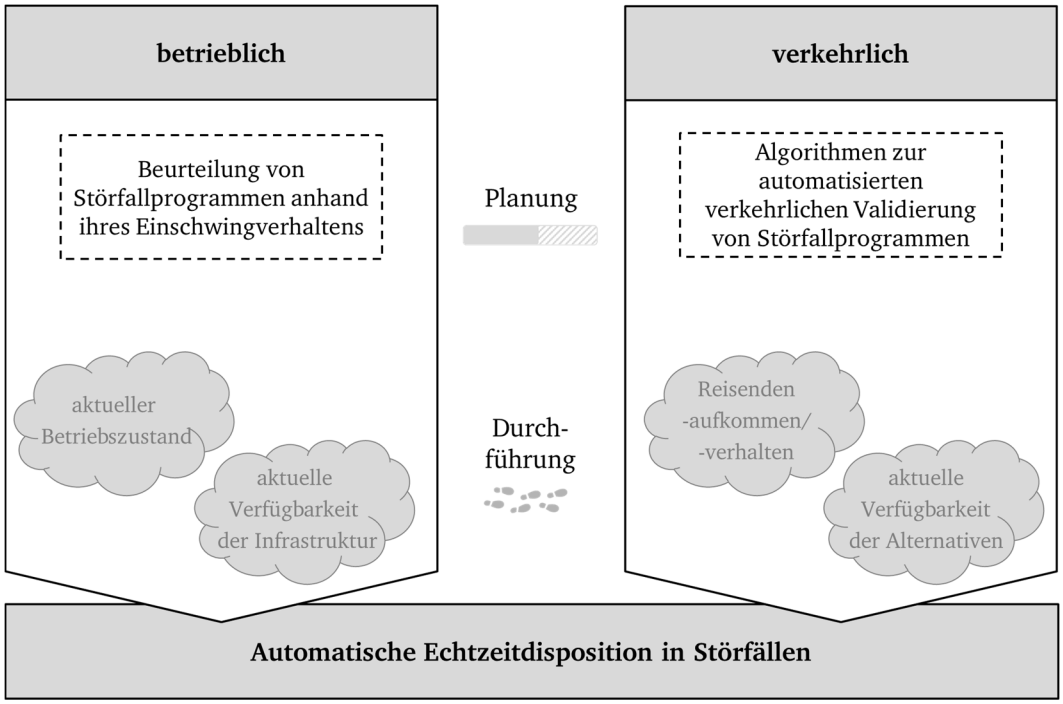


Abbildung 2-3: Gliederung der Forschungsbereiche im Störfallmanagement (eigene Darstellung)

In der Praxis hingehen wird eine Unterstützung benötigt. Daher wird bei Störfällen in einigen Regionen und Unternehmen im Schienenpersonennahverkehr zur Unterstützung und Reduktion des Stresslevels der Disponenten eine Vorab-Planung des Störfalls und anzuwendender Dispositionsmaßnahmen erstellt. Ghaemi et al. (2017) definieren, die Vorab-Planung als „contingency plan corresponds to a specific disruption scenario in a specific location designed manually by experienced traffic controllers.[1]"

Des Weiteren existiert die Definition: Unter einem „Störfallprogramm versteht man Handlungskonzepte für bestimmte Situationen, in deren Rahmen vorab ausgewählte und bereits definierte Dispositionsmaßnahmen umgesetzt werden (Chu et al. 2012, S. 45)". Nach DB Regio AG (2013b, S. 5) sind Störfallprogramme festgelegte Handlungsszenarien, die für ausgewählte Situationen vorab definierte Handlungen enthalten. Sie können für einen ausgewählten Störfall ein abgestimmtes Maßnahmenbündel mit Regelungen zu Dispositionsmaßnahmen, Wendebahnhöfen, Fahrzeugumläufen und Personaleinsatz sowie Fahrgastinformationen darstellen (DB Regio AG 2013a, S. 1). Dabei verkürzen sie die Reaktionszeit der Disposition, vereinfachen den Kommunikationsfluss, standardisieren die Disposition und dienen der betrieblichen Stabilisierung (DB Regio AG 2013a, S. 2).

[1] Übersetzung der Autorin: Ein Störfallkonzept entspricht einem bestimmten Störungsszenario an einem bestimmten Ort, das manuell von erfahrenen Disponenten entworfen wurde.

Störfallprogramme sind in der Praxis von großem Nutzen, sind aber gemäß Abschnitt 1.1 aufwendig in der Erstellung, durch die Komplexität und die manuelle Erstellung nicht umfassend in Bezug auf die Bewertung der Funktionsfähigkeit und sparen die Auswirkungen auf die Fahrgäste meist aus. Da sie aber durch die beinhalteten zugbezogenen Maßnahmen die Disponenten tatsächlich unterstützen, werden sie daher im Rahmen dieser Arbeit weitergehend als gewähltes Vorgehen im Störfall verwendet.

Da sich die Arbeiten von Chu besonders umfassend mit Störfallprogrammen befassen, wird ihre Definition weitergehend als Grundlagenarbeit verwendet. Dazu werden in den folgenden Unterabschnitten zunächst die Zusammenhänge von Störfallprogrammen dargestellt. Anschließend wird im nachfolgenden Abschnitt 2.4 die Forschung zu Störfallprogrammen vorgestellt. Da in dem Bereich wenige Arbeiten, dafür aber zahlreiche Veröffentlichungen von Chu zu diesem Thema existieren, wird in dem Abschnitt 2.4 im Besonderen die umfassende Zusammenstellung ihrer Forschungsergebnisse aus Chu (2014) aufbereitet und diskutiert.

2.3.2 Phasen eines Störfalls

Das bereits vorgestellte Badewannenmodell ähnelt in seiner Aufteilung den Phasen eines Störfalls, die für die Anwendung der Störfallprogramme definiert wurden und in Abbildung 2-4 dargestellt sind.

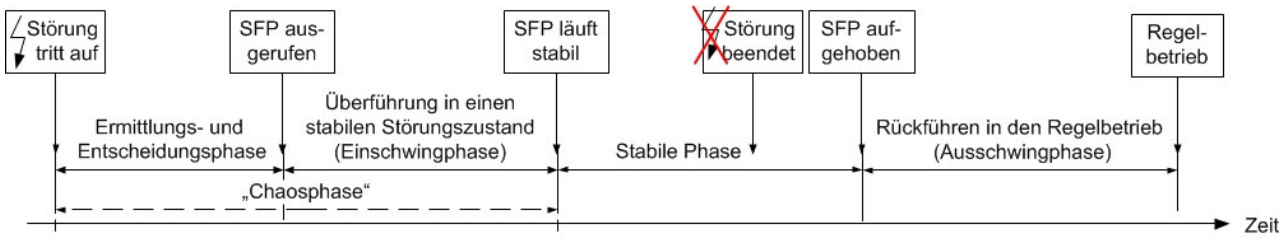


Abbildung 2-4: Phasen einer Betriebsstörung mit Störfallprogramm nach Chu et al. (2012, S. 48)

Die „Chaosphase“ bildet den Zeitraum von Störungsbeginn bis zum Erreichen der stabilen Phase ab. Hierbei existieren z. T. gegensätzliche Aussagen und Informationen; ein genaues Bild über die tatsächliche Störfallsituation entsteht sukzessive (DB Regio AG 2013b, S. 2). Diese Phase lässt sich in zwei weitere Phasen durch die Ausrufung eines SFP aufteilen.

Eintreten der Störung und Beginn der Ermittlungs- und Entscheidungsphase

Nach dem Eintreten der Störung ist die Situation zunächst unklar und eine Ermittlungs- und Entscheidungsphase beginnt. Es muss zunächst ein aktuelles Lagebild durch das Austauschen von Informationen der Akteure untereinander entstehen. In dieser Phase zeigt sich die Problematik von fehlerhaften, widersprüchlichen und diffusen Informationen als charakteristisch. Wenn ausreichend gesicherte Informationen zur Verfügung stehen, kann über das weitere Vorgehen entschieden werden. Hierbei gilt es, diese Phase zeitlich gering zu halten, da mit zunehmender Dauer vermehrt Verspätungen auftreten und sich im Netz ausbreiten können (Chu 2014, S. 21).

Ausrufen des Störfallprogramms

Sollte für die Störfallsituation ein Störfallprogramm vorliegen, kann dieses in Abstimmung mit dem EIU durch das EVU ausgerufen und umgesetzt werden.

Einschwingphase

Nach der Ausrufung des SFP wird der Betrieb in die im Störfallprogramm beschriebene Betriebslage überführt. Dieses Überführen wird Einschwingen genannt. In dieser Phase verkehren die Züge nach Regelbetrieb, beeinflusst durch die Störung oder bereits nach Störfallprogramm. Diese Phase ist dann abgeschlossen, wenn der Betrieb entsprechend dem vorgesehenen Störfallprogramm verkehrt.

Ein SFP gilt somit als eingeschwungen, wenn die Züge auf den im Störfallprogramm vorgesehenen Laufwegen, im vorgesehenen (verringerten) Takt und zuverlässig ohne Verspätungen verkehren (Chu 2014, S. 37). Die Einschwingdauer ist der Zeitraum zwischen SFP-Ausrufung und dem Erreichen der stabilen Phase.

Stabile Phase

Die Disposition erfolgt nun nach den Vorgaben des Störfallprogramms und der Betrieb ist somit wieder vorhersehbar und zuverlässig. Dies gilt auch für die darauf aufbauenden Fahrgastinformationen.

Ausschwingphase

Nachdem die Störung behoben worden ist, erfolgt nicht direkt eine Rückkehr in den Regelbetrieb. Meist wird der Zeitpunkt zum Aufheben des Störfallprogramms abgestimmt, um eine koordinierte Rückführung zu ermöglichen. Dieses Ausschwingen stellt eine schrittweise Rückkehr in den Regelbetrieb dar, sodass die Fahrten nach Abschluss dieser Phase in Anzahl, Laufwegen und auch in ihren Abfahrtszeiten dessen Fahrplan entsprechen (Pilot 2012, S. 6).

2.3.3 Akteure

Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) sind Betreiber der Infrastruktur, die den Zugang zur Infrastruktur allen Eisenbahnverkehrsunternehmen gleichermaßen und diskriminierungsfrei zur Verfügung stellen müssen. Sie koordinieren die Trassennutzung und haben den Letztentscheid über die Reihenfolge und Zeitpunkte der Schienennutzung (Heister et al. 2006).

Befahren wird die Infrastruktur von den Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU). Diese verfolgen außerhalb des Fernverkehrs das Ziel, den Verkehrsvertrag mit dem Aufgabenträger zu erfüllen.

Die Zusammenarbeit von EIU und EVU wird in Richtlinien geregelt und von Heister et al. (2006) zusammenführend beschrieben.

Relevant für die Störfallprogramme ist dabei, dass das EVU aktuell der Ersteller eines Störfallprogramms ist. Dadurch beziehen sich die Inhalte rein auf das betriebliche Angebot des EVUs, wobei diese nicht über alle Daten zu Infrastruktur und weiteren Zügen (Brauner 2016) verfügen und auch nicht die finale Entscheidung über die Infrastrukturnutzung treffen können.

Beide Parteien müssen sich sowohl im Regel- als auch Störfallbetrieb abstimmen. Störfallprogramme können nur dann ausgerufen werden, wenn das EIU sie vorher freigegeben hat und der Ausrufung im Störfall zustimmt. Im Idealfall findet die Erstellung des Störfallprogramms bereits gemeinsam statt (Brauner 2016).

Neben der Abstimmung von Störfallprogrammen zwischen EIU und EVU gibt es zudem mehrere Akteure bei der Durchführung von Störfallprogrammen. Hierbei gibt es zum einen die Anwender, die das Störfallprogramm auf EVU-Seite umsetzen: Disponenten, Triebfahrzeugführer und Kundenbetreuer. Zum anderen gibt es den Fahrgast, der von diesen Maßnahmen betroffen ist.

Vorgelagert zur Durchführung des Störfallprogramms ist dessen Erstellung. Der Ersteller auf EVU-Seite plant die betrieblichen Maßnahmen, versucht dabei den Fahrgast zu berücksichtigen und stimmt seine

Planung mit dem EIU ab. Hierbei ist der große händische Aufwand hervorzuheben und zudem zu berücksichtigen, dass Überarbeitungen durch Defizite bei der Durchführung sowie Änderungen durch Fahrplanwechsel notwendig sind (DB Regio AG 2013b, S. 6).

2.3.4 Blick in die Praxis - Auswertung dreier Experteninterviews

Die Interviews (Brauner 2016) wurden in drei Regionen der DB Regio AG durchgeführt, die bereits langjährige Erfahrungen mit Störfallprogrammen haben. Der Gesprächsleitfaden ist in Anlage 1 dokumentiert. Die Gesprächspartner haben in den Interviews aufgrund ihres Arbeitsalltags viel Bezug auf die Herausforderungen bei der Anwendung von Störfallprogrammen und der Nutzung unternehmensinterner Software oder Kommunikationsprozesse genommen. Da sich diese Arbeit jedoch auf die Planung von Störfallprogrammen konzentriert, werden lediglich die Aussagen dazu hier zusammengefasst.

Störfallprogramme gibt es in den unterschiedlichen Regionen in unterschiedlicher Ausprägung seit etwa 15 bis 20 Jahren. Sie haben unterschiedliche Bezeichnungen und werden auf unterschiedliche Art und Weise regionenspezifisch erstellt und angewendet.

Der Erstellungsprozess der Inhalte, die Aufbereitung der Inhalte und deren Anwendung war nicht einheitlich. Die Erstellung erfolgt bspw. als externe Vergabe, durch sehr erfahrene Disponenten oder durch ein Team aus EVU und EIU. Die Inhalte variieren von lediglich einem linienspezifischen Betriebsprogramm mit Angaben zu Wenden und Umleitungen, über den Einbezug einer vorab geplanten Vergabe von Sonderzugnummern oder einem sehr detailreichen Aufbau inkl. Umleitungsfahrplänen oder der Berücksichtigung langfristiger Baustellen. Es lässt sich somit ein Unterschied zwischen eher generischen und sehr spezifischen Störfallprogrammen erkennen. Überarbeitungsbedarf eines Störfallprogramms entsteht entweder, wenn festgestellt wird, dass die geplante Lösung nicht wie geplant funktionieren kann oder durch äußere Veränderungen wie bspw. Baustellen nicht mehr funktioniert.

Zum Zeitpunkt der Interviews wurde bereits regionenübergreifend ein Excel-Template manuell befüllt, das in eine Dispositionssoftware eingelesen werden kann und bei Anwendung automatisierte Dispositionsunterstützung ermöglicht.

Die Aktualisierung der Störfallprogramme wird sehr unterschiedlich gehandhabt. Es gibt zum Teil jährliche Überarbeitungen, zum Teil findet diese aber aufgrund des hohen Aufwandes nur alle paar Jahre statt.

Störfallprogramme mit betrieblichen Maßnahmen

Oftmals existiert ein Störfallprogramm für die S-Bahn in der Region, bei der besonders die große Menge an Zügen und Fahrgästen herausfordernd ist. Da es meist in Teilen ein geschlossenes System ist, lassen sich Wenden leichter planen und durchführen und aufgrund der meist einheitlichen Fahrzeuge ist das Personal flexibel einsetzbar. Diese Voraussetzungen sind im Regionalverkehr anders gelagert. Mischverkehrsstrecken erfordern einen hohen Abstimmungsaufwand, die Anzahl der Baureihen ist größer und deren Einsatz nicht grundsätzlich überall möglich. Daher wird noch oftmals auf die Erstellung von Störfallprogrammen verzichtet. In manchen Regionen existieren sie für Nebenbahnen auf Grund der geringen Komplexität der Rahmenbedingungen. Allerdings wurde zudem angemerkt, dass diese nur sehr selten, wenn überhaupt, angewendet werden und der Fokus der Störfallprogramme daher auf den S-Bahnen liegt.

Zusammenfassend lässt sich zudem festhalten, dass je diverser Infrastruktur, Umläufe, Fahrzeuge und Ausbildung des Personals sind, desto komplexer und aufwendiger ist die Erstellung und auch das Störfallprogramm selbst. Daher stellt sich oftmals die Frage, ob der Aufwand der Erstellung gerechtfertigt ist und ob das Störfallprogramm einen Nutzen bei Anwendung und oder gar durch häufige Anwendung erzeugen kann. Bei Anwendung wird durchaus festgestellt, dass ein Teil der ursprünglichen Lösungsvorschläge nicht (mehr) vollständig umsetzbar ist.

Bei der Erstellung eines Störfallprogramms stellen meist die Steuerbereiche der Stellwerke und ausgewählte Infrastrukturknoten den Ausgangspunkt für die zu planenden Störfälle dar. Genutzt werden meist bekannte Daten, die der Regelfahrplan anbietet. Die grundlegenden Einflüsse, die eigentlich in einem Störfallprogramm und dem zugehörigen Fahrplan zu berücksichtigen wären, sind die Verfügbarkeit von Infrastruktur, Personal und Fahrzeugen, sowie deren Verbindung durch Umläufe. Dabei wurde angemerkt, dass eine Priorisierung dabei schwierig ist, da die Maßnahmen nur als Gesamtkonzept funktionieren können, ebenso aber nicht alle Einflüsse bei der Planung berücksichtigt werden können. Die Untersetzung der einzelnen Einflüsse ist sehr divers, so dass eine Vielzahl an Eigenschaften einer Zugfahrt nach geltenden Richtlinien wie bspw. Tunneltauglichkeit, Geschwindigkeit, Bahnsteiglänge oder Bahnsteighöhe genannt werden. Diese finden durch die große Erfahrung der Ersteller Eingang in die Planung bzw. bei Anwendung durch den Disponenten. Die geplanten Maßnahmen werden je nach Region mit anderen EVU und dem EIU gemeinsam erstellt oder abgestimmt.

Der Zugverkehr muss auch über einen längeren Zeitraum mit den Störfallprogrammen funktionieren. Maßnahmen müssen einfach formuliert und auch für alle Beteiligten verständlich sein. Somit ist sichergestellt, wenn ein SFP ausgerufen wird, dass alle Beteiligten wissen was zu tun ist.

Fahrgastbezogene Maßnahmen

Das maßgebliche Ziel ist es, dass die Züge im Störfall weiterhin fahren. Zur Unterstützung der Fahrgäste stehen dem Personal bspw. ein Plakat vom Schnellbahnnetz und ein Netz von Buslinien zur Verfügung. Für Kunden werden meist keine Alternativrouten während der Planung ermittelt. Wünschenswert wäre es, wenn für die Fahrgäste ein schlüssiges Konzept erstellt werden könnte und dabei der Fahrgast individueller informiert werden könnte, bspw. indem verfügbare Verkehrsmittel und die für den Fahrgast relevanten Einstiegs-/Ausstiegsmöglichkeiten angezeigt werden. Es wurde bereits beobachtet, dass die Fahrgäste sich an die Maßnahmen in den Störfällen gewöhnen und diese somit auch in den Störfällen einheitlich und zuverlässig angewendet werden sollten.

In dem Excel-Template können Hinweise für die Fahrgäste hinterlegt werden, die dann bei Anwendung eines SFP (teil-)automatisiert kommuniziert werden. Welche Hinweise hinterlegt werden variiert, da sie manuell konzipiert und eingetragen werden müssen.

Als relevante Einflüsse auf die Fahrgastlenkung werden die Hauptverkehrszeit, die Richtungen der großen Fahrgastströme und dafür zur Verfügung stehende Beförderungsmöglichkeiten genannt. Die Kommunikation mit den weiteren Verkehrsmitteln im Verbund erfolgt unterschiedlich intensiv.

Außerdem wäre es wünschenswert, wenn das System die ganzen Verbundverkehre abbilden könnte. Beispielsweise für Parallelverkehr bei U-Bahn, Straßenbahn oder Bus mit Einbezug der Verkehrsmittel aus dem gesamtem Verkehrsverbund, des öffentlichen Nahverkehrs der Region, als auch möglicher Alternativen aus dem benachbarten Verkehrsverbund. Somit können Alternativrouten anzeigt und kommuniziert werden. Ferne wäre eine kurze Beschreibung wünschenswert wie die Fahrgäste vom aktuellen Standort weiterkommen. Zusätzlich sollte den Fahrgästen kommunizier werden, welche Züge

er mit seinem Ticket (abweichend vom Regelbetrieb) nutzen darf, wie bspw. ICEs oder Züge anderer EVUs.

Unterstützung durch ein Planungstool

Die betrieblichen Maßnahmen sollten im Tool vollumfänglich geplant und getestet werden können. Damit ein Tool bei der Erstellung eines Betriebsprogramms möglichst umfassende Funktion besitzt, ist es wichtig, dass es neben einem Zugriff auf Daten der Fahrplanentwürfe, Angebotsplanung und die Daten der Infrastruktur hat. Zudem sollte es an die bestehenden Dispositionssysteme angebunden werden bzw. das im Tool erstellte SFP in das bestehende Excel-Template exportiert werden können. Weiterführend sollten auch baustellenbedingte Abweichungen im Fahrplan erkennbar sein und somit eine Anpassung bereits geplanter SFP machbar werden. Grundsätzlich sollten der Aufbau eines Tools und seine Ergebnisse für den Ersteller klar verständlich sein.

Perspektivisch wäre es den Experten nach wünschenswert, wenn das System automatisch eine Lösung vorschlägt und die Personalplanung berücksichtigen könnte. Im Idealfall bestünde irgendwann eine Live-Unterstützung unter Berücksichtigung von Echtzeitdaten aus dem Betrieb einschließlich Verfügbarkeit und Auslastung möglicher Alternativen.

2.4 Forschung zu Störfallprogrammen

In der Arbeit von (Chu 2014), in Kurzform aufbereitet in (Chu und Oetting 2013a), wird sich auf die Ermittlung und Untersuchung der Einflussgrößen der Einschwingphase, die deren Erfolg und Qualität bedingen, fokussiert. Diese Arbeiten werden in diesem Abschnitt detailliert vorgestellt. In Interviews konnte festgestellt werden, dass Störfallprogramme nicht immer erfolgreich einschwingen und die Anwender keine Begründung dafür nennen können. Hierbei geht die Autorin davon aus, dass das erstellte Störfallprogramm im stabilen Zustand funktionsfähig ist. Eigene Interviews (Brauner 2016) haben ebenfalls deutlich gemacht, dass die Stabilität eines Störfallprogramms nicht zwingend sichergestellt ist und nach mehrfachem Auftreten von Problemen, wie bspw. Verspätungsaufbau, langsames Einschwingen oder häufiges Nachsteuern des SFP durch die Disposition, bei Anwendung des Störfallprogramms, Überarbeitungen notwendig sind.

Um die Einflussgrößen der Einschwingphase zu erfassen, wurden anhand von Datenanalysen aus Netzen mit SFP-Anwendung Vergleiche zum Regelbetrieb gezogen und drei Hauptgründe für die Erzeugung von Verspätungen im Störungsfall ermittelt. Hierbei wird besonders der Stau vor den SFP-Wendebahnhöfen hervorgehoben. Zudem entsteht ein hoher Anteil der Verspätungen an den Wendebahnhöfen und Abzweigstellen. Einen deutlichen Anteil stellt zudem eine Menge an Verspätungen, denen keine der untersuchten Eigenschaften zugeordnet werden konnte, dar, was aber nicht zwingend bedeutet, dass diese nicht die Ursache waren (Chu 2014, S. 58). SFP-Wendebahnhöfe zeichnen sich dadurch aus, dass an diesen Wenden stattfinden die abweichend vom Regelbetrieb durch das SFP dort geplant werden.

Die für den Störungsbetrieb ermittelten erkennbaren Unterschiede zum Regelbetrieb werden im Folgenden zusammengefasst und eingeordnet.

Die *Belegungszeiten* verändern sich durch das Eintreten der Störung (bspw. Wartezeiten durch Nothalt) und durch die geplanten Maßnahmen (bspw. Wenden). Hierbei werden einmalige und wiederholend auftretende zusätzliche Zeitanteile differenziert, die gesammelt in Abbildung 2-5 dargestellt werden. Eine Schätzung für die Zeitwerte erfolgte basierend auf Interviews und Datenanalyse und ist in Kapitel 5 von Chu (2014) nachzulesen.

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
	$t_{WartenAufFzg}$	das Warten bis entsprechende Fahrzeuge verfügbar
Umsetzen – wiederkehrende Handlungen im gesamten SFP	$t_{SFPWende}$	Wenden in SFP-Bahnhöfen
	$t_{SFPUmleitung}$	SFP-Umleitungen

Abbildung 2-5: Überblick der zusätzlichen Belegungszeiten im Störungsfall (Chu 2014, S. 67)

Für die geplanten Fahrtdauern bei Umleitung wurden bei Störfällen Verspätungen gehäuft festgestellt. Als Fahrzeitverlängerung wurden besonders Fahrtrichtungswechsel, zusätzliche Halte und das Ein- und Ausfädeln erkannt. Es ist somit für die Nutzungsdauer einer Umleitung folgender Wert zu ermitteln (Chu 2014, S. 111):

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

mit:

$t_{SFPUmleitung}$	Fahrtdauer für eine Umleitungsnutzung
$t_{reineFahrzeit,ges}$	reine Fahrzeit
$t_{Halt,ges}$	Gesamthaltedauer
$t_{FaRiWe,ges}$	Fahrtrichtungwechsel
$t_{Warten,ges}$	Warten aus Ein- und Ausfädeln bzw. auf dem Kreuzen von durchgehenden Hauptgleisen

Für die Ermittlung der Wartezeit wird das Folgende vorgeschlagen: *„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“* (Chu 2014, S. 113). Ein analytisches Vorgehen wird verworfen, da für die einzelnen Parameter empirische Daten benötigt werden. Für eine Überprüfung zur Machbarkeit von Umleitungen wird auf das Vorgehen von Keck (2012, S. 99) verwiesen (zur weiteren

Verwendung in Anlage 2 dargestellt). Dieses Schema dient zur Planung der Umleitungsnutzung mittels Überprüfung des Ziels eines pünktlichen Fahrtbeginns der auf die umgeleitete Fahrt folgenden Leistung.

Die *Wendezeiten* im Störungsfall sind aufgrund einer Vielzahl von Ursachen verlängert. Hierzu wird ein Planwert zur Wendedauer im Störfall vorgeschlagen:

$$t_{Wende,SFP} = t_{Wende,Ril} + t_{Wendezuschlag}.$$

mit:

$t_{minWende,SFP}$	Mindestwendedauer am gewählten (SFP-)Wendebahnhof,
$t_{minWende,Ril}$	Mindestwendedauer nach (DB Regio AG 2010b); zu unterscheiden nach Zuglänge und Anzahl der beteiligten Triebfahrzeugführer und
$t_{Wendezuschlag,SFP}$	empirisch ermittelter Wendezeitzuschlag nach Chu (2014); nur bei Wenden an SFP-Bahnhöfen anzusetzen.

Abbildung 2-6 stellt zusammenfassend alle Zeitbedarfe dar, die im Rahmen einer Maßnahme mit SFP-Wende auftreten.

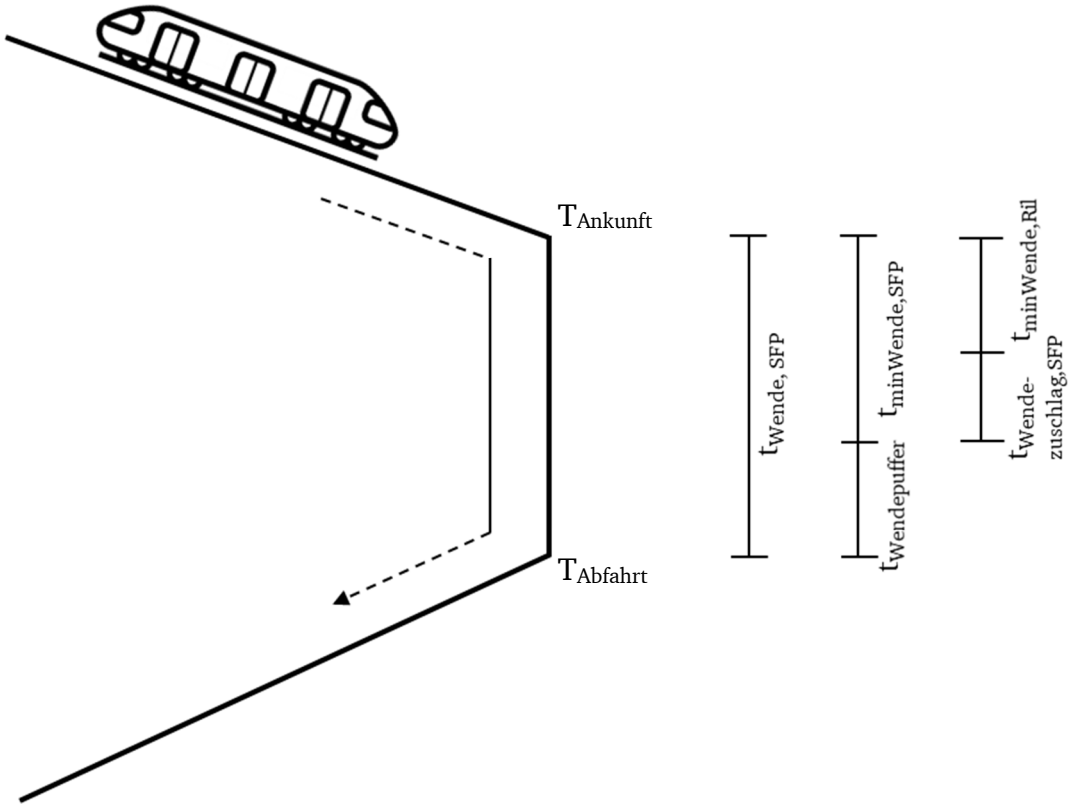


Abbildung 2-6: Übersicht der zu ermittelnden Zeiten für eine positive SFP-Wende (eigene Darstellung)

Dieser Zuschlag wird im Rahmen einer Datenanalyse zu 3 Minuten bestimmt, der somit 90 % aller in den untersuchten Störungen durchgeführten Wenden erfasst (Chu 2014, S. 104). Zudem konnte ein deutlicher Unterschied in der Wendedauer zwischen verschiedenen Netzen erkannt werden. Dabei wird vermutet, dass das Nicht-Vorhandensein von Sonderzugnummern die Wendezeiten erhöht. Dies entspricht auch der Wahrnehmung der Gesprächspartner in den Experteninterviews (Brauner 2016).

Diese Erkenntnisse finden Anwendung bei dem Aufbau einer *Belegungsgradberechnung in Wendebahnhöfe*n. Diese wird benötigt, da dies als eine der drei Hauptursachen für die

Verspätungserzeugung identifiziert wurde. Das Modell zur Berechnung des Belegungsgrads soll universell und zugfolgeunabhängig sein und wurde daher analytisch aufgebaut.

Dabei legt Chu (2014 S. 129) zur Reduktion des Aufwands fest, „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 [es] 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.“ Dies scheint auch in Bezug auf verfügbare Daten in Bezug auf Teilfahrstraßenknoten bei einem EVU sinnvoll.

Da sich die Belegung innerhalb der Gleisgruppe stark unterscheiden kann, wird jedes Gleis einzeln modelliert. Das Betriebsprogramm eines Gleises wird anhand von Fahrtypen differenziert, für die eine beispielhafte Anwendung, aber keine generische Definition festgehalten wird. Für jeden Fahrttyp kann eine zugehörige Belegungszeit ermittelt werden. Hierbei wird für haltende und danach weiterfahrende Züge die Mindestzugfolgezeit für die aus dem Bahnhof führende Strecke angesetzt, die Ein- und Ausfahrt sowie Haltezeit enthält. Bei Fahrten mit vorzeitiger Wende wird für die Belegungszeit von der Mindestzugfolgezeit die Haltezeit subtrahiert und die Wendezeit addiert unter der Annahme einer existierenden Teilfahrstraßenauflösung. Für die Züge, die nach Störungseintritt angehalten wurden, wird ein einmaliger Belegungszeitzuschlag angesetzt. Um unterschiedliche Zuganzahlen in der Einschwingphase zu berücksichtigen, werden Szenarien mit unterschiedlichen Zugzahlen festgelegt.

Die Gesamtbelegungszeit wird wie folgt ermittelt (Chu 2014, S. 132):

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

Der Belegungsgrad wird wie folgt bestimmt (Chu 2014, S. 133):

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

mit:

$t_{s,i}$	Gesamtbelegungszeit eines Gleises i im Szenario s,
$z_{s,j}$	Anzahl der Zugfahrten eines Fahrttyps j innerhalb des Szenarios s,
$t_{Zu,i}$	einmaliger Störungszuschlag im Szenario s zur Belegungszeit eines Gleises i,
s	Index für die Anzahl an Szenarien,
j	Index für mögliche Fahrttypen durch die Gleise,
i	Index für das untersuchte Gleis,
$\rho_{Bel,s,i}$	Belegungsgrad eines Gleises i im Szenario s und
t_U	Untersuchungszeitraum.

Ein Kriterium für das Erreichen der stabilen Phase ist das Erreichen der *reduzierten Zuganzahl* (siehe Unterabschnitt 2.3.2). Die Autorin stellt fest, dass es eine gewisse Zeit t_{impl} dauert, bis die kapazitätsentlastenden Maßnahmen greifen und somit der Effekt der Auslastungsreduktion eintritt. Da keine Simulation vorhanden ist und eine Entwicklung als zu teuer eingeschätzt wird, wird eine Heuristik vorgeschlagen, um die tatsächlich im Zeitverlauf stattfindende Reduktion in Schritten abzubilden und so im Gesamtmodell zur Ermittlung des Belegungsgrads in der Einschwingphase zu berücksichtigen.

Es werden Szenarien für unterschiedliche Zugzahlen, Dauern der Einschwingphase und Ankunftsreihenfolgen in den betrachteten Bahnhöfen als Eingangsgrößen für ein heuristisches Vorgehen festgelegt. Diese Szenarien werden dann nicht kontinuierlich, sondern zu festen Zeitpunkten im Rahmen einer 15-Minuten-Heuristik für jede Betriebsstelle betrachtet.

Geforderte Szenarien sind dabei: 1. alle Züge des Regelbetriebs, 2. Anzahl der Züge im stabilen Störfallprogramm und 3. ein/mehrere Einschwingszenarien, die verschiedene Einschwingdauern auf ein Vielfaches einer Viertelstunde als statische Annäherung der Dynamik festlegen. Dies soll dann u. a. auch in eine Machbarkeitsabschätzung einfließen.

Die *Machbarkeitsabschätzung* eines Störfallprogramms erfolgt gestaffelt. Der bspw. für einen SFP-Wendebahnhof ermittelte Belegungsgrad

1. soll den gleichen oder einen niedrigeren Belegungsgrad als im Regelbetrieb aufweisen. Dies entkräftet die Autorin selbst für die Wendebahnhöfe in der Einschwingphase und legt daher zudem 2. fest.
2. soll die Grenzwerte nach International Union of Railways (2013) einhalten. Die Machbarkeit gilt dann als bedingt vorhanden.
3. überschreitet die Grenzwerte aus 1. und 2. Die Machbarkeit gilt dann als nicht gegeben.

Hierfür wird zudem ein interaktiver Prozess nach Abbildung 2-7 vorgeschlagen. Da die Machbarkeit keine Aussage zur Qualität ermöglicht, soll erweiternd die Dauer der Einschwingphase abgeschätzt werden.

Zur *Abschätzung der Dauer der Einschwingphase* werden die drei der Definition entsprechenden Kriterien „Zuganzahl reduzieren“, „Zugfahrten auf geplante Wege führen“ und „Pünktlichkeit sichern“ verwendet. Diese Vorgänge erfolgen parallel und es ist maßgebend, welcher am längsten dauert. Es wird festgestellt, dass die Dauer von Netz, Betriebsprogramm, Störfallprogramm und Störungseigenschaften abhängt und daher keine allgemeingültige Bestimmung der Dauern der einzelnen Teilvorgänge möglich ist. Daher führt Chu (2014) ein allgemeingültiges Vorgehen zur Bestimmung der Gesamtdauer der drei Vorgänge ein.

Je nach Standort des Zuges dauert die Umsetzung der Maßnahme unterschiedlich lange bzw. der Zug ist unterschiedlich weit weg vom Umsetzungsort. Daher wird ein Maximalansatz verwendet und die Prämisse gesetzt, dass eine Betrachtung des wahrscheinlichsten Standortes erfolgen sollte, die jedoch nicht näher beschrieben wird.

Zuganzahl reduzieren: Für die Ermittlung der Dauer für das Abstellen eines Zuges wird ein schematisches Vorgehen beschrieben, das die Lage in Störungsnähe, den Ausstieg der Fahrgäste, die Möglichkeit einer Leerfahrt und die Fahrtdauer zur Abstellung auflistet. Die Dauer soll pro Zug ermittelt und dann mit der Anzahl der auszustellenden Züge multipliziert werden. Dies erscheint kritisch, da die Abstellungen nicht ausschließlich nacheinander, sondern auch zeitlich parallel an verschiedenen Orten im Netz durchgeführt werden. Durch die Multiplikation und den Maximalansatz für die Fahrtdauer ist hier von einer großen Überschätzung des Zeitbedarfs auszugehen.

Zugfahrten auf geplante Wege führen: Hierbei wird auf vorzeitige Wenden und Umleitungen eingegangen. Diese werden als falsche Fahrwege eingestuft und je nach Lage im Netz in drei Fälle eingeordnet. Anhand dieser wird, unter Verwendung des Maximalansatzes, die Fahrtdauer bis zum Erreichen des geplanten Wendebahnhofs bzw. der Umleitung ermittelt. Es ist unklar, warum eine vorzeitige Wende erst beim Erreichen des SFP-Wendebahnhofs als „sich auf dem geplanten Weg befindend“ eingestuft wird, da der Zug nach der vorzeitigen Wende auf der richtigen Strecke und

klassischerweise mit weniger Verspätung als bei einer Wende im SFP-Wendebahnhof verkehrt. Auch hier ist eine Multiplikation von Zugzahl und Dauer je relevantem Netzabschnitt angedacht, die entsprechend den Erläuterungen bei der Reduktion der Zuganzahl und je nach Randbedingungen deutlich zu hoch einzuschätzen ist.

Pünktlichkeit sichern: Verspätungen entstehen zu Beginn und im Verlauf der Einschwingphase und müssen abgebaut werden. Dies ist bei den Wenden möglich, die schneller abgewickelt werden können als die Zeit, die zur Verfügung steht. Die Verspätung kann somit über die Anzahl der Umläufe abgebaut werden. Da der Verspätungsabbau pauschal pro Umlauf ermittelt wird, werden jedoch Möglichkeiten wie ein Linientausch und das Anfahren unterschiedlicher (SFP-)Wendebahnhöfe nicht abgebildet. Die Höhe der darin einfließenden Verspätungen ist allerdings nicht empirisch bekannt oder modelliert:

$$\text{Anzahl Umläufe, bis Zug pünktlich} = \frac{t_v + t_{ges} - t_{puenktl}}{\Delta_{Umlauf}}$$

mit:

t_v vor der Störung bestehende Verspätung,

t_{ges} durch Störungseintritt und anschließend entstehende Ur- oder Zusatzverspätung,

$t_{puenktl}$ Pünktlichkeitsgrenze (wird abgezogen, da keine Planmäßigkeit angestrebt wird)

und

Δ_{Umlauf} Verspätungsabbau pro Umlauf.

Zusammenfassend legen die Forschungsarbeiten durch die Datenanalyse viele kritische Eigenschaften von Störungen und Störfallprogrammen offen und machen diese verwendbar. Die Arbeiten legen grundsätzlich fest, wo die kritischen Punkte beim Einschwingen sind und dass diese auch bei der Planung bereits berücksichtigt werden müssen. Der Großteil der vorgestellten Berechnungen eignet sich aber nur eingeschränkt für die Planung, da sich diese entsprechend der Einordnung der Arbeit (siehe Chu (2014, S. 34)) auf Varianten der Dispositionsmaßnahmen im Störfall bezieht. Über deren Auftreten ist wenig bekannt und ihre Verwendung in der Planung daher auch nicht beschrieben.

Für das Modell zur Reduktion der Zuganzahl wird die Einschwingdauer als Eingangsgröße verwendet, dabei ergibt sich diese u. a. aus dem Zeitpunkt, an dem die Reduktion erfüllt ist. Zudem wird nicht klar, warum eine Dauer von 30 Minuten Einschwingen als realistisches Szenario angesetzt wird bzw. wann ein anderes Szenario zu wählen wäre. Es wird somit keine Aussage diesbezüglich getroffen, wann die Züge für das geplante Störfallprogramm wahrscheinlich ausgestellt sind, sondern es erfolgt eine Näherung, zu welchem 15-Minuten-Schritt ein akzeptabler Belegungsgrad vorliegt. Dies bedingt sich aber durch die vorgegebene Eingangsgröße einer Einschwingdauer. Es ist somit überprüfbar, ob ein Einschwingen zu einer gewünschten Dauer (im Sinne des Abgleichs des Belegungsgrads) möglich ist, aber nicht, ob dann auch wirklich das Kriterium der Zugzahlreduktion erfüllt ist.

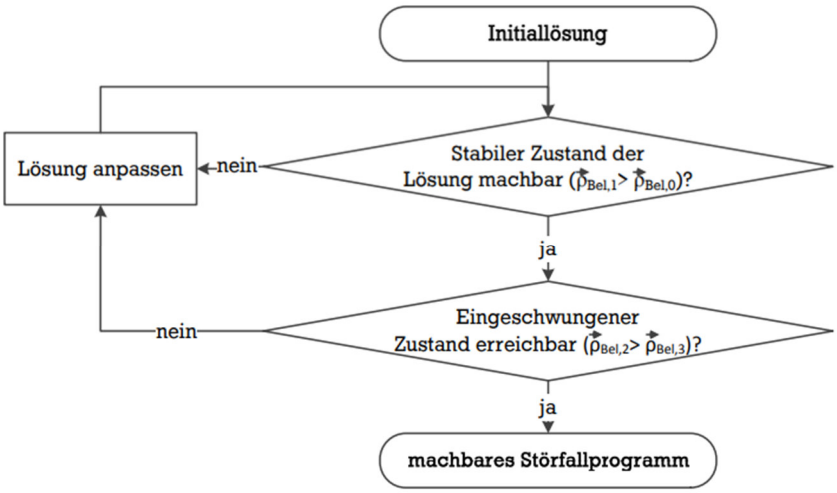


Abbildung 2-7: Prozess zum Entwurf funktionsfähiger Störfallprogramme (Chu 2014, S. 143)

In Abbildung 2-7 wird verdeutlicht, dass eine Machbarkeit von stabiler Phase und Einschwingphase getrennt zu untersuchen ist. Die dabei genannte Belegungsgradabhängigkeit erzeugt aber nur einen Bezug zu einem Netzelement und nicht zum gesamten Störfallprogramm. Die Autorin wendet ihre Ausführungen primär auf Wendebahnhöfe an, deutet aber zudem an, dass auch bspw. Umleitungen oder andere Dispositionsmaßnahmen darauf untersucht werden sollten. Dabei wird für die Einschwingphase eine Machbarkeit der 2. Kategorie und für die stabile Phase eine Machbarkeit der 1. Kategorie gefordert, wobei sich Ausführungen zur entwickelten Metrik meist nur auf die Einschwingphase beziehen. Diese erscheint kritisch, da die primär angeführten Wendebahnhöfe aufgrund der erkannten zusätzlichen Belegungszeiten auch in der stabilen Phase möglicherweise einen höheren Belegungsgrad aufweisen könnten. Wenn bspw. an einem Bahnhof nur eine Linie im Regelbetrieb durchfahrend verkehrt, so sollte diese im Störfall dort mit einer Wende eingeplant werden können. Aufgrund der zusätzlichen Zeitbedarfe der Wende ergibt dies aber sehr wahrscheinlich einen größeren Belegungsgrad als nach Kategorie 1 und wäre somit in der stabilen Phase nicht zulässig.

Diese Machbarkeits-Belegungsgrade werden zu den Zeitpunkten der Szenarien ermittelt. Aus diesen wird dann abgeleitet, wie schnell das Störfallprogramm eingeschwungen sein muss, damit es stabil funktionieren kann. Wenn das Störfallprogramm nach den adressierten 15 bzw. 30 Minuten nicht eingeschwungen ist, wäre ein schlechteres Qualitätsniveau (ein Belegungsgrad über dem Grenzwert) zu akzeptieren. Eine Einordnung, ob dies nur die Verspätungswahrscheinlichkeit erhöht oder tatsächlich Verspätungen be- bzw. entstehen und somit ein Einschwingen de facto nicht stattfindet, erfolgt nicht.

Zudem kommt es nicht immer zu einer klaren Zuordnung der Arbeiten zur Planung oder Durchführung. Grundsätzlich bezieht sich die Autorin auf die Erstellung von Störfallprogrammen, erwähnt aber oft Anpassungen durch abweichende frühzeitige Wenden, die im Rahmen der Durchführung erfolgen würden. Diese wären als vom Störfallprogramm abweichende Maßnahmen in einem zusätzlichen Teil des Störfallprogramms durch den Ersteller zu vermerken.

Ein anderer Ansatz, um beim Einschwingen eines Störfallprogramms die betrieblichen Abläufe zu optimieren und mögliche betriebliche Entscheidungen für den Disponenten durch Bewertung unterstützend aufzubereiten, ist der von Crespo Materna (2020). Dieser bezieht sich ausschließlich auf den Teil der Durchführung, siehe Abbildung 2-3, eines Störfallprogramms im Betrieb, so dass die tatsächlich vorliegenden Betriebslage berücksichtigt werden kann. Dazu erarbeitet der Autor Algorithmen für ein Entscheidungsunterstützungssystem zur störungs- und fahrzeugspezifischen Konkretisierung eines linienspezifischen Störfallprogramms. Zur Unterstützung der Disponenten und

einer Verbesserung der Einschwingphase werden Fahrpläne und Umlaufpläne berücksichtigt sowie für die meist NP-schweren Probleme (meta)heuristische Konflikterkennungs- und Konfliktlösungsansätze und Methoden erarbeitet. Einzelne Konfliktlösungen werden bewertet und in konfliktfreien Lösungskombinationen zusammengeführt. In die Bewertung fließen u. a. auch Fahrzeugposition zu Betriebsschluss und Abweichungen von geplanten Wendebahnhöfen ein.

Die Anwendung eines Störfallprogramms erzeugt ein abgestimmtes geordnetes Vorgehen, an dem sich die Disposition orientiert, dies gilt allerdings nur dann, wenn die durch den Störfall erzeugten Einschränkungen dem entsprechen, was für die Planung angenommen wurde. Neben den Ansätzen, den Disponenten bei den Entscheidungen im Rahmen des Einschwingens zu unterstützen, liegt ein weiterer Forschungsansatz für die Durchführung von Störfallprogrammen durch Steinbach und Crespo Materna (2021) vor, der speziell die Fälle adressiert, in denen der eingetretene Störfall oder die Infrastrukturverfügbarkeit von dem geplanten Störfall abweicht, wodurch das Störfallprogramm in der Ermittlungs- und Entscheidungsphase anzupassen ist.

Dabei wird der Anpassungsbedarf eines Störfallprogramms bei Abweichungen von der geplanten Infrastrukturverfügbarkeit adressiert. Es wird ein heuristischer Ansatz erarbeitet, um das Störfallprogramm ad hoc (teil-)automatisiert anzupassen. Hierzu erfolgt eine lokale Suche, die zunächst den Anpassungsbedarf für die betrieblichen Maßnahmen des Störfallprogramms ermittelt, da diese bei veränderter Infrastrukturverfügbarkeit nicht mehr wie geplant umsetzbar sind. Dabei wird ein geringer Umfang an Anpassungen angestrebt und auch das anhängige Verkehrskonzept berücksichtigt.

Sowohl die Arbeiten von Crespo Materna (2020) als auch von Steinbach und Crespo Materna (2021) arbeiten basierend auf der Annahme, dass die anzuwendenden Störfallprogramme stabil machbar und (zeitlich akzeptabel) einschwingbar sind.

Dies ist jedoch noch in Teilen eine Lücke im Stand des Wissens. Es existieren keine Algorithmen, die ein Unterstützungstool bei der Erstellung von Störfallprogrammen aufbauen können, und dabei eine stabile Phase feststellen und das Störfallprogramm anhand einer Einschwingdauer bewerten können.

2.5 Verkehrliche Aspekte

In den bisher vorgestellten Ansätzen liegt wenig Fokus auf einer Bewertung der Auswirkungen auf den Fahrgast, und es konnte kein umfassendes Unterstützungsmodell für Erstellung und Bewertung von verkehrlichen Maßnahmen bei der Planung eines Störfallprogramms ermittelt werden. Daher werden im folgenden Abschnitt nun die verkehrlichen Aspekte, die im Störfall relevant sind, beschrieben und diskutiert.

2.5.1 Angebot

Um die Wahrnehmung und Reaktion eines Fahrgastes auf Störungen adäquat abbilden zu können, muss eine Modellierung und Bewertung der Angebotsveränderung aus Sicht des Fahrgastes erfolgen, in welcher dessen Wahrnehmung berücksichtigt wird.

Nach einem kurzen allgemeinen Überblick zum Verkehrsangebot werden auf die im Störfall besonders relevante Kundenkommunikation eingegangen und anschließend die Möglichkeiten zur Bewertung der Angebotsveränderung aus Sicht des Fahrgasts erörtert.

Überblick

Das Verkehrsangebot eines Verkehrsbezirks ist die vorhandene, erschließende Verkehrsinfrastruktur, die verschiedene Wohnstandorte und Zielgelegenheiten verbindet, Mobilität ermöglicht und somit eine

Erschließungsfunktion hat (Sommer et al. 2021, S. 15). Straßen, Wege und Plätze im städtischen Raum können sowohl durch den Individualverkehr (IV) als auch öffentlichen Verkehr (ÖV) genutzt werden.

Das Angebot im Öffentlichen Personenverkehr lässt sich weiter unterteilen; bspw. nach Schiefelbusch (2018, S. 1634) in die in Abbildung 2-8 dargestellten Techniken, Betriebsformen und Angebotstypen.

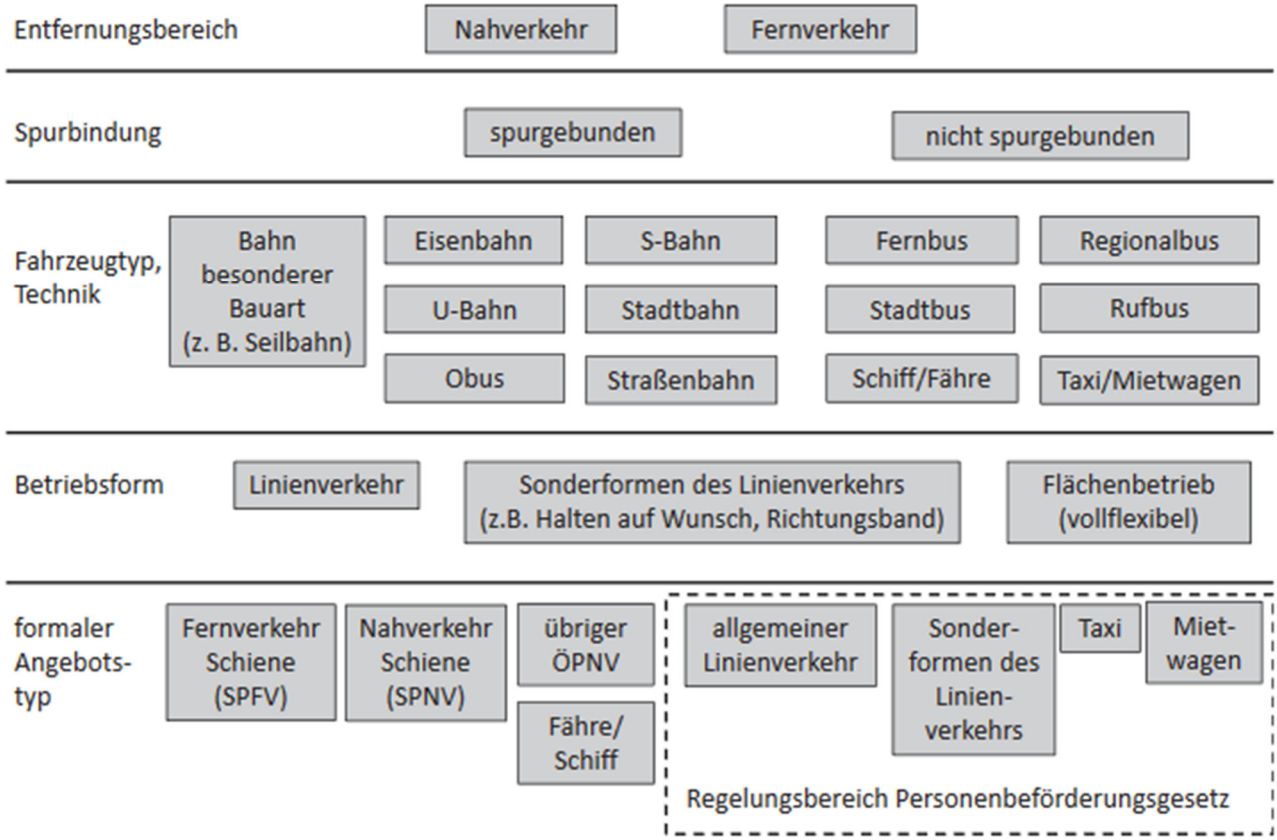


Abbildung 2-8: Übersicht des Verkehrsangebots nach Schiefelbusch (2018)

Das Verkehrsangebot umfasst die gesamte Ausgestaltung von Strecken und Knoten, wozu auch die Angebotsmerkmale des ÖPV (Öffentlicher Personenverkehr) durch Gestaltung des Liniennetzes, Taktzeiten etc. gehören (Winkler 2012, S. 26).

Angebot und Nachfrage bedingen sich kreislaufartig wechselseitig, sodass bei jeder Änderung des Angebots eine Nachfragereaktion entsteht, die ggfs. auch wieder zu einer Angebotsangpassung führen kann (Scholz 2006, S. 325).

Um das zu steuern, werden im Verkehrsmanagement drei Beeinflussungsmöglichkeiten aus Abbildung 2-9 eingesetzt, die über Maßnahmen entweder das Angebot oder die Nachfrage beeinflussen.

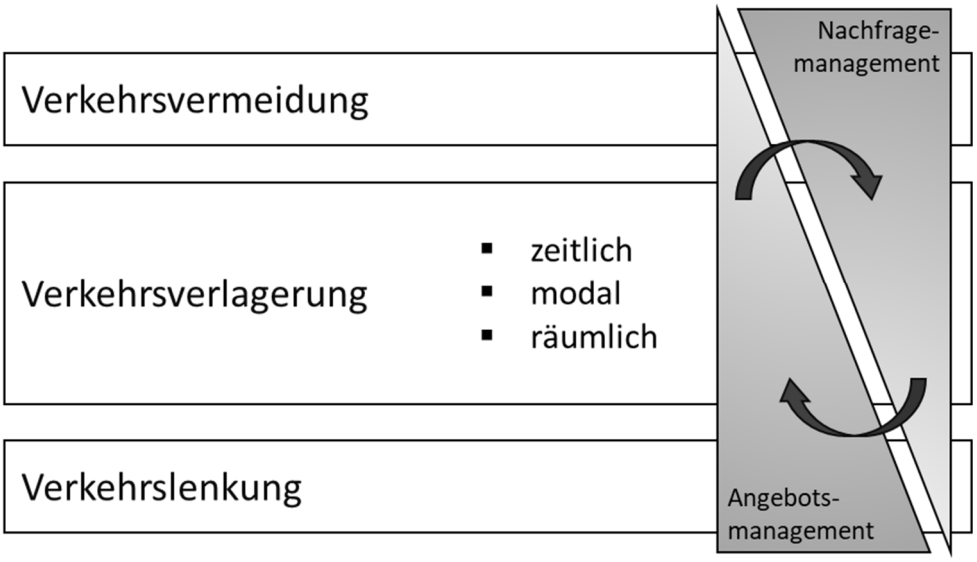


Abbildung 2-9: Strategien des Verkehrsmanagements nach Boltze und Vu (2016, S. 207)

Die Wahrnehmung der Angebotsqualität wird zudem durch die Qualität der Reisendenlenkung und deren Kommunikation bestimmt.

Kundenkommunikation

Die Fahrgastinformation als Kundenkommunikation ist sowohl im Regelbetrieb als auch im Störfall wichtig. Sie sollte entlang der gesamten Reisekette funktionieren und somit alle Informationen wie Fahrpläne, Routing und Kosten beinhalten. Neben der kollektiven, statischen wird die individuelle und dynamische Fahrgastinformation einzelner Fahrgäste zunehmend wichtiger (Pfister 2011). Monzert (2020) bietet eine Zusammenstellung der aktuellen individuellen und besonders der kollektiven Kommunikationskanäle im ÖPNV an.

Kollektive Kommunikationskanäle sprechen mehrere Personen im Zug oder am Bahnsteig an, wie es bspw. durch Lautsprecherdurchsagen und Anzeigen möglich ist. Kollektiv bedeutet jedoch auch, dass hierbei keine individuellen Informationen übergeben werden können und somit nicht jeder Fahrgast seine gewüschten Informationen erhalten kann. Hierfür eignen sich die individuellen Kanäle wie bspw. Apps oder die Ansprache eines Kundenbetreuers.

Maßnahmen zur Steuerung der Fahrgäste müssen von diesen durch Fahrgastinformationen wahrgenommen, akzeptiert und umgesetzt werden. Im Rahmen der Wahrnehmung werden Informationen, die von den Sinnessystemen bereitgestellt werden, organisiert und interpretiert. Dies kann als „Vorgang der unmittelbaren und aktiven Teilhabe des Geistes an seiner Umgebung“ beschrieben werden (Ansorge und Leder 2017, S. 1). Ansorge und Leder (2017) behandeln diesen Themenbereich umfassend und befassen sich auch mit Aufmerksamkeit als Selektivität der Wahrnehmung, was bspw. in Mazza (2009) vertieft wird.

In Bezug auf die Fahrgäste ist daraus zu schließen, dass diese im Fall von Störungen Informationen aktiv wahrnehmen müssen, aber ggfs. auch nur eine begrenzte Menge an Informationen verarbeiten und im Kurzzeitgedächtnis behalten können. Eine Überlastung mit Informationen ist somit zu vermeiden.

Wenn der Fahrgast die für ihn relevante Information zu Abweichungen und Alternativen basierend auf den Maßnahmen zur Steuerung der Fahrgäste erhalten hat, muss er diese zunächst akzeptieren, bevor er sie umsetzen kann. Fahrgäste wünschen sich umfangreiche und präzise Informationen zu Störungen,

Verspätung oder auch Umsteigemöglichkeiten, wobei sich dieses Bedürfnis beim Vergleich verhaltenshomogener Gruppen nicht unterscheidet, sondern einheitlich präsentiert (Monzert et al. 2021, S. 11 f.).

Bei der Konzeption der Maßnahmen im Störfall ist somit auf Kommunikationswege und Reisendenlenkung zu achten, sodass der Fahrgast die für ihn relevante Maßnahme über zugehörige Information präzise und zuverlässig kommuniziert bekommt. Zudem ist relevant, dass die Alternative als attraktiv wahrgenommen wird, sodass er die Maßnahmen auch umsetzen möchte. Daher wird im Weiteren nun auf die Bewertung der Angebotsqualität durch den Fahrgast eingegangen.

Bewertung der Angebotsqualität

Die Wahrnehmung des Verkehrsangebots setzt sich typischerweise aus den Eigenschaften der angebotenen Verkehrsmittel (siehe bspw. Abbildung 2-8) zusammen, die jedoch von jedem Fahrgast unterschiedlich wahrgenommen und somit bewertet werden können.

Nach Winkler (2012, S. 26) sind die „wichtigsten Determinanten des Verkehrsangebots und seiner Auslastung […] die für die Durchführung von Ortsveränderungen zu erbringenden Aufwände [Widerstände], denen als Schnittstelle zwischen Angebot und Nachfrage eine zentrale Bedeutung zukommt“. Um diese subjektiven und objektiven Bestandteile der Wahrnehmung des Verkehrsangebots zu vereinen und Entscheidungen des Fahrgasts abzuleiten, gibt es einige Ansätze in der Literatur, wobei besonders die beiden Strömungen der Discrete-Choice Modelle und der Widerstandsbewertung zu finden sind.

Bei den Discrete-Choice Modellen finden folgende Annahmen gemäß Ben-Akiva und Bierlaire (1999, S. 6) Eingang:

“1. decision-maker -- defining the decision-making entity and its characteristics;
2. alternatives -- determining the options available to the decision-maker;
3. attributes -- measuring the benefits and costs of an alternative to the decision maker; and
4. decision rule -- describing the process used by the decision-maker to choose an alternative.”[2]

Dabei sind sehr viele Informationen für die Modellierung notwendig. So muss bspw. bei den Alternativen bestimmt weren, was gewählt wird und zudem was nicht gewählt wird (Ben-Akiva und Bierlaire 1999, S. 6) und es ist dabei zu erfassen, nach welchen Kriterien diese Entscheidungen getroffen werden. Dazu werden meist sogenannte Choice-Sets erzeugt, die zudem von Person zu Person gemäß deren persönlicher Rahmenbedingungen unterschiedlich sein müssen, anhand derer das Entscheidungsverhalten per Befragung erhoben wird, um es dann anschließend im Modell zu verwenden (Temme 2009, S. 299). Auch wenn ein spezifischer Störfall mit einer gewissen Regelmäßigkeit auftritt und dabei dann auch wahrscheinlich eine wiederholend ähnliche Gruppe an Fahrgäste betrifft, ist der Erhebungsaufwand sehr hoch. Daher werden die Discrete-Choice Modelle nicht weiter erörtert.

[2] Übersetzung der Autorin:

1. Entscheidungsträger – Definition der Entscheidungsträger und ihrer Eigenschaften,

2. Alternativen – Bestimmung der Optionen, die dem Entscheidungsträger zur Verfügung stehen,

3. Attribute – Messung der Nutzen und Kosten einer Alternative für den Entscheidungsträger und

4. Entscheidungsregel – beschreibt den Prozess, den der Entscheidungsträger verwendet, um eine Alternative auszuwählen.

Bei den Ansätzen zur Bewertung der Angebotsqualität wird der Ansatz nach Walther in zahlreichen Forschungsarbeiten weiterverwendet, da er eine besonders umfassende Angebotsmodellierung anbietet, die anhand der objektive Eigenschaften des Angebots und anhand einer subjektiven Wahrnehmung, die Bewertung des Angebots durch den Fahrgast darstellt. Daher wird im Weiteren auf die zugehörigen Arbeiten von Walther näher eingegangen

Der Begriff Widerstand entstammt der Analogie zu den Widerständen elektrischen Storms. Durch die Adaption der Gesetzmäßigkeit können Widerstände mit negativem Nutzen gleichgesetzt werden und wirken somit der Akzeptanz eines Transportsystems entgegen (Walther 1992, S. 333).

Walther (1992) untersucht, wie sich das Verhalten der Verkehrsbevölkerung durch Angebotsänderungen oder restriktive Maßnahmen verändert. Er entwickelt ein Modell für die Veränderung der Verkehrsmittelwahl als Reaktion auf maßgebende Änderungen der Angebotsstrukturen der konkurrierenden Verkehrsmittel.

Der Verkehrswiderstand soll eine Größe darstellen, die tatsächlich der Akzeptanz eines Verkehrsangebots entgegensteht und somit eine Kombination von objektiven Zeit- und Kostenfaktoren mit subjektiver Empfindung des Menschen ergibt (Walther 1992).

Walther (1973) leitet datenbasiert eine verhaltensbezogene Gewichtung des korrespondierenden Widerstandes her, sodass sich durch die subjektive Bewertung eine tatsächlich teilungsrelevante Widerstandskomponente ergibt:

$$\text{Widerstandkomponente} = t \cdot e^t$$

mit:

t	Widerstandsindikator und
e^t	subjektive Empfindung des Indikators.

Die e-Funktionen dient der Beschreibung der unterschiedlichen Empfindungen, da von einer exponentiell intensiveren Empfindung bei größeren Werten auszugehen ist. So ist bspw. die Wahrnehmung einer zehnminütigen Wartezeit nicht nur doppelt so schlimm wie die fünfminütige Wartezeit, da davon ausgegangen werden kann, dass das Warten aufgrund unterschiedlicher Einflüsse wie bspw. Wetter oder persönliches Gefühl von Zeitverschwendung, zunehmend unangenehmer für den Fahrgast wird. Durch die e-Funktion werden allerdings bei hohen Werte, der zu bewertenden Reisezeitkomponenten, die Zeitbewertungsfaktoren sehr hoch.

Die verschiedenen Komponenten der Reisezeit im ÖV und im IV werden unterschiedlich und subjektiv bewertet. Dabei werden neben der Fahrzeit sogenannte „Nebenzeiten“, wie z. B. Zugangszeit von Quelle zu Fahrzeug berücksichtigt. Die Summe der gewichteten Nebenzeiten ergibt somit einen fiktiven Wert zur „fahrzeitäquivalenten“ Reisezeit (Walther 1975, S. 271). Für die zeitäquivalenten Größen spricht allgemein, dass Zeit die grundlegende Voraussetzung für die Durchführung von und Teilnahme am Verkehr ist und als einzige Größe nicht substituiert oder gelagert werden kann (Walther et al. 1997, S. 16).

Daher gilt als Grundlage für alle Widerstände nach Walther (1991, S. 11):

$$w_t = t \cdot ZB_t$$

mit:

w_t Widerstand je Reisezeitkomponente,

t reale Größe der Reisezeitkomponente und

ZB_t Zeitbewertungsfaktor der Reisezeitkomponente.

Die Zeitbewertungsfunktionen ZB_t im öffentlichen Verkehr nach Walther et al. (1997, S. 21 ff.) gibt es für:

- reine Beförderungszeit t_B wird mit 1 gewichtet.
- Fußwegzeit bzw. Zu- $t_{F,zu}$ und Abgangszeit $t_{F,ab}$: Stellt ein psychologisches Hindernis dar, da es ein „lästigster" Zeitaufwand ist und man vom öffentlichen Verkehrsmittel abhängig ist. Der Widerstand wächst quadratisch mit der aufzuwendenden Zeit bzw. der Entfernung.
  - Bus/Straßenbahn: $ZB_F = 0{,}506502 + 0{,}268792 \cdot e^{0{,}396047 \cdot t_F}$
  - U-/Stadtbahn: $ZB_F = 0{,}569179 + 0{,}274495 \cdot e^{0{,}342636 \cdot t_F}$
  - S-Bahn: $ZB_F = 0{,}573903 + 0{,}299241 \cdot e^{0{,}282115 \cdot t_F}$
- Wartezeit t_W: Der Begriff Haltestelle ist überwiegend negativ belegt, da die Passivität des Fahrgastes und das Warten als nutzlose Zeitverschwendung aufgefasst werden. Zudem ist der Fahrgast je nach Infrastruktur mehr oder weniger Witterungseinflüssen ausgesetzt. Da man diese Zeit zudem nicht privat wie im PKW verbringt, wird diese Zeit negativer ausgelegt und es ergeben sich hohe Zeitbewertungsfunktionen für die Wartezeit auf das Verkehrsmittel an der Einstiegshaltestelle.
  - Bus/Straßenbahn: $ZB_W = 1{,}632673 + 0{,}256768 \cdot e^{0{,}459240 \cdot t_W}$
  - U-/Stadtbahn: $ZB_W = 0{,}787579 + 0{,}511118 \cdot e^{0{,}341750 \cdot t_W}$
  - S-Bahn: $ZB_W = 0{,}342126 + 1{,}043384 \cdot e^{0{,}167255 \cdot t_W}$
- Umsteigezeit t_U**:** Die negative Konnotation des Umsteigens ebenfalls vorhanden.
  - Bus/Straßenbahn: $ZB_U = 0{,}744725 + 0{,}284470 \cdot e^{0{,}437923 \cdot t_U}$
  - U-/Stadtbahn: $ZB_U = 0{,}498569 + 0{,}557746 \cdot e^{0{,}317002 \cdot t_U}$
  - S-Bahn: $ZB_U = 0{,}194192 + 0{,}926407 \cdot e^{0{,}22600 \cdot t_U}$

Aus der Summe der Widerstandskomponenten ergibt sich anschließend der Verkehrswiderstand als fahrzeitäquivalente Reisezeit t_R im ÖPNV:

$$w_{ÖV} = t_R = t_{F,zu} * ZB_F + t_W * ZB_W + t_B + t_U * ZB_U + t_{F,ab} * ZB_F.$$

Dies kann für Maßnahme-Wirkungs-Berechnungen unter Berücksichtigung jedes Widerstandes von jedem konkurrierenden Verkehrsmittel wie z. B. Benzinpreiserhöhungen oder Parkgebühren, und zur Ermittlung der Synergieeffekte von Maßnahmen verwendet werden. Um ökonomische Randbedingungen nicht zu vernachlässigen, wurden zudem Kostenwiderstände w_K erstellt (Walther 1991). Zentraler Parameter dabei ist der Äquivalenzfaktor α, der für die Umwandlung der Kosten in Widerstandswerte notwendig ist. Darüber wird der Anteil des Einkommens, den ein potenzieller Nachfrager für die Verkehrsteilnahme auszugeben bereit ist, gewichtet (Walther 1996, S. 26). Norta (2012) ermöglicht basierend auf Maidment (1988) zudem die Bewertung von außerplanmäßigen Verspätungen im Fahrzeug.

2.5.2 Nachfrage

Modellierung der Verkehrsnachfrage

Durch die räumliche Verteilung der Aktivitätenstandorte des menschlichen Lebens entsteht unmittelbar der Bedarf für Ortsveränderungen (Louen 2013, S. 34). Für deren Befriedigung entsteht Verkehrsnachfrage durch die Personen, die konkurrierende Ziele unter Beachtung des Aufwandes der Ortsveränderung prüfen und bewerten (Lohse 2011, S. 174). Personenverkehrsmodelle bilden diesen individuellen Entscheidungsprozess ab (Louen 2013, S. 34).

Diesen Entscheidungsprozess gilt es bei der Abbildung der Nachfrage zu berücksichtigen, wobei die Modellierung jeder einzelnen Entscheidungsfindung durch die große Anzahl an individuellen Verkehrsteilnehmern, nachfragerelevanten Kriterien und deren subjektiver Wahrnehmung kaum vollständig abbildbar ist. Daher werden zur Abschätzung von Maßnahmenwirkungen und Nachfrageprognose Verkehrsmodelle eingesetzt. Verkehrsnachfragemodelle bilden dabei die Nachfrageentstehung prozesshaft ab (Louen 2013, S. 34). Nach Lohse (2011, S. 174) kommt der Wahrnehmung und Schätzung von Verkehrsaufwänden, wie Entfernungen, Fahrzeiten, Wartezeiten, direkte und indirekte Fahrtkosten usw., eine große Rolle in der Verkehrsnachfragemodellierung zu.

Zum Zweck der Beschreibung von Verkehrsnachfrage und Verkehrsverhalten gibt es unterschiedliche Modellformen, siehe Louen (2013, S. 34 ff.). Klassischerweise geschieht dies unter Anwendung von vier Stufen:

1. Das Mobilitäts- und Transportaufkommen (Verkehrserzeugung),
2. Die Zielwahl (Verkehrsverteilung),
3. Die Verkehrsmittelwahl (Modal-Split) und
4. Die Routenwahl (Verkehrsumlegung).

Das sequenzielle Vier-Stufen-Modell der klassischen Verkehrsplanung

Die Modellierung der Verkehrsnachfrage erfolgt klassischerweise unter Anwendung des „Vier-Stufen-Modells“. Jede Stufe stellt ein Teilmodell dar, und diese werden sequenziell bearbeitet.

1. Das Mobilitäts- und Transportaufkommen (Verkehrserzeugung)

Die *Verkehrserzeugung* stellt die erste Stufe dar, sie ermittelt das Verkehrsaufkommen und beschreibt somit das Entstehen eines Mobilitätsbedürfnisses (Lohse 2011, S. 213). Die Mobilität stellt die Anzahl der Wege und zurückgelegten Wegstrecken von Personen oder Gruppen pro Zeiteinheit dar (Birn und Schäfer 2016, S.76).

Wesentliche Variablen für das individuelle Mobilitätsverhalten sind nach Birn und Schäfer (2016) Alter und Geschlecht, Einkommen, Beruf, Ausbildung, Arbeitslosenstatus und die Größe des Haushaltes, in dem die betroffene Person lebt. Die Anzahl der Einwohner, differenziert nach den individuellen Variablen, die Anzahl der Beschäftigten, der Schulplätze, die Größe und Attraktivität von Einkaufs- und Freizeiteinrichtungen sowie das Angebot von Dienstleistungseinrichtungen beeinflussen das Aufkommenspotenzial einer Verkehrszelle (Birn und Schäfer 2016, S. 76).

Quell- und Zielverkehr einer Zelle wird dann als Verkehrsaufkommen über die Anzahl der Wege von Personen pro Raum- und Zeiteinheit erfasst. Entstehende bzw. angezogene Verkehre basieren auf der Annahme, dass diese Variablen Nutzungszwecke erzeugen, die innerhalb unterschiedlicher Modellansätze das Verkehrsaufkommen entstehen lassen (Louen 2013, S. 39).

2. Die Zielwahl (Verkehrsverteilung)

Durch die Modellierung der *Verkehrszielwahl* werden Quell- und Zielverkehre zu Fahrten verknüpft, die als Verkehrsverflechtungen dargestellt werden können (Louen 2013, S. 40). Es entsteht eine Verkehrsverteilung, die die Wege der Personen im Verkehrssystem auf unterschiedliche Ziele verteilt.

Neben der Zielattraktivität ist auch die verfügbare Verkehrsbeziehung im Sinne von Verkehrswegen und öffentlichem Verkehr beeinflussend (Birn und Schäfer 2016, S. 76). Verteilungen basieren zumeist auf spezifischen Widerständen zwischen Quelle und Ziel, die die subjektive Einschätzung zu einem Teil der Beurteilungsgrundlage für Entscheidungen machen (Louen 2013, S. 41).

3. Die Verkehrsmittelwahl (Modal-Split)

Bei der *Verkehrsmittelwahl* werden die Fahrten zu den unterschiedlichen Zielen auf die alternativ verfügbaren Verkehrsmittel aufgeteilt, sodass sich ein Modal-Split ergibt.

Viele gebräuchlichen Modelle zur Bestimmung der verkehrsmittelspezifischen Anteile des Marktes verwenden eine Gegenüberstellung der Verkehrswiderstandswerte (Birn und Schäfer 2016, S. 79). Basierend auf der Annahme von rationalen Entscheidungen kann daher davon ausgegangen werden, dass sich der Fahrgast für den geringsten Widerstand entschiedet.

Wichtige Determinanten der Mobilität und der Verkehrsmittelwahl sind bspw. nach Birn und Schäfer (2016, S. 75) :

- Verfügbarkeit der Verkehrsmittel,
- Reisezeit,
- Kosten,
- Umsteigenotwendigkeit und -häufigkeit,
- Komfort sowie
- Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit.

Neben der rationalen Wahlbetrachtung ist für die Wahl des Verkehrsmittels eines Fahrgastes zu berücksichtigen, dass diese stark von der Verfügbarkeit der verschiedenen Verkehrsmittel abhängt. Fahrgäste ohne Zugang zu Pkw oder Mitfahrgelegenheit werden oft als sogenannte Captive Riders modelliert. Fahrgäste, die aufgrund von Rahmenbedingungen oder persönlicher Einstellung nur den motorisierten Individualverkehr (MIV) nutzen, sind dann demzufolge sogenannte Captive Drivers. Fahrgäste ohne Bindung sind wahlfrei und sogenannte Choice Riders (Birn und Schäfer 2016, S. 80).

4. Die Routenwahl (Verkehrsumlegung)

Abschließend werden für die Fahrten bei der *Verkehrswegewahl* unterschiedliche Routen gesucht und die Fahrten darauf umgelegt (Lohse 2011, S. 213). Im ÖPNV wären dies die möglichen Verbindungen. Oftmals gilt die Route mit dem in Summe über alle Widerstandskomponenten, die bspw. von Walther (1991) beschrieben wurden, geringsten Widerstand als die beste Route.

Bei diesem sequenziellen Vorgehen des Vier-Stufen-Modells ist zu berücksichtigen, dass der Zusammenhang der Teilmodelle eingeschränkt und die Entscheidungsabfolge nicht immer zutreffend ist. So finden im Nutzeralltag Verkehrsmittel- und Routenwahl meist gleichzeitig statt. Gerade beim ÖPNV erfolgt die Entscheidung durch den Fahrgast im Rahmen einer Verbindungsabfrage, auf der seine Entscheidung zu Abfahrtszeit, Verkehrsmittel und Route gleichzeitig getroffen wird.

Die Verbindungsabfrage im ÖPNV erfolgt klassischerweise über ein Fahrplanauskunftssystem des anbietenden Verkehrsunternehmens oder des zugehörigen Verkehrsverbunds. In vielen Fällen steht

dahinter die Software HAFAS (HaCon Ingenieurgesellschaft mbH 2009). Der Algorithmus zur Verbindungssuche wird vom anbietenden Unternehmen selbst kontinuierlich weiterentwickelt wie bspw. in Twele (2020). Daneben existiert umfangreiche Forschung zu Routing, wie Navigation im Auto, oder Fahrplanauskunft im öffentlichen Verkehr (Fahnenschreiber et al. 2019, S. 1). Zu erwähnen ist hier bspw. das langjährige Projekt MOTIS, das ein Informationssystem entwickelt hat, das nach einer pareto-optimalen Verbindung unter Abwägung von Reisezeit und Umsteigeanzahl sucht (Fahnenschreiber et al. 2016, S. 178).

2.5.3 Verkehrliche Maßnahmen

Nach Boltze et al. (2020) ist Reisendenstromlenkung die optimale Steuerung des laufenden Verkehrs, die bei Abweichungen vom Regelbetrieb Anwendung finden sollte. Deren „Ziel ist es ein effizientes Störfallmanagement, welches neben der Angebotsanpassung insbesondere auch eine differenzierte Beeinflussung der Nachfrage ermöglicht“ (Boltze et al. 2020, S. 53) , die es im ÖPNV bisher kaum gibt. Die Autoren untersuchen daher die Beeinflussbarkeit von Reisenden und die Verhaltensänderungen bei Beeinflussungsmaßnahmen. Zur Bewertung der nachfrageseitigen Beeinflussung wird „die Wartezeitensumme für die Reisenden als Kriteriuem verwendet“ (Boltze et al. 2020, S. 56).

Die Autoren heben hervor, dass die Maßnahmen rechtzeitig kommunziert werden müssen und die Steuerung von Angebot und Nachfrage eine intensive Abstimmung der Maßnahmen erfordert. Hierzu sind vorab geplante und abgestimmte Strategien notwendig. Dabei können „für spezifische Störfallsituationen […] geeignete Maßnahmenbündel und zugehörige Handlungskonzepte als Störfallstrategien definiert werden“ (Boltze et al. 2020, S. 54). Bei der Erstellung der verkehrlichen Maßnahmen ist zudem darauf zu achten, dass keine Überlastungen entstehen. Da dabei auch andere Verkehrsanbieter miteinbezogen werden, hat Crespo Materna (2020) ein Modell zur Abschätzung der Restkapazität in öffentlichen Verkehrsmitteln entwickelt.

Ghaemi (2018) erstellt ein dynamisches Fahrgastmodell, das für Quelle-Ziel-Beziehungen alternative Routen ermittelt und diesen Fahrgästen zuordnet. Dabei wird ein Modell zur Entscheidung bei der Alternativenwahl durch den Fahrgast verwendet, sodass verschiedene Kennwerte zur Anzahl der betroffenen Fahrgäste erzeugt werden können. Hierbei entsteht aber kein abgestimmes Maßnahmenbündel, das eine Kommunikation an den Fahrgast ermöglicht, sondern nur eine Abschätzung der Auswirkungen in Kennzahlen.

Ein Grobkonzept für ein Vorgehen zur Reisendenstromsteuerung wird in DB Regio AG (2013b, S. 35) aufgezeigt. Es zeigt ein beispielhaftes Ablaufdiagramm, das für einen zu definierenden Störfall angewendet werden kann. Im ersten Teil ist dabei ein Konzept mit betrieblichen Maßnahmen zu erabeiten, auf das im zweiten Teil allgemeine verkehrliche Maßnahmen folgen. Maßnahmen, die zur Anwendung empfohlen werden, sind in Tabelle 2-3 dargestellt.

Tabelle 2-3: verkehrliche Maßnahmen nach DB Regio AG (2013b, S. 38)

Maßnahmenkategorie		Maßnahmen
verkehrliche Kompensation	modale Verlagerung von Fahrgästen	auf andere ÖV-Verkehrsträger (Bus, U-Bahn, Dritte EVU)
		auf Fernverkehr (Freigabe der Züge)
		BNV (Bustransfer – wenn Bf/Streckenabschnitte nicht bedient)
		BNV (Taxi – wenn Bf/Streckenabschnitte nicht bedient)
	räumliche Verlagerung von Fahrgästen	auf andere (eigene) Regio-Linien (auf anderen Strecken)
		Sperren des Zugangs zu Bahnhöfen (Stadtgebiet)
	zeitliche Verlagerung von Fahrgästen	Fahrgastlenker („bitte kommen Sie in einer Stunde wieder“)
	Anschlusssicherung	

2.6 Zusammenfassung

Sowohl in der Praxis als auch der Forschung sind Möglichkeiten zur unterstützenden Konfliktlösung bei einzelnen Konflikten in der Ad-hoc-Disposition vorhanden. Die Vielzahl der Probleme, die während einer Störung entstehen, kann jedoch nicht ad hoc gelöst werden. Dafür werden vorgeplante Störfallprogramme verwendet, deren Nutzen und Notwendigkeit sowohl in Praxisveröffentlichungen und Forschungsarbeiten als auch den geführten Experteninterviews sehr deutlich wurde.

Zur Planung von Störfallprogrammen liegen für die betrieblichen Maßnahmen sowohl die praxisnahen Leitfaden und Richtlinien sowie insbesondere die Forschungsarbeiten von Chu (2014), Crespo Materna (2020) und Steinbach und Crespo Materna (2021) vor. Deren Anwendung und die händische Erstellung von SFP erfordern sehr erfahrene, netzkundige Mitarbeiter, die bspw. lange Zeit im Bereich der Disposition tätig waren oder sind. Um diese zu unterstützen, wurden in Chu (2014) händisch machbare Berechnungshilfen für grobe Abschätzungen entwickelt, deren benötigte Eingangsgrößen dem Ersteller nicht unbedingt zur Verfügung stehen, die aufwendig sind und keine Rückmeldung enthalten, um eine Qualitätsaussage zum geplanten Störfallprogramm zu erhalten.

Zur Anwendung von Störfallprogrammen liegen Algorithmen zur Unterstützung der Disponenten vor, um die Überführung in einen stabilen Betrieb zu erleichtern oder Anpassungen aufgrund von Abweichungen vom geplanten Störfall vorzunehmen. Diese Ansätze basieren darauf, dass das anzuwendende vorab geplante Störfallprogramm funktionsfähig und nicht fehlerbehaftet ist. Zudem planen diese Ansätze, bereits damit bestehende Maßnahmen zur Fahrgastlenkung umzusetzen und nur leicht anzupassen.

Es werden daher folgende Forschungslücken erkannt:

- Funktionsfähigkeit wird, wenn überhaupt, nur über die Erfahrung des Erstellers und die mehrfache Anwendung inkl. interaktiver Anpassung sichergestellt,
- Abschätzung der Einschwingfähigkeit und Qualität in Planung nur sehr grob, vermischt mit der Durchführung vorhanden und händisch kaum berechenbar,

- Fahrgastlenkung besteht meist nur aus Information, welche Züge wie ausfallen und frühzeitig enden.

Um diese Lücken zu schließen und tatsächlich eine Kundenorientierung im Störfallprogramm zu erreichen, ist der Planungsprozess für den Ersteller zu erleichtern. Dieser benötigt dazu eine (teil-)automatisierte Unterstützung bei der Erstellung von SFP.

3 Problemstellung und Lösungsansatz

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche und der Experteninterviews werden in diesem Kapitel die Problemstellung spezifiziert und ein zugehöriger Lösungsansatz entwickelt.

3.1 Aufgabenstellung und inhaltliche Abgrenzung

Um einen Teil der erkannten Forschungslücken zu schließen und die Erstellung von kundenorientierten Störfallprogrammen zu ermöglichen, ist der Planungsprozess für den Ersteller zu erleichtern. Dieser benötigt dazu eine (teil-)automatisierte Unterstützung bei der Erstellung von Störfallprogrammen. Hierfür wird im Folgenden die inhaltliche Zielsetzung zunächst festgelegt und anschließend durch eine inhaltliche Abgrenzung der in- und out-of-scope Bereiche der Aufgabenstellung konkretisiert.

3.1.1 Zielsetzung

Durch Kapitel 2 wird deutlich, dass bei der Erstellung eines Störfallprogramms weiterhin große Hürden bezüglich des Aufwands, der Sicherstellung der geplanten betrieblichen Qualität in stabiler und Einschwingphase und des Einbezugs der Kundenorientierung bestehen. Diesen Lücken soll sich mittels der vorliegenden Arbeit im nun festzulegenden Rahmen gewidmet werden.

Ziel der Arbeit ist daher, die Konzeption eines (teil-)automatisierten Unterstützungssystems für die zug- und fahrgastbezogene Planung von Störfallprogrammen. Für ein Entscheidungsunterstützungssystem sind Algorithmen für die notwendigen innovativen Fachlichkeiten zu entwickeln, die somit die Intelligenz für ein auf Basis dieser Dissertation zu entwickelndes SFP-Tool bereitstellen. Die Software des Unterstützungssystems soll mit den zu entwerfenden Algorithmen sowohl einem EVU als auch einem integrierten Unternehmen nutzen und dort die Planung von Störfallprogrammen durch erfahrene Ersteller erleichtern und verbessern.

Hierzu soll das Konzept bestehend aus zugbezogenen Maßnahmen des Störfallprogramms weiterhin durch einen Ersteller in einer Software erstellt werden. Der geplante Zustand entspricht dabei der stabilen Phase. Diese Planung soll allerdings in der Software des Unterstützungssystems erfolgen können, das auf den Eingaben basierend folgende Unterstützungsziele erreicht:

- (teil-)automatisierte Bewertung der Planung in Bezug auf die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase,
- (teil-)automatisierte Bewertung der Planung in Bezug auf die Einschwingphase,
- (teil-)automatisierte Erstellung und Bewertung eines fahrgastbezogenen Maßnahmenkonzepts und
- kundenorientierte Bewertung des Störfallprogramms.

Entsprechend der angestrebten Kundenorientierung ist unter einem Störfallprogramm nicht mehr nur die Planung von zugbezogenen Maßnahmen zu verstehen, sondern ein Störfallprogramm soll eine integrierte Planung mit Maßnahmen für Züge und Fahrgäste darstellen.

Für die Unterstützungsziele sind die notwendigen Inhalte zu bestimmen und die Algorithmen zu erstellen. Das SFP-Tool selbst und die zugehörigen Aufgaben wie bspw. Programmierung, Benutzeroberfläche, Datenverfügbarkeit, -bereitstellung oder -aufbereitung sind dabei nicht Gegenstand der Arbeit. Somit ist eine Behebung von Datenmängeln bzw. der Nicht-Verfügbarkeit derer nicht Teil der Aufgabe. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei den adressierten Unternehmen ggfs. die Infrastrukturdaten nicht in der Qualität wie bei einem EIU vorliegen. Die Algorithmen sind somit für

eine sehr rudimentäre Infrastrukturdatenverfügbarkeit zu erstellen. Sollten Fahrgastdaten relevant werden, ist aufgrund aktueller Digitalisierungsbestrebungen in diesem Bereich von einer umfassenden Datenverfügbarkeit auszugehen. Bestehende Algorithmen und Software, die die angestrebten Ziele unterstützen und ergänzen, sind als Black Box einzubinden, d. h. eine inhaltliche Überarbeitung oder eine Definition der Schnittstelle ist nicht grundsätzlich erforderlich.

Zielkonflikt der zug- und fahrgastbezogenen Konzepte

Die adressierte Problemgröße umfasst die Erstellung eines kundenorientierten Störfallprogramms. Hierzu ist bisher nach Abschnitt 2.4 bekannt, dass ein Störfallprogramm – seine angewandten Maßnahmen sowie die darauf aufbauenden Informationen – umso besser funktioniert, je schneller es vollständig umgesetzt ist. Es ergibt sich das Ziel, schnell betrieblich stabil zu sein. Daraus könnte geschlossen werden, dass ein kundenorientiertes Störfallprogramm eines ist, das schnell einschwingt.

Ein schnelles Einschwingen, im Speziellen der zugehörige Abbau von Verspätungen, wird u. a. mit einer Reduktion der Auslastung der Infrastruktur durch weniger verkehrende Fahrzeuge zügiger erreicht. Ein reduzierter, aber planmäßiger Betrieb bedeutet jedoch zugleich ein reduziertes Angebot für den Fahrgast. Im Extremfall würde dies bedeuten, den Betrieb unmittelbar einzustellen und somit eine Einschwingdauer von null Minuten zu erreichen, wobei klar ist, dass dieses Vorgehen nicht kundenorientiert ist.

Es liegt somit ein Zielkonflikt zwischen dem schnellen Erreichen eines stabilen Betriebs und dem Erhalt eines attraktiven Angebots für den Fahrgast vor. Daher wird eine kundenorientierte Bewertung eines Störfallprogramms nötig. Neben der Betrachtung der betrieblichen Maßnahmen müssen auch konkrete Maßnahmen für den Fahrgast entwickelt werden, die über einen schnell erreichbaren stabilen Betrieb hinausgehen. Die Kundenorientierung hängt von den weiterhin bestehenden Relationen und der Existenz sowie Attraktivität von Alternativverbindungen ab.

Die beiden zu erstellenden und bewertenden Konzepte beschreiben die Planung der stabilen Phase. Die Bewertung des Betriebskonzepts für die stabile Phase erfordert, dass diese Stabilität ebenfalls aufrechterhalten werden kann. Eine stabile Phase ist aber keine kundenorientierte Bewertung. Eine Aussage zu den Auswirkungen auf den Fahrgast entsteht erst bei Betrachtung der verbleibenden verkehrlichen Möglichkeiten im Rahmen des Verkehrskonzepts. Da die betrieblichen Maßnahmen dort eine Eingangsgröße darstellen, werden diese darüber indirekt in ihrer Kundenorientierung bewertet. Dies vermeidet eine zu starke Reduktion des betrieblichen Angebots und adressiert so einen Teil des zu Beginn erläuterten Zielkonflikts zwischen dem schnellen Erreichen eines stabilen Betriebs für den Kunden und dem Erhalten eines attraktiven Angebots für den Fahrgast.

3.1.2 In- und out-of-scope

In der vorliegenden Arbeit wird sich auf den Schienenpersonennahverkehr fokussiert, insbesondere die S-Bahnverkehre, da dort die Anwendung von Störfallprogrammen geläufig und aufgrund der Taktdichte sehr effektiv und von großer Relevanz ist. Störfallprogramme sind entsprechend der in Unterabschnitt 2.3.1 gewählten Definition Handlungskonzepte für bestimmte Situationen, in deren Rahmen vorab ausgewählte und bereits definierte Dispositionsmaßnahmen umgesetzt werden. Daher handelt es sich um ein Unterstützungssystem bei der Planung, das nicht zur Erstellung von Echtzeitdispositionskonzepten gedacht ist.

In der Erstellung und Bewertung der Planung sind zugbezogene – also betriebliche – Maßnahmen und die Möglichkeiten für fahrgastbezogene – also verkehrliche – Maßnahmen zu berücksichtigen.

Die Bewertung der ***betrieblichen Maßnahmen*** erfolgt für ein durch den Ersteller erzeugtes Betriebskonzept im Störfall und soll dessen Funktionsfähigkeit überprüfen. Dabei sind die Arbeiten von Chu (2014) zu verwenden und bei Bedarf anzupassen sowie zu detaillieren. Das Ergebnis ist ein funktionsfähiges Betriebskonzept, wobei die Granularität grundsätzlich linienspezifisch ist, es aber auch möglich sein soll, dass der Ersteller einzelne Fahrten mit einer Maßnahme adressiert. Die zugnummernscharfe Umsetzung eines linienspezifischen Störfallprogramms erfolgt bei Anwendung bspw. unterstützt durch die Ergebnisse von Crespo Materna (2020).

Zum Zeitpunkt der Planung ist nicht bekannt, ob sich bei Anwendung des SFP Züge im direkten Einflussbereich der Störung befinden oder aus anderen Gründen nicht im Rahmen der im Störfall geplanten Maßnahmen verkehren können. Diese benötigen einen Eingriff durch den Disponenten im Rahmen der Durchführung und werden bspw. durch die Arbeiten von Crespo Materna (2020) abgedeckt. Sollten Abweichungen der Infrastrukturverfügbarkeit bei Anwendung des SFP eine Anpassung des SFP nötig machen, so sind dabei die Erkenntnisse von Steinbach und Crespo Materna (2021) verwendbar. Für diese Algorithmen zur Anpassung eines SFP soll die vorliegende Arbeit einen möglichen Input darstellen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden daher die Zugfahrten, die durch das Störfallprogramm direkt adressiert werden, bewertet. Verortet werden die Zugfahrten zu Störungsbeginn anhand ihrer Standorte entsprechend dem Fahrplan im Regelbetrieb und nach Ausrufung erfolgt der Betrieb entsprechend den geplanten Maßnahmen im SFP.

Da Umlauf- und Dienstpläne meist keine kontinuierlichen Regelmäßigkeiten aufweisen, lassen sich diese nicht in ein allgemeingültiges, vorhergehend geplantes Störfallprogramm integrieren. Die Existenz des Störfallprogramms erleichtert die Arbeit der Fahrzeug- und Personaldisposition aber zumindest soweit, dass den Disponenten der kommende Betriebsablauf im Störfall bekannt ist und durch den Disponenten schneller Maßnahmen ergriffen werden können, da die Planung zur Zugfahrt bereits erfolgte. Auch sind die Triebfahrzeugführer bei Ausrufung eines Störfallprogramms direkt über den kommenden Betriebsablauf informiert.

Daher wird in der Praxis für einen Verfügbarkeitskonflikt der Infrastruktur ein generisches Störfallprogramm erstellt. Hierbei ist im Rahmen dieser Arbeit sicherzustellen, dass Belegungskonflikte in der Planung vermieden werden. Da die Umlaufkonflikte nicht generisch erkennbar sind, weil diese stark vom Auftretenszeitpunkt der Störung und den tagesaktuellen Planungen zu Personal und Zugumlauf abhängen, werden diese nicht betrachtet. Da die Maßnahmen für den Fahrgast im Störungsfall umfassender Betrachtung finden sollen als nur in der Bindung zweier Züge, werden Anschlusskonflikte ebenso nicht berücksichtigt.

Da die Störungsdauer, Laufzeit des Störfallprogramms und die Anpassungen bei seiner Durchführung viele Unbekannte erzeugen, ist der Übergang vom Störungs- zum Regelbetrieb sehr vage und die Rückführung somit nicht Bestandteil der Planung im Rahmen dieser Arbeit.

Die ***verkehrlichen Maßnahmen*** sind unter Berücksichtigung der Bedürfnisse und der Angebotswahrnehmung der Fahrgäste zu ermitteln. Das Ergebnis ist ein funktionsfähiges Verkehrskonzept, wobei die Granularität so aufzubauen ist, dass die Maßnahmen im Verkehrskonzept kundenorientiert sowohl über individuelle als auch kollektive Medien entsprechend Unterabschnitt 2.5.1 kommuniziert werden können.

Bei der Konzepterstellung ist für die Ermittlung von Verbindungen auf klassische Fahrplanauskunftssysteme zu verweisen. Sollten andere Verkehrsmittel Bestandteil der Maßnahmen sein, so kann die Ermittlung der Restkapazität von Crespo Materna (2020) eingebunden werden.

Da die Verhaltensweisen der Fahrgäste höchst individuell sind und von vielen Rahmenbedingungen abhängen, sind diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur grob abzuschätzen. Nicht Bestandteil dieser Arbeit ist der Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells.

Für die verkehrlichen Maßnahmen und die ***Bewertung des Störfallprogramms*** ist ein Ansatz zu entwickeln, der die Akzeptanz für die individuelle eigenständige Verlagerung von Fahrgästen aufgrund deren Wahrnehmung berücksichtigt.

Basierend auf dem Stand des Wissens, der Aufteilung der Funktionen und der Zielsetzung ist in Abbildung 3-1 ein Systembild inklusive möglicher Input(funktionen) und der angestrebten Ergebnisse dargestellt.

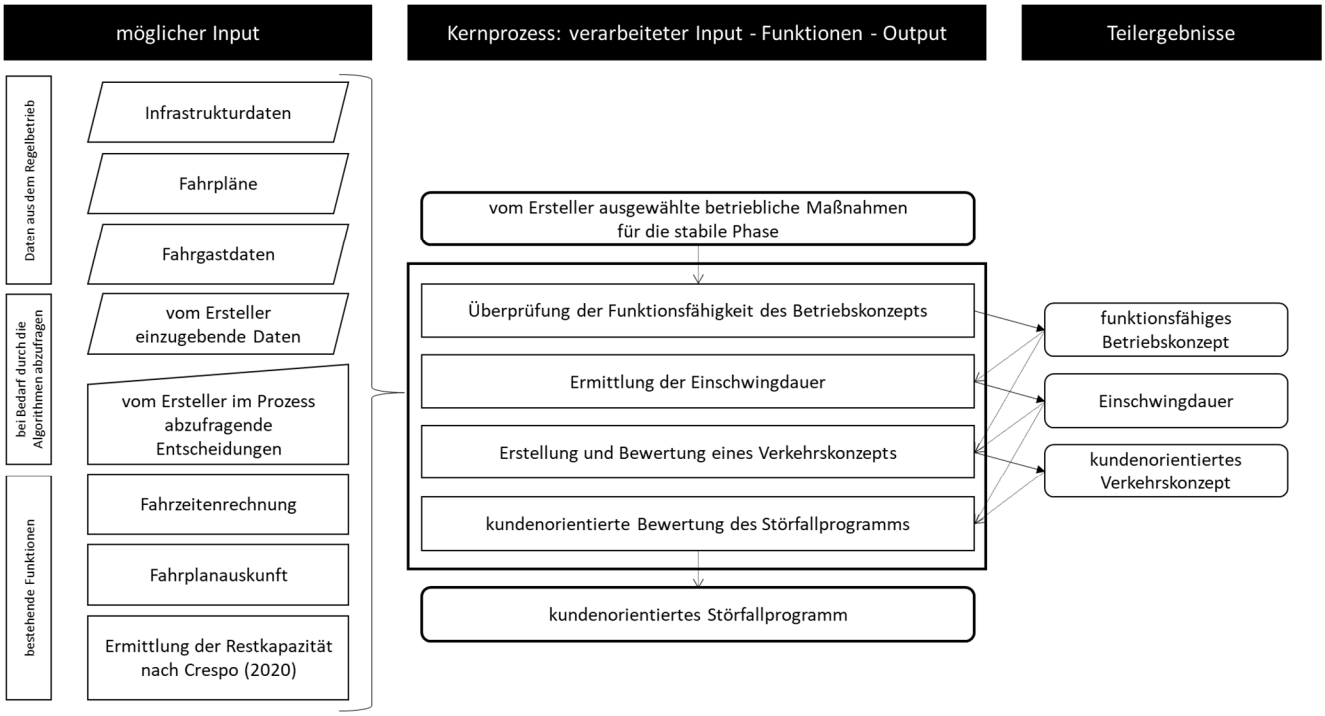


Abbildung 3-1: Systembild der Arbeit (eigene Darstellung)

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird zur Strukturierung und zur Förderung der Nachvollziehbarkeit das komplexe System problemadäquat weiter aufgeteilt und systematisch erstellt. Die Bereitstellung und Modellierung der Daten ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Da es sich bei der Arbeit nicht um eine zur Programmierung dienende Fachspezifikation handelt, wird der Input der Algorithmen nicht vollständig aufbereitet. Es bedarf nur des Bezuges von in der Arbeit erstellten oder besonders häufig verwendeten Eingangsgrößen.

Im Folgenden werden die zu berücksichtigenden betrieblichen und verkehrlichen Maßnahmen erläutert. Anschließend wird im nächsten Unterabschnitt die grundlegende Herangehensweise zur Ermittlung eines Lösungsansatzes der nun spezifizierten Problemstellung beschrieben.

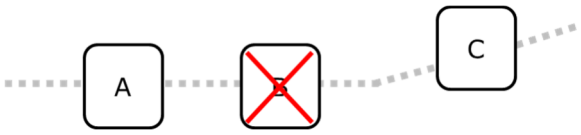
Zu betrachtende betriebliche Maßnahmen

Die in Abschnitt 2.3 zitierte Liste der möglichen betrieblichen Maßnahmen wurde im Abgleich mit den durchgeführten Interviews zum Vorgehen in der Praxis zielführend eingegrenzt und konkretisiert. Die folgenden sechs betrieblichen Maßnahmen für eine Anpassung des Laufwegs im Störfall mit vollständiger Einschränkung der Infrastruktur finden standardmäßig Anwendung in den SFP und sind daher in den Algorithmen zu berücksichtigen. Zudem sind zwei Fahrplan-Maßnahmen zu beachten, die klassischerweise bei einer teilweisen Einschränkung der Infrastruktur Anwendung finden.

Laufweg-Maßnahmen

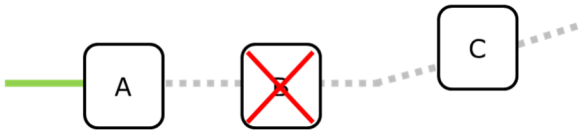
Laufweg-Maßnahmen werden hauptsächlich bei vollständig eingeschränkter Nutzung der Infrastruktur genutzt. Sie können aber auch bei teilweiser Einschränkung angewendet werden. Eine Kombination verschiedener Maßnahmen ist nicht zulässig, allerdings sind unterschiedliche Anpassungen und Varianten innerhalb einer Maßnahme möglich. Eine Laufweg-Maßnahme kann jedoch in Kombination mit einer Fahrplan-Maßnahme angewendet werden. Durch den Ersteller ist anzugeben, ob die Maßnahme für ausgewählte Züge oder eine Linie anzuwenden ist. Wenn eine Linie ausgewählt wird, so ist die Maßnahme auf alle Züge dieser Linie im Untersuchungszeitraum automatisiert zu übertragen.

Ausfall



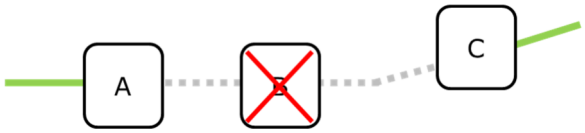
Die ausgewählte Zugfahrt/Linie entfällt komplett und das dafür geplante Fahrzeug wird in die Abstellung gefahren oder bleibt am Bahnsteig stehen.

Teilausfall

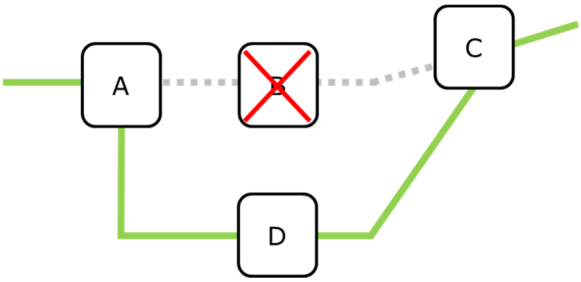


Für eine ausgewählte Zugfahrt/Linie wird eine Wende an einem vom Regelbetrieb abweichenden Wendebahnhof durchgeführt. Dieser wird SFP-Wendebahnhof genannt. Der restliche Streckenabschnitt entfällt. Sollte dies einen Fahrzeugüberschuss erzeugen, so ist durch den Ersteller anzugeben, ob und wo Fahrzeuge abgestellt werden sollen. Es wird dann wie die Maßnahme Ausfall behandelt. Beim Teilausfall werden somit nur ein Linienast und ein ursprünglicher Endbahnhof bedient. Die Maßnahme kann so angepasst werden, dass sie auf dem verbleibenden Linienast nicht am ursprünglichen Endbahnhof, sondern früher an einem SFP-Wendebahnhof gewendet wird.

Teilausfall mit Ersatz

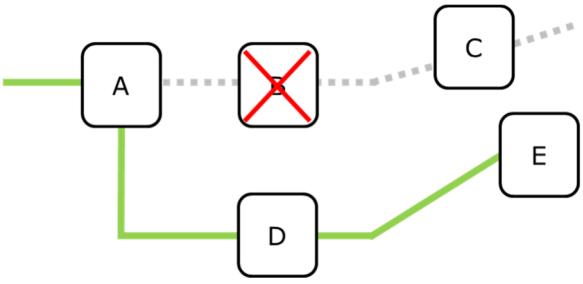


Für eine ausgewählte Zugfahrt/Linie werden zwei Wenden an zwei vom Regelbetrieb abweichenden Wendebahnhöfen durchgeführt. Diese werden SFP-Wendebahnhof genannt. Es werden zwei Linienäste bedient. Der die beiden Linienäste verbindende Streckenabschnitt wird nicht befahren. Es werden beide ursprünglichen Endbahnhöfe bedient. Die Maßnahme kann so angepasst werden, dass sie auf den beiden verbleibenden Linienästen jeweils oder in Teilen nicht am ursprünglichen Endbahnhof, sondern früher an einem SFP-Wendebahnhof gewendet wird.



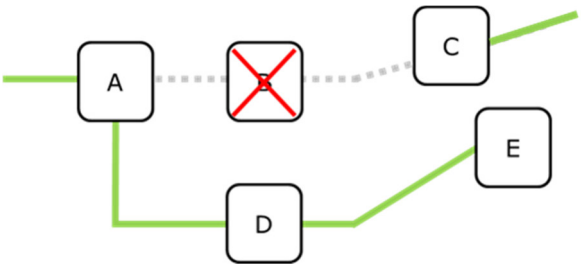
Umleitung

Die ausgewählte Zugfahrt/Linie wird auf einem Streckenabschnitt oder komplett über eine andere Strecke geführt. Die beiden ursprünglichen Endbahnhöfe bleiben erhalten. Dies kann bei Einhalten der Regeln nach DB Netz AG (2011) unter erleichterten Bedingungen durchgeführt werden.



Umleitung mit Teilausfall

Die ausgewählte Zugfahrt/Linie wird über einen Streckenabschnitt oder komplett über eine andere Strecke geführt. Zusätzlich wird mindestens eine Wende an einem abweichenden SFP-Wendebahnhof durchgeführt. Der restliche Streckenabschnitt entfällt. Es wird somit maximal ein ursprünglicher Endbahnhof bedient. Der neue abweichende SFP-Wendebahnhof kann jeweils auf der Umleitungsstrecke (Variante 1, in Abbildung dargestellt) oder dem Regelweg (Variante 2) liegen. Beide Varianten können auch kombiniert werden.



Umleitung mit Teilausfall und Ersatz

Die ausgewählte Zugfahrt wird über einen Streckenabschnitt oder komplett über eine andere Strecke geführt. Zusätzlich wird eine Wende an einem abweichenden Wendebahnhof durchgeführt. Der restliche Streckenabschnitt wird in Teilen mit einem Ersatz bedient. Es können somit, je nach Planung des Ersatzzuges, beide ursprünglichen Endbahnhöfe bedient werden.

Fahrplan-Maßnahmen (räumliche und/oder zeitliche Abweichung vom Fahrplan des Regelbetriebs): hauptsächlich zur Anwendung bei nur teilweise eingeschränkter Nutzung der Infrastruktur, kann aber auch in Kombination mit einer Laufweg-Maßnahme angewendet werden.

vom Fahrplan abweichende Fahrt auf dem Regelfahrweg	Die Zugfahrt kann auf dem geplanten Laufweg stattfinden, allerdings erzeugt die Maßnahme zur Weiterführung des Betriebs auf dem Regelfahrweg eine direkte zeitliche Verschiebung.
vom Fahrplan abweichende Fahrt im Gegengleis	Die Zugfahrt kann auf dem geplanten Laufweg stattfinden, allerdings erzeugen die Maßnahmen zur Weiterführung des Betriebs eine Abweichung vom Regelfahrweg, da das Gegengleis genutzt wird.

Zu betrachtende verkehrliche Maßnahmen

Es sind die in Unterabschnitt 2.5.3 genannten Maßnahmen grundlegend zu berücksichtigen. Eine Priorisierung oder ein Ausschluss möglicher Maßnahmen erfolgt ggfs. basierend auf den zu erstellenden Anforderungen im Rahmen der problemspezifischen Algorithmenkonzeption.

Sowohl für den betrieblichen als auch den verkehrlichen Teil des Störfallprogramms ist nur die Planung relevant. Für die Durchführung wird auf die entsprechenden Ansätze gemäß Abschnitt 2.4 verwiesen. Im Hinblick auf die in der Praxis angestrebte Anwendung der geplanten SFP ist bei der Erhebung der Anforderungen auch die Phase der Durchführung zu berücksichtigen.

3.1.3 Grundlegende Herangehensweise

Aufbauend auf der Detaillierung der Aufgabenstellung in den Unterabschnitten 3.1.1 und der Festlegung der Lücken, die in-scope liegen in Unterabschnitt 3.1.2, wird eine Systemarchitektur in Abschnitt 3.2 entwickelt. Um die Eignung für die Praxis sicherzustellen, wird in dieser Arbeit ein besonderes Augenmerk auf die möglichst umfängliche Erhebung der Anforderungen in Abschnitt 3.3 gelegt.

Zur Lösung des so grundsätzlich beschriebenen und konkretisierten Problems wird in Abschnitt 3.4 die übergeordnete Methode hergeleitet anhand einer Betrachtung der Problemgröße und des bestehenden Zielkonflikts eines kundenorientierten Störfallprogramms.

Darauf aufbauend wird unter Berücksichtigung der Systemarchitektur in Abschnitt 3.5 die Vorgehensweise für die gesamte Arbeit festgelegt.

Kapitel 3 schließt mit der Definition von Begriffen, die für die Arbeit von hoher Relevanz sind und gleichzeitig in der Literatur unterschiedlich genutzt werden oder bisher nicht in diesem Kontext Verwendung finden (Abschnitt 3.6).

3.2 Systemarchitektur

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die (teil-)automatisierte Planung eines Störfallprogramms, die die einzelnen Bestandteile des Zielkonflikts (siehe Abschnitt 3.1.1) bewertet und somit bei dessen Auflösung unterstützt. Da das Thema sehr umfassend ist, sind unterschiedliche Ziele bei der Algorithmenentwicklung zu beachten. Die Problemgröße erfordert eine klare Strukturierung, die

Transparenz ermöglicht. Das Ziel liegt darin, die Algorithmen in der Praxis in eine Implementierung zu bringen. Dazu ist es nötig, auch potenzielle Weiterentwicklungen und notwendige Anpassungen zu ermöglichen. Diese Punkte werden durch eine modulare Systemarchitektur unterstützt.

Nach Jamshidi (2009, S. 31) lautet das Prinzip der Modularisierung, dass Module „in sich abgeschlossen, entkoppelt, skalierbar und hochgradig kohäsiv durch das Design“ sind.

Modulare Systemarchitekturen „werden durch das Gruppieren von Komponenten gebildet, die eine einzige unabhängige Funktion oder einzelne logische Aufgaben erfüllen; haben jeweils einen Punkt als Ein- und Ausgang; und sind separat prüfbar“ (Defense Acquisition University Press 2001, S. 58). Dabei ist eine hohe Kohäsion wünschenswert. Dies bedeutet, dass die Aufgaben, die das Modul erfüllt, eine große Ähnlichkeit haben. Um spätere Modifikationen leicht umzusetzen, wird eine Entkopplung durch die Module empfohlen.

Modularisierung ermöglicht u. a. die Anpassbarkeit des Systems (Defense Acquisition University Press 2001, S. 27). Sie erzeugt Vorteile, da jedem modularen Element ein gewisses Maß an Autonomie ermöglicht wird, diese sich leichter weiterentwickeln und kostengünstiger unterhalten sowie austauschen lassen (Jamshidi 2009, S. 31).

Weitere Vorteile der Modularisierung sind u. a. die Flexibilität bei der Wahl der Komponenten ohne Einfluss auf das Interface (Defense Acquisition University Press 2001, S. 97), die Möglichkeit zur Ergänzung ohne Notwendigkeit vollständiger Re-Designs oder Neuentwicklungen der Systemteile, die bereits bestehen. Zudem erleichtert es die Wartung und Aktualisierung (Space & Missile Systems Center U.S. Air Force 2005, S. 137).

Zudem erlaubt es die Integration von bestehenden Funktionen als zusätzliche Module, wie bspw. im Systembild in Abbildung 3-1 dargestellt.

Modulare Systemarchitektur der Erstellung und Bewertung von Betriebs- und Verkehrskonzept

Es sind somit ein Modulsystem Betriebskonzept und ein Modulsystem Verkehrskonzept aufzubauen. In jedem Modul der Modulsysteme können andere problemadäquate Lösungsverfahren zur Anwendung kommen, um die jeweils adressierte Problemgröße einzuschränken.

Die beiden Modulsysteme sind gekapselt, das heißt die einzelnen Module der beiden Systeme haben keine Querverbindung und interagieren nicht im Verlauf miteinander. Die Modulsysteme agieren nur über In- und Output miteinander.

Bei Betrachtung von Abschnitt 2.4 und Abschnitt 2.5.3 wird deutlich, dass sich betriebliche und verkehrliche Maßnahmen deutlich unterscheiden und somit getrennt betrachtet werden können. Für beide Arten der Maßnahmenbündel wurden der verwandte Stand des Wissens erfasst und zu bearbeitende Lücken festgestellt.

Es wurde bereits deutlich, dass die Erstellung der einzelnen Maßnahmenbündel komplex ist. Daher können nicht beide Maßnahmenbündel als ein Problem „kundenorientiertes Störfallprogramm“ gelöst werden. Deshalb soll die Aufteilung in Betrieb und Verkehr somit im Weiteren als Aufteilung in Teilprobleme beibehalten werden. Zudem sind im Rahmen der Planung eine Erstellung und eine Bewertung nötig.

Es ergibt sich somit folgende grundlegende Aufteilung in die Systembereiche Betrieb und Verkehr mit Teilproblemen gemäß Abbildung 3-2.

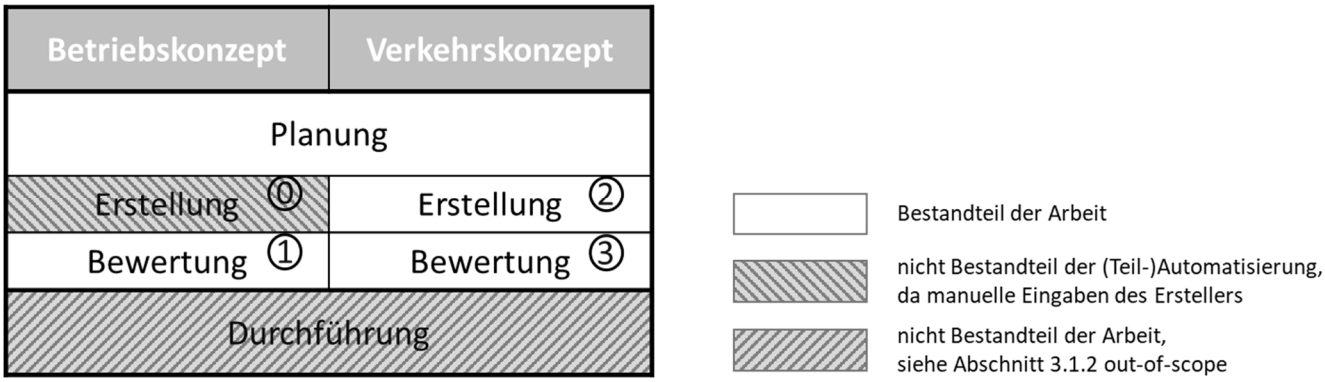


Abbildung 3-2: übergeordnete Systemarchitektur der Arbeit (eigene Darstellung)

Es ist offensichtlich, dass eine Bewertung der Maßnahmen erst nach deren Erstellung stattfinden kann, wodurch die Probleme in den oberen Zeilen vor denen in den unteren Zeilen gelöst werden müssen. Es ist noch zu klären, ob die beiden Spalten parallel stattfinden könnten.

Jede betriebliche Maßnahme, die der Ersteller einplant, verändert die Grundlage, auf der das Verkehrsangebot für den Fahrgast ermittelt werden kann. Damit durch das Verkehrskonzept zuverlässige Informationen kommuniziert werden können, muss das Verkehrskonzept funktionsfähig sein. Grundlage dafür ist, dass das betriebliche Angebot einem funktionsfähigen Betriebskonzept entspricht. Daher ist dieses zunächst zu erstellen und zu bewerten und erst anschließend ein Verkehrskonzept zu entwickeln; somit ist kein paralleler Prozess möglich. Es ergibt sich daher die nummerierte Reihenfolge aus Abbildung 3-2.

Dieses Ergebnis ist aber nicht mit einer Unabhängigkeit der beiden Konzepte gleichzusetzen. Wenn nach der Bewertung des Verkehrskonzepts keine Kundenorientierung festgestellt werden kann, dann gilt dies auch für das Betriebskonzept, sodass Nacharbeiten mit Anpassung der betrieblichen Maßnahmen notwendig sind. Es wird somit ein interaktiver Prozess, wie in Abbildung 3-3 dargestellt, ausgelöst.

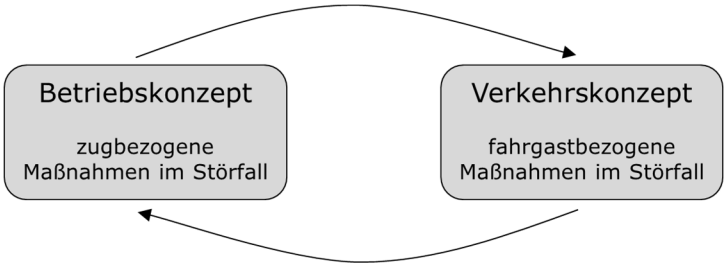


Abbildung 3-3: Interaktiver Prozess der Störfallprogrammplanung (eigene Darstellung)

Für die Bestandteile der Systemarchitektur werden im Weiteren nun die Anforderungen erarbeitet und somit entsteht eine tiefere inhaltliche Untersetzung, die anschließend in den Abschnitten Methode und Vorgehensweise mit einem Lösungsansatz zur Erreichung des Ziels versehen wird.

3.3 Anforderungen an die Lösung

Wie oben beschrieben, wird in dieser Arbeit besonderes Augenmerk auf eine möglichst umfassende Zusammenstellung der Anforderungen gelegt. Um dieses Ziel zu erreichen, erfolgt einerseits die Herleitung von Anforderungen top-down mit einer Zieluntersetzung entsprechend der Systemarchitektur.

Andererseits wurden zudem bottom-up Anforderungen aus der Praxis durch Workshops, Experteninterviews, Literatur und Brainstormings ermittelt. Dabei wurde die Problemabgrenzung gemäß Abschnitt 3.1 und die unterschiedlichen Ziele der Stakeholder berücksichtigt.

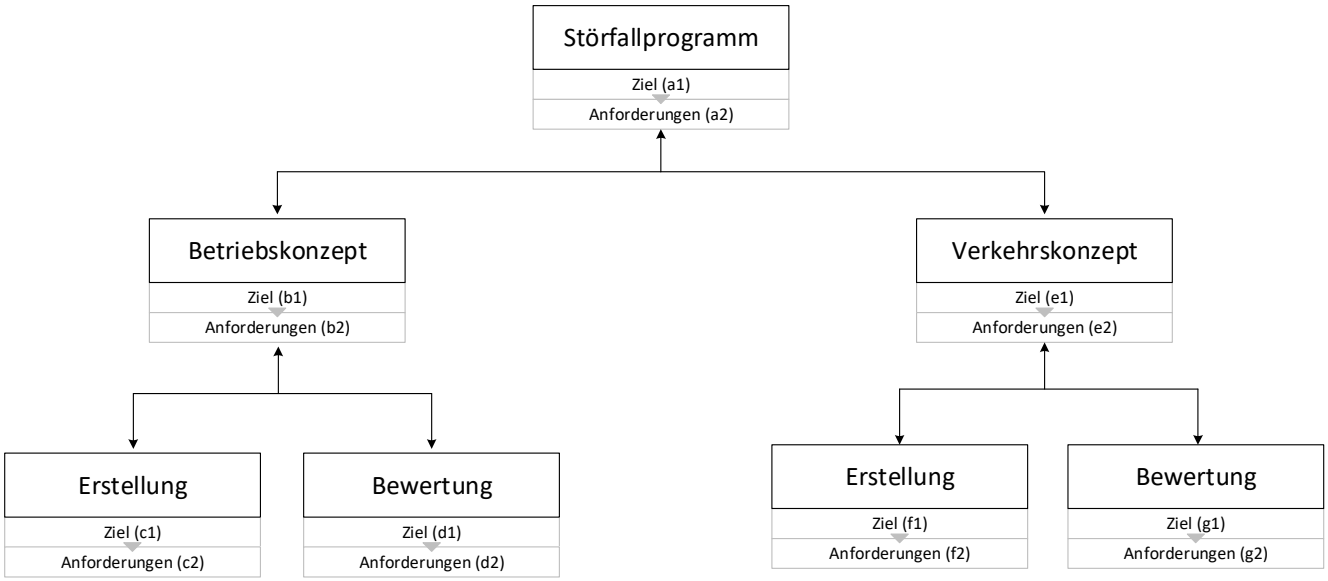
Die top-down und bottom-up erhobenen Anforderungen (siehe Abbildung 3-4), werden anhand der die Sichtweisen der wesentlichen Stakeholder – Ersteller, Anwender und Fahrgast – strukturiert und jeweils separat und pro Teilziel dargestellt. Dadurch kann erneut anhand der Kategorien die Vollständigkeit, durch Strukturierung und Abgleich innerhalb und über die Kategorien, geprüft werden. Neben den Anforderungen der Stakeholder gibt es zudem Systemanforderungen, die sich funktional (fachliche Ausprägung) und nicht funktional (programmiertechnische Ausprägung) auf die Software beziehen. Im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung sind die nicht funktionalen Anforderungen dabei nachrangig und wären für den Fall einer Feinspezifikation weiter zu detaillieren. Dazu kann auf Modelle zur Sicherung der Qualität im Softwareentwicklungsprozess, wie bspw. ISO/IEC 9126, verwiesen werden.

Da die Stakeholder und ihre Anforderungen aufgrund der Arbeitsbereiche und Arbeitsweisen teilweise unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen und in dieser Arbeit ein Fokus auf die kundenorientierte Planung gelegt wird, sind neben dem Nachrang der nicht funktionalen Anforderungen an eine Software die Anforderungen weitergehend nach deren Wichtigkeit wie folgt zu clustern:

- primäre Anforderungen:
  - sehr wichtig und
  - für eine gute Lösung zwingend zu erfüllen.
- sekundäre Anforderungen:
  - sind nachrangig zu erfüllen, können das Ergebnis jedoch verbessern oder
  - beziehen sich auf die Qualität der Anwendung, die nur indirekt im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung zu berücksichtigen ist, oder
  - beziehen sich auf Funktionen, die inhaltlich sinnvoll und passend sind, aber entsprechend Abschnitt 3.1.2 out-of-scope sind.
- tertiäre Anforderungen:
  - Stakeholder-Anforderungen, die einen Programmierungsbezug haben, ähnlich den nicht funktionalen Anforderungen, bspw. nutzerfreundliche Darstellung der Ergebnisse, oder
  - beziehen sich auf in Abschnitt 3.1.2 klar als out-of-scope definierte Themen.

Durch unterschiedliche Quellen und Methoden zur Sammlung von Anforderungen wurde in einem strukturierten Vorgehen sichergestellt, dass die Anforderungen so weit wie möglich vollständig sind.

Die beschriebene strukturierte Herleitung der Anforderungen wird basierend auf der Systemarchitektur aus Abschnitt 3.2 durchgeführt. Im Folgenden werden die Anforderungen a2 bis g2 jeweils anhand des davor genannten Ziels getrennt nach Stakeholdern bzw. Systemanforderungen aufgelistet, erläutert, priorisiert und mit Quelle ausgewiesen.



(#2) erfolgt jeweils in Untersetzung für:

Stakeholder-Anforderungen an das Störfallprogram bzw. die Module davon:

- Ersteller
- Anwender
- Reisender

Systemanforderungen beziehen sich auf die Software:

- funktional: fachliche Ausprägungen
- nicht funktional: programmtechnische Ausprägungen

Abbildung 3-4: Aufbau und Vorgehen zur Ermittlung der Anforderungen (eigene Darstellung)

Ziel eines Störfallprogramms und eines zugehörigen Planungstools (a1)

Störfallprogramme ermöglichen gemäß der Abschnitte 2.3 und 2.4:

- Schnellere Reaktionszeit: Auswahl und Abstimmung zwischen EVU und EIU von spezifischen Maßnahmenbündeln. Lösungserstellung erfolgt bereits vor dem eigentlichen Störungseintritt, daher wird lediglich die Dauer für die Entscheidungsfindung im Störfall nötig.
- Höhere Lösungsqualität: Vorhergehende Planung von Lösungen ermöglicht deren Bewertung. Auswirkungen und Wechselwirkungen im Netz können berücksichtigt werden, was ad hoc nicht möglich wäre.
- Entlastung des Disponenten: Schnellere Reaktionen in einem Störfall unter Anleitung durch ein qualitätsgesichertes Störfallprogramm resultieren in einer Entlastung des Disponenten.

Es wird eine Aufwandsreduktion und Qualitätssicherung/-steigerung bei der Erstellung und Bewertung von Störfallprogrammen durch (Teil-)Automatisierung der Planung angestrebt. Zudem sollen zur verbesserten Kundenorientierung neben den betrieblichen Maßnahmen auch verkehrliche Maßnahmen Inhalt eines Störfallprogramms sein.

Anforderungen an ein Störfallprogramm und ein zugehöriges Planungstool (a2)

Stakeholder-Anforderungen an das Störfallprogramm und ein zugehöriges Planungstool			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
Ersteller			
Abstimmungsfähigkeit	Vor der Anwendung eines SFP im Betrieb ist dieses mit dem EIU abzustimmen. Das Ergebnis ist somit so aufzubereiten, dass eine Abstimmung ohne Mehraufwand erfolgen kann.	sekundär	Interviews
Allgemeingültigkeit	Die Nutzung von SFP ist in vielen Nahverkehrsregionen Deutschlands von Vorteil. Die Anwendbarkeit soll somit im gesamten deutschen SPNV möglich sein, ohne weitreichende, programmier-technische Änderungen vornehmen zu müssen.	primär	Aufgaben-stellung
(Teil-) Automatisierung	Der Arbeitsprozess des Erstellers soll durch die Software vereinfacht und verbessert werden, sodass eine gute, funktionsfähige Grobplanung ermöglicht wird.	primär	Aufgaben-stellung
Anwender			
einfache Verständlichkeit	Das Ergebnis ist so aufzubereiten, dass eine einfache und unkomplizierte Anwendung im Betrieb gewährleistet ist. Das Maßnahmenbündel ist nachvollziehbar und übersichtlich gestaltet, sodass alle Anwender (Disponenten, Triebfahrzeugführer, Kundenbetreuer etc.) das Störfallprogramm fehlerfrei umsetzen und kommunizieren können. Missverständnisse und häufige Nachfragen sind im Sinne der Betriebsflüssigkeit zu vermeiden.	sekundär	Interviews
betriebliche Funktionsfähigkeit	Das geplante Störfallprogramm muss aus betrieblicher Sicht fehlerfrei geplant und umsetzbar sein, sodass bei Durchführung kein Anpassungsbedarf durch fehlerhafte Planung entsteht.	primär	Aufgaben-stellung

Verfügbarkeit	Die Störfallprogramme vereinfachen die Disposition deutlich. Daher sollten sie für große Störfalle vorliegen.	sekundär	Interviews
Fahrgast			
Informationen	Der Fahrgast muss über den Störungseintritt und Änderungen in seiner Reise informiert werden können.	primär	Monzert et al. (2021)
Mobilitätserhaltung	Der Fahrgast möchte auch im Störfall sein Mobilitätsbedürfnis realisieren. Daher sollten Erstellung und Bewertung eines SFP kundenorientiert erfolgen.	primär	Aufgaben-stellung
verkehrliche Funktionsfähigkeit	Das geplante Störfallprogramm muss aus verkehrlicher Sicht fehlerfrei geplant und umsetzbar sein.	primär	Aufgaben-stellung
Zuverlässigkeit	Der Fahrgast sollte so wenige Veränderungen wie möglich an seinem gewohnten Mobilitätsverhalten vornehmen müssen.	sekundär	Interviews

System-Anforderungen an das Störfallprogramm und ein zugehöriges Planungstool			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
funktional			
Adaptivität/Überarbeitung erstellter SFP	Mit dem Planungstool erstellte SFP sollten anschließend einfach an infrastrukturelle (bspw. andauernde Baustellen) und betriebliche (bspw. Fahrplanwechsel) Veränderungen angepasst werden können.	sekundär	Workshop mit Stakeholdern
kundenorientierte Bewertung	Die Qualität eines Störfallprogramms sollte anhand seiner Kundenorientierung bestimmt werden.	primär	Aufgaben-stellung
integriertes SFP für Betrieb und Verkehr	Die Software soll die Erstellung und Bewertung von Störfallprogrammen ermöglichen, die zug- und fahrgastbezogenen Maßnahmen berücksichtigen und Rückkopplungen zwischen den beiden Maßnahmen ermöglichen.	primär	Aufgaben-stellung

räumliche und zeitliche Flexibilität	Der Algorithmus soll für verschiedene zeitliche und räumliche Störfallszenarien generisch, durch EVUs und integrierte Unternehmen anwendbar sein.	primär	Aufgaben-stellung
Vollständigkeit	Alle vom Ersteller oder Algorithmus erstellten Maßnahmen sind zu bewerten und dabei alle Fahrgäste zu berücksichtigen.	primär	Workshop mit Stakeholdern
Weiterentwicklungs-fähigkeit	Zukünftige Echtzeit-Anwendungen oder Echtzeitanpassungen sollen im Idealfall keine vollständigen Neuentwicklungen darstellen, sondern auf dem Tool und seinen Algorithmen aufbauen können.	sekundär	Brain-storming
nicht funktional			
Bedienbarkeit und Verständlichkeit der Software	Um den Arbeitsprozess tatsächlich zu vereinfachen und nicht durch eine umständliche Software zu erschweren, ist auf eine gute Usability bei der Oberflächenentwicklung zu achten.	tertiär	-
Implementierbarkeit	Der Algorithmus soll entsprechend auf dem heutigen Stand der IT-Technik implementierbar sein. Aktuell ist keine Echtzeitfähigkeit erforderlich.	sekundär	Workshop mit Stakeholdern
Operationalität/geringe Rechenzeit	Die Komplexität der Zusammenhänge des Betriebs- und Verkehrsgeschehens soll auf ein überschaubares Maß vereinfacht werden, sodass sich der Algorithmus praktisch und mit vertretbarem Aufwand umsetzen lässt.	primär	Brains-storming

Ziel eines betrieblichen Maßnahmenbündels (b1)

Durch die Vorplanung eines betrieblichen Maßnahmenbündels wird angestrebt, einen stabilen, planmäßigen und zuverlässigen Betrieb im Störungsfall zu ermöglichen, dessen Erreichen und Erhalt für den beplanten Störfall sichergestellt ist, um so tatsächlich eine Entlastung des Disponenten zu ermöglichen.

Anforderungen an das betriebliche Maßnahmenbündel (b2)

Stakeholder-Anforderungen an das betriebliche Maßnahmenbündel			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
Ersteller			
Es bestehen keine Stakeholder-Anforderungen des Erstellers. Anforderungen, die er bei der Erstellung zur Erreichung der Zielsetzung berücksichtigt, kommen vom Anwender.			
Anwender			
Anpassbarkeit	Das Maßnahmenbündel soll so aufbereitet sein, dass nötige Anpassungen bei der Durchführung leicht erkenn- und umsetzbar sind.	tertiär	Weiterverwendung des Ergebnisses in Ansätzen wie Steinbach und Crespo Materna (2021)
Einschwingfähigkeit	Das Maßnahmenbündel ist in der Lage, einen stabilen, verspätungsfreien Zustand zu erreichen.	primär	Chu (2014)
Ermöglichung einer betrieblichen Stabilität/ Funktionsfähigkeit	Das Maßnahmenbündel soll einen stabilen, verspätungsfreien, obwohl weiterhin gestörten Betrieb ermöglichen. Die geplanten betrieblichen Maßnahmen sind einzeln und in Kombination umsetzbar.	primär	Interviews und Workshops
Rückführbarkeit	Das Betriebskonzept kann ohne betriebliche Störungen aufgehoben werden und der Betrieb kann nach Störungsende schrittweise wieder in den Normalzustand zurückgeführt werden.	tertiär	siehe out-of-scope
Fahrgast			
Es bestehen keine Anforderungen des Fahrgasts an das betriebliche Maßnahmenbündel, die über die des Anwenders hinausgehen. Da das Störfallprogramm integriert zu betrachten ist, finden die betrieblichen Maßnahmen eine Übersetzung in verkehrliche Maßnahmen, bei denen die Anforderungen des Fahrgasts konkretisiert werden.			

System-Anforderungen an das betriebliche Maßnahmenbündel			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
funktional			
schnelle Stabilität	Die Bewertung der betrieblichen Maßnahmen sollte erfassen, wie schnell eine zuverlässige (Informations-)Lage für den Fahrgast erreicht werden kann.	primär	Chu (2014)
logische Konsistenz	Das betriebliche Maßnahmenbündel soll keine inneren Widersprüche enthalten.	primär	System-architektur
nicht funktional			
Es sind keine spezifischen nicht funktionalen Systemanforderungen vorhanden, da sich die Anforderungen von b2 rein auf das Ergebnis = betriebliches Maßnahmenbündel beziehen.			

Ziel der Erstellung des betrieblichen Maßnahmenbündels (c1)

Durch die Softwareunterstützung bei der Erstellung von Betriebskonzepten wird eine Reduktion des Erstellungsaufwands angestrebt.

Anforderungen an die Erstellung des betrieblichen Maßnahmenbündels (c2)

Stakeholder-Anforderungen an die Erstellung des betrieblichen Maßnahmenbündels			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
Ersteller			
Anleitung	Der Ersteller soll durch das Tool im Erstellungsprozess angeleitet werden und ihm sollen erkannte Problemstellen aufgezeigt werden.	primär	Brain-storming
Einlegen von Einzelmaßnahmen	Einlegen von einzelnen (linienspezifischen) Maßnahmen durch den Ersteller. Eine Bündelung erfolgt durch das Tool bei Ergebnisausgabe.	primär	Maßnahmen siehe 3.1.2
Anwender			
Es bestehen keine Stakeholder-Anforderungen des Anwenders an den Erstellungsprozess. Seine Anforderungen beziehen sich rein auf das Ergebnis der Erstellung → b2 und d2.			
Fahrgast			
Es bestehen keine Stakeholder-Anforderungen des Fahrgasts an den Erstellungsprozess. Seine Anforderungen beziehen sich rein auf die Übersetzung der betrieblichen Maßnahmen in verkehrliche Maßnahmen.			

System-Anforderungen an die Erstellung des betrieblichen Maßnahmenbündels			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
funktional			
Bündelbildung	Die vom Ersteller eingeplanten Maßnahmen sollen abstrahiert und gebündelt werden, bspw. von Zügen auf eine Linie.	tertiär	Interviews
Fehlerfreiheit	Der Ersteller benötigt zur Erstellung eines fehlerfreien Betriebskonzepts eine fehlerfreie Datenbasis.	tertiär	Aufgabenstellung out-of-scope
realitätsnahe Modellierung	Das Modell muss eine hinreichend genaue Abbildung der Realität liefern, sodass darauf Maßnahmen geplant und die Auswirkungen der Maßnahmen zuverlässig untersucht werden können.	tertiär	Aufgabenstellung out-of-scope
vereinfachte Datenmodellierung	Im Hinblick auf das Ziel einer Anwendung der erarbeiteten Algorithmen in der Praxis sollte bei der Modellierung darauf geachtet werden, möglichst Funktionen mit leicht verständlichen und in der Praxis einfach ermittelbaren Parametern zu verwenden. Zudem liegen den EVU meist nicht die Daten und Werkzeuge zur Modellierung des Betriebs vor, wie sie in einem EIU vorhanden sind.	sekundär	Chu (2014)
nicht funktional			
Es gibt eine Vielzahl von nicht funktionalen Systemanforderungen an die Software, um eine leichte und zielführende Anwendung durch den Ersteller zu ermöglichen. Diese sind aber nicht relevant für die Algorithmenentwicklung, sondern Bestandteil eines Softwareentwicklungsprozesses. Daher sind diese hier nicht aufgeführt.			

Ziel der Bewertung des betrieblichen Maßnahmenbündels (d1)

Durch die Softwareunterstützung bei der Bewertung von betrieblichen Maßnahmenbündeln wird angestrebt, die stabile Phase eines Störfallprogramms zu erreichen und aufrechtzuerhalten. Zudem soll das betriebliche Maßnahmenbündel qualitativ eingeordnet werden, um eine Verbesserung der Planung zu ermöglichen.

Anforderungen an die Bewertung des betrieblichen Maßnahmenbündels (d2)

Stakeholder-Anforderungen an die Bewertung des betrieblichen Maßnahmenbündels			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
Ersteller			
automatisiert	Die Bewertung erfolgt ohne weitere Zuarbeit basierend auf den betrieblichen Eingaben des Erstellers.	primär	Aufgaben-stellung
Nachvollziehbarkeit	Die größtmögliche Transparenz der im Hintergrund ablaufenden Prozesse und die Verständlichkeit der Ergebnisse sind relevant für die Akzeptanz des Tools und seiner Bewertungsergebnisse.	sekundär	Nakamura et al. (2011, S. 2)
Objektivität	Die Bewertung soll so aufbereitet sein, dass ein anderer Ersteller zur gleichen Einschätzung gelangen kann und nicht die Erfahrung und subjektive Einschätzung des Erstellers maßgebend sind.	primär	Workshops
Anwender			
Auswahlmerkmale	Die Bewertung soll so aufbereitet werden können, dass der Anwender bei der Entscheidungsfindung in der EE-Phase einschätzen kann, wie zielführend eine Ausrufung des Störfallprogramms wäre.	primär	Workshops
Qualitätseinordnung	Die Bewertung soll derart aufbereitet werden, dass eine zu erwartende Betriebsqualität dokumentiert wird und somit mögliche zusätzliche Aufgaben des Disponenten bei der Anwendung ersichtlich werden.	sekundär	Brain-storming
Fahrgast			
Es bestehen keine Anforderungen des Fahrgasts an die Bewertung des betrieblichen Maßnahmenbündels, die über die des Anwenders hinausgehen. Da das Störfallprogramm integriert zu betrachten ist, finden die betrieblichen Maßnahmen eine Übersetzung in verkehrliche Maßnahmen, bei denen die Anforderungen des Fahrgasts konkretisiert werden.			

System-Anforderungen an die Bewertung des betrieblichen Maßnahmenbündels			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
	funktional		
abweichende Betriebseigenschaften	Die besonderen Eigenschaften, wie bspw. erhöhte Zeitbedarfe, des Bahnbetriebs in Störungen müssen berücksichtigt werden.	primär	Chu (2014)
Allgemeingültigkeit des Ansatzes	Die erarbeiteten Bewertungsmethoden sollten grundsätzlich alle adressierten Störungssituationen abdecken und allgemeingültig sein.	primär	Chu (2014)
Auslösung einer interaktiven Rückkopplung	Basierend auf den Ergebnissen der Bewertung soll eine Überarbeitung der Maßnahmen durch den Ersteller angestoßen werden.	primär	Aufgaben-stellung
Reproduzierbarkeit	Die Bewertungsalgorithmen sollten so aufgebaut sein, dass Ergebnisse bei gleichen Ausgangsbedingungen und Maßnahmen zur gleichen Einschätzung führen.	primär	Brain-storming
Quantifizierbarkeit	Auswirkungen der Störung und der verkehrlichen Maßnahmen sollen vergleichbar und zugleich anhand eines vorzugebenden Zielwerts bewertet werden. Hierfür ist eine geeignete Größe zu bestimmen.	primär	Aufgaben-stellung
situationsabhängige Modellierung	Die unterschiedlichen betrieblichen Situationen, die bei und nach Störungseintritt auftreten können, wie bspw. Zugreihenfolge oder Zuganzahl im System, sollen bei relevantem Einfluss auf die Bewertung dort Eingang erhalten.	primär	Chu (2014)
nicht funktional			
Es gibt eine Vielzahl von nicht funktionalen Systemanforderungen an die Software, um eine leichte und zielführende Anwendung durch den Ersteller zu ermöglichen. Diese sind aber nicht relevant für die Algorithmenentwicklung, sondern Bestandteil eines Softwareentwicklungsprozesses. Daher sind sie hier nicht aufgeführt.			

Ziel eines verkehrlichen Maßnahmenbündels (e1)

Durch das verkehrliche Maßnahmenbündel kann ein kundenorientiertes Störfallprogramm erstellt werden, das betriebliche und verkehrliche Maßnahmen integriert und somit die Störfallauswirkungen auf den Fahrgast erfasst, adressiert und bewertet.

Anforderungen an das verkehrliche Maßnahmenbündel (e2)

Stakeholder-Anforderungen an das verkehrliche Maßnahmenbündel			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
Ersteller			
automatisiert	Die Erstellung und Bewertung verkehrlicher Maßnahmenbündel erfolgen ohne weitere Zuarbeit basierend auf den betrieblichen Eingaben des Erstellers.	primär	Aufgaben-stellung
Realisierbarkeit	Bevor der Algorithmus verkehrliche Maßnahmen ausgibt und weitere Maßnahmen zur Freigabe durch den Ersteller fordert, sollten die bereits verwendeten vorher auf Umsetzbarkeit geprüft sein.	primär	Brain-storming
Anwender			
Kommunizierbarkeit	Das Ergebnis sollte über eine Schnittstelle in die Kommunikationssysteme eingespeist und automatisiert kommuniziert werden können. Zudem ist eine kompakte Aufbereitung für das Betriebspersonal für Rückfragen durch Fahrgäste hilfreich.	sekundär	Interviews
Fahrgast			
Eignung	Die Maßnahmen müssen den Einschränkungen und Änderungen bei der Umsetzung des Mobilitätsbedürfnisses eines Fahrgasts entsprechen und dafür Lösungen bieten.	primär	Boltze et al. (2020)
Individualisierung	Die Maßnahmen und die zugehörige Information sollten zu den individuellen Einschränkungen und Änderungen bei der Umsetzung des Mobilitätsbedürfnisses passen.	primär	Interviews

Information	Bereitstellung von Informationen für die Fahrgäste so schnell wie möglich nach Eintreten der Störung.	sekundär	Monzert et al. (2021)
kostenneutral	Die bei der Erstellung angewendeten Maßnahmen müssen für den Fahrgast mit seinem bereits erworbenen Ticket nutzbar sein und dürfen keine zusätzlichen Kosten für diesen Fahrgast erzeugen.	primär	Brain-storming
Nachvollziehbarkeit	Um die Änderungen seiner Reisekette zu verstehen, benötigt der Fahrgast sehr konkrete Informationen wie Abfahrtsort, Abfahrtszeit, neue Ankunftszeit am Ziel, Tarifinformationen, Umsteigewege und Liniennummer/Fahrzeugnummer.	primär	Monzert et al. (2021)
praktische Relevanz	Zur Umsetzung der vorgeschlagenen Maßnahmen dürfen für den Fahrgast keine Hindernisse vorliegen.	primär	Brain-storming
Vollständigkeit	Die Maßnahmen sollen jeden betroffenen Fahrgast adressieren.	primär	Workshop
Zuverlässigkeit	Die erhaltenen Informationen stimmen mit dem tatsächlich realisierten Betrieb und den möglichen verkehrlichen Maßnahmen überein.	sekundär	Brain-storming

System-Anforderungen an das verkehrliche Maßnahmenbündel			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
funktional			
Engpassvermeidung	Die verkehrlichen Maßnahmen sollen die zur Verfügung stehende „Kapazität“ nicht übersteigen.	primär	Crespo Materna (2020)
Lenkungsmöglichkeit	Das Maßnahmenbündel soll eine Verhaltenslenkung der Reisenden im Störfall ermöglichen.	primär	Boltze et al. (2020)
logische Konsistenz	Das verkehrliche Maßnahmenbündel soll keine inneren Widersprüche enthalten.	primär	Brain-storming
nicht funktional			
Es sind keine spezifischen nicht funktionalen Systemanforderungen vorhanden, da sich die Anforderungen von e2 rein auf das Ergebnis = verkehrliches Maßnahmenbündel beziehen.			

Ziel der Erstellung eines verkehrlichen Maßnahmenbündels (f1)

Durch die Softwareunterstützung bei der Erstellung von verkehrlichen Maßnahmen wird eine Reduktion des Erstellungsaufwands angestrebt bzw. die Erstellung ermöglicht, da diese händisch nicht machbar ist.

Anforderungen an die Erstellung des verkehrlichen Maßnahmenbündels (f2)

Stakeholder-Anforderungen an die Erstellung des verkehrlichen Maßnahmenbündels			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
Ersteller			
Anleitung – zusätzliche Maßnahmen	Die Maßnahmen werden durch einen Algorithmus ermittelt und bewertet. Ggfs. hat der Ersteller auf Rückfrage des Tools Entscheidungen entsprechend der regionalen Zielsetzung zu treffen und einzugeben. Hierzu ist ein Aufzeigen von Problem- und Lösungsbereichen unterstützend.	primär	Brain-storming
Anleitung – Iteration	Sollte eine Iteration ausgelöst werden, ist der Ersteller über die verkehrliche Bewertung anzuleiten, welche Problembereiche existieren und wo er ggfs. eine Anpassung der betrieblichen Maßnahmen vornehmen kann.	sekundär	Brain-storming
Anwender			
Es sind keine Anwenderanforderungen an den Prozess der Erstellung vorhanden, da sich dessen Anforderungen auf das Ergebnis = verkehrliches Maßnahmenbündel beziehen und daher unter e2 dokumentiert wurden.			
Fahrgast			
Es sind keine Fahrgastanforderungen an den Prozess der Erstellung vorhanden, da sich dessen Anforderungen auf das Ergebnis = verkehrliches Maßnahmenbündel beziehen und daher unter e2 dokumentiert wurden.			

System-Anforderungen an das verkehrlichen Maßnahmenbündel			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
funktional			
Erhebbarkeit	Die Eigenschaften der Reise oder des Fahrgastes sollten grundsätzlich erhebbar sein.	sekundär	Brain-storming

Genauigkeit	Der Algorithmus soll die Veränderung des Fahrgaststroms möglichst genau abschätzen.	sekundär	Brain-storming

nicht funktional
Es gibt eine Vielzahl von nicht funktionalen Systemanforderungen an die Software, um eine leichte und zielführende Anwendung durch den Ersteller zu ermöglichen. Diese sind aber nicht relevant für die Algorithmenentwicklung, sondern Bestandteil eines Softwareentwicklungsprozesses. Daher sind diese hier nicht aufgeführt.

Ziele der Bewertung des verkehrlichen Maßnahmenbündels (g1)

Durch die Bewertung von verkehrlichen Maßnahmenbündeln wird die Kundenorientierung des Störfallprogramms erfasst und eine qualitative Einordnung von dessen Auswirkungen auf den Fahrgast ermöglicht.

Anforderungen an die Bewertung des verkehrlichen Maßnahmenbündels (g2)

Stakeholder-Anforderungen an die Bewertung des verkehrlichen Maßnahmenbündels			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
Ersteller			
Nachvollziehbarkeit	Da die Bewertung der verkehrlichen Maßnahmen auch eine Aussage über die Kundenorientierung der betrieblichen Maßnahmen impliziert, ist größtmögliche Transparenz der im Hintergrund ablaufenden Prozesse wünschenswert, sodass der Ersteller ggfs. Verbesserungen sinnvoll vornehmen kann.	sekundär	Brain-storming
Objektivität	Die Bewertung soll so aufbereitet sein, dass ein anderer Ersteller zur gleichen Einschätzung kommen kann und nicht die Erfahrung und subjektive Einschätzung des Erstellers maßgebend ist.	primär	Workshops
Anwender			
Qualitätseinordnung	Die Bewertung soll so aufbereitet werden, dass eine zu erwartende Angebotsqualität für den Fahrgast dokumentiert wird und somit mögliche Herausforderungen bei der Anwendung ersichtlich werden.	sekundär	Brain-storming

Fahrgast			
Kundenorientierung/ Akzeptanz	Die vorgeschlagenen Maßnahmen müssen für den Fahrgast in der Umsetzung attraktiv sein. Die Bewertung soll die verkehrlichen Bedürfnisse und Erwartungen des individuellen Fahrgasts abbilden.	primär	Aufgaben-stellung
parametrisierbar	Gewichtungen anhand von Fahrgastgruppen mit spezifischen Bedürfnissen wie bspw. Schüler oder Mobilitätseinschränkungen sollen möglich sein.	sekundär	Workshop

System-Anforderungen an die Bewertung des verkehrlichen Maßnahmenbündels			
Kurzname	**Beschreibung**	**Cluster**	**Quelle**
funktional			
Quantifizierbarkeit	Auswirkungen der Störung und der verkehrlichen Maßnahmen sollen vergleichbar und zugleich anhand eines vorzugebenden Zielwerts bewertet werden. Hierfür ist eine geeignete Größe zu bestimmen.	primär	Aufgaben-stellung
Auslösung einer interaktiven Rückkopplung zum Betriebskonzept	Sollten die Möglichkeiten zur Gestaltung der verkehrlichen Maßnahmen und deren Bewertung nicht zufriedenstellend sein, soll eine Überarbeitung der betrieblichen Maßnahmen durch den Ersteller angestoßen werden.	primär	Aufgaben-stellung
nicht funktional			
Es gibt eine Vielzahl von nicht funktionalen Systemanforderungen an die Software, um eine leichte und zielführende Anwendung durch den Ersteller zu ermöglichen. Diese sind aber nicht relevant für die Algorithmenentwicklung, sondern Bestandteil eines Softwareentwicklungsprozesses. Daher sind diese hier nicht aufgeführt.			

3.4 Methode

Es wird eine Methode benötigt, um Algorithmen für die (teil-)automatisierte Unterstützung und Verbesserung der zug- und fahrgastbezogenen Planung von Störfallprogrammen in einem Entscheidungsunterstützungssystem zu erstellen.

Vorliegendes Problem, dessen Größe und Methoden zur Bearbeitung

Die Planung von Störfallprogrammen benötigt eine betriebliche und verkehrliche Konflikterkennung und -lösung. Nach Abschnitt 2.1 sind die betrieblichen Konfliktlösungen klassischerweise NP-schwer. Es besteht zudem laut Abschnitt 3.3 die Anforderung, die Rechenzeit klein zu halten.

Das Anbieten von Maßnahmen für den Fahrgast, die über eine Information zur Störung hinausgehen, resultiert darin, dass die Problemgröße von einer Lösung der betrieblichen Konflikte um die verkehrlichen Maßnahmen im Störfall erweitert wird.

Dies erfordert ein Einschränken der Problemgröße anhand der in Abschnitt 2.2.5 genannten Möglichkeiten und schließt zugleich die gesamthafte Verwendung von exakten Methoden aus. Es sind Methoden anzuwenden, die in kurzer Rechenzeit zielführende Lösungen anbieten.

Für diese Problemgröße sind Methoden zu nutzen, die in geringer Rechenzeit möglichst trotzdem globale Optima oder ersatzweise optimum-nahe Lösungen finden. Die Verfahren zur Konstruktion solcher Lösungen nennt man allgemein (Meta)Heuristiken, wie in Abschnitt 2.2.5 beschrieben. Diese Möglichkeiten sollen im Verlauf der Arbeit individuell und problemadäquat Anwendung finden.

In Kapitel 2 und Abschnitt 3.2 wurde bereits eine inhaltliche Differenzierung eines kundenorientierten Störfallprogramms in betriebliche und verkehrliche Maßnahmen vorgenommen und es wurde zudem festgestellt, dass ein Störfallprogramm zum Erreichen der Kundenorientierung aufgrund des vorliegenden Zielkonflikts beide Maßnahmenbündel benötigt. Im Weiteren wird daher zunächst eine Methode erarbeitet, wie dieser Zielkonflikt aufgelöst werden kann.

Auflösen des Zielkonflikts der Kundenorientierung in Einschwing- und stabiler Phase

Es kann klassischerweise davon ausgegangen werden, dass ein attraktives Angebot für den Fahrgast einen hohen Verbleib des betrieblichen Angebots des Regelbetriebs erfordert und somit ein längeres Einschwingen erzeugt. Die Einschwingphase ist aber von Unzuverlässigkeit geprägt und somit unattraktiv für den Fahrgast. Ein als kundenorientiert in der stabilen Phase bewertetes Konzept garantiert keine vollständige Auflösung des in Abschnitt 3.1.1 dargestellten Zielkonflikts und keine hohe Kundenorientierung des Störfallprogramms. Hierzu wird somit eine Methode zur Abwägung zwischen Einschwingphase und stabiler Phase sowie Betrieb und Verkehr benötigt.

Die Einschwingphase ist eine Übergangsphase, sodass betriebliche und verkehrliche Maßnahmen umgesetzt werden, aber noch nicht voll umfänglich zuverlässig sind. Für den Fahrgast ist es relevant, wie lange die Unzuverlässigkeit besteht und welche Auswirkungen auf seine Mobilität dadurch entstehen.

Um die Dauer der Unzuverlässigkeit zu bestimmen, ist im Modulsystem Betriebskonzept neben der Funktionsfähigkeit der stabilen Phase auch die Einschwingdauer zu ermitteln. Zur Bestimmung der Auswirkungen auf die Fahrgäste in diesem Zeitraum müssen die Ergebnisse zu Einschwingdauer und zu den verkehrlichen Maßnahmen im Verkehrskonzept nach jeweiliger Fertigstellung zusammengeführt werden, um die Einschwingphase kundenorientiert zu bewerten.

Anschließend liegen zwei einzelnstehende Bewertungsergebnisse – Kundenorientierung in stabiler Phase und Kundenorientierung in Einschwingphase – vor, wodurch sich noch keine Aussage zur Kundenorientierung des Störfallprogramms ergibt.

Es ist daher eine Zusammenführung von zwei nebeneinanderstehenden Konzepten und der Bewertungen zweier Phasen zu einem anhand der Kundenorientierung bewerteten Störfallprogramm anzustreben. Das Ergebnis ist eine integrierte kundenorientierte Bewertung bestehend aus Einschwingphase und stabiler Phase.

Daher ist im Verlauf der Arbeit, nachdem die Qualitätsmaßstäbe und die Bewertungssysteme der beiden Konzepte erarbeitet wurden, eine Methode zur Integration in einem gesamthaften Bewertungssystem zu erstellen. Dieses soll eine Aussage zur Kundenorientierung über das gesamte Störfallprogramm ermöglichen und bei nicht zufriedenstellendem Ergebnis einen interaktiven Prozess zur Überarbeitung von Betriebs- und Verkehrskonzept auslösen.

Es lässt sich somit zusammenfassen, dass eine Trennung in Betriebskonzept, Verkehrskonzept und Störfallprogramm mit jeweiliger Bewertung erfolgt. Die Bewertungen können dabei jeweils bei nicht zufriedenstellendem Ergebnis einen interaktiven Prozess auslösen.

3.5 Vorgehensweise

Nach der Einleitung in das Themenfeld in Kapitel 1 sowie der Aufbereitung des Stands des Wissens in Kapitel 2 wurden in den Abschnitten 3.1 bis 3.4 die Aufgabenstellung, die Anforderungen an deren Lösung und die Methode dargestellt. Weiterführend wird nun die Vorgehensweise zur Durchführung und dem Abschluss der Arbeit vorgestellt.

Im Rahmen der Durchführungskapitel erfolgt die Konzeption der innovativen Fachlichkeiten zur Erstellung eines kundenorientierten Störfallprogramms, wie in Abbildung 3-5 dargestellt.

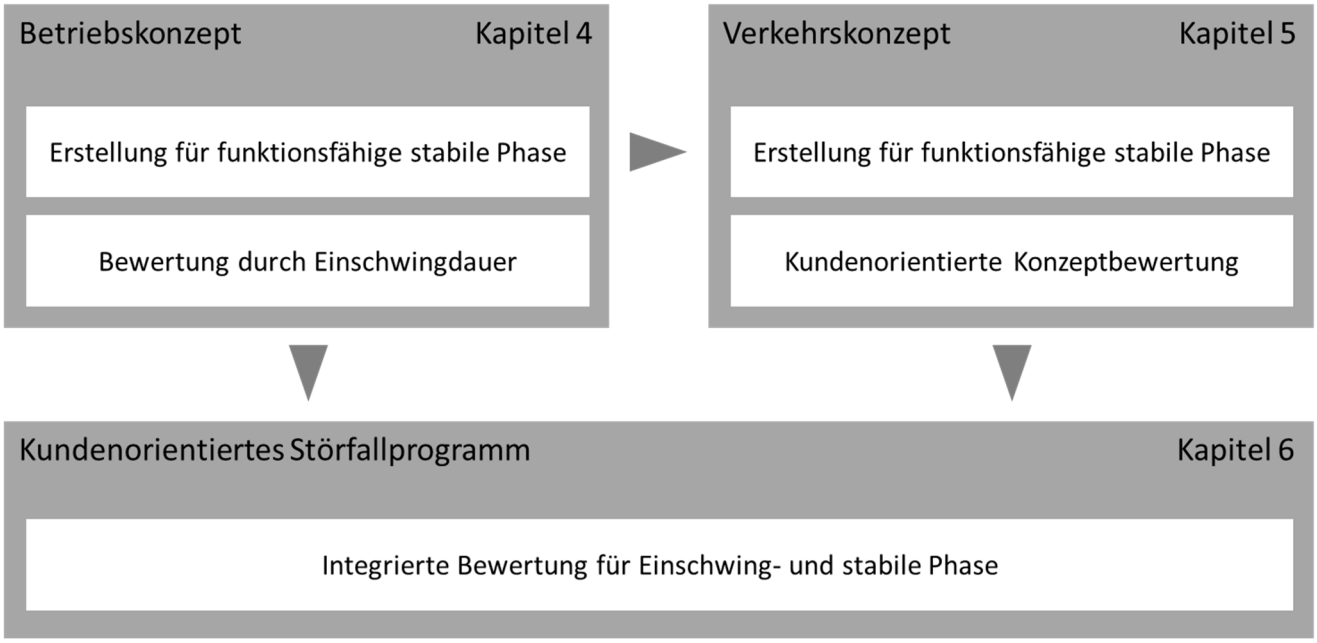


Abbildung 3-5: Vorgehensweise im inhaltlichen Kern der Arbeit (eigene Darstellung)

Gemäß Abbildung 3-2 werden in Kapitel 4 zunächst Algorithmen zur (teil-)automatisierten Begleitung der Erstellung eines stabilen *Betriebskonzepts* entwickelt und abschließend wird durch die Einschwingdauer ein betriebliches Qualitätsmaß zur Bewertung des geplanten Betriebskonzepts modelliert.

Gemäß Abbildung 3-2 werden in Kapitel 5 Algorithmen zur (teil-)automatisierten Erstellung eines stabilen *Verkehrskonzepts* entwickelt und abschließend wird durch die Konzeptbewertung ein verkehrliches Qualitätsmaß zur Bewertung des geplanten Verkehrskonzepts der stabilen Phase im Sinne des Fahrgasts erarbeitet.

Um den in Abschnitt 3.1.1 diskutierten Zielkonflikt zu lösen, erfolgt in Kapitel 6 die Zusammenführung der Ergebnisse und Bewertungen der beiden Konzepte zu einem *Störfallprogramm*. Hierbei ist eine kundenorientierte Bewertung zu erarbeiten, die den Zielkonflikt auflöst und Einschwing- und stabile

Phase in einem Bewertungssystem integriert, sodass eine eindeutige Aussage über die Qualität des Störfallprogramms für den Fahrgast getroffen werden kann.

Zur ausschnittsweisen Demonstration werden die Algorithmen anschließend in Kapitel 7 in einer *beispielhaften Anwendung* in Auszügen dargestellt und auf Beispiele angewendet.

Die in Durchführungs- und Anwendungskapiteln erzeugten und dargestellten Ergebnisse werden in Kapitel 8 zusammengefasst und eingeordnet. Abschließend wird ein *Ausblick* auf die weiteren Forschungsaufgaben im Themenfeld vorgenommen und eine perspektivische Anwendung der Forschungsergebnisse in der Praxis besprochen.

3.6 Definition unterschiedlich verwendeter und neuer Begriffe

In Forschung und Praxis sind einige Begriffe mit ähnlicher Bezeichnung, aber unterschiedlicher Bedeutung sowohl im betrieblichen als auch verkehrlichen Kontext in Verwendung. In diesem Abschnitt werden die Definitionen zur Verwendung in dieser Arbeit sowie neue Begriffe beschrieben.

3.6.1 Betriebs- und Verkehrskonzept

Betriebskonzept: Im Rahmen der Zielsetzung und Systemarchitektur dieser Arbeit stellt ein Betriebskonzept einen Teil eines Störfallprogramms dar, der eine vorhergehende Planung der gestörten Betriebssituation darstellt. Es beinhaltet alle betrieblichen Maßnahmen, die bei Auftreten des Störfalls umzusetzen sind. Diese ergeben einen linienspezifischen Störfallfahrplan.

Verkehrskonzept: Im Rahmen der Zielsetzung und Systemarchitektur dieser Arbeit stellt ein Verkehrskonzept einen Teil eines Störfallprogramms dar, der eine vorhergehende Planung von Verbindungskonflikten und dazu passenden Lösungen darstellt. Es beinhaltet alle Lösungsalternativen, die bei Auftreten des Störfalls an die Fahrgäste zu kommunizieren sind.

3.6.2 Modellierung der Beziehungen im Netz in Abhängigkeit des Verwendungszwecks

Die Möglichkeiten der Infrastrukturmodellierung wurden in Unterabschnitt 2.2.1 vorgestellt. Im weiteren Verlauf werden die in Abbildung 3-6 beispielhaft dargestellten makroskopischen Infrastrukturknoten und Infrastrukturkanten verwendet. Beide werden als Netzelemente bezeichnet.

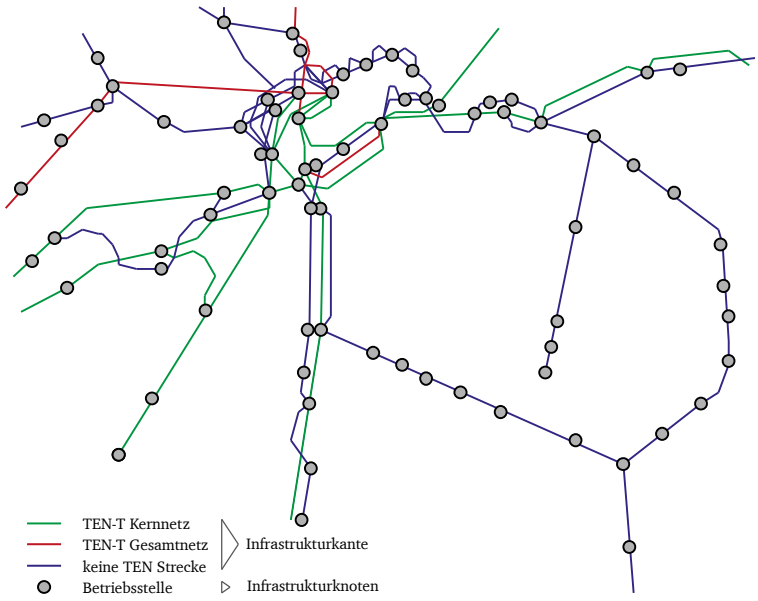


Abbildung 3-6: Infrastrukturknoten und -kanten (eigene Darstellung)

Für die Beschreibung und vor allem die Kommunikation der durch betriebliche Maßnahmen ausgelösten Veränderungen der Zugfahrten ist nur eine Teilmenge davon relevant. In der graphentheoretischen Modellierung von Verbindungen finden u. a. die Begriffe Knoten und Kanten Verwendung. Da diese aber bereits im betrieblichen Kontext mit deutlichem Bezug zur Infrastruktur angewendet werden, wird im Weiteren eine begriffliche Unterscheidung und Definition der Kanten und Knoten je nach Verwendungszweck für eine eindeutige Verwendung notwendig. Diese bilden jeweils problemadäquate Teilmengen der Netzelemente.

Um die Nutzung des Netzes durch eine Zugfahrt zu beschreiben, werden Verkehrsknoten (KnotV) und Verkehrskanten (KantV), wie in Abbildung 3-7 zu sehen, definiert. Jeder Verkehrsknoten beschreibt einen Verkehrshalt eines Zuges. Eine Betriebsstelle wird somit erst zu einem Verkehrsknoten, wenn der Zug an dieser Betriebsstelle zum Zweck des Fahrgastwechsels hält.

Eine Verkehrskante beschreibt den Laufweg zwischen zwei benachbarten Verkehrsknoten und bildet somit eine Menge aneinandergereihter Infrastrukturkanten. Die Nutzung wird durch Abfahrts- und Ankunftszeiten im Fahrplan an den Verkehrsknoten und zugspezifische Fahrzeiten auf den Verkehrskanten gekennzeichnet und kann für die Modellierung der Zugfahrt verwendet werden.

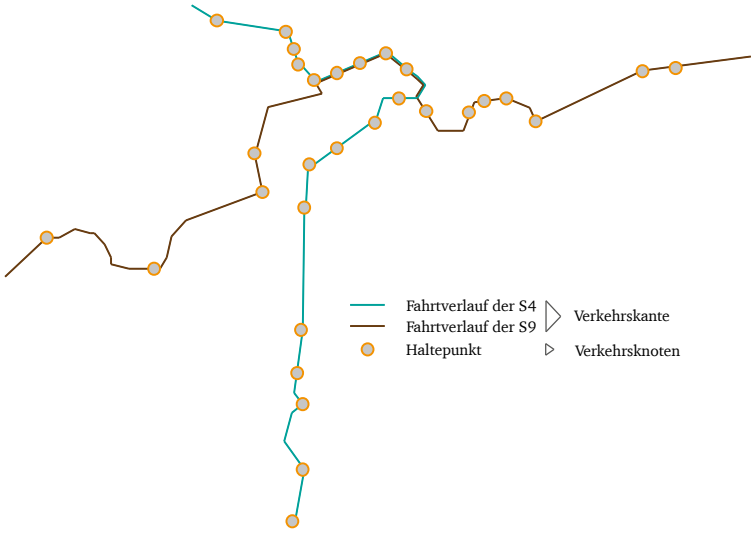


Abbildung 3-7: Verkehrsknoten und -kanten (eigene Darstellung)

Verkehrsknoten und -kanten, die im Rahmen einer Verbindung durch die Fahrgäste verwendet werden, sind, wie in Abbildung 3-8 dargestellt, Aktionsknoten (KnotA) und Aktionskanten (KantA). Ein Aktionsknoten beschreibt entweder eine Einstiegs-, Umstiegs- oder Ausstiegshaltestelle. Jeder Verkehrsknoten kann durch eine Verbindung zu einem Aktionsknoten werden. Eine Aktionskante beschreibt den Fahrweg des genutzten Verkehrsmittels zur Verbindung zweier Aktionsknoten. Mehrere Verkehrskanten können durch die Verbindung zu einer Aktionskante zusammengefasst werden. Die Nutzung eines Aktionsknotens wird durch Abfahrts- und Ankunftszeiten und Umsteigezeiten beschrieben. Einer Aktionskante sind als Fahrtdauer die Fahrzeiten und unterwegs geplanten Warte- und Haltezeiten des verwendeten Verkehrsmittels attribuiert.

Für den Fahrgast repräsentieren dabei die Aktionsknoten Zughalte, an denen ein Ein-, Aus- und Umsteigen möglich ist, wie bspw. Haltepunkte und Bahnhöfe. Bei Betrachtung einer Verbindung, die mehrere Verkehrsmittel miteinbezieht, ist der Knoten die Schnittstelle der unterschiedlichen Verkehrsmittel. Auch in Bezug auf den Fahrgast gilt die Definition, dass Aktionskanten Aktionsknoten verbinden. Den Aktionskanten können somit bspw. Entfernung oder Bedienfrequenz und daraus ableitbare Eigenschaften wie Fahrzeiten oder Kosten zugeordnet werden.

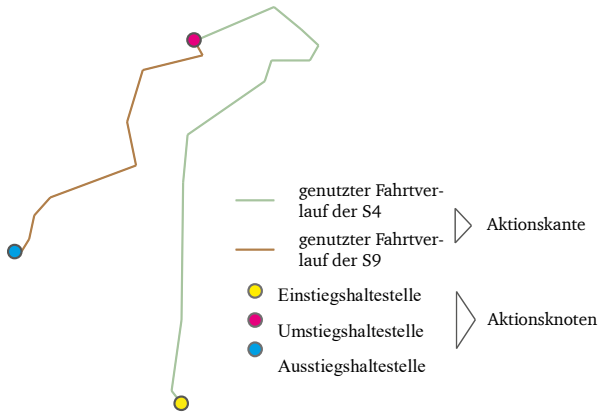


Abbildung 3-8: Aktionsknoten und -kanten (eigene Darstellung)

3.6.3 Betriebskonzept

Mögliche Abweichungen und Planungsreferenzen

Die Arbeit adressiert die stabile und Einschwingphase, die einen zum Regelbetrieb veränderten Betrieb aufweisen. Hierfür liegen für die Erstellung und Bewertung jeweils unterschiedliche Planungsreferenzen und notwendige Anpassungen davon vor. Die Anpassungen können gemäß der möglichen Elementarlösungen in Unterabschnitt 2.2.5 für Konflikte in Anpassungen zeitlicher und räumlicher Art sowie (Teil-)Ausfälle gegliedert werden. Wichtige Begriffe dafür werden in Abbildung 3-9 dargestellt und anschließend untersetzt.

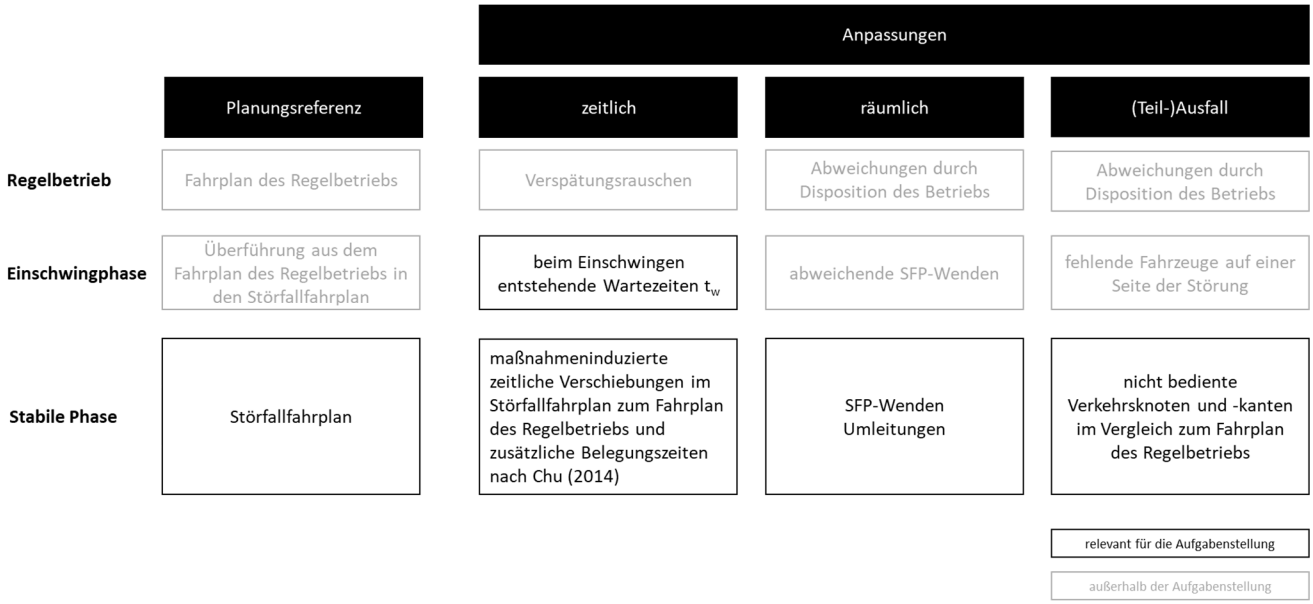


Abbildung 3-9: Planungsreferenzen und wichtige Begriffe für Regelbetrieb, stabile und Einschwingphase (eigene Darstellung)

Maßnahmeninduziertes Verschieben im Störfallfahrplan kann unterschieden werden in:

planmäßige Wartezeiten im Störfallfahrplan $t_{w,plan,SFP}$: Gemäß Abschnitt 2.4 entstehen Verspätungen im Störfall maßgeblich bei SFP-Wenden, Wenden und Abzweigstellen, die für Umleitungen relevant sind. Der zeitliche Mehrbedarf soll als planmäßige Wartezeit im Störfallfahrplan berücksichtigt werden, und geht somit über die jeweiligen angepassten Fahr- und Haltezeiten in den Störfallfahrplan ein.

planmäßige Verfrühungen im Störfallfahrplan: Verfrühungen im Vergleich zum Fahrplan des Regelbetriebs entstehen durch die Anpassung der Abfahrtszeiten im Rahmen der betrieblichen Maßnahmen oder durch frühere Ankunftszeiten bei gekürzten Fahrzeiten der Züge bspw. bei Umleitungsnutzung oder Haltentfall.

Wenden

SFP-Wende: Der Zug wird an einem Bahnhof abweichend von dem Wendebahnhof des Regelbetriebs gewendet.

SFP-Wendebahnhof: Bahnhof, an dem die vom Regelbetrieb abweichenden Wenden stattfinden.

positive Wende: Der Zug wird auf einen folgenden Takt gewendet und fährt nach Fahrplan des Regelbetriebs planmäßig ab. Dies kann der nach Ankunft direkt mögliche Takt zu Wende sein oder auch der übernächste, sodass sich eine überschlagende Wende ergibt.

negative Wende: Der Zug wird auf einen bereits vergangenen Takt gemäß des Fahrplans des Regelbetriebs gewendet. In der stabilen Phase wendet der Zug somit nach Störfallfahrplan planmäßig,

nach Fahrplan des Regelbetriebs fährt er verspätet ab. Negative Wenden können am SFP-Wendebahnhof bzw. bei negativen Wenden nach verspäteter Ankunft nach Umleitung am Wendebahnhof entstehen. In der Einschwingphase können weitere negative Wenden ein Mittel der Disposition zur Verspätungsreduktion sein. Der Zug wendet somit nach Störfallfahrplan und nach Fahrplan des Regelbetriebs verspätet.

Kategorisierung der Zugfahrten in der Ermittlungs- und Entscheidungsphase

Basierend auf Keck (2012) sowie Chu und Oetting (2013b) wird eine weiterentwickelte Kategorisierung der Zugfahrten anhand ihres Standortes in der Ermittlungs- und Entscheidungsphase bzw. zum Zeitpunkt der Ausrufung des Störfallprogramms verwendet. Diese bezieht sich nur auf Züge, die durch betriebliche Maßnahmen oder Wechselwirkungen mit diesen vom Fahrplan des Regelbetriebs abweichen. Um Verspätungsaufbau zu vermeiden sind die grünen Züge primär zu disponieren und um eine stabile Phase zu erreichen, müssen die gelben Züge auf ihren geplanten Standort geführt werden. Durch den hohen und stark situationsabhängigen Dispositionsaufwand sind die roten Züge nachrangig zu behandeln und gehen daher auch nicht in die Bewertung eines Störfallprogramms ein.

Rote Züge

Rote Züge sind Zugfahrten, die sich in einem Bereich des Netzes befinden, an dem sie bei Störungseintritt nicht mehr ohne sehr großen Aufwand disponierbar sind. Sie befinden sich in unmittelbarer Nähe der Störung oder sind selbst Teil der Störung und können kaum mehr den Betrieb nach Störfallfahrplan aufnehmen. Sie sind in den Störbereich eingefahren und können erst wieder in das System integriert werden, wenn die Störung behoben wurde. Als rote Züge sind die folgenden Fälle zu definieren:

- Zug befindet sich an dem Störungsort und
- Zug fährt von dem letzten betrieblich möglichen Wendebahnhof zum Störungsort.

Gelbe Züge

Gelbe Züge haben den Ort, an dem sie spätestens den Betrieb nach Störfallfahrplan aufnehmen können, bereits hinter sich gelassen. Sie sind noch nicht unweigerlich in den Bereich der Störung eingefahren, sondern können noch durch schnelles Eingreifen disponiert werden. Sie befinden sich hinter dem geplanten Eingreifpunkt, aber vor der letzten betrieblichen Wendemöglichkeit.

In der genauen Definition entsprechen gelbe Züge den folgenden Fällen:

- Zug befindet sich zwischen SFP- Wendebahnhof und letztem möglicher Wendebahnhof,
- Zug befindet sich an letztem betrieblich möglichen Wendebahnhof sowie
- Zug befindet sich hinter der im SFP geplanten Betriebsstelle zur Umleitung.

Grüne Züge

Grüne Züge befinden sich bei Eintritt einer Störung in einem Bereich des Netzes, der nicht unmittelbar an den Störungsort angrenzt oder direkt darauf zuführt. Dies bedeutet für die Disposition, dass diese Züge problemlos in ein SFP eingeschwungen werden können. Grüne Züge sind somit alle Züge, die nicht der gelben oder roten Kategorie zugeordnet werden.

Sie entsprechen somit folgenden Fällen:

- Zug befindet sich direkt an dem SFP- Wendebahnhof,

- auf den Störungsort zufahrend, aber vor dem Wendebahnhof bzw. der Betriebsstelle zur Umleitung nach SFP und
- von dem Störungsort wegfahrend.

3.6.4 Verkehrskonzept

Darstellung der Reisekette und ihrer Eigenschaften

Ein Verkehrskonzept besteht aus fahrgastbezogenen Maßnahmen, die Reroutings und Verbindungsanpassungen von Fahrgästen beinhalten.

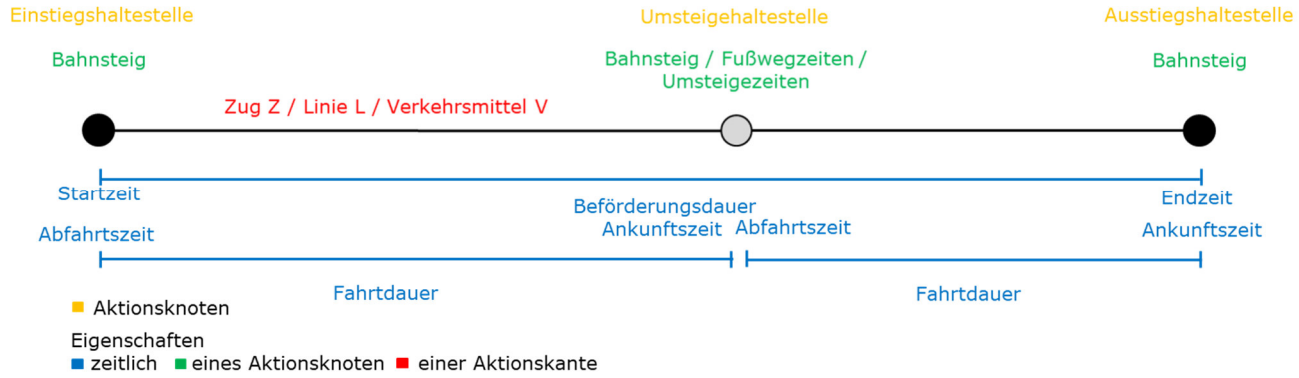


Abbildung 3-10: Eigenschaften einer Reisekette (eigene Darstellung)

Eine einzelne Verbindung ist eine Reisekette, siehe Abbildung 3-10, die verschiedene Eigenschaften hat, die je nach Verbindung unterschiedlich ausfallen:

- die Aktionsknoten: Einstiegshaltestelle, Umsteigehaltestelle und Ausstiegshaltestelle stellen Beginn, Wechsel der Aktionskanten und Ende der Aktionskanten und somit der Verbindung dar.
- Eigenschaften von Aktionskanten: Die kantenbezogenen Eigenschaften beschreiben die Verknüpfung zweier Aktionsknoten durch ein Verkehrsmittel.
- zeitliche Eigenschaften: Die zeitlichen Eigenschaften beziehen sowohl Zeitpunkte als auch Dauern der Fahrten und Beförderung mit ein.
- Eigenschaften eines Aktionsknotens: Die Eigenschaften in einer spezifischen Verbindung ergeben sich aus der Kombination des Aktionsknotens, zu- und wegführender Aktionskanten und deren zeitlichen Eigenschaften. Sie können an diesem Ort in ihrer Ausprägung sowohl zeitlicher als auch räumlicher Art sein.
- qualitative Eigenschaften: Die qualitativen Eigenschaften treten über die gesamte Reisekette auf und sind die Kosten sowie die enthaltene Anzahl an notwendigen Umstiegen.

Außerhalb der in der Arbeit adressierten und in Abbildung 3-10 dargestellten Reisekette existieren vor und nach der Beförderung zudem Zugangszeit und ggfs. Wartezeit sowie Abgangszeit und ggfs. Dispositionszeit (Ankunft früher als gewollt, weil der Fahrplan es nicht anders zulässt). Diese ergeben dann gemeinsam mit der Beförderungsdauer die Reisezeit nach dem Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe (1981).

Grundlegende Begriffe und ihre Verwendung in dieser Arbeit

Die folgenden Begriffe sind in der Literatur teilweise unterschiedlich und inhaltlich überlappend. Hier werden daher geläufige Begriffe aus der Verkehrsplanung für die vorliegende Arbeit definiert.

Relation: Eine Relation verbindet die Einstiegshaltestelle (A) mit der Ausstiegshaltestelle (Z) und erfüllt somit den Bedarf des Fahrgasts, von A nach Z zu kommen.

Route: Eine Route ermöglicht die Umsetzung der Relation unter Verwendung von Verkehrswege- und Verkehrsmittelwahl. Sie ermöglicht dem Fahrgast, von A ggfs. über die Umsteigehaltestelle C nach Z unter Verwendung der Verkehrsmittel x und y zu kommen.

Verbindung: Eine Verbindung konkretisiert die Route mit Uhrzeiten und der Zuordnung der Verkehrsmittel zu einzelnen Fahrten bzw. Abschnitten des Weges.

Rerouting: Ein Rerouting ist eine Neuplanung der Route durch Veränderungen der Aktionsknoten und -kanten im Vergleich zur ursprünglich geplanten Verbindung. Sie erfolgt zum Erhalt der Relation unter Verwendung einer neuen Route. Notwendige Voraussetzung für ein Rerouting ist, dass die ursprünglich geplante Route und somit die geplante Verbindung nicht mehr verfügbar sind. Es erfolgt eine räumliche Verlagerung. Anschließend ist eine neue Verbindung zu ermitteln. Diese kann im Vergleich zur ursprünglichen Verbindung noch zeitliche Verlagerungen beinhalten.

Verbindungsanpassung: Eine Verbindungsanpassung ist eine Neuplanung der Verbindung. Sie erfolgt zum Erhalt der Route unter Verwendung einer neuen Verbindung, d. h. die ursprünglich geplante Verbindung ist nicht mehr verfügbar. Es erfolgt eine zeitliche Verlagerung und/oder eine Veränderung der Aktionskanten, während die Aktionsknoten unverändert bleiben.

Fahrtdauern der Fahrgäste können sich in der stabilen Phase durch die betrieblichen oder verkehrlichen Maßnahmen verändern:

> *Störfallfahrplan-induzierte Fahrtdauerveränderung*: Der Zug in der ursprünglich geplanten Verbindung erfährt maßnahmeninduzierte zeitliche Verschiebungen im Störfallfahrplan zum Fahrplan des Regelbetriebs und erzeugt so eine Fahrtdauerveränderung des Fahrgastes.
>
> *Verbindungsinduzierte Fahrtdauerveränderung*: Durch eine Verbindungsanpassung kann eine Veränderung der Fahrtdauer entstehen.

In der Einschwingphase können durch die beim Einschwingen entstehenden Wartezeiten *einschwinginduzierte Fahrtdauerverlängerungen* entstehen.

3.7 Zusammenfassung

Mit Festlegung der Inhalte der Arbeit, Systemarchitektur, Methode und Vorgehensweise sowie der Begriffsdefinitionen wurden die Grundlagen für die Entwicklung der Algorithmen gelegt. Diese erfolgt nun gemäß Abbildung 3-1 zunächst für das Betriebskonzept (Kapitel 4) und anschließend für das Verkehrskonzept (Kapitel 5), bevor abschließend eine integrierte Bewertung für ein Störfallprogramm (Kapitel 6) zu entwickeln ist.

4 Betriebskonzept

4.1 Einleitung

Die Bewertung von Störfallprogrammen setzt sich gemäß Abbildung 3-2 aus den zwei übergeordneten Systembereichen Betriebskonzept und Verkehrskonzept zusammen. Die Erstellung eines Betriebskonzepts beinhaltet viele Eingriffe in den Fahrplan des Regelbetriebs. Durch die Anwendung der in Unterabschnitt 3.1.2 definierten betrieblichen Maßnahmen für Linien oder einzelne Zugfahrten entsteht aus dem Fahrplan des Regelbetriebs ein Störfallfahrplan.

Ziel ist es, einen neuen, an die konstruierte Störungssituation angepassten funktionsfähigen linienspezifischen Störfallfahrplan zu erstellen. Um das zu unterstützen, werden in diesem Kapitel Algorithmen zur (teil-)automatisierten Bewertung von Betriebskonzepten in der Planung erstellt. Die Anforderungen an das Ergebnis dieses Kapitels wurden unter Abschnitt 3.3 (b2) dokumentiert und zur Verwendung in der Modularisierung mit den Anforderungen (c2) und (d2) untersetzt.

In diesem und den folgenden Abschnitten wird schrittweise eine Konkretisierung der Systemarchitektur für den Teil Betriebskonzept und dessen Bewertung hergeleitet. Begleitend werden In- und Output sowie die Algorithmen, die in diesen Modulen (teil-)automatisiert prüfen und bewerten, beschrieben.

Entsprechend Abschnitt 3.2 ist es für ein kundenorientiertes Störfallprogramm notwendig, dass die Prüfung des Betriebskonzepts sicherstellt, dass der kontrollierte Störungsbetrieb in der stabilen Phase funktioniert. Dies impliziert aber nicht, dass dieser Zustand auch in angemessener Dauer erreichbar ist, was aber entsprechend dem in Abschnitt 3.1.1 diskutierten Zielkonflikt ebenfalls relevant ist. Somit sind auch auf die Erreichbarkeit einer stabilen Phase und die Einschwingqualität (Dauer) zu prüfen.

Die Erreichbarkeit einer stabilen Phase lässt sich auch als Einschwingqualität des Betriebskonzepts bezeichnen. Eine ausreichende Qualität ist gegeben, wenn alle Kriterien, entsprechend Unterabschnitt 2.3.2, für einen stabilen Zustand in vorgegebener Zeit erreichbar sind. Nach zufriedenstellender Prüfung der Einschwingphase kann das erstellte und überprüfte Betriebskonzept als funktionsfähig für den entsprechenden Störfall bewertet werden.

Bei der Anwendung eines SFP ist die *Funktionsfähigkeit* der stabilen Phase Voraussetzung für die Ermittlung einer *Einschwingqualität*. Daher wird im Rahmen der Planung zunächst überprüft, ob eine stabile Phase existieren kann, und erst anschließend das Einschwingen bewertet. Dies entspricht somit nicht der Reihenfolge der Phasen eines Störfalls bei Anwendung eines SFP entsprechend Unterabschnitt 2.3.2, sondern einer getauschten Reihenfolge der beiden Phasen. Da die Einschwingphase zudem chaotischer ist als die stabile Phase, wird diese getauschte Reihenfolge auch auf die Algorithmenentwicklung übertragen.

Somit lassen sich für den Systembereich Betrieb und dessen Teilproblem Bewertung die folgenden beiden Systemunterbereiche zusammenfassen:

- Das Betriebskonzept muss in der Lage sein, einen stabilen Zustand in vorgegebener Zeit zu erreichen. Im Weiteren genannt: *Einschwingqualität*.
- Anschließend soll das Betriebskonzept einen nach Störfallfahrplan stabilen, obwohl weiterhin gestörten Betrieb ermöglichen. Im Weiteren genannt: *Funktionsfähigkeit*.

Im Folgenden werden nun zuerst die Funktionsfähigkeit in der stabilen Phase und anschließend die Einschwingqualität des Betriebskonzepts untersetzt und anschließend die zugehörigen Algorithmen erstellt.

4.2 Bewertung des Betriebskonzepts

Ziel der Bewertung des Betriebskonzepts ist die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit in der stabilen Phase und einer vorgegebenen Einschwingqualität entsprechend der in Abschnitt 4.1 genannten Anforderungen. Besonders relevant sind die folgenden Stakeholder-Anforderungen in Bezug auf die Bewertung des Betriebskonzepts (siehe Abschnitt 3.3 (d2)), die hier für die beiden Systemunterbereiche spezifiziert werden:

- automatisiert: Die Prüfung der Funktionsfähigkeit der stabilen Phase und der Einschwingfähigkeit erfolgt automatisiert nach den Eingaben durch den Ersteller.
- vergleichbare Ergebnisse: Die Machbarkeit der einzelnen Maßnahmen und die Funktionsfähigkeit sind für jedes geplante Betriebskonzept und deren Einschwingqualität einheitlich zu bewerten, sodass eine Vergleichbarkeit gegeben ist.
- Objektivität: Die Prüfung der Funktionsfähigkeit und der Einschwingqualität darf keine subjektiven Größen enthalten, sondern erfolgt basierend auf festzulegenden und ermittelbaren Grenzwerten oder Richtlinien.
- Iterationsauslösung: Wenn die Machbarkeit einer einzelnen Maßnahme, die Funktionsfähigkeit aller betrieblichen Maßnahmen oder die Einschwingqualität nicht ausreichend festgestellt werden, ist ein interaktiver Prozess zur Überarbeitung durch den Ersteller auszulösen.

Input hierfür sind die vom Ersteller eingeplanten betrieblichen Maßnahmen. Output soll ein bewertetes Betriebskonzept sein, das eine Grundlage für die Erstellung eines Verkehrskonzepts darstellt.

Die in Abschnitt 3.1.2 dargestellten betrieblichen Maßnahmen können zum einen die Anzahl der Züge im Netz reduzieren und/oder die Eigenschaften einer Zugfahrt (Lauflänge, Laufweg, Wendebahnhof, Fahrzeit, Lage im Fahrplan etc.) verändern. Beides kann zu einer Entlastung der Infrastruktur führen und somit den Abbau von Verspätungen ermöglichen und die Entstehung sowie die Übertragung von Verspätungen vermeiden.

Maßnahmen können aber auch Überlastungen erzeugen, bspw. durch erhöhte Belegungszeiten aufgrund von SFP-Wenden oder durch das Entstehen von Belegungskonflikten. Diese Nachteile können sich durch weitere Maßnahmen verstärken und benötigen ggfs. eine konstruktive Lösung durch den Ersteller. Möglich ist aber auch, dass sich diese bereits durch die Einplanung weiterer Maßnahmen lösen. Daher ist im Weiteren neben den einzelnen Maßnahmen auch deren Zusammenspiel im Rahmen eines Betriebskonzepts zu untersuchen.

Während der Einschwingphase werden diese Maßnahmen ebenfalls, zum Teil in durch den Disponenten angepasster Form, angewendet, um ein schnelles Einschwingen umzusetzen.

Die Qualität des Betriebskonzeptes hängt u. a. von der Dauer der Einschwingphase ab, da erst nach deren Abschluss ein stabiler, zuverlässiger Störungsbetrieb erfolgt. Die akzeptable Höhe der Einschwingdauer ist abhängig von diversen Einflussfaktoren, wie bspw. Störfall, Unternehmenszielen, Verkehrsverträgen oder Dispositionsgrundsätzen, und ist daher eine vom Ersteller zum Zweck der Bewertung anzugebende Inputgröße.

Die Erfüllung der Stakeholder-Anforderungen erzeugen für diese Personen unterschiedliche Nutzen. Der Ersteller muss nicht eigenständig abschätzen, ob das SFP einschwingen kann, sondern bekommt einen ermittelten Wert angezeigt und hat somit die Möglichkeit einer einfachen, vergleichenden Bewertung bei der Erstellung. Der Anwender kann anhand des Werts der geschätzten Einschwingdauer besser abschätzen, ob eine Ausrufung bei vorliegendem Störfall sinnvoll ist, und kann sich durch das

Betriebskonzept auf die Themen konzentrieren, die das SFP nicht abbilden kann (bspw. Züge außerhalb der geplanten Rahmenbedingungen oder Personal). Der Fahrgast erhält basierend auf einem umsetzbaren Betriebskonzept verkehrliche Informationen zu Störfall und Verbindungsalternativen.

Verschlechterungen der Angebotsqualität gegenüber dem Regelbetrieb sind zu bewerten. Dies kann anhand von Grenzwerten, Erfahrungswerten oder zu entwickelnden Vergleichswerten erfolgen.

Zur Berechnung und Bewertung können viele der in Unterabschnitt 2.4 zitierten Berechnungen aus der Arbeit von Chu (2014) verwendet werden. Allerdings liegt in der vorliegenden Arbeit der Kontext rein auf der Planung, während in Chu (2014) eine Mischung aus Planung und Durchführung mit Fokus auf die Einschwingphase vorlag. Für Probleme, die in Bezug auf die Durchführung der Einschwingphase entstehen, bspw. Konflikterkennung und -lösung sowie zugehörige Modellierung der Infrastruktur, wird entsprechend Unterabschnitt 2.4 auf die Arbeit von Crespo Materna (2020) verwiesen.

Entsprechend Unterabschnitt 2.3.2 ist die Einschwingphase beendet, wenn u. a. ein pünktlicher Betrieb (abzüglich der Pünktlichkeitstoleranz) vorliegt. Dies soll das reguläre Verspätungsrauschen abbilden. Da dies aber bereits vor der Störung vorhanden ist, sind alle durch die Störung entstandenen zusätzlichen Verspätungen komplett abzubauen, sodass das Verspätungsniveau vor der Störung erreicht wird. Daher ist in der Planung von Störfallprogrammen die Definition gemäß Abschnitt 2.4 anzupassen und *Planmäßigkeit anzustreben statt Pünktlichkeit zu sichern*. Planmäßige Wartezeiten im Störfallfahrplan, gemäß Unterabschnitt 3.6.3, sind hierbei nicht zu berücksichtigen, da sie bei Anwendung eines Störfallprogramms keine Verspätungen darstellen, sondern geplanter Bestandteil des linienspezifischen Störfallfahrplans sind.

Im Störungsbetrieb ist analog zum Regelbetrieb von einem Verspätungsrauschen im Netz auszugehen. Die vielfältigen Ursachen, die dieses Verspätungsrauschen im Regelbetrieb erzeugen, können auch im Störfall vorhanden sein und werden nicht durch das Betriebskonzept unterbunden.

Je nach Zeitpunkt des Störungseintritts ist eine andere Betriebslage und somit Reihenfolge der Züge vorhanden. Die tatsächliche Betriebslage und Reihenfolge der Züge ist für die Planung nicht bekannt bzw. variabel, da eine Störung zu jeder Minute eintreten kann. Somit gilt, dass der Störungseintritt zu jeder Minute gleich wahrscheinlich ist.

Ein Störfallprogramm ist eine Vorabplanung der stabilen Phase. Die Anwendung von Störfallprogrammen erfolgt bei großen umfassenden Störungen, die starke Auswirkungen auf Betrieb und Verkehr haben (siehe Abschnitte 1.1 und 2.3). Die Vorplanung muss für einen Zeitraum gelten, in dem die Auswirkungen groß sind und ein Nutzen durch die Anwendung eines Störfallprogramms entsteht. Dies ist klassischerweise ein Zeitraum, in dem viele Züge und Fahrgäste verkehren.

Hierfür wird ein begrenzter Untersuchungszeitraum festgelegt, in dem eine Störung die größten Auswirkungen hat und somit auch die Anwendung eines SFP notwendig ist. Dies ist klassischerweise die Hauptverkehrszeit. In dieser ist entsprechend Unterabschnitt 2.2.4 ein Zeitraum von vier Stunden zu betrachten.

Im Folgenden werden nun die Methode und Vorgehensweise für die Funktionsfähigkeit in der stabilen Phase in Unterabschnitt 4.2.1 und für die Qualität in der Einschwingphase in Unterabschnitt 4.2.2 im modularen System erstellt.

4.2.1 Methode und Vorgehensweise zur Bestimmung der Funktionsfähigkeit des Betriebskonzepts in der stabilen Phase

Um eine Modularisierung der Bewertung der stabilen Phase gemäß Unterabschnitt 3.2 umzusetzen, werden zunächst die spezifischen Anforderungen betrachtet und anschließend die eine stabile Phase kennzeichnenden Eigenschaften detailliert.

Anforderungen

Die stabile Phase ist gekennzeichnet durch einen kontrollierten Störungsbetrieb entsprechend dem Störfallfahrplan. Neben den in Abschnitt 4.2 spezifizierten Anforderungen ergeben sich entsprechend Abschnitt 3.2 (d2) folgende spezifizierte Stakeholder-Anforderungen an die Bewertung der geplanten stabilen Phase:

- Nachvollziehbarkeit: Prüfergebnisse sind in verständlicher Granularität zurückzumelden. Wenn die Funktionsfähigkeit nicht gegeben ist, sollen neben dem Ergebnis auch Zwischenschritte der Prüfung für den Ersteller aufbereitet werden, sodass diese ihn im Planungsprozess unterstützen.
- Auswahlmerkmale/Qualitätseinschätzung: Der Anwender ist auf zusätzliche Dispositionstätigkeiten, die ggfs. zur Umsetzung des Betriebskonzepts notwendig sind, hinzuweisen.

Untersetzung kennzeichnender Eigenschaften einer stabilen Phase nach Unterabschnitt 2.3.2 und Unterabschnitt 4.2

Die stabile Phase stellt einen eingeschwungenen Zustand dar. Dieser kennzeichnet sich, entsprechend Abschnitt 2.3.2, durch die drei messbaren Eigenschaften, die an den Zugfahrten identifiziert werden können: Planmäßigkeit, Zugstandort und Zuganzahl. Wenn diese drei Eigenschaften erfüllt sind, fahren die Züge wie im Betriebskonzept geplant.

1. Gemäß Abschnitt 4.2 ist der Störungsbetrieb stabil, wenn er planmäßig dem Störfallfahrplan entspricht. Bei Erstellung des Störfallfahrplans sind im Sinne des Fahrgastes und der Anforderung Zuverlässigkeit (siehe Abschnitt 3.3 (a2)) maßnahmeninduzierte zeitliche Verschiebungen im Störfallfahrplan im Vergleich zum Regelbetrieb nach Möglichkeit zu vermeiden. Wenn dies nicht vermeidbar ist, werden sie im Betriebs- und Verkehrskonzept über die resultierenden Ankunft- und Abfahrtszeiten eingeplant und berücksichtigt. Somit sind sie Bestandteil des Störfallfahrplans und stellen bei der Prüfung der stabilen Phase keine Verspätung dar. Das Einschwingen ist abgeschlossen, wenn keine durch das Einschwingen entstandenen Wartezeiten mehr vorliegen.
2. Der *Zugstandort* entspricht bei allen Zügen dem Störfallfahrplan. Dies bedeutet, dass entsprechend der Kategorisierung der Züge anhand ihres Standortes in Unterabschnitt 3.6.3 in der stabilen Phase nur grüne Züge Gegenstand der Bewertung sind. Wenn ein Zug nach 1. planmäßig verkehrt, entspricht dies einer grünen Kategorisierung. Für diese Eigenschaft gibt es somit in Bezug auf die Funktionsfähigkeit der stabilen Phase keinen Überprüfungsbedarf.
3. Die *Zuganzahl* im System entspricht der im Störfallfahrplan geplanten Anzahl an Zügen. Im besten Fall sind genau alle geplanten Züge im System vorhanden, sodass sich der Störfallfahrplan vollständig umsetzen lässt. Lage und Zeitpunkt einer Störung können dazu führen, dass es nicht möglich ist, auf allen Ästen die geplante Anzahl an Zügen zu fahren,

wenn diese Äste vom restlichen Netz abgeschnitten sind. Wenn diese Äste nicht durch Umleitungen oder zusätzliche Bereitstellungen abgedeckt werden können, kommt es zu zusätzlichen Ausfällen. Die Nutzung zusätzlicher Umleitungen, Bereitstellung oder Adaption des SFP an eine geringere Zuganzahl erfolgt in der Bewertung der Einschwingphase. Für diese Eigenschaft gibt es somit in Bezug auf die Funktionsfähigkeit der stabilen Phase keinen Überprüfungsbedarf.

Maßgebend ist somit in der stabilen Phase der Erhalt eines planmäßigen Betriebes. Es dürfen keine Verspätungen durch geplante Überlastung entstehen oder andere Ursachen, die zur Abweichung vom Störfallfahrplan führen, fehlerhafterweise eingeplant sein. Die anderen beiden Eigenschaften der stabilen Phase stellen sich bei einem funktionsfähigen Betriebskonzept im Laufe der Einschwingphase automatisch ein. Sollte dies durch eine ungünstige Betriebslage bei Störungseintritt nicht möglich sein, so ist ein händisches Nachsteuern durch den Disponenten notwendig. Dies kann dann aber strukturiert anhand des vorliegenden Betriebskonzepts erfolgen. Die Funktionsfähigkeit hängt somit maßgebend von der Eigenschaft *Planmäßigkeit* ab.

Während der Erstellung muss durch die Bewertung sichergestellt werden, dass das Betriebskonzept einen Zustand abbildet, der nicht durch Fehlplanungen Abweichungen erzeugt. Das Betriebskonzept wird, wie in Unterabschnitt 3.1.1 und Abschnitt 3.2 erläutert, weiterhin durch einen erfahrenen Mitarbeiter unter Nutzung einer Software erstellt. Dieser Ersteller fügt dem Betriebskonzept Schritt für Schritt einzelne Maßnahmen hinzu. Er plant diese für einen Zug oder eine Linie.

Der Störfallfahrplan ist erst bekannt, wenn alle betrieblichen Maßnahmen eingeplant sind. Bis dahin kann eine Maßnahme nur, ohne Berücksichtigung aller anderen Züge, daraufhin überprüft werden, ob sie grundsätzlich machbar ist. Dieser Zwischenschritt vor Vollendung der Planung dient der anforderungsgerechten Nachvollziehbarkeit für den Ersteller.

Modul 1 beinhaltet somit die Untersuchung der *Machbarkeit* einzelner Maßnahmen. Bei Anwendung einer Maßnahme auf eine Linie sind alle Zugfahrten im gewählten Untersuchungszeitraum, siehe Unterabschnitt 4.2, zu überprüfen.

Für eine einzelne Maßnahme können direkt deren eigenständige *Auswirkungen* auf die Fahrtdauer und die Veränderungen weiterer *zeitlicher Bestandteile* des Fahrplans des Regelbetriebs berechnet werden. In Modul 1 können somit alle Überprüfungen und Berechnungen bezogen auf eine Maßnahme und Zugfahrt bzw. Linie ohne Berücksichtigung der weiteren bestehenden Zugfahrten bzw. weiterer Maßnahmen im System erfolgen. Das Zusammenspiel aller Maßnahmen kann diese Zeiten anschließend ggfs. verändern.

Daher ist ab Modul 2 die Funktionsfähigkeit des Störfallfahrplans zu überprüfen. Gemäß Abschnitt 2.4 entstehen Abweichungen vom Störfallfahrplan durch Wechselwirkungen der Maßnahmen, wie Belegungskonflikte oder zu hohe Auslastung. Ein einzelner veränderter Zug kann eine Überprüfung notwendig machen, für die Bewertung sind jedoch alle Wechselwirkungen an diesem Netzelement zu berücksichtigen.

Ein Netzelement (siehe Unterabschnitt 3.6.2) wird im Wesentlichen als *betroffenes Netzelement* bezeichnet, wenn dort im Untersuchungszeitraum Veränderungen der Belegung durch betriebliche Maßnahmen entstehen. Eine Maßnahme kann mehrere Netzelemente betreffen.

Die betroffenen Netzelemente stellen somit den Ausgangspunkt für das Prüfungsvorgehen der Funktionsfähigkeit aller Maßnahmen ab Modul 2 dar.

Die Netzelemente umfassen entsprechend Unterabschnitt 2.2.4 Strecken, Gesamtfahrstraßenknoten und Gleisgruppen. Den Ergebnissen von Chu (2014) zufolge erzeugen besonders die Strecken wegen der Umleitungsmaßnahmen und in den Bahnhöfen die Gleisgruppen wegen der Wenden Abweichungen vom Störfallfahrplan. Daher werden die Gesamtfahrstraßenknoten nicht separat berücksichtigt, sondern die Betrachtung der Gleisgruppen als Knoten weitergeführt. Es erfolgt daher eine Aufteilung in Kanten und Knoten (Gleisgruppe), da diese entsprechend Unterabschnitt 2.2.4 z. T. unterschiedliche eisenbahnbetriebswissenschaftliche Berechnungen erfordern. Da Umleitungen gemäß Abschnitt 2.4. verspätungserzeugend wirken können, erfolgt hier zudem eine Betrachtung der Knoten, wie bspw. die Abzweigstellen.

Die Maßnahmen mit Umleitungen erzeugen ggfs. stark abweichende Fahrtdauern und somit abweichende Ankunfts- und Abfahrtszeiten in den Knoten. Diese müssen für eine Ermittlung von Belegungskonflikten in den Knoten bekannt sein. Daher wird die gesamthafte Überprüfung aller Maßnahmen im System in *Modul 2* „Funktionsfähigkeit der Kanten“ und *Modul 3* „Funktionsfähigkeit der Knoten“ aufgeteilt.

Zusammenfassend lässt sich die Untersuchung der Funktionsfähigkeit der stabilen Phase des Betriebskonzepts in

- die Machbarkeitsprüfung und Berechnung der Zeitbedarfe je Maßnahme (Modul 1) und
- das Zusammenspiel aller Maßnahmen im System (Modul 2 und Modul 3)

aufteilen.

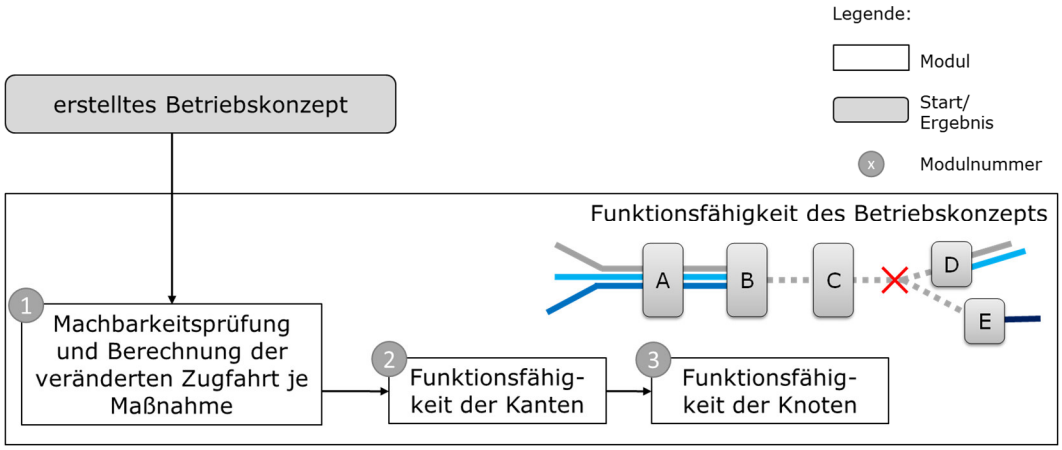


Abbildung 4-1: Module zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der stabilen Phase (eigene Darstellung)

Dieser Teil (siehe Abbildung 4-1) des gesamten Modulsystems zur Bewertung des Betriebskonzepts bezieht sich rein auf die Überprüfung der stabilen Phase und dient nur dazu, sicherzustellen, dass das Betriebskonzept keine Belegungskonflikte und Kapazitätsüberschreitungen beinhaltet, die eine stabile Phase unmöglich machen. Die Ergebnisse der Prüfungsmodule treffen keine direkte Aussage über die betriebliche und verkehrliche Qualität.

Es erfolgt in Abschnitt 4.3 die Konzeption von Modul 1 und in Abschnitt 4.4 die Konzeption der Module 2 und 3 zur Prüfung der Funktionsfähigkeit eines geplanten Betriebskonzepts in der stabilen Phase.

4.2.2 Methode und Vorgehensweise zur Bestimmung der Einschwingqualität

Die Einschwingphase ist gekennzeichnet durch einen Bahnbetrieb im unkontrollierten Störungszustand, der sich im zeitlichen Verlauf der Phase in einen zuverlässigen und steuerbaren Betrieb entwickeln soll.

Nachdem die Funktionsfähigkeit der vorgeplanten stabilen Phase in den Modulen 1 bis 3 festgestellt wird, soll das zugehörige linien- und betriebsstellenscharfe Betriebskonzept darauf geprüft werden, dass eine stabile Phase mit geprüft funktionsfähigem Störfallfahrplan in vorgegebener Zeit erreicht werden kann. Entsprechend den Anforderungen an ein betriebliches Maßnahmenbündel (siehe Abschnitt 3.3 (b2)) ist das Einschwingen sicherzustellen und zur Qualitätssicherung, entsprechend Abschnitt 3.4, festzustellen, welchen Zeitraum dies wahrscheinlich benötigt.

Neben den in Abschnitt 4.2 spezifizierten Anforderungen ergeben sich entsprechend Abschnitt 3.3 (d2) folgende spezifizierte Stakeholder-Anforderungen an die Bewertung der Einschwingphase:

- Nachvollziehbarkeit: Direkte Rückmeldung der Prüfungsergebnisse und ggfs. Zwischenschritte an den Ersteller zur Begleitung des Erstellers im Planungsprozess.
- Auswahlmerkmale/Qualitätseinschätzung: Anwender ist auf zusätzliche Aufgaben, die ggfs. zur Umsetzung des Betriebskonzepts in der Einschwingphase notwendig sind, hinzuweisen.
- schnelle Stabilität: Die Einschwingdauer ist mit einem angestrebten, akzeptablen Maximalwert abzugleichen.

Gemäß Abschnitt 2.4 entstehen durch betriebliche Maßnahmen Ent- und Überlastungen an Netzelementen. Entsprechend Abschnitt 2.4 sind Überlastungen kritisch in Bezug auf die Höhe der Einschwingdauer. Um der allgemeinen Anforderung an geringe Rechenzeiten gerecht zu werden, erscheint es sinnvoll, zunächst zu prüfen, ob Ausschlusskriterien vorliegen, die ein Einschwingen verhindern, und erst anschließend die Dauer zu berechnen. Sollten Ausschlusskriterien vorliegen, die ein Einschwingen verhindern, könnte die Dauer nicht ermittelt werden. Daher ist die Bewertung der Einschwingphase zu trennen in ein Modul 4 zur Prüfung auf Ausschlusskriterien und ein Modul 5 zur Ermittlung der Einschwingdauer.

Nach Unterabschnitt 4.2 gilt, dass je nach Zeitpunkt des Störungseintritts eine andere Betriebslage vorhanden ist. Im Weiteren wird in Abwägung von Rechenzeit und Genauigkeit eine Diskretisierung in Minutenschritten verwendet. Jede Minute einer Stunde ist als Störungszeitpunkt gleich wahrscheinlich.

Um Verwechslungen mit dem Zeitwert Minute zu vermeiden, wird für die Minuten des Fahrplans im Regelbetrieb, zu denen die Störung eintritt, der Begriff Fahrplanminute m gewählt. Die Anzahl der zu betrachtenden Fahrplanminuten ergibt sich aus dem maßgebenden Zeitintervall. Dieses stellt einen zeitlichen Ausschnitt dar, der sich regelmäßig wiederholt und somit alle Zugfolgefälle abdeckt. Dies ist der Grundtakt.

Entsprechend Abschnitt 2.4 beeinflusst die Dauer der Ermittlungs- und Entscheidungsphase das Entstehen von Verspätungen. Zudem gilt, dass ein Störfallprogramm umso wirksamer ist, je schneller es vollständig angewendet werden kann. Die Zieldauer der Ermittlungs- und Entscheidungsphase ist eine Eingangsgröße, die parametrisiert durch den Ersteller festgelegt werden kann. In Beispielrechnungen wird der in der Literatur empfohlene, auf dem Takt basierende Wert verwendet. Dies sind bei S-Bahnen klassischerweise 15 Minuten.

Bei Störungseintritt befinden sich Zugfahrten im Zulauf auf die Störung. Je nach Situation und Informationslage agieren die Disponenten ggfs. unterschiedlich. Entsprechend Abschnitt 2.4 ist in manchen Situationen ein Nothalt erforderlich, in anderen nicht. Um vergleichend planen zu können,

wird daher hier ein Worst-Case-Szenario verwendet: Es erfolgt die Festlegung der Annahmen, dass bis durch die Ausrufung des SFP das weitere Vorgehen feststeht, die Züge in Fahrtrichtung zur Störung, von der letzten SFP-Wendemöglichkeit bis zu der Störung, angehalten werden. Die anderen Züge rücken bis zur letzten SFP-Wendemöglichkeit bis zur SFP-Ausrufung nach.

In Abhängigkeit der Störungszeitpunkte können unterschiedliche Reihenfolgen der Züge/Linien auftreten. Die Wendedauern und der Zeitbedarf im Knoten ergeben sich aus den im Störfallfahrplan geplanten Abfahrtszeiten je Zug bzw. Linie und können stark variieren. Je nach Störungszeitpunkt und vorliegender Reihenfolge können zudem unterschiedlich lange bzw. kurze Ankunftsabstände am Knoten vorliegen. Dies beeinflusst jeweils den Verspätungsaufbau.

Für die Bestimmung eines maßgebenden Zeitintervalls zur Ermittlung der Einschwingdauer ist entsprechend Abschnitt 4.2 zu beachten, dass der Fokus auf den Zeiträumen liegt, in denen maximale Auswirkungen entstehen werden. Daher erfolgte bereits eine Einschränkung auf einen Betrachtungszeitraum von vier Stunden in der Hauptverkehrszeit (HVZ), die nun auf ein maßgebendes Zeitintervall gekürzt werden sollen.

Das maßgebende Zeitintervall muss eine hohe betriebliche Auslastung aufweisen, d. h. die Taktverstärker, wenn vorhanden, müssen Teil des maßgebenden Zeitintervalls sein. Zudem sollten betrieblich aufwendige Maßnahmen, die den Wendezeitbedarf erhöhen würden, wie Flügeln und Vereinigen, bei Vorliegen in der Hauptverkehrszeit auch Bestandteil sein. Das maßgebende Zeitintervall ist so zu wählen, dass es innerhalb des Untersuchungszeitraums von 4 h liegt.

Modul 4 prüft das Betriebskonzept auf Ausschlusskriterien für ein Einschwingen. Daher werden Netzelemente, bei denen laut Abschnitt 2.4 häufig Verspätungen durch Stauentwicklung entstehen, auf dauerhafte Überlastung untersucht. Zudem werden Maßnahmen, die das System durch Ausstellen von Fahrzeugen entlasten, wie bspw. der Ausfall und der nicht befahrene Linienast beim Teilausfall, auf ihre Funktionsfähigkeit und Umsetzungsdauer hin untersucht.

Das Betriebskonzept gilt als einschwingfähig, wenn in Modul 4 keine Ausschlusskriterien ermittelt werden konnten und die in Modul 5 berechnete Einschwingdauer als ausreichend bewertet werden kann. Bezugspunkt der Bewertung ist dabei, gemäß der Anforderung Quantifizierbarkeit (siehe Abschnitt 3.3 (d2)), eine vom Ersteller vorzugebende Zielfunktion. Sollte das Betriebskonzept nicht als einschwingfähig gelten, ist eine anforderungsgemäße Rückkopplung durch Überarbeitung der eingeplanten Maßnahmen des Betriebskonzepts notwendig. Wenn dies der Fall ist, so kann die Erstellung und Bewertung des Betriebskonzepts als abgeschlossen betrachtet werden und im Folgenden das Verkehrskonzept als zweiter Bestandteil eines SFP erstellt und bewertet werden.

Zusammenfassend lässt sich die Untersuchung der Einschwingqualität des Betriebskonzepts in

- die Prüfung der Einschwingfähigkeit (Modul 4) und
- die Berechnung und Bewertung der Einschwingdauer (Modul 5)

aufteilen.

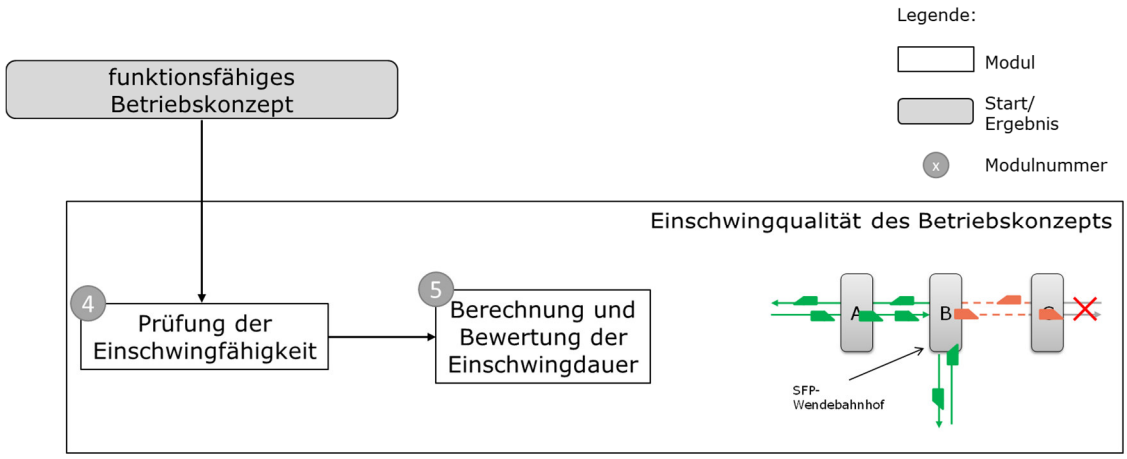


Abbildung 4-2: Module zur Überprüfung der Qualität der Einschwingphase (eigene Darstellung)

Dieser Teil (siehe Abbildung 4-2) des gesamten Modulsystems zur Bewertung des Betriebskonzepts bezieht sich rein auf die Überprüfung der Einschwingphase und dient dazu, sicherzustellen, dass das Einschwingen in vorgegebener Dauer möglich ist. Es erfolgt in Abschnitt 4.5 die Konzeption von Modul 4 und in Abschnitt 4.6 die Konzeption von Modul 5 zur Bewertung der Einschwingqualität eines geplanten Betriebskonzepts.

4.3 Modul 1: Machbarkeitsprüfung und Berechnung der veränderten Zugfahrt je Maßnahme

4.3.1 Einleitung

Um die angestrebte Funktionsfähigkeit (siehe Abschnitt 3.3 (b2)) eines Betriebskonzepts zu erreichen, muss die Machbarkeit jeder einzelnen Maßnahme gegeben sein. Ziel dieses Moduls ist somit die Überprüfung der Machbarkeit einer einzelnen Maßnahme. Die relevanten Anforderungen aus Abschnitt 3.3 wurden in Abschnitt 4.2 zitiert und zudem in Abschnitt 4.2 und 4.2.1 für die Bewertung der stabilen Phase spezifiziert.

Der Input sind die vom Ersteller geplanten Maßnahmen und das Ergebnis ist eine Menge an voneinander unabhängig machbaren Maßnahmen. In den folgenden Unterabschnitten werden hierfür Methode, Vorgehensweise und Algorithmus erarbeitet.

4.3.2 Methode

Gemäß Abschnitt 1.1 entstehen durch den Störfall und die eingeplanten Maßnahmen Veränderungen bei den Einheiten Infrastruktur, Betrieb und Verkehr. Die Machbarkeit einer Maßnahme ist gegeben, wenn

- für die durch eine Maßnahme adressierte Zugfahrt, die dafür vorgesehene *Infrastruktur* vorhanden und kompatibel ist.
- die durch eine Maßnahme adressierte Zugfahrt, auf der vorhandenen Infrastruktur *betrieblich* durchführbar ist.
- die Erbringung der geplanten *verkehrlichen* Leistung durch das EVU (angepasst) möglich ist.

Für die Machbarkeit einer Maßnahme müssen alle drei Bedingungen erfüllt sein.

Zur Begleitung des Erstellers im Planungsprozess sind diesem direkte Einstufungen zur Machbarkeit der von ihm eingeplanten Maßnahmen zugeben. Diese können von

1. Maßnahme nicht machbar,
2. Maßnahme nur mit Anpassungen machbar bis
3. Maßnahme machbar

reichen.

Zu 1.: Die im Modul 1 zu implementierenden Algorithmen müssen Probleme einer nicht machbaren Maßnahme erkennen, für die es in Bezug auf die adressierte Zugfahrt keine Lösung gibt. Dies ist der Fall, wenn die Maßnahmen technisch nicht möglich, betrieblich nach Regelwerk nicht zulässig oder verkehrlich nach auferlegten Zielsetzungen nicht möglich sind. Die Anwendung für die adressierte Zugfahrt wird somit ausgeschlossen.

Zu 2.: Die im Modul 1 zu implementierenden Algorithmen müssen Probleme einer nicht machbaren Maßnahme erkennen, für die es in Bezug auf die adressierte Zugfahrt Anpassungsmöglichkeiten hin zu einer machbaren Maßnahme geben kann. Eine Bewertung der Anpassungsmöglichkeiten ist nicht enthalten. Der Ersteller erhält einen Hinweis auf das vorliegende Problem und mögliche Anpassungen und muss selbst entscheiden, ob mit der angepassten Maßnahme weitergearbeitet werden soll oder ob die Anwendung der Maßnahme abgebrochen wird.

Zu 3.: Die im Modul 1 zu implementierenden Algorithmen erkennen keine Probleme bei der Machbarkeit einer Maßnahme.

Für die Zuordnung jeder auf Machbarkeit zu prüfenden Maßnahmen zu den drei Einstufungen sind Kriterien zu definieren. Eine nicht machbare Maßnahme kann durch *absolute Ausschlusskriterien* identifiziert werden. Eine mit Anpassungen machbare Maßnahme kann durch *weiche Ausschlusskriterien* identifiziert werden. Eine machbare Maßnahme kann durch das *Nicht-Auftreten von Ausschlusskriterien* identifiziert werden.

Entsprechend den Anforderungen Allgemeingültigkeit sowie räumliche und zeitliche Flexibilität (siehe Abschnitt 3.3 (a2)) werden Grenzwerte, denen kein fixer Wert bspw. aus Richtlinien zugeordnet werden kann, parametrisierbar erstellt. Bei Überschreitung der (individuell) festgelegten Grenzen besteht beim Überschreiten der ersten Grenze ein weicher Ausschluss und beim Überschreiten einer zweiten Grenze ein absoluter Ausschluss. Es müssen nicht immer beide Grenzen vorhanden sein.

Es ergibt sich bei Auftreten von

- absoluten Ausschlusskriterien:
  - Die Maßnahme darf nicht angewendet werden.
  - Gemäß der Anforderung Nachvollziehbarkeit sollte der Algorithmus inklusive Grund rückmelden, dass die Maßnahme nicht umgesetzt werden darf.
  - Die Maßnahme ist technisch nicht möglich, betrieblich nach Regelwerk nicht zulässig oder verkehrlich nach auferlegten Zielsetzungen nicht möglich.
- weichen Ausschlusskriterien:
  - Diese Maßnahme sollte vor der Anwendung überdacht werden.
  - Gemäß der Anforderung Nachvollziehbarkeit sollte der Algorithmus die erkannten Probleme inkl. Lösungsmöglichkeiten rückmelden und informieren, dass die Maßnahme nicht wie geplant umgesetzt werden kann.

- Der Algorithmus weist darauf hin, überlässt aber die Entscheidung über die Anwendung der Maßnahme dem Ersteller.
- Dies kann zum einen bedeuten, dass die Maßnahme technisch nicht wie vorgesehen machbar ist, aber betriebliche Regeln zur Umsetzung angewandt werden können. Diese betrieblichen Regelungen bringen aber meist Nachteile wie bspw. Fahrzeitverlängerungen durch Fahren auf Befehl mit sich.
- Dies kann zum anderen bedeuten, dass die Maßnahme betrieblich nicht wie vorgesehen machbar ist, aber Konfliktlösungen zur Umsetzung angewandt werden können. Deren Auswirkungen sind zu berücksichtigen. Da diese Konflikte entsprechend Abschnitt 2.2.5 durch die Bindung zweier Züge entstehen, kann dies nicht Bestandteil der Überprüfung einer einzelnen Maßnahme vor Fertigstellung der Planung aller betrieblichen Maßnahmen, entsprechend Abschnitt 4.2.1, sein.
- Verkehrliche Veränderungen wie bspw. große Fahrzeitverlängerungen oder zu viele entfallende Halte geben einen ersten Hinweis auf eine geringe Kundenfreundlichkeit.

Eine einzelne betriebliche Maßnahme aus Unterabschnitt 3.1.2 kann die zeitliche Nutzung der Infrastruktur im Vergleich zum Regelbetrieb erhöhen, verringern oder unverändert belassen. Dies ist vor einer Machbarkeitsprüfung als Input zu bestimmen. Somit sind in Modul 1 zunächst die erhöhten Zeitbedarfe durch *zusätzliche Zeitaufwände* bei im Regelbetrieb bestehenden Zeiten oder durch *zusätzliche Fahrten* als neu erzeugte Zeitbedarfe im Störfallfahrplan zu ermitteln.

Für die beiden Modulbestandteile Machbarkeit und Berechnung der veränderten Zugfahrt je Maßnahme ohne Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit anderen Zugfahrten werden nun im Folgenden die Vorgehensweise und der Algorithmus entwickelt.

4.3.3 Vorgehensweise

Die in Modul 1 zu berechnenden veränderten Zeiten stellen einen möglichen Input für die Machbarkeitsprüfung dar. Daher wird zunächst die Vorgehensweise für Berechnung einer durch eine Maßnahme veränderten Zugfahrt ermittelt und anschließend die Vorgehensweise für die Machbarkeitsprüfung hergeleitet.

Berechnung der Zeitbedarfe je Maßnahme

Durch die Anwendung von betrieblichen Maßnahmen können sich die Zeitbedarfe der adressierten Zugfahrt verändern. Basierend auf der Arbeit von Chu (2014) wurden die im Störfall auftretenden Zeitbedarfe als relevant bestimmt, wenn sie in der stabilen Phase regelmäßig auftreten und die Auslastung potenziell erhöhen können. Zeiten, die offensichtlich eine Entlastung erzeugen, wie bspw. entfallende Haltezeiten bei (Teil-)Ausfällen, werden nicht ermittelt.

Gemäß Abschnitt 2.4 entstehen *zusätzliche Zeitaufwände* durch SFP-Wenden oder SFP-Abstellungen mit den in Tabelle 4-1 gelisteten und zugeordneten Zeitbedarfen. *Zusätzliche Fahrten* entstehen auf Strecken, die durch eine Umleitung genutzt werden, und teilweise auch bei Abstellungen mit den gelisteten und zugeordneten Zeitbedarfen. Dabei lassen sich Veränderungen hinsichtlich Fahr-, Halt- und Belegungszeiten differenzieren.

Tabelle 4-1: relevanter veränderter Zeitbedarf differenziert nach Fahr-, Halte- und Belegungszeiten (eigene Darstellung)

			SFP-Wende	Abstellung	Umleitung
Fahrzeiten	a)	Bestimmung der Änderung der Fahrzeitenrechnung		(x)[3]	x
Haltezeiten	b)	Bestimmung von evtl. Auswirkungen einer Fahrzeitverlängerung auf die Folgeleistung			x
	c)	Bestimmung der Haltedauer an neuen Halten			x
Belegungszeiten	d)	Bestimmung der Dauer zur Vergabe der Sonderzugnummer	x		(x) [4]
	e)	Bestimmung der Verzögerung bei initialer Abfahrt wegen Erstellung der Fahrplan-Mitteilung		(x)[5]	x
	f)	Vorbereitungszeiten für eine Abstellung		x	
	g)	Ermittlung der Zeitbedarfe für eine (SFP-)Wende basierend auf Chu (2014)	x		(x)[6]

Die Belegungszeiten im Gesamtfahrstraßenknoten (GFK) finden entsprechend Unterabschnitt 4.2.1 keine Berücksichtigung. Diese sind bei Bedarf durch das EIU bei Abstimmung des SFP durchzuführen, da die finale Entscheidung über den Fahrweg grundsätzlich beim EIU liegt (siehe Abschnitt 2.3.3).

Untersetzung der Vorgehensweise zur Berechnung der ermittelten Zeitbedarfe

Vor Erstellung der Algorithmen im folgenden Unterabschnitt wird hier nun die Vorgehensweise zur Ermittlung für jeden Zeitbedarf beschrieben.

zu a) Bestimmung der Änderung der Fahrzeitenrechnung

Die Ermittlung der neuen Fahrzeit auf der Umleitung $t_{Fahrt,Ul}$ vom letzten Bahnhof vor Verlassen des Regellaufweges bis zum Endbahnhof und der Gegenrichtung sowie die Fahrtdauer in die Abstellung auf abweichender Strecke erfolgen gemäß Unterabschnitt 3.1.2 in einer bestehenden Software oder unter Verwendung von bestehenden Algorithmen (bspw. haben Hansen und Pachl (2014, S. 196 ff.) eine Liste von bestehenden Softwareprodukten, die auch Fahrzeitenberechnungen enthalten, erstellt).

[3] Relevant für die Fahrten in die Abstellung, die als Zugfahrt auf abweichender Strecke erfolgen müssen.

[4] Relevant für die Maßnahme „Umleitung mit Teilausfall und Ersatz“, wenn die Fahrt auf der Umleitung die Ersatzfahrt mit Sonderzugnummer darstellt.

[5] Relevant für die Fahrten in die Abstellung, die als Zugfahrt erfolgen müssen.

[6] Relevant, wenn sich in b) eine verspätete Ankunft am Wendebahnhof ergibt.

zu b) Bestimmung von evtl. Auswirkungen einer Fahrzeitverlängerung auf die Folgeleistung

Basierend auf der Abfahrtszeit an dem letzten Bahnhof vor Verlassen des Regelwegs kann die Ankunftszeit am Endbahnhof nach Abbildung 4-3 ermittelt werden.

Anhand von Ankunftszeit und (SFP-)Wendezeit kann der frühestmögliche Zeitpunkt für die Leistung der Rückfahrt ermittelt werden. Wenn dieser nicht dem gewünschten Takt entspricht oder eine negative Wende bedeutet, so ist dies dem Ersteller zur Entscheidung über Wende auf einen späteren Takt, negative Wende oder Anpassung bzw. Abbruch der geplanten Umleitungsmaßnahme anzuzeigen.

Die veränderte Fahrtdauer und deren Auswirkungen sind dann ebenso für die Gegenrichtung erneut zu berücksichtigen.

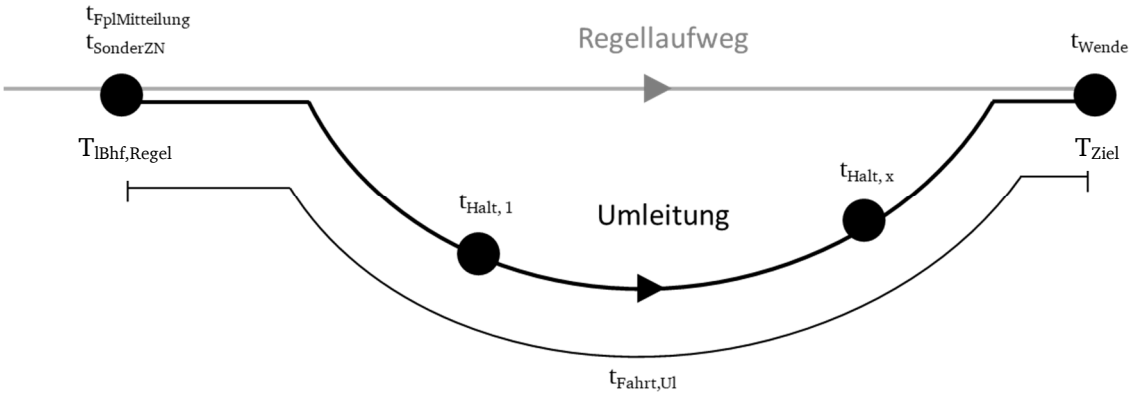


Abbildung 4-3: Übersicht der zu ermittelnden Zeiten für eine Umleitung (eigene Darstellung)

zu c) Bestimmung der Haltedauer an neuen Halten

Wenn der Zug auf der Umleitungsstrecke halten soll, müssen zusätzlich zur neuen Fahrzeit die Haltezeiten an jedem neuen Halt bestimmt werden, um eine Ankunftszeit am Endbahnhof zu ermitteln.

Diese Halte werden wegen der kurzfristigen Nutzung im Rahmen eines Störfallprogramms, besonders bei Umleitungsstrecken, die sonst nicht von S-Bahnen genutzt werden, üblicherweise für den Ausstieg verwendet. Es ist somit für die Haltedauer nicht von einem erhöhten Fahrgastaufkommen auszugehen. Es besteht somit keine Notwendigkeit, einen SFP-Zuschlag für Halte analog zu den Wenden anzusetzen.

zu d) Bestimmung der Dauer der Vergabe der Sonderzugnummer

Nach der DB Netz AG (2009) wird eine Sonderzugnummer wie folgt notwendig: Wenn „ein Zuglauf im Reisezugverkehr gebrochen [wird], muss für einen der verbleibenden Teilabschnitte eine neue Zugnummer vergeben werden. Die neue Zugnummer wird dem Kontingent der Betriebszentrale entnommen. Auf Wunsch kann die Leitstelle des betroffenen EVU eine Zugnummer aus dem eigenen Kontingent zur Verfügung stellen. Der Zug mit der neuen Zugnummer wird unter Nutzung der Fahr- und Aufenthaltszeiten sowie der weiteren Fahrplanangaben des ausfallenden Zuges mittels Fahrplan-Mitteilung bekanntgegeben“.

Die Vergabe erfolgt durch das EIU, kann aber, wie in der Richtlinie beschrieben, vom EVU vorgeschlagen werden. Es bestehen unterschiedliche Möglichkeiten, den Zeitbedarf erheblich zu reduzieren. Die existierenden Absprachen mit dem EIU, bspw. zu Sonderzugnummern, unterscheiden über die Regionen allerdings deutlich (siehe Unterabschnitt 2.3.4). Es ist somit eine vom Ersteller anzugebene Inputgröße.

Im Fall der Maßnahme Umleitung mit Teilausfall und Ersatz kann es sein, dass die umgeleitete Zugfahrt den Ersatz darstellt und daher eine Sonderzugnummer für die Fahrt benötigt.

zu e) Bestimmung der Verzögerung bei initialer Abfahrt wegen Erstellung der Fahrplan-Mitteilung

Eine Fahrplan-Mitteilung ist notwendig, wenn der Laufweg von seinem ursprünglichen Fahrplan abweicht. Durch eine Fahrplan-Mitteilung gibt das EIU die Fahrplanangaben bekannt. Die Übermittlung kann durch Aushändigen oder Diktieren geschehen. Sowohl das Aushändigen als auch das Diktat darf nach DB Netz AG (2015, S. 1) nur stattfinden, wenn der Zug steht. Wenn der Zug unter erleichterten Bedingungen umgeleitet werden kann, benötigt der Triebfahrzeugführer (Tf) entsprechend der Richtlinie keine Fahrplan-Mitteilung.

Die existierenden Möglichkeiten zur Umleitung unter erleichterten Bedingungen und bestehenden Absprachen mit dem EIU unterscheiden sich in den Regionen. Die Ersteller kennen die jeweiligen vor Ort existierenden Absprachen und Vorgehensweisen. Der Zeitbedarf zur Erstellung der Fahrplan-Mitteilung, der gewöhnlich nach Ankunft am Wendebahnhof besteht, ist somit eine vom Ersteller anzugebene Inputgröße.

zu f) Vorbereitungszeiten für eine Abstellung

Gemäß Abschnitt 2.3.2 beginnt die stabile Phase erst, wenn die geplante Zugzahl erreicht ist. Die Durchführung der Abstellung eines Zuges findet daher nicht in der stabilen Phase statt, sondern gehört zur Einschwingphase. Die zur Abstellung zugehörige Maßnahme Ausfall wird somit in der stabilen Phase nur erhaltend umgesetzt, indem bspw. geplante Verstärkerfahrten entsprechend dem SFP nicht eingesetzt werden.

Trotzdem ist die Abbildung der Maßnahme Ausfall in Modul 1 notwendig. Modul 1 stellt sicher, dass jede Maßnahme machbar ist. Hierzu gehört auch die Maßnahme Ausfall, die durch die erzielte Zugzahlreduktion einen wichtigen Anteil zur Funktionsfähigkeit der stabilen Phase beisteuern kann. Wenn die Maßnahme und somit die Zugzahlreduktion nicht durchführbar sind, so beeinträchtigt dies auch die Maßnahmen, die eine aktive Umsetzung in der stabilen Phase haben. Deswegen finden sich in diesem Modul auch die Bewertungen zur Abstellung.

Nach Chu (2014, S. 156) benötigt eine Abstellung Vorbereitungen durch den oder die Triebfahrzeugführer, die in einem zusätzlichen Zeitbedarf resultieren. Vor einer Abstellung ist sicherzustellen, dass sich nach Ausstieg keine Fahrgäste mehr im Zug befinden. Dies ist durch den Tf im Rahmen eines vollständigen Durchgangs zu kontrollieren. Sollte der Zug zur Weiterfahrt in die Abstellung wenden müssen, so müssen die Führerstände ab- und aufgerüstet werden. Die anzusetzenden Vorbereitungszeiten unterscheiden sich zudem aufgrund der Angaben zur Anzahl der einzusetzenden Triebfahrzeugführer (Tf), die bei Planung der Maßnahme „Ausfall“ eine vom Ersteller anzugebene Inputgröße ist. Durch den Ersteller ist bei der Planung der Maßnahme Ausfall zudem anzugeben, an welchen Bahnhöfen die Abstellung erfolgen und vorbereitet werden soll.

g) Ermittlung der Zeitbedarfe für eine (SFP-)Wende basierend auf Chu (2014)

Die Ermittlung des Zeitbedarfs für eine Wende basiert auf den Arbeiten von Chu (2014) entsprechend Abschnitt 2.4 und wird daher lediglich an Rest des Moduls 1 angepasst notiert.

Machbarkeitsprüfung

Gemäß Abschnitt 4.3.2 ist die Machbarkeit einer Maßnahme gegeben, wenn die vorgesehene *Infrastruktur* vorhanden und kompatibel ist, die Zugfahrt *betrieblich* durchführbar ist und eine Erbringung der verkehrlichen Leistung ermöglicht wird.

Im Folgenden ist nun zu ermitteln, wie dies umgesetzt werden kann.

Infrastruktur und Betrieb

Laufweg-Maßnahmen führen zur Nutzung von abweichenden Infrastrukturkanten oder Infrastrukturknoten. Deren Eigenschaften können von den Regellaufwegeigenschafen so abweichen, dass sich hierdurch Ausschlusskriterien in Bezug auf Infrastruktur und Betrieb ergeben können. Fahrplan-Maßnahmen nutzen den Regelfahrweg zu einer anderen Zeit oder auf dem Gegengleis. Hierbei können für die Nutzung auf dem Gegengleis Ausschlusskriterien in Bezug auf Infrastruktur und Betrieb und bei zeitlichem Verschub betriebliche Ausschlusskriterien entstehen.

Die *Infrastruktur* kann unter Verwendung der im Infrastrukturregister genannten Eigenschaften vollständig auf Machbarkeit überprüft werden. Für die Erstellung eines Tools zur Störfallprogrammplanung wird, ist gemäß der Anforderung zu vereinfachten Datenmodellierung (siehe Abschnitt 3.3 (c2)) davon auszugehen, dass ein EVU nicht den gleichen Zugang zu Infrastrukturdaten hat wie ein EIU. Es ist nicht bekannt, welche Granularität diese Daten haben und welche weiteren Daten ggfs. beim Unternehmen vorliegen.

Grundlegend ist daher zur Überprüfung der Machbarkeit in Bezug auf die Infrastruktur nur sicher ein Abgleich mit bestehenden Zugfahrten, unter der Annahme, dass dort, wo eigene Züge bisher fahren, weitere Fahrten geplant werden können, möglich. Sollten weitere makroskopische oder mikroskopische Daten vorliegen, so können bedarfsgerechte weitere Prüfungen umgesetzt werden.

Zudem ist anzumerken, dass das EVU nicht selbst die finale Entscheidung über eine Maßnahme und ihre Machbarkeit treffen kann, sondern dem EIU lediglich einen sinnvollen Vorschlag unterbreiten kann. Die Betriebskonzepte sind vom EIU für ihren Einsatz freizugeben (gemäß Unterabschnitt 2.3.3), wobei auch die technische und betriebliche Machbarkeit zu prüfen ist.

Um diesen Abstimmungsprozess zu vereinfachen, sollte das EVU ein Betriebskonzept unter grober Berücksichtigung einer möglichen Realisierung und Genehmigung durch das EIU erstellen. Hierzu kann zum einen auf das Expertenwissen des Erstellers und zum anderen auf eine Unterstützung durch ausgewählte (Teil-)Automatisierung zurückgegriffen werden.

Unterstützend können bspw. besonders maßgebende Eigenschaften zur Überprüfung der Nutzbarkeit der Infrastruktur abgeglichen werden. Dies erfordert keinen wissenschaftlich anspruchsvollen Algorithmus, sondern das Vorliegen von Infrastrukturdaten und Zuglaufdaten, sodass bspw. die Elektrifizierung oder die Streckenklasse überprüft werden können.

Die betriebliche Machbarkeit hängt von möglicherweise erkannten Konflikten und deren Lösung ab. Entsprechend Unterabschnitt 3.1.2 werden in dieser Arbeit nur Belegungskonflikte berücksichtigt. Gemäß Unterabschnitt 4.2.1 können diese aber erst im Zusammenspiel aller Maßnahmen betrachtet werden. Daher kann in Modul 1 keine betriebliche Machbarkeit je Maßnahme bestimmt werden.

Verkehr

Durch die betrieblichen Maßnahmen können die Determinanten der Mobilität aus Unterabschnitt 2.5.2 verändert werden. Allerdings wird erst bei Neukonzeption der Reiseketten im Verkehrskonzept deutlich, wie die Angebotsänderungen auf den Fahrgast wirken. Die Determinanten werden in Tabelle 4-2 daraufhin überprüft, ob die Auswirkungen der betrieblichen Maßnahmen (siehe Unterabschnitt 3.1.1) Hinweise auf mögliche Veränderungen der Verkehrsqualität geben.

Tabelle 4-2: in Modul 1 bestimmbare Veränderungen der Determinanten der Mobilität nach Birn und Schäfer (2016, S.75) durch eine betriebliche Maßnahme (eigene Darstellung)

Determinanten der Mobilität	Hinweis auf mögliche Veränderung der Verkehrsqualität durch eine betriebliche Maßnahme
Verfügbarkeit der Verkehrsmittel	entfallende Halte
Reisezeit	- (ergibt sich erst durch Reisekette)
Kosten	- (entsprechend der Anforderung „kostenneutral“ (siehe Abschnitt 3.3 (e2)) nicht zu verändern)
Umsteigenotwendigkeit und -häufigkeit	- (ergibt sich erst durch Reisekette)
Komfort	- (ergibt sich erst durch Reisekette)
Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit	planmäßige Wartezeiten im Störfallfahrplan

Die Eigenschaften entfallende Halte und planmäßige Wartezeiten im Störfallfahrplan sind somit in Modul 1 je Maßnahme zu bestimmen. Entsprechend Unterabschnitt 3.6.3 sind die maßnahmeninduzierten zeitlichen Verschiebungen durch Wenden und Abzweigen auf eine Umleitung zu berücksichtigen. Abzweigungen auf die Umleitung sind abhängig von dem Zusammenspiel mit anderen Zugfahrten und somit nicht Bestandteil von Modul 1.

Eine Machbarkeitsbewertung des bestimmten Ergebnisses hängt bspw. von regionalen Dispositionsvorgaben, Zielen oder Vorgaben im Verkehrsvertrag ab und kann nicht allgemeingültig erfolgen. Die Bewertung ist somit über (weiche und/oder absolute) Grenzwerte, die vom Ersteller anzugebende Inputgrößen sind, abzubilden.

Sollten regionale Vorgaben die Auswahl weiterer bedarfsgerechterer Eigenschaften, die in eine Prüfung eingehen sollen, nötig machen, so können diese in der Überprüfung der verkehrlichen Machbarkeit durch Ermittlung und Grenzwertabgleich ergänzt werden. Dies erfordert keinen wissenschaftlich anspruchsvollen Algorithmus, sondern das Vorliegen von relevanten Eigenschaften und deren Einordnung zu weichen und absoluten Grenzwerten.

Dies ist jeweils nur eine Vorabprüfung, da es lediglich die einzelne Maßnahme und nicht die Wechselwirkungen im Netz berücksichtigt.

Die Vorgehensweise zu Modul 1 lässt sich somit für jede durch eine Maßnahme adressierte Zugfahrt in Abbildung 4-4 zusammenfassen. Im nächsten Unterabschnitt werden diese durch Algorithmen untersetzt. Für die grauen Texte gilt das nicht, da sie an anderer Stelle, durch ein anderes Unternehmen oder durch eine andere Software erfolgen.

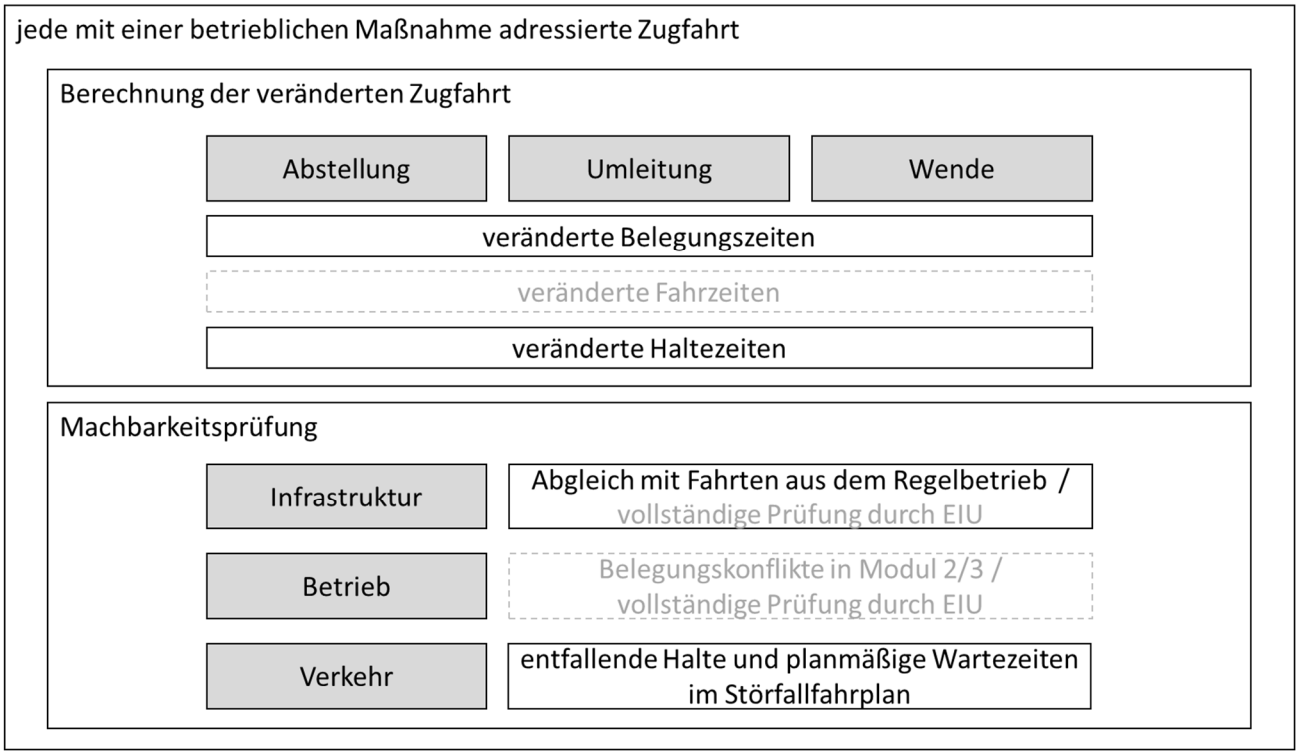


Abbildung 4-4: Vorgehensweise von Modul 1 (eigene Darstellung)

4.3.4 Algorithmus

Nachdem in den Unterabschnitten Methode und Vorgehensweise erläutert wurde, welche Aufgaben der Algorithmus hat und wie der Input verarbeitet wird, um den gewünschten Output zu erreichen, erfolgt hier die formalere Notation der einzelnen Arbeitsschritte. Die Arbeitsschritte erfolgen für jede von einer Maßnahme adressierten Zugfahrt. Wenn die Maßnahme für eine Linie ausgewählt wurde, wird jede Zugfahrt im Untersuchungsraum betrachtet.

Berechnung der Zeitbedarfe je Maßnahme

Die Berechnung der Zeitbedarfe je Maßnahme erfolgt entsprechend den Eigenschaften der Maßnahme anhand der Schritte in Tabelle 4-1 pro Zugfahrt.

a) Bestimmung der Änderung der Fahrzeitenrechnung

Nicht Bestandteil dieser Arbeit.

b) Bestimmung von evtl. Auswirkungen einer Fahrzeitverlängerung auf die Folgeleistung

Ankunftszeit am Endbahnhof nach Umleitung:

$$T_{Ankunft} = T_{ab,lBSt,Regel} + t_{Fahr,Ul} + \sum_{i=1}^{n_H} t_{Halt,i} + t_{Fahr,UlEnde}$$

$$\text{mit: } T_{ab,lBSt,Regel} = \max \begin{cases} T_{an,Lbst,Regel} + t_{Halt,lBst,Regel} \\ T_{an,Lbst,Regel} + t_{FplMitteilung} \end{cases}$$

mit:

$T_{Ankunft}$	Ankunftszeit am Endbahnhof,
$T_{ab,lBST,Regel}$	Abfahrtszeit an dem letzten Bahnhof vor Verlassen des Regelwegs,
$T_{an,lBST,Regel}$	Ankunftszeit an dem letzten Bahnhof vor Verlassen des Regelwegs
$t_{Fahr,Ul}$	Fahrzeit der Umleitung,
$t_{Halt,i}$	Haltezeit an dem Halt i auf der Umleitung,
n_H	Anzahl der Halte
$t_{Fahr,UlEnde}$	Fahrzeit vom Ende der Umleitung bis zum Wendebahnhof auf dem Regellaufweg und
$t_{FplMitteilung}$	Zeitbedarf für die Fahrplanmitteilung.

Der frühestmögliche Zeitpunkt für die Abfahrt der Folgeleistung kann über die Ermittlung des Zeitbedarfs einer Wende anhand von e) bestimmt werden.

c) Bestimmung der Haltedauer an neuen Halten

Für die Bestimmung der Haltezeiten $t_{Halt,x}$ können entsprechend Abschnitt 2.2.3 die Regelhaltezeiten ermittelt werden.

d) Bestimmung der Dauer zur Vergabe der Sonderzugnummer

vom Ersteller anzugebene Inputgröße

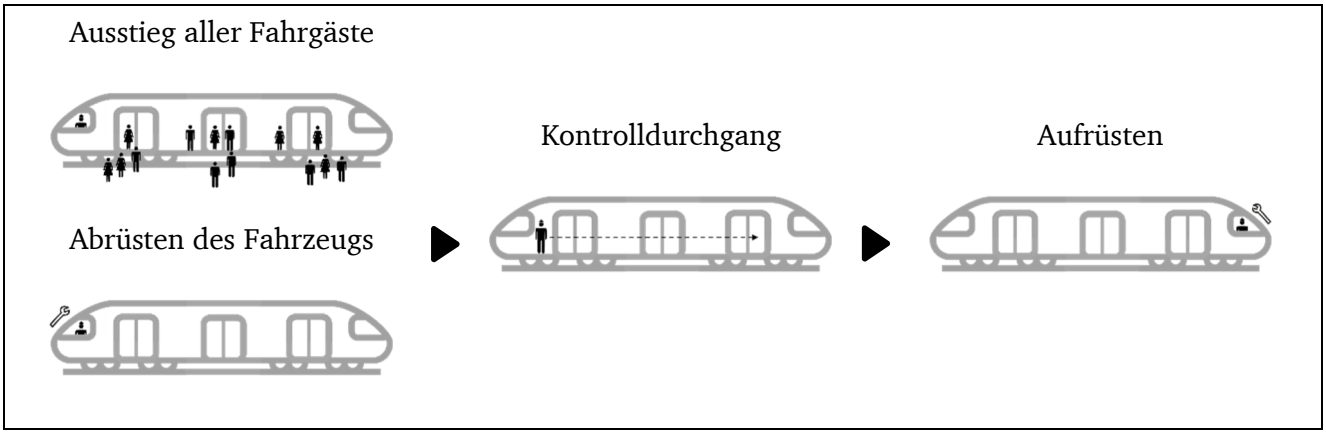
e) Bestimmung der Verzögerung bei initialer Abfahrt wegen Erstellung der Fahrplan-Mitteilung

vom Ersteller anzugebene Inputgröße

f) Vorbereitungszeiten für eine Abstellung

Die Ermittlung des Zeitbedarfs bei Abstellung basiert auf der Forschungsarbeit von Chu (2014) entsprechend Abschnitt 2.4 und DB Regio AG (2010b). Es ergeben sich die in Abbildung 4-5 dargestellten Aufgaben bei Weiterfahrt in die Abstellung mit und ohne Wende bei einem Tf und einem Stockwerk.

Weiterfahrt zur Abstellung mit Wechsel der Fahrtrichtung



Weiterfahrt zur Abstellung ohne Wechsel der Fahrtrichtung

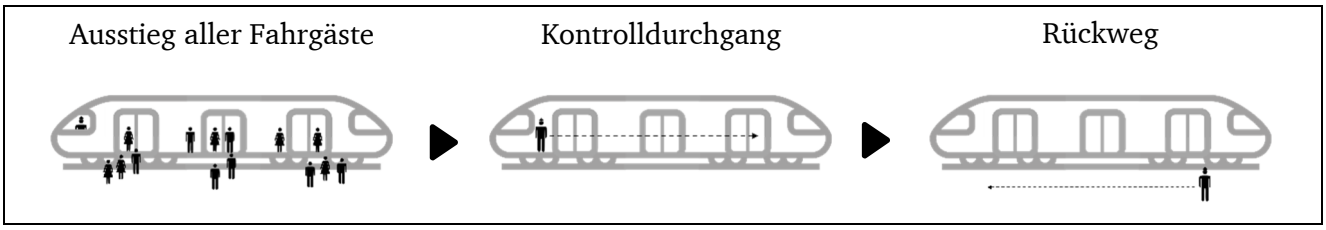


Abbildung 4-5: mögliche Abläufe der Vorbereitungsarbeiten vor einer Abstellung (1 Tf, 1 Fahrzeugebene) (eigene Darstellung)

Im Verfahren zur Bestimmung der Dauer zum Abstellen eines Zuges nach Chu (2014, S. 156) wird dargestellt, wie die Dauer für die Abstellung eines Zuges bei der Durchführung ermittelt werden kann. In dieser werden in Abhängigkeit der Position des Zuges Fahrtdauern bestimmt. Das Verfahren kann nicht allgemeingültig in der Planung eingesetzt werden, da es nicht formuliert, wie die zu summierenden Dauern bestimmt werden.

Die für die Planung relevanten Bestandteile sind der Ausstieg der Fahrgäste und die Dauer von Auf- und Abrüsten. Diese werden in den Ablauf aus Abbildung 4-5 integriert und mit Formeln untersetzt.

Ein Teil der Zuführung zur Abstellung nach Chu (2014, S. 156) ist die Dauer für den Ausstieg der Fahrgäste. Diese ist daher Teil der Vorbereitungszeit. Der *Ausstieg aller Fahrgäste* $t_{FgAusstieg}$ nach Halt eines Zuges ergibt sich zum einen aus der Platzkapazität einer Einheit im Verhältnis zu deren Anzahl an Türen, sowie einer meist ungleichen Verteilung der Fahrgäste auf die Türen. Zum anderen gehen der Besetzungsgrad und Zeitbedarf für den Ausstieg eines Fahrgastes ein. Der Zeitbedarf kann wie folgt ermittelt werden:

$$t_{FgAusstieg} = \frac{k_{Fg}}{n_{Tür}} \cdot f_{ungl} \cdot q_{Besetzung} \cdot t_{Ausstieg}$$

mit:

$t_{FgAusstieg}$ Zeitbedarf für Ausstieg aller Fahrgäste,
k_{Fg} Sitz- und Stehplatzkapazität einer Einheit (Wagen oder Zug),
$n_{Tür}$ Anzahl der Türen einer Einheit (Wagen oder Zug),
f_{ungl} Faktor für ungleiche Verteilung der Fahrgäste auf die Türen,
$q_{Besetzung}$ Besetzungsgrad der Sitz- und Stehplätze sowie
$t_{Ausstieg}$ Dauer für den Ausstieg pro Person.

Parallel zum Ausstieg kann der Tf für den Fall Weiterfahrt mit Wende den bisher genutzten Führerstand abrüsten. Das *Abrüsten* erfolgt bei Bedarf parallel zum Ausstieg der Fahrgäste. Relevant für die Vorbereitungsdauer ist dabei:

$$t_{FgAusstieg} = \max \begin{cases} t_{FgAusstieg} \\ t_{abrü} \end{cases}$$

mit:

$t_{abrü}$ Zeitbedarf für das Abrüsten.

Nach dem erfolgten Ausstieg der Fahrgäste kann der nach DB Regio AG (2010a, S. 9) benötigte *Durchgang des Triebfahrzeugführers* t_{DG} zur Kontrolle, ob alle Fahrgäste den Zug verlassen haben, stattfinden. Teilweise sind Zeitbedarfe für einzelne Baureihen in DB Regio AG (2010b) vorgegeben. Ansonsten kann der Zeitbedarf für den Durchgang als simples Verhältnis aus der benötigten Weglänge auf ein oder zwei Ebenen und der Gehgeschwindigkeit ermittelt werden:

$$t_{DG} = \frac{n \cdot l_{Zug}}{v_{geh}}$$

mit:

t_{DG} Zeitbedarf für den Durchgang des Tf,
n Anzahl der Ebenen des Zugs,
l_{Zug} Länge des Zuges und
v_{geh} Gehgeschwindigkeit.

Anschließend ist zu überprüfen, ob je nach Anzahl der Ebenen des Zuges und der Art der Weiterfahrt ein Rückweg nach dem Kontrolldurchgang nötig ist. Dazu kann das Schema in der Tabelle zur Ermittlung der möglichen Vorbereitungszeiten für die Weiterfahrt mit einem Tf in Anlage 3 verwendet werden.

Der *reine Rückweg* erfolgt nur auf einer Ebene und ermittelt sich daher wie folgt:

$$t_{reinWeg} = \frac{l_{Zug}}{v_{geh}}$$

mit:

$t_{reinWeg}$ reine Wegezeit des Tf auf dem Bahnsteig,
l_{Zug} Zuglänge und
v_{geh} Gehgeschwindigkeit.

Es können somit für unterschiedliche Konstellationen die Vorbereitungszeiten zur Weiterfahrt in die Abstellung ermittelt werden. Die benötigen Zeitbedarfe für die Vorbereitungszeit je nach Fall sind in Anlage 3 dokumentiert.

g) Ermittlung der Zeitbedarfe für eine (SFP-)Wende basierend auf Chu (2014)

Die Ermittlung des Zeitbedarfs für eine Wende basiert auf den Arbeiten von Chu (2014) entsprechend Abschnitt 2.4 und wird hier formal an den Rest der Arbeit angepasst notiert. Diese können bei Wenden an SFP-Bahnhöfen, aber auch zur Ermittlung von veränderten Wenden bei abweichender Ankunftszeit an regulären Wendebahnhöfen angewendet werden.

Basierend auf der Ankunftszeit am SFP-Wendebahnhof kann unter Berücksichtigung der Mindestwendedauer die frühestmögliche Abfahrtszeit nach Wende ermittelt werden:

$$T_{frühmöglAbfahrt} = T_{Ankunft,SFP} + t_{minWende,SFP}$$

mit:

$T_{Ankunft,SFP}$ Ankunftszeit am (SFP-)Wendebahnhof im Störfallfahrplan,
$T_{frühmöglAbfahrt}$ frühestmögliche Abfahrtszeit nach Wende,
$t_{minWende,SFP}$ Mindestwendedauer am gewählten (SFP-)Wendebahnhof,

nach Chu (2014) mit: $t_{minWende,SFP} = t_{minWende,Ril} + t_{Wendezuschlag,SFP}$

$$\text{dabei gilt } t_{minWende,SFP} = \max\begin{cases} t_{minWende,Ril} + t_{Wendezuschlag,SFP} \\ t_{SonderZN} \end{cases}$$

mit:

$t_{minWende,Ril}$ Mindestwendedauer nach DB Regio AG (2010b); zu unterscheiden nach Zuglänge und Anzahl der beteiligten Triebfahrzeugführer,
$t_{Wendezuschlag,SFP}$ empirisch ermittelter Wendezeitzuschlag nach Chu (2014); nur bei Wenden an SFP-Bahnhöfen anzusetzen und
$t_{SonderZN}$ Zeitbedarf für Vergabe der Sonderzugnummer.

Die frühestmögliche Abfahrtszeit kann mit der gewählten Abfahrtszeit $T_{gewAbfahrt}$ (Takt aus dem Regelfahrplan) (Inputgröße des Erstellers) abgeglichen werden. Dabei gilt:

$$T_{gewAbfahrt} \geq T_{frühmöglAbfahrt}; \text{ positive Wende möglich, sonst}$$
$$T_{gewAbfahrt} < T_{frühmöglAbfahrt}; \text{ negative Wende nötig.}$$

Bei *positiven* Wenden ist die tatsächlich verfügbare Wendedauer im Störfall zu ermitteln. Diese kann aufgeteilt werden in einen Zeitanteil, der für die Wenden benötigt wird, und in einen Zeitanteil, der als Wendepuffer für Verspätungsabbau zur Verfügung steht:

$$t_{vorhWende,SFP} = T_{Abfahrt,SFP} - T_{Ankunft,SFP}$$
$$t_{Wendepuffer,SFP} = t_{vorhWende,SFP} - t_{minWende,SFP}$$

mit:

$t_{Wendepuffer,SFP}$ Wendepuffer und

$T_{Abfahrt,SFP}$ Abfahrtszeitpunkt nach Wende im Störfallfahrplan.

Der Wendepuffer am Start-/Endbahnhof des Regelbetriebs wird analog zum SFP-Wendebahnhof berechnet. Dabei wird allerdings $t_{minWende,SFP}$ durch $t_{minWende,Ril}$ ersetzt, da diese Wende auch im Regelbetrieb so stattfindet und somit kein Wendezuschlag zu berücksichtigen ist.

Bei *negativen* Wenden entspricht die tatsächlich verfügbare Wendedauer im Störfall der Mindestwendedauer am gewählten (SFP-)Wendebahnhof. Zudem ist die planmäßige Wartezeit im Störfall durch die (SFP-)Wende zu ermitteln:

$$t_{w,plan,SFP} = T_{frühmöglAbfahrt} - T_{gewAbfahrt}$$

mit:

$t_{w,planr,SFP}$ planmäßige Wartezeit im Störfall.

Die planmäßig verspätete Abfahrt an diesem (SFP-)Wendebahnhof darf nicht zu einem kontinuierlichen Verspätungsaufbau führen, da sie sonst ein Einschwingen vermeidet. Es ist daher zunächst durch den Wendepuffer am nächsten Endbahnhof zu prüfen, ob die geplante Verspätung dort abbaubar ist.

Wenn ein Verspätungsabbau nach der kommenden Leistung durch den Wendepuffer nicht möglich ist, ist zu prüfen, ob die Verspätung durch die planmäßige Wartezeit im Rahmen der Wende abgebaut werden kann. Wenn dies nicht der Fall ist, sollte überprüft werden, ob bei der nächsten Wende am SFP-Wendebahnhof die negative Wende mit der gleichen Höhe an planmäßiger Wartezeit umsetzbar ist. Wenn dies der Fall ist, kann die negative Wende eingeplant werden, da sich somit ein regelmäßiger Betrieb auf dieser Linie abbilden lässt. Wenn dies nicht zutrifft, kann die Maßnahme nicht mit negativer Wende erfolgen.

Für den Ersteller besteht die Möglichkeit, die Abfahrt mit $T_{tatAbfahrt}$ (unter Einhaltung der notwendigen Wendezeiten) im Störfallfahrplan abweichend vom Regelfahrplan zum Ausgleich längerer Fahrzeiten einzuplanen. Zudem bleibt nach Unterabschnitt 3.1.2 auch die Option, die Maßnahme so anzupassen, dass der Laufweg verkürzt wird und dann zwei SFP-Wendebahnhöfe genutzt werden.

Das Vorgehen aus Unterabschnitt 2.4 für Umleitungen (dargestellt in Anlage 2) wurde hierfür verallgemeinert in Tabelle 4-3. Somit ergeben sich nach der Wahl einer negativen Wende folgende Berechnungsschritte, die je betrachteter Fahrtrichtung durchzuführen sind:

Tabelle 4-3: Überprüfung von Zügen mit Maßnahmen mit negativer Wende (eigene Darstellung)

1. Berechnung der im Störfall anzusetzenden Fahrzeit $t_{Fahr,SFP}$ zwischen den Wendebahnhöfen:

wenn Maßnahme mit Umleitung: basierend auf b):

$$t_{Fahr,SFP} = t_{Fahr,SFP,Ul} = t_{Fahr,Ul} + \sum_{i=1}^{n} t_{Halt,i} + t_{Fahr,Rest}$$

mit:

$t_{Fahr,Rest}$ Fahrzeit vor/nach Umleitung auf Regelfahrweg;

sonst $t_{Fahr,SFP}$ entsprechend Regelfahrplan

2. Ermittlung des neuen Ankunftszeitpunkts nach negativer Wende:

$$T_{Ankunft,Ende} = T_{frühmöglAbfahrt} + t_{Fahrt,SFP}$$

mit: $T_{Ankunft,Ende}$ tatsächliche Ankunftszeit am Wendebahnhof nach neg. Wende

3. Ermittlung des machbaren Abfahrtszeitpunktes für die Gegenleistung $T_{frühmöglAbfahrt,GL}$:

wenn SFP-Wendebahnhof: $T_{Ankunft,Ende} + t_{minWende,SFP} = T_{frühmöglAbfahrt,GL}$

sonst $T_{Ankunft,Ende} + t_{minWende,Ril} = T_{frühmöglAbfahrt,GL}$

4. Abgleich mit der eigentlich geplanten Abfahrt der Gegenleistung:

wenn $T_{frühmöglAbfahrt,GL} \leq T_{gewAbfahrt,GL}$; dann Maßnahme machbar; Ende

wenn $T_{frühmöglAbfahrt,GL} > T_{gewAbfahrt,GL}$; erneut neg. Wende nötig; wiederhole g) und 2. - 4.;

wenn $t_{w,plan,SFP2} \leq t_{w,plan,SFP1}$; dann Maßnahme machbar; Ende;

sonst Abbruch der Maßnahme

mit: $t_{w,plan,SFP1}$ = planmäßige Wartezeit bei der ersten Wende am SFP-Bahnhof

$t_{w,plan,SFP2}$ = planmäßige Wartezeit bei der zweiten Wende am SFP-Bahnhof

Machbarkeitsprüfung

Die Machbarkeitsprüfung ist für jede eingeplante Maßnahme durchzuführen.

Infrastruktur:

1. Werden bisher Zugfahrten auf dem gewählten Fahrweg vom eigenen Unternehmen mit dem gleichen Fahrzeug durchgeführt?

- Wenn ja: Machbarkeit der Infrastruktur kann angenommen werden.
- Wenn nein: Hinweis an Ersteller geben.

Grundsätzlich wird eine Prüfung der Machbarkeit der Infrastruktur durch das EIU durchgeführt.

Betrieb:

Gemäß Unterabschnitt 4.3.3 nicht Bestandteil des Moduls.

Verkehr:

Für die Machbarkeitsprüfung einer Maßnahme sind gemäß Abschnitt 4.3.3 die entfallenden Halte und die maßnahmeninduzierten zeitlichen Verschiebungen durch Wenden im Störfall zu überprüfen. Der Algorithmus hierfür ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

Die entfallenden Halte entsprechen nach Abschnitt 3.6.1 gestörten Verkehrsknoten. Diese können je Maßnahme durch den Abgleich des Störfallfahrplans mit dem Regelfahrplan ermittelt werden. Anschließend kann die ermittelte Anzahl mit der vom Ersteller als Grenzwert angegebenen maximalen Anzahl abgeglichen werden.

Bei der Ermittlung möglicher Abfahrtszeitpunkte nach Wende können dem Ersteller sowohl negative als auch positive Wenden angezeigt werden. Sinnvoll erscheint die Ermittlung der Abfahrtszeitpunkte für die nächste und übernächste positive Wende sowie die kürzeste negative Wende. Negative Wenden erzeugen planmäßige Wartezeiten im Störfallfahrplan. Die Entscheidung über die Wende trifft der Ersteller.

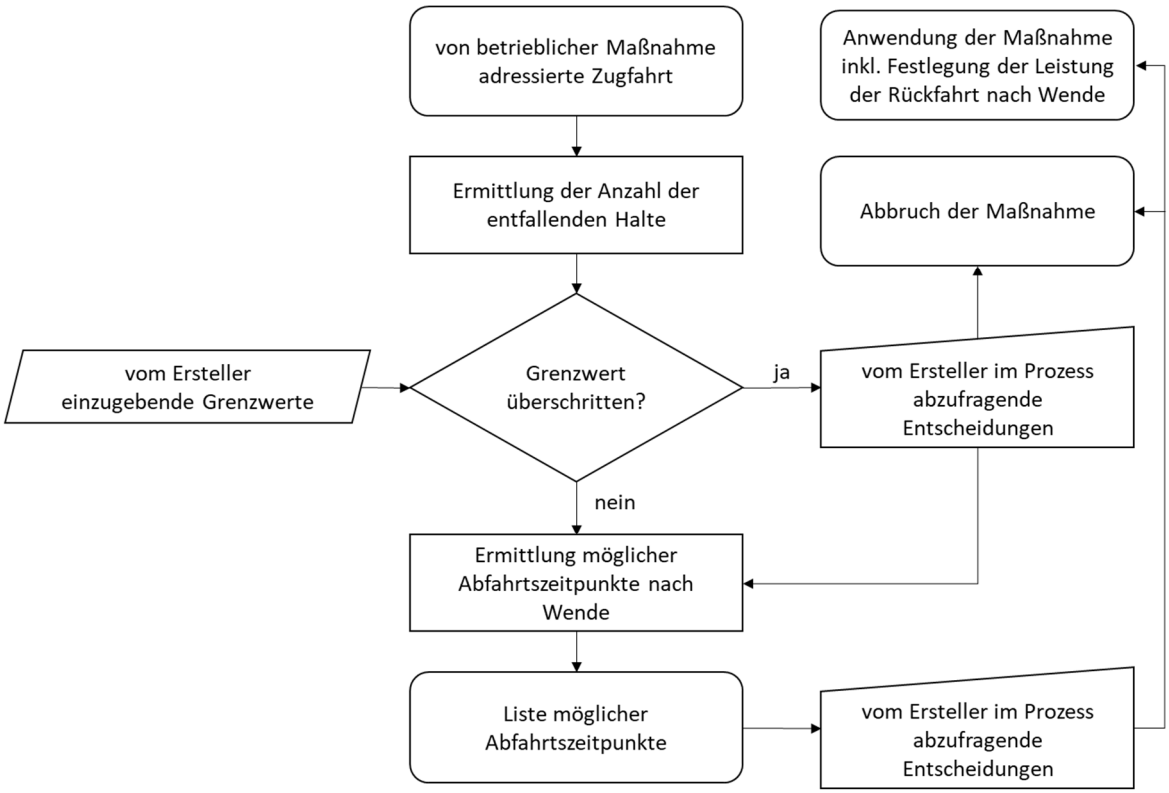


Abbildung 4-6: Algorithmus für die Prüfung der verkehrlichen Machbarkeit von Maßnahmen (eigene Darstellung)

Zusammengefasst ergibt sich für die technische und betriebliche Machbarkeit die Möglichkeit einer sehr eingeschränkten (teil-)automatisierten Überprüfung. Die Prüfung der verkehrlichen Machbarkeit benötigt in allen Fällen, für eine Zuordnung zu weichen oder absoluten Kriterien, Vorgaben durch den Ersteller.

Sollte zukünftig ein integriertes Störfallmanagement mit oder beim EIU stattfinden und eine breite, aktuelle Datenlage vorliegen, so können die Eigenschaften aus dem Infrastrukturregister den Arten der Ausschlusskriterien zugeordnet werden. Für eine Erstellung von automatisierten Lösungsmöglichkeiten beim Vorliegen von weichen Ausschlusskriterien wäre zudem eine formalisierte Digitalisierung der Regelwerke nötig.

4.3.5 Zusammenfassung

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass aufgrund der Rahmenbedingungen – Verfügbarkeit von Daten und Informationen sowie beim EIU liegende Entscheidungsgewalt – keine vollständige Machbarkeit automatisiert ermittelt werden kann. Dies ist aber als vergleichsweise unkritisch einzuschätzen, da davon auszugehen ist, dass ein erfahrener Ersteller die Realisierungsmöglichkeiten einer einzelnen Maßnahme gut im Kontext seines Netzes einschätzen kann. Hilfreiche Arbeitserleichterung sind Prüfungsmechanismen für Eigenschaften, die im komplexen Planungsprozess den Überblick erschweren oder die aufwendige Datenbankrecherche erfordern.

Zudem hilfreich für den aktuellen Planungsprozess des SFP-Erstellers, da für jede angewendete Maßnahme kleinteilig und umfangreich, ist die Automatisierung der Berechnungen der Veränderungen der Zeitbedarfe einer einzelnen Zugfahrt im Rahmen des Moduls 1, aus denen sich auch Rückschlüsse auf Ausschlusskriterien ergeben können.

Die (Teil-)Automatisierung dient in diesem Modul somit hauptsächlich zur Neuberechnung der Zeitbedarfe der Zugfahrt, die sich durch die Anwendung von Maßnahmen verändern.

Zusammenfassend lässt sich Modul 1 in die

- Berechnung der Zeitbedarfe je Maßnahme
- und deren Machbarkeitsprüfung

aufteilen. Dieses Modul betrachtet jede Maßnahme je Zug ausschließlich für sich selbst stehend ohne Wechselwirkungen mit den anderen Zugfahrten oder weiteren geplanten Maßnahmen. Maßnahmen, für die die Machbarkeit nicht ausgeschlossen wurde, können in den folgenden Modulen auf Funktionsfähigkeit im Zusammenspiel untersucht werden. Die ermittelten Zeitbedarfe können als Inputgrößen in den weiteren Modulen Berücksichtigung finden.

4.4 Modul 2 und Modul 3: Validierung der Maßnahmen auf allen betroffenen Netzelementen in der stabilen Phase

4.4.1 Einleitung

Ergebnis der Anwendung des Moduls 1 ist ein vollständig erstelltes Betriebskonzept für einen definierten Störfall. Dabei wurden für jede eingeplante Maßnahme für einen Zug oder eine Linie in Modul 1 die veränderten Zeitbedarfe berechnet und die Machbarkeit überprüft. Es wurde somit ein Bündel an betrieblichen Maßnahmen zusammengestellt. Jede Maßnahme wurde bisher ohne Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit den anderen Zügen betrachtet. Somit ist zu prüfen, ob das Bündel in der stabilen Phase funktionsfähig ist.

Ziel dieses Abschnittes ist die Feststellung der Funktionsfähigkeit durch die Überprüfung möglicherweise bestehender Überbelegungen. Dies erfolgt differenziert nach Infrastrukturkanten und -knoten (entsprechend Unterabschnitt 3.6.1) in den Modulen 2 und 3.

Die relevanten Anforderungen aus Abschnitt 3.3 wurden in Abschnitt 4.1 zitiert und zudem in Abschnitt 4.2 und 4.2.1 für die Bewertung der stabilen Phase spezifiziert.

Für diese beiden Module werden in den folgenden Unterabschnitten 4.4.2 bis 4.4.6 Methode, Vorgehensweise und Algorithmus erarbeitet.

4.4.2 Methode

Die geplanten Maßnahmen beeinflussen den Betrieb auf den betroffenen Netzelementen und schränken ggfs. auch dessen Funktionsfähigkeit ein, da sich die Belegung durch die betrieblichen Maßnahmen verändert (siehe Unterabschnitt 4.2.1). Als relevant wurden, im Sinne einer Einschränkung der Funktionsfähigkeit, die zusätzlichen bzw. verlängerten Belegungen der Kanten und Knoten bestimmt.

Mit der Überprüfung des Zusammenspiels der Maßnahmen in Modul 2 und 3 beginnt die Betrachtung unter Einbezug der weiteren Zugfahrten. Entsprechend der diskutieren Datenverfügbarkeit der adressierten Unternehmen, entsprechend Abschnitt 3.1.2, werden für diese Zugfahrten bekannte und unbekannte (ggfs. zu schätzende) Belegungen wie folgt angenommen:

Bekannte Belegungen der Netzelemente, die für die Überprüfung der Anwendung des Maßnahmenbündels zur Verfügung stehen, sind:

- detaillierte Fahrpläne der EVU-eigenen Züge, die bereits im Regelbetrieb verkehren,
- Anzahl der eigenen Zugfahrten, die im Störfallfahrplan verkehren sollen, mit grober Schätzung der Ankunfts- und Abfahrtszeiten und
- Ankunfts- und Abfahrtszeiten von anderen Personen-EVU-Zügen aus den veröffentlichten Fahrplänen.

Nicht bekannte Belegungen sind:

- detaillierte Fahrpläne der anderen Personenverkehre,
- Fahrpläne, Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Güterverkehre und
- detaillierte Fahrpläne der eigenen Züge im SFP, da diese bei Freigabe durch das EIU erstellt werden.

Für die nicht bekannten Bestandteile können und müssen durch den Ersteller realistische Annahmen getroffen werden. Dies verhält sich ähnlich wie bei der bereits genannten Überprüfung der einzelnen Maßnahmen und deren betrieblicher Machbarkeit. Damit entfallen allerdings sämtliche fahrplanabhängigen Betrachtungsmethoden zur Überprüfung betroffener Netzelemente. Sollten bessere Daten zur Verfügung stehen, ist ein genaueres Ergebnis zu erwarten. Bei Bedarf könnten dann bspw. auch konstruktive Verfahren eingesetzt werden.

Trotz der Maßnahmen muss weiterhin eine zuverlässige Leistungserbringung auf dem betroffenen Netzelement ermöglicht bleiben.

Hierzu sollen keine Belegungskonflikte vorliegen. Die detaillierte Prüfung muss auch hier durch das EIU erfolgen, aber eindeutige Konflikte aus den veröffentlichen Fahrplänen können bereits durch den Ersteller berücksichtigt werden. Nachdem evtl. erkannte Belegungskonflikte gelöst wurden, kann die Leistungsfähigkeit weitergehend geprüft werden.

Da die Leistungsfähigkeit für Knoten und Kanten ermittelt werden soll, bieten sich nach DB Netz AG (2008c, S. 27 ff.) die infrastrukturbezogenen Kenngrößen Belegungsgrad und infrastrukturbezogene Behinderungen an.

Der dimensionslose Belegungsgrad gibt an, welcher Anteil des Untersuchungszeitraums durch Fahrplan bzw. Betrieb genutzt wird. Dabei weist er den Vorteil auf, dass er „prinzipiell auf Blockabschnitte, Fahrstraßen und Teile davon, Streckenabschnitte, Überholungsabschnitte und Teilfahrstraßenknoten bezogen werden“ kann (DB Netz AG 2008c, S. 27). Zudem gibt DB Netz AG (2008c) Richtwerte zur qualitätsstufenabhängigen Einordnung des verketteten Belegungsgrads vor. International Union of Railways (2013) (siehe Unterabschnitt 2.2.4) bietet zudem Grenzwerte für den Belegungsgrad an,

unterschieden nach Knoten und Kanten. Nachteilig ist, dass der Belegungsgrad keinen Schluss auf eine tatsächlich zu erwartende Betriebsqualität ermöglicht, da die Höhe der Wartezeiten von Zugmix und Einbruchsverspätungen abhängt (DB Netz AG 2008c, S. 28). Für eine grobe Einschätzung gilt er aber gemeinhin als zweckmäßig.

Infrastrukturbezogene Behinderungen werden mit zeitlicher Größe und mit betroffenen Zügen als Häufigkeit für ein einzelnes Belegungselement ermittelt und geben somit Hinweise auf Engpässe (DB Netz AG 2008c, S. 29). Die Bestimmung erfolgt anhand von Simulationstools. Bisher sind keine Qualitätsmaßstäbe in der Richtlinie veröffentlicht.

Gemäß der angenommenen Datenverfügbarkeit in Unterabschnitt 3.1.2 ist davon auszugehen, dass die Daten über alle Verkehrsunternehmen hinweg nur fahrplanunabhängig vorliegen bzw. zu schätzen sind. Weitergehende Daten wie Verspätungsverteilungen liegen nicht vor, sodass keine (teil-)automatisierte Bewertung der Betriebsqualität durchgeführt werden kann.

Der Belegungsgrad ist nur eine grobe Richtgröße, die aber nach einem Abgleich mit vorliegenden Grenzwerten durch den Ersteller eingeordnet werden kann. Zudem liegen in Teilen nur grobe Daten als Input vor, die für eine detaillierte Betrachtung ungeeignet wären. Für die infrastrukturbezogenen Behinderungen wäre ein separates Simulationstool notwendig und es liegen keine Grenzwerte vor. Daher soll im Weiteren der Belegungsgrad Verwendung finden.

Der Belegungsgrad bietet eine Möglichkeit, alle für den Störfall geplanten Maßnahmen zu überprüfen, bevor unrealistische Betriebskonzepte entstehen, wodurch sich der Überarbeitungsaufwand beim EVU und der Abstimmungsaufwand mit dem EIU eingrenzen lassen.

Bewertung des Belegungsgrads

Um dem Ersteller eine Einordnung zu erleichtern, soll für einen berechneten Belegungsgrad jeweils ein Abgleich mit Grenzwerten durchgeführt werden. Neben den Grenzwerten aus den Richtlinien kann gemäß Abschnitt 2.4 auch der Regelbetrieb als Vergleichsgröße für die Belegung herangezogen werden.

Dieses *erste Prüfkriterium* legt fest, dass so lange die *Belegung aus dem Regelbetrieb* nicht überschritten wird, die betrieblichen Maßnahmen auf dem untersuchten Netzelement funktionsfähig sind. Sollte der Wert des Regelbetriebs überschritten werden, ist nicht bekannt, ob auch im Regelbetrieb ein höherer Belegungsgrad machbar wäre (siehe dazu auch Diskussion von Abbildung 2-7). Daher sollte der Belegungsgrad anhand eines Grenzwertes als zweites Prüfkriterium überprüft werden.

Die Bewertung der Ergebnisse soll laut Abschnitt 4.2 nach den aktuellen Richtlinien und Möglichkeiten stattfinden. Dies ist im Fall des Belegungsgrads der UIC-Kodex 406 (siehe dazu (International Union of Railways 2013). In der Berechnung des Belegungsgrads nach UIC sind neben den Belegungszeiten noch zusätzliche Zeiten als Zusatzzeitrate z_{UIC} berücksichtigt, um eine gewisse Betriebsqualität zu sichern. Hierdurch werden beispielsweise Wartungsarbeiten etc. berücksichtigt. Zuschläge gehören nicht zu den zusätzlichen Zeiten.

Der nach in Unterabschnitt 2.2.4 zitierte empfohlene Belegungsgrad ρ_{UIC} für Kanten ist den Streckenstandards zugeordnet. Um den empfohlenen Belegungsgrad nach UIC- Kodex 406 als Grenzwert verwenden zu können, muss die Belegungszeit für die Kante um die entsprechenden zusätzlichen Zeiten nach UIC z_{UIC} erhöht werden. Die Zusatzzeitrate wird für Gleise im Knoten mit 100 % (Parameter) empfohlen. Die Belegungszeit ist somit zu verdoppeln.

Das *zweite Prüfkriterium* ist somit der *Belegungsgrad nach UIC-Kodex 406.*

Notwendigkeit der Berechnung des Belegungsgrads

Die Berechnung des Belegungsgrads wird notwendig, wenn im Störfallfahrplan eine erhöhte Belegung zum Fahrplan des Regelbetriebs vorliegt, da dies ggfs. einen Auslöser für eine Einschränkung der Funktionsfähigkeit darstellt.

Für die *Überprüfung der Kante in Modul 2* wird eine Neuberechnung des Belegungsgrads notwendig, sobald entweder die mittlere Mindestzugfolgezeit, die Zuganzahl oder beide Werte in Relation zum Regelbetrieb gestiegen sind.

Es lassen sich zudem zwei Prüffälle für die betroffenen Kanten zusammenfassen:

- Fall 1: Ein Faktor im Zähler sinkt, ein Faktor im Zähler steigt. ($\overline{z}$ oder n)
  - Berechnung ρ_{alt}
  - Berechnung ρ_{neu}
  - wenn $\rho_{neu} > \rho_{alt}$
  - dann ρ_{UIC} + Abgleich mit UIC-Grenzwerten
- Fall 2: Ein Faktor im Zähler steigt, ein Faktor im Zähler bleibt unverändert/steigt.
  - da $\rho_{neu} > \rho_{alt}$
  - ρ_{UIC} + Abgleich mit UIC-Grenzwerten

Für die *Überprüfung der Knoten in Modul 3* gilt nach Chu (2014, S. 129) die belegte Zeit in den einzelnen Gleisgruppen als bestimmender Faktor für die Leistungsfähigkeit. Hier wird somit eine Neuberechnung notwendig, wenn bei einem Gleis zusätzliche oder erhöhte Belegungszeiten durch die Maßnahmen entstehen (siehe dazu Tabelle 4-1).

Da die Belegungszeit einzelner Gleise unterschiedlich sein kann, werden statt einer Bündelung in Gleisgruppen alle verwendeten (Bahnsteig-)Gleise eines Bahnhofs einzeln betrachtet und bewertet. Da es sich um eine reine Summe von einzelnen Belegungszeiten handelt, kann diese ohne Berechnung des Belegungsgrads direkt mit der Summe aus dem Regelbetrieb verglichen werden. Es kann aber auch ein Belegungsgrad ermittelt werden. Dieser wird spätestens nötig, wenn das zweite Prüfkriterium für die Bewertung zu nutzen ist.

Die Betrachtung einzelner Gleise in einer Gleisgruppe führt dazu, dass der Grenzwert nach UIC-Kodex 406 über alle Gleise identisch ist, aber bei einem Abgleich mit dem Regelbetrieb unterschiedliche gleisspezifische Grenzwerte gelten. Da die Ursachen für die unterschiedliche Belegung nicht bekannt sind, sollte nicht davon abgewichen werden und bspw. aus dem Regelbetrieb der höchsten Belegungsgrad oder ein Mittel zu verwendet werden. So kann ein geringerer Belegungsgrad eines Gleises bspw. durch hohe Auslastung in zuführenden Teilfahrstraßenknoten begründet sein, die hier nicht in die Untersuchung miteingehen.

Es lassen sich zudem zwei Prüffälle für die betroffenen Knoten zusammenfassen:

- Fall 1: Ein Summand sinkt, ein Summand steigt. ($t_{B,f}$ oder n)
  - Berechnung $t_{B,i,alt}$
  - Berechnung $t_{B,i,neu}$
  - wenn $t_{B,i,neu} > t_{B,i,alt}$
  - dann $\rho i,_{UIC}$ + Abgleich mit UIC-Grenzwerten
- Fall 2: Ein Summand steigt, ein Summand bleibt unverändert/steigt.
  - da $t_{B,i,neu} > t_{B,i,alt}$
  - ρ_{UIC} + Abgleich mit UIC-Grenzwerten

Tabelle 4-4 stellt die beiden Prüfkriterien für die beiden Netzelemente – Kante und Knoten – inklusive der anzuwendenden Formeln zusammenfassend dar.

Tabelle 4-4: Prüfkriterien für die von Maßnahmen betroffenen Netzelemente (Zusammenfassung aus Abschnitt 2.4 entsprechend notierter Quellen)

Kante	**Knoten**
1. Prüfkriterium: Berechnungsgrundlage für den Abgleich mit den Verhältnissen im Regelbetrieb	
$\rho = \frac{\overline{z} \cdot n}{t_u}$	$t_{B,i} = \sum_{f=1}^{n} t_{B,f}$
n Zuganzahl auf der betrachteten Kante $\overline{z}$ mittlere Mindestzugfolgezeit auf der betrachteten Kante t_U Untersuchungszeitraum	$t_{B,i}$ Gesamtbelegungszeit des Gleises i im betrachteten Knoten nach Chu (2014) $t_{B,f}$ Belegungszeit einer Fahrt
2. Prüfkriterium: Abgleich mit den Grenzwerten nach UIC-Kodex 406	
$\rho_{UIC} = \frac{\overline{z} \cdot n \cdot (1 + z_{UIC})}{t_u}$	$\rho_{i,UIC} = \frac{2 \cdot t_{B,i}}{t_U}$
z_{UIC} Zusatzzeitrate	

Für alle Maßnahmen müssen eine Ermittlung und Zuordnung der Zugfahrten im Untersuchungszeitraum zu den betroffenen Netzelementen erfolgen. Bestimmt durch die Maßnahmen, die der Ersteller eingearbeitet hat, werden die Fahrten, die zusätzlich durch das Betriebskonzept neu bzw. verändert auf dieser Strecke verkehren sollen, ermittelt.

Dort, wo durch diese Fahrten Veränderungen entsprechend den beiden Prüffällen erzeugt werden, sind zudem alle bisherigen Fahrten, die auf dem betroffenen Netzelement verkehren, wie Personenfern- und -nahverkehr bspw. aus den Daten des EFZ zu ermitteln und der Güterverkehr durch Eingabe des Erstellers geschätzt hinzuzufügen.

Nachdem der Belegungsgrad als Prüfmethode und die zugehörigen Prüffälle festgelegt wurden, ist nun zu untersetzen, wann jeweils Kanten und Knoten von einer erhöhten Nutzung betroffen sein können. Anschließend wird durch die folgenden Berechnungsschritte die Anwendung der Prüfmethode auf die Arten der betroffenen Netzelemente umgesetzt, um sicherzustellen, dass keine Verspätungen erzeugt werden.

4.4.3 Modul 2: Funktionsfähigkeit der betroffenen Kanten – Vorgehensweise

Eine Kante ist dann eine betroffene Kante, wenn mindestens eine Maßnahme auf der Kante eingeplant wird, die eine mittlere Mindestzugfolgezeiten steigernde oder zusätzliche Nutzung im Vergleich zum Regelbetrieb erzeugt. Dies können zum einen die Fahrplan-Maßnahmen (Zweirichtungsbetrieb auf verbleibender Eingleisigkeit) und zum anderen zusätzliche Fahrten infolge der Laufweg-Maßnahmen (alle Maßnahmenarten der Umleitung) sein.

Zweirichtungsbetrieb auf verbleibender Eingleisigkeit

Die neue Belegung der eingleisigen Strecke ist nach Unterabschnitt 2.2.5 auf Belegungskonflikte zu prüfen. Bei Vorliegen von Belegungskonflikten durch Unterschreiten der Bindungszeiten ist eine Lösung durch den Ersteller zu veranlassen.

Eine Teilsperrung und die weitere Nutzung von dann eingleisigen Strecken erfordern die Überprüfung der Funktionsfähigkeit dieser Kante anhand deren verminderter, verbleibender Kapazität. Entsprechend Unterabschnitt 3.2.1 ist die neue mittlere Mindestzugfolgezeit in einer bestehenden Software zu ermitteln.
Da für die verbleibende Eingleisigkeit kein Belegungsgrad aus dem Regelbetrieb vorhanden ist, erfolgt die Bewertung ausschließlich anhand des zweiten Prüfkriteriums ρ_{UIC}.

Umleitungen

Nach der Einzelmaßnahmenprüfung in Modul 1 ist über eine Umleitungsmaßnahme bekannt, ob diese unter Berücksichtigung der neuen Zeitbedarfe eine pünktliche Gegenleistung ermöglicht. Dies berücksichtigt nicht die anderen Zugfahrten auf der Umleitungsstrecke. Es ist somit nicht bekannt, ob alle nun auf der Umleitung geplanten Fahrten einen verträglichen Belegungsgrad erzeugen. Zudem ist auch nicht bekannt, wie sich die Belegung durch andere Fahrten auf die Züge mit einer Umleitungsmaßnahme auswirkt.

Umleitungen führen neben einer Entlastung auf dem ursprünglichen Laufweg zu höheren Belastungen aller Netzelemente auf der Umleitungsstrecke und erzeugen Veränderungen des Belegungsgrads sowie planmäßige Wartezeiten. Umleitungen sind Bestandteil der drei Maßnahmen mit Umleitung. Für die Fahrten in die Abstellung können sie ggfs. auch Bestandteil der Maßnahmen Ausfall und Teilausfall sein.

Entsprechend Unterabschnitt 3.6.3 sind die planmäßigen Wartezeiten im Störfallfahrplan für Wenden und Abzweigen auf eine Umleitung zu berücksichtigen. Die Wartezeiten bei Wenden werden bereits in Modul 1, siehe Unterabschnitt 4.3.4, ermittelt. Die planmäßigen Wartezeiten beim Abzweigen auf eine Umleitung können nun im Zusammenspiel mit den anderen Zugfahrten ermittelt werden.

Um dies abzubilden, ist die belegungsgradabhängige planmäßige Wartezeit auf Ein-/Ausfädeln zu ermitteln. Diese planmäßigen Wartezeiten entstehen beim Einfädeln auf die Umleitungsstrecke und beim Ausfädeln auf die ursprüngliche Strecke. Die mittleren Wartezeiten sind jedem Zug, der die Maßnahme dieser Umleitung erfährt, als planmäßige Wartezeit zur Fahrtzeit zuzurechnen. Erst dann kann die SFP-Ankunftszeit am Endbahnhof final bestimmt werden. Zudem erzeugen die Wartezeiten ggfs. erhöhte Mindestzugfolgezeiten, wenn die Wartezeiten im maßgebenden Block liegen oder der entsprechende Block infolge der Berücksichtigung der Wartezeit maßgebend wird.

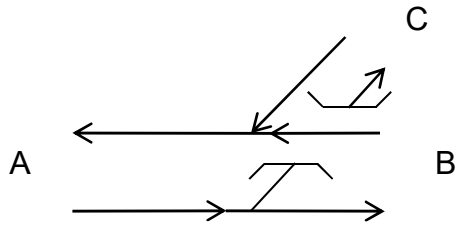


Abbildung 4-7: Darstellung der zur Berechnung anzunehmenden Einfädelsituation (eigene Darstellung)

Zur Berechnung der planmäßigen Wartezeiten auf Ein- und Ausfädeln wird zunächst die Annahme getroffen, dass Überwerfungsbauwerke für einkreuzungsfreies Überleiten vorhanden sind (siehe Abbildung 4-7). Ansonsten muss ein mehrfaches Einfädeln berechnet werden.

Bei der Ermittlung dieser planmäßigen Wartezeiten handelt es sich um eine analytische Betrachtung mit einem Wartesystem. Da die Berechnungsweise anwendbar für das gesamte deutsche Netz sein soll, handelt es sich bei dieser Betrachtung nicht um ein reines S-Bahnnetz, sondern es muss auch berücksichtigt werden, dass Mischverkehre häufig sind. Es ist somit nicht von der starken Vertaktung im S-Bahn-Verkehr auszugehen, sondern mit vielen Zulaufstrecken auf das zu untersuchende Netzelement zu arbeiten. Der Ankunftsprozess ist exponentialverteilt und mit einem Variationskoeffizienten von $V=1$ beschrieben. Die Annahme einer Exponentialverteilung hat sich bereits mehrfach als valide Annahme für den Bahnverkehr gezeigt. Der Bedienprozess hingegen ist als beliebig zu betrachten, da die Belegungszeiten stark variieren können. Es wird immer eine Bedienungsstelle betrachtet und da auf dem Netz keine Züge abgewiesen werden können, ist der Warteraum unendlich. Für die Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten auf Ein- und Ausfädeln ist mit dem Wartesystem $M/G/1/\infty$ zu rechnen.

Die Berechnung von ρ für die Wartezeitenermittlung erfolgt hierbei nicht nach der UIC-Methode. Diese ist anschließend, wenn $\rho_{neu} > \rho_{alt}$, für die Grenzwertprüfung der Kante anzuwenden. So werden für die Kanten einer Umleitung mind. drei ρ Werte ermittelt und nach Prüffall 1 bzw. Prüffall 2 auf eine Überlastung überprüft. Dies stellt die Funktionsfähigkeit des Maßnahmenbündels in der stabilen Phase sicher.

Zudem wurde hergeleitet, dass die planmäßigen Wartezeiten für Ein- und Ausfädeln die Ankunftszeit am Endbahnhof der Umleitung verschieben. Diese ist somit nach einer groben Schätzung in Modul 1 in Modul 2 zu finalisieren.

4.4.4 Modul 2: Funktionsfähigkeit der betroffenen Kanten – Algorithmus

Nachdem in den Unterabschnitten Methode und Vorgehensweise erläutert wurde, welche Aufgaben der Algorithmus hat und wie der Input verarbeitet wird, um den gewünschten Output zu erreichen, erfolgt hier die formalere Notation der einzelnen Arbeitsschritte. Die Arbeitsschritte erfolgen für jedes von einer Maßnahme betroffene Netzelement, wenn diese nicht ausschließliche eine Reduktion der Belastung darstellt.

Zweirichtungsbetrieb auf verbleibender Eingleisigkeit

Hierfür sind die mittleren Mindestzugfolgezeiten nach Unterabschnitt 2.2.4 inklusive der Zugzahlen (verbleibende) Regelfahrten auf dem verbleibenden Gleis und zusätzliche Fahrten durch die Fahrplan-Maßnahmen zu ermitteln.

Anschließend kann mit diesen Werten der Belegungsgrad nach UIC-Kodex 406 berechnet werden.

Abschließend ist ein Abgleich mit dem empfohlenen Belegungsgrad entsprechend den empfohlenen Grenzwerten nach Unterabschnitt 2.2.4 durchzuführen. Die empfohlenen Grenzwerte dürfen nicht überschritten werden. Ein stabiler Zustand wäre bei Überschreitung der Grenzwerte nicht sicherzustellen und es können Behinderungen und Verspätungen durch Überlastung entstehen.

Umleitungen

Das in Unterabschnitt 4.4.3 ermittelte Wartesystem berechnet die mittlere Wartezeit aus Einfädeln $t_{Wm,Einfädeln}$ bzw. $t_{Wm,Ausfädeln}$ anhand der folgenden Formel (siehe dazu Unterabschnitt 2.2.4):

$$t_{Wm} = \frac{1}{2} \cdot t_{Bm} \cdot \frac{\rho}{(1-\rho)} \cdot (1 + V_B^2).$$

Diese allgemeine Berechnungsfolge ist nicht parallel für alle Bestandteile der Umleitung durchführbar, da eine Beeinflussung der Wartezeiten auf den Belegungsgrad möglich ist, der wiederum Einfluss auf die vorgehende Wartezeit haben kann. Es ist somit eine Berechnung anhand der Abfolge in Abbildung 4-8 zur rückwärtigen Berücksichtigung der Wartezeiten nötig:

1. Zunächst wird der Belegungsgrad der Kante, auf die ausgefädelt wird, ermittelt.
2. Zur Ermittlung von $t_{Wm,Ausfädeln}$ wird ρ aus 1. verwendet. Diese Wartezeit entsteht in Abhängigkeit von 1. und wird auf der Kante von 3. umgesetzt.
3. Bei der Berechnung von ρ müssen alle Blöcke zur Festlegung der maßgebenden Mindestzugfolgezeit dieser Kante berücksichtigt werden. Hierbei ist die Belegungszeit im letzten Block, um die Wartezeit auf Ausfädeln zu ergänzen. Hierdurch kann dieser ggfs. maßgebend werden, bspw. im Fall einer sehr homogenen Geschwindigkeit auf dieser Kante.
4. Zur Ermittlung von $t_{Wm,Einfädeln}$ wird das ρ aus 3. verwendet. Diese Wartezeit entsteht in Abhängigkeit von 3. und wird auf der Kante von 5. umgesetzt.
5. Bei der Berechnung von ρ müssen alle Blöcke zur Festlegung der maßgebenden Mindestzugfolgezeit dieser Kante berücksichtigt werden. Hierbei ist die Belegungszeit im letzten Block, um die Wartezeit auf Einfädeln zu ergänzen. Hierdurch kann dieser ggfs. maßgebend werden, bspw. im Fall einer sehr homogenen Geschwindigkeit auf dieser Kante.

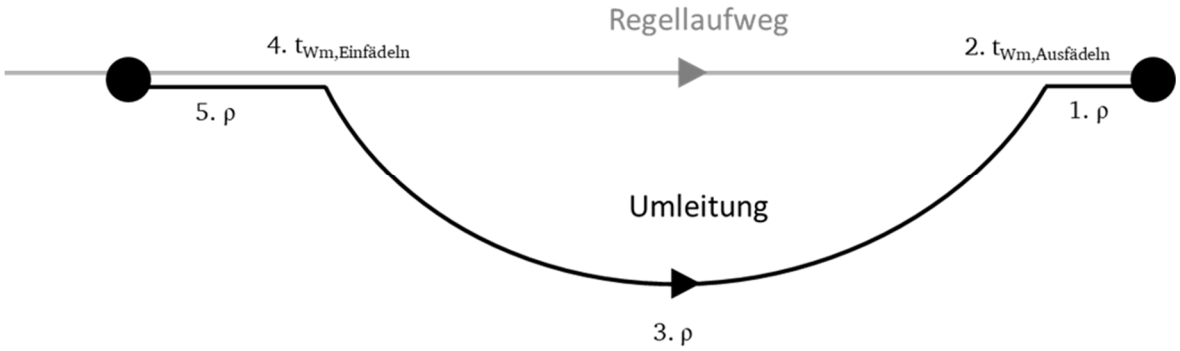


Abbildung 4-8: Berechnung für planmäßige Wartezeiten durch Ein- und Ausfädeln sowie der Belegungszeiten von Umleitungen (eigene Darstellung)

Anschließend kann eine erneute Bewertung der Machbarkeit der Umleitung unter Verwendung der Algorithmen für Umleitungen aus Modul 1 erfolgen und der tatsächliche Abfahrtszeitpunkt nach Wende $T_{tatAbfahrt}$ final bestimmt werden. Dabei ist die bei Störfall anzusetzende Fahrzeit $t_{Fahr,Ul}$ aus Modul 1 zu $t_{FAhr,SFP}$ zu erweitern und somit zwischen den Wendebahnhöfen wie folgt anzupassen:

$$t_{Fahrt,SFP} = t_{Fahrt,Ul} + t_{Halt,x} + \cdots + t_{Halt,n} + t_{Wm,Einfädeln} + t_{Wm,Ausfädeln}.$$

4.4.5 Modul 3: Funktionsfähigkeit der betroffenen Knoten – Vorgehensweise

Ein betroffener Knoten hat mindestens eine Maßnahme zugeordnet, die eine veränderte, zusätzliche Nutzung im Vergleich zum Regelbetrieb erzeugt. Die zusätzliche Nutzung der Gleise im Knoten kann durch zusätzliche Belegungen (Zugfahrt nutzt im Regelbetrieb das betroffene Netzelement nicht) oder durch zusätzliche Belegungszeiten im Rahmen der angewendeten Maßnahmen (Zugfahrt nutzt das im Regelbetrieb genutzte Netzelement länger) entstehen. Hierbei können die Belegungsarten Durchfahrt, Halt, Wende oder Abstellung am Bahnsteig differenziert werden. Die Belegungsarten unterscheiden sich durch die Zeitanteile, die sie im Knoten benötigen. In Tabelle 4-5 sind die Belegungsarten und ihre Ausprägungen den Maßnahmenarten in der Unterscheidung von erzeugten zusätzlichen Belegungen und Belegungszeiten zugeordnet.

Tabelle 4-5: zusätzliche Belegungen und Belegungszeiten durch die Maßnahmenarten (eigene Darstellung)

	zusätzliche Belegung	**zusätzliche Belegungszeit**
Teilausfall	-	Wende am SFP-Wendebahnhof
Teilausfall mit Ersatz	-	Wende am SFP-Wendebahnhof
Ausfall[7]	Abstellung am Bahnsteig abseits des Regelwegs	Abstellung am Bahnsteig auf dem Regelweg
Umleitung	neue Halte neue Durchfahrten	-
Umleitung mit Teilausfall	neue Halte neue Durchfahrten Wende am SFP-Wendebahnhof auf der Umleitungsstrecke	vorzeitige Wende am SFP-Wendebahnhof auf dem Regelweg
Umleitung mit Teilausfall und Ersatz	neue Halte neue Durchfahrten Wende am SFP-Wendebahnhof der Umleitungsfahrt mit TA	Wende am SFP-Wendebahnhof der Ersatzfahrt
für alle Maßnahmenarten	zusätzliche Halte auf dem Regelweg	geplante verspätete Abfahrten nach Halt (in Modul 1 erkannte zusätzliche Zeitbedarfe, die die Abfahrt im Knoten verzögern und eingeplant werden) Durchfahrten auf verändertem Bahnhofsgleis

Es zeigt sich, dass alle vier Belegungsarten sowohl als zusätzliche neue Belegungen als auch neue Belegungszeiten in Knoten auftreten können. Die Aufteilung dient der Übersicht und stellt sicher, dass für jede Maßnahmenart alle Auswirkungen erfasst werden. Grundsätzlich erzeugen aber beide Spalten der Tabelle den Bedarf der Ermittlung der Belegungszeiten im Störfall. Diese müssen bei jedem durch eine Maßnahme betroffenen Knoten neu bestimmt werden.

Die Belegungsart Abstellung am Bahnsteig erzeugt ein im SFP-Anwendungszeitraum dauerhaft belegtes Gleis. Die im Regelbetrieb auf diesem Gleis stattfindenden Belegungen müssen somit auf andere Gleise verlegt werden. Die tatsächliche Entscheidung über die Gleisbelegung liegt beim EIU.

Hier ist somit eine erfahrungsbasierte Angabe des Erstellers notwendig, um diese Fahrten anderen Gleisen zuzuordnen. Diese Gleise müssen dann anschließend durch die neuen Belegungen ebenfalls auf Auslastung hin überprüft werden. Diese Überprüfung kann dann die drei verbleibenden Belegungsarten Durchfahrt, Halt und Wende beinhalten.

[7] Vorbereitungszeiten für die Abstellung und die zugehörigen Fahrten sind hier nicht relevant, da sie nicht in der stabilen Phase, sondern ausschließlich in der Einschwingphase stattfinden.

4.4.6 Modul 3: Funktionsfähigkeit der betroffenen Knoten – Algorithmus

Nachdem in den Unterabschnitten Methode und Vorgehensweise erläutert wurde, welche Aufgaben der Algorithmus hat und wie der Input verarbeitet wird, um den gewünschten Output zu erreichen, erfolgt hier die formalere Notation der einzelnen Arbeitsschritte. Die Arbeitsschritte erfolgen für jedes von einer Maßnahme betroffene Netzelement, wenn diese nicht ausschließliche eine Reduktion der Belastung darstellt.

In einem Knoten bestehen drei Belegungsarten: Durchfahrt, Halt und Wende. Um die Berechnung für jede der drei Belegungsarten durchführen zu können, ist zunächst zu ermitteln, welche vorliegt. Hierzu muss für den Knoten erfasst werden, welche Fahrbeziehungen möglich sind. Daraus lassen sich angelehnt an Chu (2014 S. 130) Fahrttypen bestimmen. Ein Fahrttyp j definiert sich über den Richtungswechsel. Findet keiner statt, handelt es sich um eine Durchfahrt oder einen Halt. Findet ein Richtungswechsel statt, so handelt es sich um eine Wende.

Für die Modellierung der Infrastrukturnutzung des Bahnhofs ist die Anzahl der zu betrachtenden Gleise i zu bestimmen. Die möglichen Fahrbeziehungen werden nach dem folgenden Vorgehen ermittelt. Dieses wird im Beispiel in Abbildung 4-9 beispielhaft verdeutlicht.

„Finde alle Kombinationen von

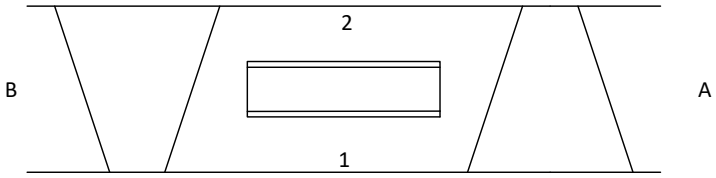
Einfahrt von *vorheriger Betriebsstelle* nach *Bahnhofsgleis* und

Ausfahrt von *Bahnhofsgleis* nach *kommende Betriebsstelle*

Wenn die *vorherige Betriebsstelle* = *kommende Betriebsstelle* entspricht, handelt es sich um eine Wende.

Wenn die *vorherige Betriebsstelle* ≠ *kommende Betriebsstelle* entspricht, handelt es sich um eine Weiterfahrt.“

Aus diesen Kombinationen ergeben sich alle möglichen Fahrttypen.



Fahrttyp j	Einfahrt	Ausfahrt	Richtungswechsel?
1	A → 1	1 →A	Wende
2		1 → B	Weiterfahrt
3	A → 2	2 →A	Wende
4		2 → B	Weiterfahrt
5	B → 1	1 →A	Weiterfahrt
6		1 → B	Wende
7	B→ 2	2 →A	Weiterfahrt
8		2 → B	Wende

Abbildung 4-9: Beispiel zur Bestimmung der möglichen Fahrttypen (eigene Darstellung)

i – Index für betrachtete Gleise, i = 1, . . . n (n = Anzahl Gleise)

j – Index für betrachteten Fahrttyp, j = 1, . . ., n (n = Anzahl Fahrttypen)

f – Index für betrachtete Fahrten, f = 1, . . . , n (n = Anzahl Fahrten je Gleis)

Der Fahrttyp j Weiterfahrt untergliedert sich in die Durchfahrt und den Halt und lässt sich am Vorhandensein des Zeitanteils für einen Halt t_H unterscheiden.

Es entstehen verschiedene Fälle bei der Berechnung der Belegungszeit. Bei Durchfahrten hat die Geschwindigkeit einen hohen Einfluss auf die Belegungszeit, da die Fahrzeit im Block (Bestandteil der

Sperrzeit t_{Sp} nach Abschnitt 2.2.3) durch den entfallenden Halt rein geschwindigkeitsabhängig ermittelt werden kann. Daher ist bei der Fahrzeit im Block zu berücksichtigen, ob die Geschwindigkeit beibehalten werden kann oder zu reduzieren ist.

1. Wenn die Zugfahrten den Bahnhof auf dem *durchgehenden Hauptgleis (dgH) durchfahren*, so kann für v die mittlere Geschwindigkeit angesetzt werden und mit dieser der geschwindigkeitsabhängige Bestandteil Fahrzeit im Block t_{Bl} der Belegungszeit berechnet werden.
2. Wenn die Fahrzeuge den Bahnhof auf *anderen Gleisen als dem dgH durchfahren*, so ist eine Geschwindigkeitsreduktion zu berücksichtigen. Für die Durchfahrt auf Nebengleisen ist die anzusetzende Geschwindigkeit auf die Weichengeschwindigkeit zu reduzieren. Bei der Berechnung der Fahrzeit im Block sind somit ein Zeitraum mit Abbremsen auf Weichengeschwindigkeit und ein Zeitraum mit verringerter Geschwindigkeit enthalten.
3. Wenn die Fahrzeuge *halten*, sind bei der Berechnung der Fahrzeit im Block somit ein Zeitraum mit Abbremsen auf Stillstand und ein Zeitraum mit Beschleunigung nach Halt enthalten. Dies gilt auch bei den SFP-Wenden, da sie für die Durchführung der Wende in den Knoten halten.

Im Anschluss werden alle Zugfahrten f den Fahrttypen j zugeordnet. Es können Fahrttypen unbesetzt bleiben, wenn keine Zugfahrten entsprechend allen möglichen Fahrttypen verkehren. Diese sind dann für die weitere Validierung nicht zu berücksichtigen. Die Gesamtbelegungszeit eines Gleises ist somit die Summe aller Fahrten f auf dem betrachteten Gleis i, die in Abhängigkeit des Fahrttyps j bestimmt werden. Die Belegungszeit ist je Fahrt entsprechend dem Fahrttyp j nach Tabelle 4-6 mit der Sperrzeit t_{Sp} nach Abbildung 2-2 zu berechnen.

Tabelle 4-6: Berechnung der Belegungszeiten einer Zugfahrt entsprechend dem Fahrttyp (eigene Darstellung)

Belegungszeit $t_{B,f}$ durch einen Zug f bei $j_{Weiterfahrt,H}$	$t_{B,f,Weiterfahrt,H} = t_{Sp} + t_{H}$
Belegungszeit $t_{B,f}$ durch einen Zug f bei $j_{Weiterfahrt,D}$	$t_{B,f,Weiterfahrt,D} = t_{Sp}$
Belegungszeit $t_{B,f}$ durch einen Zug f bei j_{Wende}	$t_{B,f,Wende} = t_{Sp} + t_{Wende,SFP}$

Im vorherigen Beispiel aus Abbildung 4-9 werden für das Gleis 1 alle Belegungszeiten der Zugfahrten f mit den Fahrttypen 1, 2, 5 und 6 summiert. Hierbei wird bei den Fahrttypen 2 und 5 für alle Zugfahrten f die Belegungszeit $t_{B,f,Weiterfahrt}$ durch einen Zug bei $j_{Weiterfahrt}$ berechnet und alle Zugfahrten f der Fahrttypen 1 und 6 als Belegungszeit $t_{B,f,Wende}$ durch einen Zug bei j_{Wende}.

Nach Ermittlung aller Belegungen ist eine Überprüfung des Knotens auf Vorliegen von Belegungskonflikten nach Unterabschnitt 2.2.5 durchzuführen. Bei Vorliegen von Belegungskonflikten durch Unterschreiten der Bindungszeiten ist eine Lösung durch den Ersteller zu veranlassen.

Nach der Ermittlung der Gesamtbelegungszeit eines einzelnen Gleises $t_{B,i}$ wird diese mit dem ersten Prüfkriterium der Gesamtbelegungszeit des Gleises im Regelbetrieb $t_{B,i,Regel}$ verglichen. Sollte die Bedingung $t_{B,i} < t_{B,i,Regel}$ erfüllt sein, so ist das Maßnahmenbündel an diesem untersuchten betroffenen Netzelement in der stabilen Phase als funktionsfähig einzustufen. Wenn die Bedingung nicht erfüllt ist, ist nun für das untersuchte Gleis i der Belegungsgrad $\rho_{i,UIC}$ zu berechnen.

Anschließend ist ein Abgleich des Belegungsgrads $\rho_{i,UIC}$ mit dem Maximalwert für den Belegungsgrad der Gleise im Knoten nach UIC vorzunehmen und auf die Bedingung $\rho_{i,UIC} < \rho_{max}$ zu prüfen. Für ρ_{max} wird nach dem UIC-Kodex 406 (2013) ein Wert von 0,45 empfohlen.

Wenn $\rho_{i,UIC} > \rho_{max}$ ist, muss die Rückmeldung „Maßnahmenbündel am untersuchten betroffenen Netzelement nicht funktionsfähig“ für den Ersteller erscheinen. Wenn $\rho_{i,UIC} < \rho_{max}$ ist, so ist das Maßnahmenbündel an diesem untersuchten betroffenen Netzelement in der stabilen Phase als funktionsfähig einzustufen.

4.4.7 Zusammenfassung

Ab Modul 2 werden die eingeplanten Maßnahmen nicht mehr eigenständig, sondern immer als Maßnahmenbündel auf betroffenen Netzelementen und somit in Bezug auf die resultierenden Auswirkungen im Netz betrachtet. Die Prüfung der Funktionsfähigkeit eines betroffenen Netzelements wird notwendig, wenn sich durch betriebliche Maßnahmen eine veränderte Nutzung ergibt, die nicht ausschließlich aus einer Reduktion der Auslastung besteht.

Die beiden Arten von betroffenen Netzelementen – Kante und Knoten – werden mit einem einheitlichen Vorgehen auf ihre Funktionsfähigkeit in der stabilen Phase überprüft. Hierzu wird die Belegung zunächst im Vergleich zum Regelbetrieb und ggfs. anschließend im Vergleich zu UIC-Grenzwerten für die unterschiedlichen Belegungsarten kontrolliert. Wenn bei dieser Überprüfung keine Einschränkungen der Leistungsfähigkeit erkannt werden, gilt das Betriebskonzept als funktionsfähig in der stabilen Phase. Somit kann im Folgenden nun das Erreichen der stabilen Phase durch die Überprüfung der Einschwingqualität adressiert werden.

4.5 Modul 4: Überprüfung der Einschwingfähigkeit

4.5.1 Einleitung

Das Ergebnis der Anwendung der Module 1 bis 3 ist ein vollständig erstelltes und auf Funktionsfähigkeit in der stabilen Phase geprüftes Betriebskonzept für einen definierten Störfall.

Ziel des Moduls 4 ist eine grobe Überprüfung der Einschwingfähigkeit, um sicherzustellen, dass keine Ausschlusskriterien für einen schnellen Übergang in eine stabile Phase vorliegen. Das angestrebte Ergebnis ist eine Aussage, ob und welche Ausschlusskriterien für die Einschwingfähigkeit bestehen.

Die relevanten Anforderungen aus Abschnitt 3.3 wurden in Abschnitt 4.1 zitiert und zudem in Abschnitt 4.2 und 4.2.2 für die Bewertung der Einschwingphase spezifiziert.

Für das Modul 4 werden in den folgenden Unterabschnitten 4.5.2 bis 4.5.8 Methoden, Vorgehensweisen und Algorithmen erarbeitet.

4.5.2 Methode

Die Einschwingphase ist gemäß Unterabschnitt 2.3.2 eine chaotische Phase, deren Ausgangspunkt, gemäß Abschnitt 4.2, abhängig von Störfall und dessen Eintretenszeitpunkt eine variierende Betriebslage vorliegt, wodurch die Einschwingphase für einen geplanten Störfall unterschiedlich verlaufen kann. Die Modellierung dieser Phase ist daher deutlich komplexer als die Bewertung der stabilen Phase.

Wenn die Modellierung der Einschwingdauer ein sehr hohes oder gegen unendlich gehendes Ergebnis ergibt, ist das Einschwingen nicht machbar. Um die Rechenzeit anforderungsgemäß gering zu halten,

sollten vor der Modellierung der Einschwingdauer Ursachen, die ein Einschwingen potenziell verhindern, ausgeschlossen werden.

Vorliegende Ausschlusskriterien verhindern, dass sich die nach Unterabschnitt 4.2.2 angestrebten Eigenschaften des Einschwingens – Planmäßigkeit, Zugstandort und Zuganzahl – nach Störfallfahrplan einstellen.

Planmäßigkeit kann nicht erreicht werden, wenn durch Überlastungen kontinuierlich außerplanmäßige Wartezeiten entstehen. Der Zugstandort ergibt sich gemäß Unterabschnitt 4.2.2 spätestens bei Erreichen der Planmäßigkeit. Davor werden aber bereits Streckenabschnitte entlastet, sobald Züge auf der geplanten Umleitung verkehren. Die Zuganzahl wird im Störfallfahrplan klassischerweise durch Abstellungen reduziert, um somit das Erreichen und Erhalten der Planmäßigkeit (schneller) zu ermöglichen.

Es ergeben sich damit die beiden folgenden Ausschlusskriterien: kontinuierliche (oder zu lange andauernde) Überlastung eines Netzelements und zu lange Dauer des Auslegens durch Abstellung oder Umleitung.

Durch eine Fokussierung auf diese beiden Ausschlusskriterien kann nicht sichergestellt werden, dass das Einschwingen (in vorgegebener Dauer) funktionieren kann, es wird nur auf rechenzeitarme Weise festgestellt, ob Ausschlusskriterien dafür vorliegen. Die Rechenzeit wird, unter Anwendung der Möglichkeiten zur Bearbeitung komplexer Probleme aus Unterabschnitt 2.2.5, durch die Einschränkung der Problemgröße auf zwei Teilprobleme und eine problemadäquate Eingrenzung des Betrachtungsraums reduziert.

Es ist somit nun eine Vorgehensweise zu erarbeiten, die es ermöglicht, Bereiche zu identifizieren, in denen hohe außerplanmäßige Wartezeiten auftreten können und deren Belegung für eine funktionsfähige Einschwingphase zu bewerten ist. Das Auslegen der Züge ist im Zeitverlauf nach Störungseintritt abzubilden, sodass ein Zeitpunkt bekannt ist, ab dem eine Entlastung erreicht wird.

Bereiche, in denen hohe Wartezeiten beim Einschwingen auftreten, sind gemäß Abschnitt 2.4 Rückstaus, die durch die Störung entstehen. Relevant für ein Ausschlusskriterium sind dabei die Bereiche, bei denen die außerplanmäßige Wartezeit nicht nur durch den Nothalt aufgebaut wird, sondern diese, in denen eine erhöhte Belastung und/oder eingeschränkte Verfügbarkeit der Infrastruktur durch die Störung entstanden ist. Ein Netzelement mit diesen Eigenschaften wird im Folgenden Störungseinflussbereich genannt. Dieser wird ggfs. erst bei Erreichen des Störfallfahrplans ausreichend entlastet. Hierzu ist die Umsetzung der entlastenden Maßnahmen (Auslegen durch Ausfall, Teilausfall oder Umleitung) abzuschließen.

Die Überlastung kann analog zum Vorgehen in Modul 3 durch die Verwendung des Belegungsgrads ermittelt werden. Da nicht die Planung der stabilen Phase, sondern ein Ausschlusskriterium der Einschwingphase betrachtet wird, ist das Ziel sicherzustellen, dass es nicht zu lange dauert, bis weniger Züge ankommen als bedient werden können. Daher werden keine Pufferzeiten oder Zusatzzeitraten berücksichtigt und der Belegungsgrad mit einem Richtwert von 1 versehen.

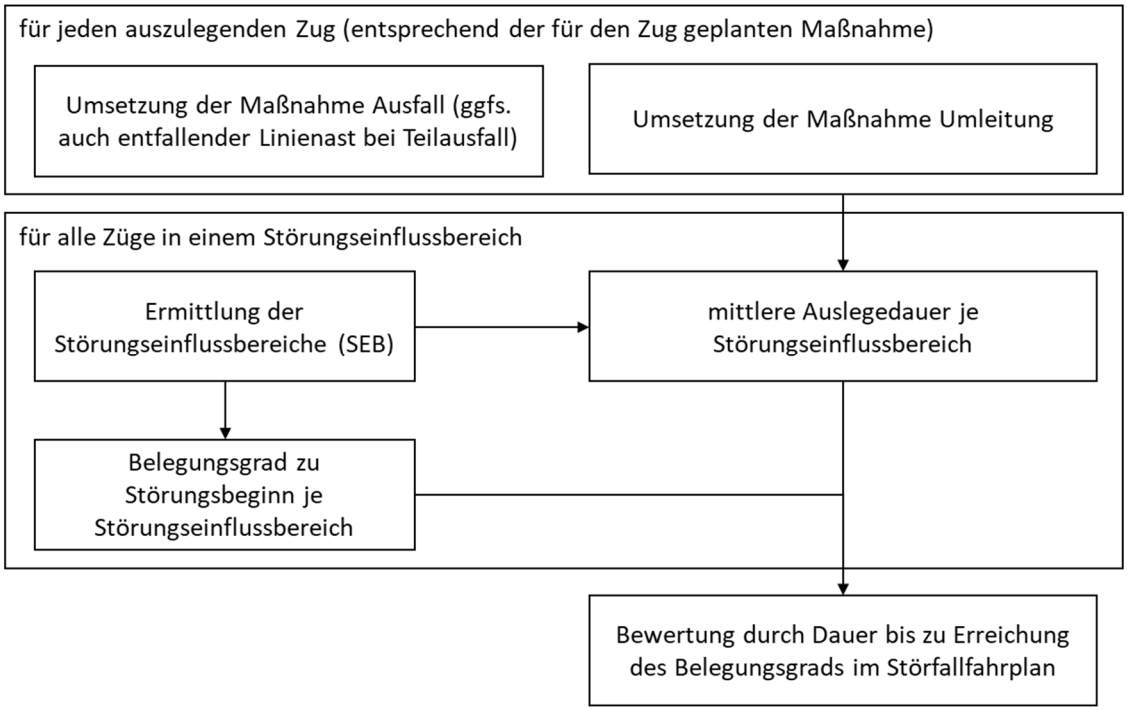


Abbildung 4-10: Vorgehensweise zur Feststellung von Ausschlusskriterien für das Einschwingen (eigene Darstellung)

In Abbildung 4-10 ist die Vorgehensweise zur Feststellung von Ausschlusskriterien für das Einschwingen dargestellt. Die Störungseinflussbereiche liegen bspw. vor SFP-Wendebahnhöfen oder Bahnhöfen, in denen die Abstellung vorbereitet wird. Das Netzelement kann anhand der folgenden Eigenschaften ermittelt werden:

- eingeschränkte Verfügbarkeit der Infrastruktur resultiert in Verfügbarkeitskonflikten oder
- Belastung durch zusätzliche Belegungszeiten zum Fahrplan des Regelbetriebs.

Die Berechnung der Zeitbedarfe für die Umsetzung der Maßnahme Umleitung erfolgte bereits in Modul 1 und 3 und kann aus diesen Modulen als Input verwendet werden. Darüber hinaus ist eine Vorgehensweise zur Bestimmung der Fahrten auf die Umleitungsstrecke und deren Dauer zu ermitteln.

Für die Umsetzung der Maßnahme Ausfall und im Falle von Zügen, die bei Teilausfällen ausgelegt werden, kann aus dem Modul 1 der Input zu Abstellungen verwendet werden. Darüber hinaus ist eine Vorgehensweise zur Bestimmung der Fahrten in die Abstellung und deren Dauer zu ermitteln.

Anschließend ist eine Vorgehensweise zur Bestimmung der mittleren Auslegedauer je Störungseinflussbereich zu erarbeiten. Hierbei ist zu ermitteln, nach welchem Zeitraum der Störungseinflussbereich entlastet wurde, sodass dort keine weiteren Verspätungen entstehen.

Diese Dauer ist für jeden Störungseinflussbereich zu bewerten. Erst nach der mittleren Auslegedauer kann das Einschwingen erreicht werden bzw. kann der (schnellere) Verspätungsabbau beginnen. Daher sollte die Auslegedauer nur einen parametrisierbaren Anteil der vorgegebenen Einschwingdauer darstellen.

In den Unterabschnitten 4.5.3 und 4.5.4 werden Vorgehensweise und Algorithmus für die Maßnahme Ausfall, in den Unterabschnitten 4.5.5 und 4.5.6 werden Vorgehensweise und Algorithmus für die Ermittlung der mittleren Auslegedauer und in den Unterabschnitten 4.5.7 und 4.5.8 werden Vorgehensweise und Algorithmus für die Ermittlung des Belegungsgrads je Störungseinflussbereich und der Bewertung erarbeitet.

4.5.3 Maßnahme Ausfall – Vorgehensweise

Die Maßnahme Ausfall ist in der stabilen Phase eine Maßnahme ohne dispositiven Eingriff in den laufenden Betrieb, da sie dort nur aufrechterhalten wird, indem bspw. im Regelbetrieb geplante Verstärkerfahrten je nach Störfallfahrplan nicht eingelegt werden. Ihre aktive Umsetzung wird ausschließlich in der Einschwingphase durchgeführt. Ggfs. kann bei großen Teilausfällen auch eine Abstellung notwendig werden. Diese erfolgt analog.

Während der Vorbereitung der Abstellung erzeugt die Umsetzung gemäß Modul 1 längere Belegungszeiten der Gleise in den Betriebsstellen, in denen das Auslegen durchgeführt wird. Wenn sie erfolgreich umgesetzt wurde, ermöglicht die Maßnahme Ausfall eine Reduktion des Belegungsgrads der Strecke und der zugehörigen Knoten. Die Umsetzung ist bei Erreichen der stabilen Phase abgeschlossen und die geplanten Auswirkungen sind bereits erreicht.

In Modul 1 wurden daher für die Maßnahme Ausfall bereits die Vorbereitungszeiten für eine Abstellung als Grundlage für das Auslegen ermittelt.

Das Auslegen eines Zuges findet entweder direkt an einem Bahnhof statt, an dem entsprechende Kapazitäten zur Abstellung (Abstellgleise, dauerhaft freie Bahnsteiggleise etc.) vorhanden sind, oder es beginnt bereits an einem anderen Bahnhof durch die Vorbereitung für eine Abstellung mit anschließender Zugfahrt zum Abstellungsort. Es wird dabei angenommen, dass der Ersteller entsprechend seiner Netzkenntnisse berücksichtigt, dass ausreichend Abstellmöglichkeiten vorhanden sind.

Aktive Umsetzung in der Einschwingphase

Zum Zeitpunkt der Störung können sich die auszulegenden Fahrzeuge auf beiden Seiten der Störung befinden, wenn die Störung nicht am Ende eines Netzastes auftreten sollte. Die zu nutzenden Abstellmöglichkeiten sind durch den Ersteller zu deklarieren.

Auf jeder Seite der Störung existieren zwei übergeordnete Ausführungsarten zur Durchführung der Maßnahme:

1. Züge werden, wie beispielhaft in Tabelle 4-7 dargestellt, nur an einem Knoten ausgelegt. Für die Züge, die in der davon abgewandten Richtung verkehren, ist somit ein Wendebahnhof zu deklarieren. Des Weiteren ist durch den Ersteller für die Rückfahrt anzugeben, ob die Züge schnellstmöglich wenden und als Leerfahrt fahren sollen oder ob die Züge auf die nächste Gegenleistung wenden und Passagiere mitnehmen sollen.
2. Züge können wie beispielhaft in Tabelle 4-8 und Tabelle 4-9 dargestellt, an zwei bzw. n Betriebsstellen ausgelegt werden. Wenn zwei Knoten auf einer Seite der Störung deklariert werden, so ist durch den Ersteller anzugeben, für welche Abschnitte und welche Fahrtrichtung welcher der beiden Wendebahnhöfe zur Abstellung anzufahren ist. Wenn die Knoten nicht am Linienastende liegen, sind auch Wendebahnhöfe, die nach der Wende anzufahrenden Abstellbahnhöfe (siehe Tabelle 4-7) und die Form der Rückfahrt anzugeben.

Abbildung 4-11 verdeutlicht die Möglichkeiten der Auswahl der Abstellbahnhöfe und ggfs. zugehörigen Wendebahnhöfe beispielhaft. Für die *Abstellbahnhöfe* ist Folgendes zu beachten: Wenn die Züge wie im Beispiel der Tabelle 4-7 nur an einem Bahnhof ausgelegt werden können, dann kann dieser (wie im Beispiel) am Ende des Netzastes sein, aber auch im Verlauf liegen. Für diesen Fall müsste dann ein weiterer SFP-Wendebahnhof für die Richtung ← definiert werden.

Für die *SFP-Wendebahnhöfe* ist das Folgende zu beachten: Wenn diese nicht am Ende des Netzastes oder direkt vor dem Störungsort eingeplant sind, so kann es sein, dass dadurch beim Einschwingen gemäß Unterabschnitt 3.6.2 gelbe Züge entstehen. Diese sind dann zunächst, durch zusätzliche Dispositionsmaßnahmen außerhalb der Vorgaben des Betriebskonzepts, wieder zurück in den Bereich der Kategorisierung der grünen Züge zu bringen. Bei der Wahl der Form der Rückfahrt kann zwischen der Fahrgastbeförderung mit Abfahrt zum Taktzeitpunkt oder der schnellstmöglichen Leerfahrt gewählt werden. Diese Wahl obliegt dem Ersteller. Es wird somit deutlich, dass bei näherer Betrachtung der Umsetzung der Maßnahme Ausfall mehr Angaben bei Einplanung durch den Ersteller zu machen sind als Modul 1 (Unterscheidung Weiterfahrt/Wende bei Vorbereitungszeit) benötigt.

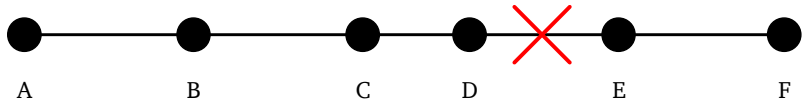


Abbildung 4-11: Beispiel für Eingaben bei Anwendung der Maßnahme Ausfall für die linke Seite der Störung (eigene Darstellung)

Tabelle 4-7: Beispielangaben bei einer Betriebsstelle zur Abstellung (eigene Darstellung)

Abstellung in	A	Wendeort und Form der Rückfahrt
für die Richtung →	A nach D	in D auf Takt oder Leerfahrt
für die Richtung ←	Störungsort nach A	nicht notwendig

Tabelle 4-8: Beispielangaben bei zwei Betriebsstellen zur Abstellung (eigene Darstellung)

Abstellung in	A	D	Wendeort und Form der Rückfahrt
für die Richtung →	-	A nach D	nicht notwendig
für die Richtung ←	Störungsort nach A	-	nicht notwendig

Tabelle 4-9: Beispielangaben bei zwei Betriebsstellen zur Abstellung mit abweichendem Wendebahnhof (eigene Darstellung)

Abstellung in	A	C		Wendeort und Form der Rückfahrt
für die Richtung →	-	A nach C sowie C nach D (nach Wende)		in D auf Takt oder Leerfahrt
für die Richtung ←	Störungsort nach A	-		nicht notwendig

Ergänzend ist festzuhalten, dass, wenn eine Nutzung auf abweichendem Laufweg stattfindet und dies somit eine Umleitung darstellt, ist anhand der Algorithmen aus Modul 2 die Ermittlung von Wartezeiten

für Ein- und/oder Ausfädeln durchzuführen. Diese ist dann bei der Belegungsgradberechnung zu berücksichtigen. Wenn eine Fahrt auf dem Regellaufweg mit abweichendem Fahrweg stattfinden muss und dies dann eines Gleiswechselbetriebs bedarf, so ist hier das Vorgehen analog zum Zweirichtungsbetrieb bei Eingleisigkeit anzuwenden.

Die Umsetzung der Maßnahme Ausfall führt zu einer erhöhten Gleisbelegung an den Knoten, an denen das Auslegen durchgeführt wird. Jeder dieser Knoten ist somit ein Störungseinflussbereich, dessen Kapazität zu überprüfen ist.

Diese zusätzliche Belegung der Gleise erzeugt ähnlich wie die zusätzlichen Wenden an SFP-Wendebahnhöfen zusätzliche Belegungszeiten, sodass die Berechnung im Grunde analog zur Wendekapazität der SFP-Bahnhöfe vorgenommen werden kann. Da der Zug dort allerdings keine reine Wende, sondern eine Abstellung oder ein Auslegen erfährt, sind Erweiterungen nötig. Ein wesentlicher Unterschied ist die Sicherstellung, dass alle Fahrgäste den Zug verlassen haben und dieser nur leer abgestellt werden kann. Dieser Input kann aus Modul 1 f) gewonnen werden.

Zur Abbildung der Umsetzung des Auslegens durch Abstellung ergeben sich somit folgende Fälle:

1. Auslegen mit Fahrt in die Abstellung ohne Wende,
2. Auslegen mit Fahrt in die Abstellung mit Wende und
3. Abstellung auf dem Bahnsteiggleis.

Für diese Fälle werden nun im Folgenden die Algorithmen erarbeitet.

4.5.4 Maßnahme Ausfall – Algorithmus

Nachdem in dem Unterabschnitt Vorgehensweise erläutert wurde, welche Aufgaben der Algorithmus hat und wie der Input verarbeitet wird, um den gewünschten Output zu erreichen, erfolgt hier die formalere Notation der einzelnen Arbeitsschritte. Die Arbeitsschritte erfolgen für jede Zugfahrt mit der Maßnahme Ausfall, für die drei Fälle zur Berechnung der Belegungszeit erforderlich sind. Ggfs. kann bei großen Teilausfällen auch eine Abstellung notwendig werden. Diese erfolgt analog. Die Ausgangsbasis stellen die Formeln zur Ermittlung von Sperrzeiten aus Unterabschnitt 2.2.3, die Formeln zur Ermittlung der Belegungszeiten aus Unterabschnitt 4.4.6 und die Vorbereitungszeiten der Abstellung in Unterabschnitt 4.3.4 f) dar.

Für alle Fälle gilt ein Ankommen mit Fahrgästen. Wenn der Zug als Leerfahrt ankommt, so ist jeweils der Anteil der Vorbereitungszeit (siehe dazu Abschnitt 4.3.4 f) und Anlage 3) zur Prüfung der Leerung mit $t_{FgAusstieg}$, t_{DG} und ggfs. $t_{reinWeg}$ an dem Bahnhof durchzuführen, an dem die Leerfahrt beginnen soll. An dem Bahnhof an dem die Leerfahrt endet und ggfs. eine Wende für die Fahrt in die Abstellung notwendig ist, sind dann die Zeitanteile zu $t_{abrü,}$ $t_{aufrü}$ und $t_{reinWeg}$ in Abhängigkeit der Anzahl der Triebfahrzeugführer zu berücksichtigen.

1. Fall: Auslegen mit Fahrt in die Abstellung ohne Wende

Bei Fahrt in die Abstellung ohne Wende wird zur Berechnung der Belegungszeit die reguläre Haltezeit durch die Vorbereitungszeit für die Weiterfahrt ohne Wechsel der Fahrtrichtung $t_{Vb,ohneWende}$ ersetzt. Die Signalsichtzeit wird zweifach angesetzt.

Sperrzeit t_{Sp}	$t_{Sp} = t'_{Sig} + 2 \cdot t_i + t_A + t_B + t_R + t''_{Sig}$
Belegungszeit $t_{B,Ausfall,ohneWende}$ durch einen Zug bei Abstellung ohne Wende	$t_{B,Ausfall,ohneWende} = t_{Sp} + t_{Vb,ohneWende}$

2. Fall: Auslegen mit Fahrt in die Abstellung mit Wende

Bei Fahrt in die Abstellung mit Wende ist die reguläre Haltezeit durch die Vorbereitungszeit für die Weiterfahrt mit Wechsel der Fahrtrichtung $t_{Vb,Wende}$ zur Berechnung der Belegungszeit zu ersetzen. Zusätzlich ist die Sperrzeit erhöht, da der Block zweimal (Einfahrt und Ausfahrt) befahren wird. Die Signalsichtzeit und die Fahrzeit im Block werden zweifach angesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass die Auflösung der ersten Fahrstraße und das Einstellen der zweiten Fahrstraße während der Vorbereitungszeit erfolgen. Eine Fahrzeit Vorsignalabstand und Räumzeit für die Einfahrt gibt es in diesem Fall nicht.

Sperrzeit $t_{Sp,Wende}$	$t_{Sp,Wende} = t'_{Sig} + 2 \cdot t_i + t_A + 2 \cdot t_B + t_R + t''_{Sig}$
Belegungszeit $t_{B,Ausfall,Wende}$ durch einen Zug bei Abstellung mit Wende	$t_{B,Ausfall,mit\,Wende} = t_{Sp,Wende} + \max\begin{cases} t_{Vb,Wende} \\ t_{min,Wende,SFP} \end{cases}$

3. Fall: Abstellung auf dem Bahnsteiggleis

Bei Abstellung auf einem Bahnsteiggleis sind die weiteren auf diesem Gleis geplanten Zugfahrten auf die restlichen Bahnsteiggleise zu verteilen. Für diesen Fall erfolgt die Berücksichtigung bereits in Modul 3 (Unterabschnitt 4.4.5), da es sich hier um Auswirkungen in der stabilen Phase handelt.

Zusammenfassung

Für eine Überprüfung der Belegung der Knoten durch Auslegen in der Einschwingphase sind nun die Belegungszeiten inkl. Vorbereitungszeiten entsprechend den Prüffällen bekannt.

Im Weiteren kann nun ermittelt werden, wie lange die Auslegung andauert und ab wann mit einer geplanten, reduzierten Zuganzahl zu rechnen ist.

4.5.5 Ermittlung der mittleren Auslegedauer – Vorgehensweise

Das Erreichen der angestrebten Zugzahl wird durch die Maßnahme Ausfall geplant und durch das Abstellen von Zügen erreicht. Die Entlastung durch die Reduktion der Zugzahl und der Nutzung von Umleitungen ist wichtig, um einen stabilen Störzustand zu erreichen. Bis ein Zug seinen Laufweg entsprechend der betrieblichen Maßnahme Umleitung erreicht hat, gilt er als gelber Zug. Diese wenden entsprechend dem Vorgehen der anderen Fahrzeuge am SFP-Wendebahnhof und fahren ggfs. nach erneuter Wende am Start- bzw. Endbahnhof und dem Erreichen der Ein-/Ausfädelstelle auf einem vom Störfallfahrplan abweichenden Laufweg. Anschließend ist der umzuleitende Zug bereits ausgelegt und entlastet ggfs. ebenfalls Teile seines Laufwegs des Regelbetriebs.

Entlastung von Netzelementen ermöglicht den Abbau und die Vermeidung des Aufbaus von Verspätungen. Gemäß Unterabschnitt 4.2.1 sollte das Auslegen von Zügen daher vor dem Stabilitätskriterium Planmäßigkeit erreicht werden und somit nur einen Teil der vorgegebenen Einschwingdauer in Anspruch nehmen. Das Auslegen erfolgt für die nach Störfallfahrplan im Umlauf überschüssigen Fahrzeuge. Da es zur Erstellung eines Umlaufplan bereits Vorgehensweise im Regelbetrieb, der Praxis im Störfall und der Forschung existieren, ist dies gemäß Unterabschnitt 3.1.2 nicht Bestandteil dieser Arbeit. Bei einer Implementierung der Algorithmen kann somit bspw. auf

bestehende Software und deren Algorithmen und die Arbeit von Crespo Materna (2020) verwendet werden. Der Umlauf wird somit in einem externen Modul erzeugt, sodass anschließend je nach anzunehmender Betriebslage die auszulegenden Fahrzeuge bestimmt werden können.

Für diese ist zu ermitteln, wie lange es dauert, bis die Züge abgestellt sind bzw. die Umleitung nutzen und somit Kapazitäten im Störungseinflussbereich freigeben.

Basierend auf dem allgemeinen Vorgehen (siehe Unterabschnitt 4.2.2) für die Bestimmung der Einschwingqualität sind in einem maßgebenden Zeitintervall für jede Fahrplanminute die auszulegenden Zugfahrten zu betrachten. Für die Ermittlung der Ausstelldauer, die jeder Zug pro Fahrplanminute benötigt, sind zunächst die folgenden Rahmenbedingungen zu definieren:

Der *Betrachtungsraum* entspricht bei jedem Zug, der abgestellt werden soll, dem trotz Störung befahrbaren Bereich, der Abstellmöglichkeiten ausweist. Wenn die Störung die Linie unterbricht, so können sich zum Störungszeitpunkt auf beiden Seiten Fahrten, die ausgestellt werden sollen, befinden. Es sind somit beide Seiten der Störung zu untersuchen, wodurch sich für die Linie L zwei Betrachtungsräume ergeben. Dies erfolgt anhand von Unterabschnitt 4.5.4 und 4.5.4. Wenn für eine Linie nicht alle Züge abgestellt werden sollen, sondern nur die Taktverstärker ausgelegt werden, so ist anhand der Umläufe, die sich unter Verwendung der Wenden aus Modul 1 ergeben, zu ermitteln, welche Züge weiter verkehren und welche abgestellt werden. Bei den Umleitungen ergibt sich der Betrachtungsraum aus dem Standort des Zuges bei Störungsbeginn und dem direkten Weg zum Umleitungsbeginn.

Der *Betrachtungszeitraum* $t_{U,AD}$ basiert auf dem Grundtakt der Linien, die betrachtet werden sollen. Es ist sicherzustellen, dass alle Linien, die ausgelegt werden, Beachtung finden.

Der *Bezugspunkt* der Ermittlung der mittleren Ausstelldauer ist für die abzustellenden Züge der Abstellbahnhof und für die umzuleitenden Züge der Beginn der Umleitungsstrecke. Es ist jeweils festzustellen, ob sich die Zugfahrt hin oder weg vom Abstellbahnhof bzw. Umleitungsbeginn bewegt. So ergeben sich:

Fall a) Zugfahrt in Richtung zum Abstellbahnhof/Umleitungsbeginn und

Fall b) Zugfahrt in Gegenrichtung zum Abstellbahnhof/Umleitungsbeginn.

Wenn für jede Seite der Störung nur ein Abstellbahnhof deklariert wurde, können die Fälle a) und b) auftreten. Wenn auf jeder Seite am jeweiligen Ende des verbleibenden Fahrweges ein Abstellbahnhof deklariert wird, ist nur Fall a) zu berücksichtigen. Gibt es zwei bzw. mehrere Abstellbahnhöfe, die aber nicht am Ende liegen, so sind a) und b) zu berücksichtigen. Dabei ist immer der am schnellsten zu erreichende Abstellbahnhof zu wählen. Bei Umleitungen können beide Fälle auftreten.

Im Fall a) ist die Fahrtzeit zu ermitteln. Im Fall b) sind die Fahrzeiten und ggfs. bis zu zwei Wenden entsprechend Modul 1 zu ermitteln.

Aus den je Zug ermittelten Auslegedauern pro Fahrplanminuten ist der maximale Wert als maßgebender Wert M_m für diese Fahrplanminute zu wählen. Da der Störungseintritt zu jeder Fahrplanminute gemäß Unterabschnitt 4.2.2 gleichwahrscheinlich ist, ist anschließend ein Mittel über alle Fahrplanminuten in einem Störungseinflussbereich zu bilden.

Im Folgenden werden die Berechnungsschritte des Algorithmus zur *Ermittlung der mittleren Auslegedauer einer Linie auf einer Seite der Störung* beschrieben. Diese Schritte sind für jede Linie, die von der Maßnahme Ausfall betroffen ist, für jede Seite der Störung durchzuführen.

4.5.6 Ermittlung der mittleren Auslegedauern zum Erreichen der geplanten Zugzahl – Algorithmus

Nachdem im Unterabschnitt Vorgehensweise erläutert wurde, welche Aufgaben der Algorithmus hat und wie der Input verarbeitet wird, um den gewünschten Output zu erreichen, erfolgt hier die formalere Notation der einzelnen Arbeitsschritte. Die Arbeitsschritte erfolgen für jede Zugfahrt mit der Maßnahme Ausfall bzw. mit Abstellung belegte Teilausfälle und für die Umleitungsmaßnahmen. Ziel ist es, eine mittlere Auslegedauer über alle mit dieser Maßnahme adressierten Züge je Störungseinflussbereich zu bilden. Abbildung 4-12 bietet eine Übersicht der Schritte und ihre Zuordnung zu Betriebskonzept, Störungseinflussbereich, Fahrplanminuten und einzelnen Zügen. Anschließend werden die einzelnen Schritte ausdetailliert.

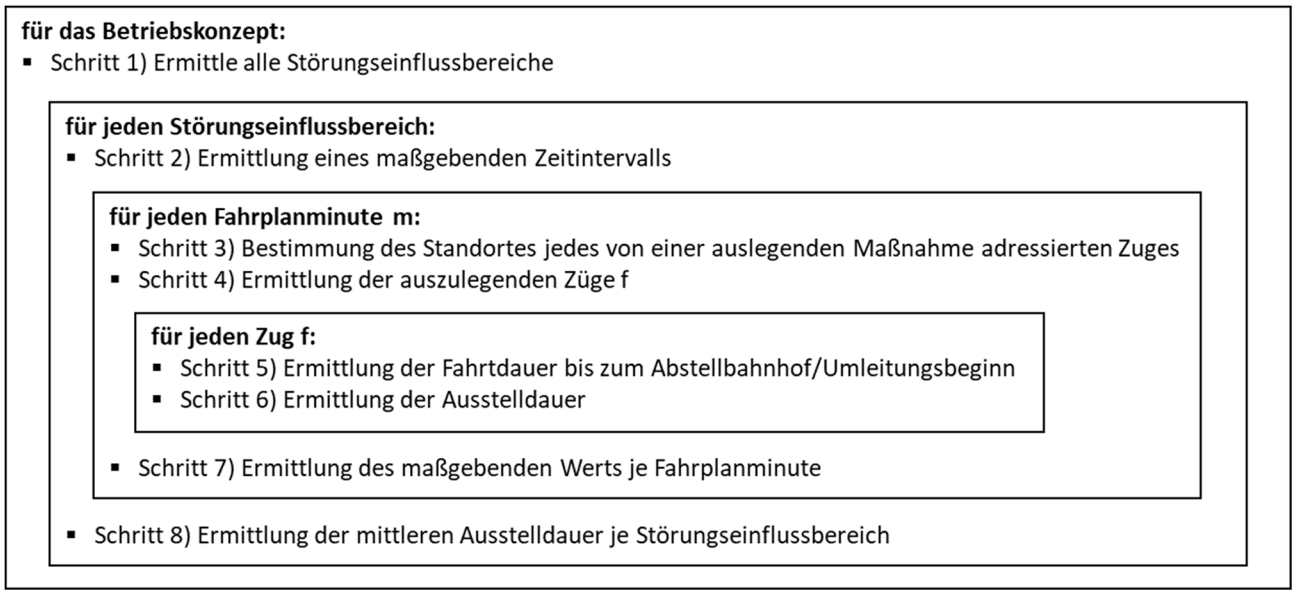


Abbildung 4-12: Übersicht der Schritte zur Ermittlung der mittleren Auslegedauern zum Erreichen der geplanten Zugzahl (eigene Darstellung)

Schritt 1) Ermittle alle Störungseinflussbereiche und führe die folgenden Schritte für jeden Störungseinflussbereich durch.

Störungseinflussbereich = Infrastrukturknoten, die nach Störungseintritt eine

- eingeschränkte Verfügbarkeit der Infrastruktur im Vergleich zum Regelbetrieb aufweisen, und/oder
- die vor einer Kante mit eingeschränkter Verfügbarkeit der Infrastruktur im Vergleich zum Regelbetrieb liegen, und/oder
- erhöhte Belastung durch zusätzliche Belegungszeiten zum Fahrplan des Regelbetriebs erfahren.

Schritt 2) Ermittlung eines maßgebenden Zeitintervalls

1. Aus dem Fahrplan des Regelbetriebs wird das maßgebende Zeitintervall $t_{U,AD}$ erstellt.
2. Bestimme alle Züge mit Abstellungen, alle Züge einer Linie, von denen ein Teil abgestellt werden soll, und alle umzuleitenden Züge in dem maßgebenden Zeitintervall.

Schritt 3) Für jede Fahrplanminute m: Bestimmung des Standortes jedes von einer auslegenden Maßnahme adressierten Zuges

Kategorisiere jeden in Schritt 2) ermittelten Zug anhand seines Standortes bei Störungseintritt entsprechend Unterabschnitt 3.6.2. Rote Züge gelten als ausgelegt.

Schritt 4) Für jede Fahrplanminute m: Ermittlung der auszulegenden Züge f

1. Für Linien, bei denen nur ein Teil der Züge ausgelegt werden soll: Bestimme anhand des Umlaufs im Störfallfahrplan die auszulegenden Züge.
   - Wenn abzüglich der roten Kategorie mehr Züge einer Linie im Netz verfügbar sind, dann sind die nicht im Umlauf benötigten Züge für die Abstellung auszuwählen.
   - Wenn abzüglich der roten Kategorie weniger Züge einer Linie im Netz verfügbar sind, dann ist der Ersteller zu informieren.
   - Dieser muss bestätigen, dass eine Lösung möglich ist, und für diese einen Zeitwert als Inputgröße angeben. Dies kann bspw. eine zusätzliche Bereitstellung oder eine außerplanmäßige Umleitung sein. Zudem kann er auch einen Fahrzeugmangel akzeptieren, eine Maßnahme Ausfall für diesen Zug eintragen und somit das Betriebskonzept anpassen. Der Ersteller kann zudem auch eine Überarbeitung des Betriebskonzepts vornehmen.
2. Für Züge der grünen und gelben Kategorie:
   - Für grüne Züge: Ermittle die Fahrtrichtung und bestimme Fall a) oder b)
   - Für gelbe Züge:
     - Ermittle, ob der Zug in Richtung Störung oder weg von der Störung fährt.
     - Wenn der Zug in Richtung Störung fährt, frage letzte Wendemöglichkeit (bei Ersteller) ab. Ermittle Fahrtrichtung nach Wende und bestimme Fall a) oder b).
     - Wenn der Zug weg von der Störung fährt, ermittle Fahrtrichtung und bestimme Fall a) oder b).

Schritt 5) Für jede Fahrplanminute m und jeden Zug f: Ermittlung der Fahrtdauer $t_{Fahr,ausleg}$ bis zum Abstellbahnhof/Umleitungsbeginn

Ermittle die Fahrtdauer:

Fall a) direkte Fahrt zum Abstellbahnhof möglich: Fahrtdauer vom aktuellen Standort zum Abstellbahnhof/Umleitungsbeginn,

Fall b) keine direkte Fahrt zum Abstellbahnhof möglich: Fahrtdauer vom aktuellen Standort bis zum Wendebahnhof + Wendedauer + Fahrtdauer von Wendebahnhof bis Abstellbahnhof/Umleitungsbeginn.

Die Bestimmung der Wendedauer erfolgt nach Unterabschnitt 4.3.4 g). Hierbei ist zu berücksichtigen, ob der Ersteller Angaben einer Wende auf den Folgetakt mit Passagieren oder als Leerfahrt zur schnelleren Abstellung geplant hat (siehe Unterabschnitt 4.5.3).

Fall a)

$$t_{Fahr,ausleg} = T_{Ankunft,ausleg} - T_{SFP,Beginn}$$

mit:

$t_{Fahr,ausleg}$	Fahrzeit zum Auslegeort,
$T_{Ankunft,ausleg}$	Ankunftszeitpunkt am Auslegeort im Fahrplan des Regelbetriebs und
$T_{SFP,Beginn}$	Zeitpunkt der SFP-Ausrufung.

Fall b)

$$t_{Fahr,Rest1} = T_{Ankunft,Wende} - T_{SFP,Beginn}$$

mit:

$t_{Fahr,Rest1}$	verbleibende Fahrzeit zum SFP-Wendebahnhof,
$T_{Ankunft,Wende}$	Ankunftszeitpunkt am Wendebahnhof im Fahrplan des Regelbetriebs und
$T_{SFP,Beginn}$	Zeitpunkt der SFP-Ausrufung.

$$t_{Fahr,Rest2} = T_{Abfahrt,Wende} - T_{Ankunft,ausleg}$$

mit:

$t_{Fahr,Rest2}$	Fahrzeit vom SFP-Wendebahnhof zum Auslegeort,
$T_{Abfahrt,Wende}$	Abfahrtszeitpunkt am Wendebahnhof im Fahrplan des Regelbetriebs und
$T_{Ankunft,ausleg}$	Ankunftszeitpunkt am Auslegeort im Fahrplan des Regelbetriebs.

Bei Leerfahrt nach Wende:

$$t_{Fahr,ausleg} = t_{Fahr,Rest} + \max\begin{cases} t_{Vb,Wende} \\ t_{min,Wende,SFP} \end{cases} + t_{Fahr,Rest2}$$

mit:

$t_{minWende,SFP}$	Mindestwendedauer am gewählten (SFP-)Wendebahnhof und
$t_{VB,Wende}$	Vorbereitungszeit für Abstellung bei Wende.

Bei Fahrt mit Passagieren nach Wende:

$$t_{Fahr,ausleg} = t_{Fahr,Rest} + t_{min,Wende,SFP} + t_{Fahr,Rest2}.$$

Schritt 6) Für jede Fahrplanminute m und jeden Zug f: Ermittlung der Ausstelldauer

Die spezifische Ausstelldauer $t_{AD,m,f}$ der Fahrt f zu jeder Fahrplanminute m ergibt sich aus der Restfahrzeit zu diesem Zeitpunkt und den (verbleibenden) Vorbereitungszeiten für die Abstellung (gemäß Unterabschnitt 4.3.4 und Anlage 3):

$$t_{AD,m,f} = t_{Fahr,ausleg} + t_{Vb}.$$

Schritt 7) Ermittlung des maßgebenden Werts je Fahrplanminute

Für jede Fahrplanminute m wird aus allen $t_{AD,m,f}$ der maximale Wert aller Fahrten f gewählt und als maßgebender Wert M_m für diese Fahrplanminute festgelegt.

Schritt 8) Für alle Störungseinflussbereiche: Ermittlung der mittleren Ausstelldauer

In jedem Störungseinflussbereich sind die maßgebenden Werte M_m in ihrem Auftreten gleich wahrscheinlich. Deswegen werden sie aufsummiert und durch die Anzahl $m = T_U$ geteilt, um so die mittlere Ausstelldauer für den Störungseinflussbereich zu bestimmen:

$$\overline{t_{AD_{SEB}}} = \frac{1}{t_{U,AD}} \sum_{m=1}^{t_{U,AD}} M_m .$$

Mit dem Modell zur Ermittlung der mittleren Ausstelldauer wird ein gemittelter Wert bestimmt, nach dessen Ablauf davon auszugehen ist, dass die Züge des Betrachtungsraums ausgelegt sind.

4.5.7 Überprüfung des Belegungsgrads in Störungseinflussbereichen – Vorgehensweise

Wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, läuft ein Störfallprogramm stabil, wenn die Züge in der vorgesehenen Anzahl entsprechend den vorgesehenen Maßnahmen planmäßig verkehren. Bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustandes, sind zum einen möglicherweise noch zu viele Züge im System und/oder zum anderen durch die Störung induzierte Verspätungen im System vorhanden.

Wenn Störungseinflussbereiche vorliegen, in denen während der gesamten Einschwingphase der Belegungsgrad ρ größer 1 ist, kann das SFP nicht einschwingen, da konstant eine Warteschlange vorhanden sein wird und daraus Wartezeiten resultieren. Dies ist aber durch die Überprüfung der stabilen Phase nicht dauerhaft der Fall. Wenn es jedoch zu Störungsbeginn auftritt und zu lange anhält, dann wir das Einschwingen verzögert.

Die meisten Wartezeiten entstehen entsprechend Unterabschnitt 2.4 in den ab Modul 4 eingeführten Störungseinflussbereichen. Der Rückstau entsteht, wenn mehr Fahrzeuge in diesem Bereich eintreffen als bedient werden können.

Der Belegungsgrad im Störungseinflussbereich kann sich während der Einschwingphase durch das Auslegen von Fahrzeugen verringern. Für einen Störungseinflussbereich kann somit ein Belegungsgrad zur SFP-Ausrufung und ein Belegungsgrad nach Abschluss des Auslegens $\overline{t_{AD,SEB}}$ (bereits in Modul 3 erfolgt) berechnet werden. Wenn der Belegungsgrad den Richtwert von 1 erreicht hat, so ist davon auszugehen, dass während der Auslegedauer eine Überlastung besteht. Gemäß Unterabschnitt 4.2.2 ist diese Dauer in Relation zur vom Ersteller vorgegebenen Zielfunktion der Einschwingdauer zu bewerten.

4.5.8 Überprüfung des Belegungsgrads in Störungseinflussbereichen – Algorithmus

Nachdem im Unterabschnitt Vorgehensweise erläutert wurde, welche Aufgaben der Algorithmus hat und wie der Input verarbeitet wird, um den gewünschten Output zu erreichen, erfolgt hier die formalere Notation der einzelnen Arbeitsschritte. Die Arbeitsschritte erfolgen für jeden Störungseinflussbereich mit dem Ziel, eine mögliche langanhaltende Überlastung zu erkennen.

Für jeden Störungseinflussbereich SEB_1 bis SEB_n

Der Belegungsgrad im Störungseinflussbereich zu Störungsbeginn wird für eine in der Einschwingphase möglicherweise auftretende Maximalbelastung ermittelt. Er bezieht sich somit auf alle Züge des Regelbetriebs und die durch Maßnahmen zusätzlich zugeordneten Züge, die dann ggfs. nur eine eingeschränkte Infrastruktur nutzen können:

$$\rho = \frac{\overline{z} \cdot n}{t_u}.$$

Somit ergibt sich für die mittlere Mindestzugfolgezeit eine Berechnung unter Verwendung der neuen Sperrzeiten der Züge durch Wenden, Abstellungen, Umleitungen und/oder entstandene Eingleisigkeit, die wie auch in Modul 2 in einer bestehenden Software ermittelt werden kann. Dabei gilt für die maximale Zuganzahl, dass alle Zugfahrten aus dem Fahrplan des Regelbetriebes und die im Störfallfahrplan neu hinzukommenden Zugfahrten in die Betrachtung miteingehen.

Wenn der Belegungsgrad den Richtwert überschreitet, so ist die Bewertung der mittleren Ausstelldauer relevant für die Einschätzung der Einschwingfähigkeit.

Bewertung der mittleren Ausstelldauer

Für die Störungseinflussbereiche mit $\rho \geq 1$:

$$t_{AD_{SEB}} < e \cdot t_{vorgebED}$$

mit:

e	Parameter für den Anteil der Ausstelldauer an der vorgegebenen Einschwingdauer und
$t_{vorgebED}$	vorgegebene Einschwingdauer.

Für die Störungseinflussbereiche mit $\rho < 1$:

$$t_{AD_{SEB}} \leq t_{vorgebED}.$$

Wenn diese Bewertungsbedingungen nicht eingehalten werden, kann davon ausgegangen werden, dass das Einschwingen nicht in der vorgegebenen Dauer machbar ist. Es ist somit eine interaktive Überarbeitung durch den Ersteller auszulösen.

4.5.9 Zusammenfassung

In Modul 4 erfolgt eine simple Überprüfung der Einschwingfähigkeit des Störfallprogramms durch die Betrachtung der Machbarkeit der Zugzahlreduktion und der Ermittlung deren Dauer sowie einer Belegungsgradrechnung für den direkten Störungsraum während der Einschwingphase. Wenn diese Überprüfung keine Ausschlusskriterien aufzeigt, kann anschließend die Einschwingdauer ermittelt und bewertet werden.

Dieses Modul ermittelt somit nicht, ob das Einschwingen sicher machbar ist, sondern ob Ausschlusskriterien vorliegen, die ein Einschwingen verhindern können. Hierzu gehören das Nicht-Erreichen der angestrebten Zuganzahl (in angemessener Dauer) und eine konstante Überlastung der Infrastruktur im direkten Störungsraum. Diese schnellen Rückmeldungen ermöglichen dem Ersteller eine Anpassung seiner Maßnahmen, bevor nun im Anschluss die Einschwingdauer unter Betrachtung aller Zugfahrten detailliert ermittelt wird.

4.6 Modul 5: Ermittlung der mittleren Einschwingdauer

4.6.1 Einleitung

Ziel des Moduls 5 ist die Ermittlung der Einschwingdauer, gemäß Unterabschnitt 2.3.2 der Zeitraum zwischen SFP-Ausrufung und dem Beginn der stabilen Phase, um somit entsprechend der angestrebten Bewertung in Unterabschnitt 4.2.2 einen Qualitätsmaßstab für die Einschwingphase und das Betriebskonzept zu ermitteln.

Der Input ist das geprüfte Betriebskonzept und das Ergebnis ist die mittlere Einschwingdauer für das Betriebskonzept.

Durch eine Weiterentwicklung des Einschwingmodells von Chu (2014) (siehe Abschnitt 2.4) entsprechend der Aufgabenstellung (siehe Abschnitt 3.1) wird für das Betriebskonzept eine Einschwingfähigkeit in angemessener Dauer sichergestellt und somit ein in der stabilen Phase funktionsfähiges Betriebskonzept bewertet.

4.6.2 Methode

Unter Berücksichtigung der Anforderungen (siehe Abschnitt 3.3) ergeben sich für die Ermittlung der Methode zur Ermittlung der Einschwingdauer folgende Randbedingungen:

- Schnelligkeit: Die Problemgröße von eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen, die die Konflikte und Verspätungsentwicklung miteinbeziehen, ist nach Unterabschnitt 2.2.5 klassischerweise NP-schwer. Es ist somit eine Einschränkung der Problemgröße nach Unterabschnitt 2.2.5 anzuwenden.
- Vollständigkeit: Um trotz notwendiger Einschränkung der Problemgröße eine sinnvolle für das gesamte Netz gültige Lösung zu generieren, ist bei der Entwicklung der Methode auf den für die Einschwingdauer kritischen Bereich zu achten und dieser möglichst vollständig abzubilden.
- nachvollziehbar und objektiv: Um die Einschätzung der Bewertung und die interaktive Überarbeitung durch den Ersteller zu unterstützen, ist eine transparente Darstellung der Probleme im Gesamtsystem notwendig, wenn die Einschwingdauer zu hoch werden sollte. Diese sollte ermöglichen, dass der Ersteller Rückschlüsse auf die Maßnahmen ziehen kann.

Das weiterzuentwickelnde Modell von Chu ermittelt einen Verspätungsabbau deterministisch (siehe Abschnitt 2.4). Um den verwendeten Abbau über die Anzahl der Umläufe abzubilden, ist aber zunächst eine Verspätung zu ermitteln, die abzubauen ist. Für die Bestimmung einer Inputgröße der „abzubauenden Verspätung“ wird in der Arbeit von Chu (2014) kein Vorgehen erstellt, sondern nur auf eine Summe aus vor der Störung bestehender Verspätung und der durch den Störfall entstehenden Ur- oder Zusatzverspätung verwiesen. In der Planung ist eine Verspätung aus dem Betrieb nicht bekannt. Daher wird in dieser Arbeit, gemäß Abschnitt 4.2, die Planmäßigkeit angestrebt und ein Verspätungsrauschen vor und nach dem Störfall als gegeben und akzeptabel angesehen.

Das Vorgehen von Chu (2014) ist, entsprechend den Erkenntnissen in Abschnitt 2.4, nicht direkt verwendbar für die Ermittlung einer Einschwingdauer eines geplanten Betriebskonzepts in der Planung. Es ist somit eine Methode zu erarbeiten, die die Anforderungen erfüllt und eine Anschlussfähigkeit an den von Chu vorgeschlagenen deterministischen Abbau der Verspätungen ermöglicht. Deterministisch bedeutet, dass der Zug in Abhängigkeit des vorliegenden Fahrplans und seiner Umläufe verfolgt wird. Da hierbei aber auch weitere Möglichkeiten, wie bspw. ein Linientausch zu berücksichtigen sind, ist das Vorgehen zum Abbau der Verspätungen anzupassen, sodass entsprechend der Maßnahmen konstruktiv-deterministisch vorgeht und nicht nur eine pauschale Umlaufdauer ermittelt.

Es ist somit zunächst zu ermitteln, was eine Verspätung eines Zuges in der Einschwingphase auslösen kann. Entsprechend den Abschnitte 2.4 und den Modulen 2 - 4 sind hierbei besonders die Position des Zuges im Netz bei Störungseintritt (Kategorien grün, gelb oder rot, siehe Unterabschnitt 3.6.2) sowie die Auslastung der Haltestellen und Wendebahnhöfe relevant.

Methode zur Ermittlung des Verspätungsaufbaus nach Störungseintritt

Es besteht der Bedarf eines Ausgangswertes für den konstruktiv-deterministischen Verspätungsabbau. Da der Abbau zugabhängig erfolgt, ist zunächst die abzubauende Verspätung eines Zugs zu ermitteln. Diese Verspätung entsteht zu Störungsbeginn und im Verlauf der Einschwingphase, wenn der Zug auf einen Störungseinflussbereich (siehe Unterabschnitt 4.5.2) zufährt und somit möglicherweise eine beim Einschwingen entstehende Wartezeit t_W erhält.

Da Fahrpläne vorliegen sind sowohl fahrplanunabhängige als auch fahrplanabhängige Methoden zur Betrachtung der Leistungsfähigkeit (siehe Unterabschnitt 2.2.4) möglich. Bei Anwendung einer *analytischen* Methode kann die Verspätung eines Zuges anhand der Warteschlangentheorie und der Ermittlung einer Wartewahrscheinlichkeit bestimmt werden. Gemäß Unterabschnitt 4.2.2 wirkt sich die Reihenfolge der Züge auf die entstehenden Verspätungen aus. Die unterschiedlichen Wendedauern und maßnahmeninduzierten Wartezeiten im Störfallfahrplan sind Bestandteil der Bedienzeiten. Je nach Störungszeitpunkt und vorliegender Reihenfolge der Züge ergeben variierende Ankunftsabstände. Auch wenn es sich bei der analytischen Methode um ein fahrplanunabhängiges Verfahren handelt, sollte die Reihenfolge der Züge berücksichtigt werden, sodass eine fahrplanminutengenaue Ermittlung der Warteschlange in Abhängigkeit des Zeitpunkts des Störungseintritts möglich wird.

Bei der *statistisch-deterministischen* Methode kann eine Auswertung von Verspätungsdaten zu dem geplanten Störfall vorgenommen werden, sodass eine Aussage zur Verspätungshöhe eines einzelnen Zuges möglich wird. Dabei muss der Störfall wie im Störfallprogramm geplant aufgetreten sein und der geplante Störfallfahrplan müsste angewendet worden sein.

Bei Anwendung der *konstruktiven* Methode können die Züge und ihre Zeiten kontinuierlich fortgeschrieben werden. Dabei würden die Einflüsse durch andere Züge in den Störungseinflussbereichen in Abhängigkeit der Belegungszeiten berücksichtigt und resultierende Wartezeiten einem einzelnen Zug zugeordnet werden. Der Laufweg des Zuges würde somit kontinuierlich zwischen den beiden (SFP-)Wendebahnhöfen unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen konstruiert werden.

Eine *Simulation* kann den Fahrplan und den Störungseintritt nachbilden, erfordert dafür aber die Anschaffung geeigneter Software. Es kann somit bspw. auch hinterlegt werden, wie die Züge bei mehreren Gleisen im Knoten bedient werden. Hierfür existiert aber durch Crespo Materna (2020) bereits ein Algorithmus, der für die Anwendung im Rahmen eines SFPs entwickelt wurde. Zudem könnte auch der Verspätungsabbau simuliert werden, für den aber nach Chu (2014) bereits ein Ansatz besteht, der sich zur Weiterentwicklung eignet. In einer Störung können zudem zufällige Ereignisse, wie bspw. ein allgemeines Verspätungsrauschen des Betriebs, abgebildet werden.

Bei der analytischen Methode zur Ermittlung der Verspätung wird zunächst fahrplanunabhängig vorgegangen, für den Abbau wird dann aber ein konstruktiv-deterministisches, vom Störfallfahrplan abhängiges Verfahren verwendet. Zudem sind aus Modul 4 Ergebnisse zur Auslegedauer und somit einer veränderten Auslastung zu verarbeiten, was zu einer Veränderung der Inputgrößen im analytischen Modell führt. Beides kann zu Inkonsistenzen führen. Durch das Vorliegen eines Fahrplans und der Betrachtung eines eher kleinen Untersuchungszeitraum ist eine fahrplanunabhängige Methode nicht zwingend notwendig.

Für eine statistisch-deterministische Ermittlung der Verspätungswertes kann erneut die Arbeit von Chu (2014) herangezogen werden. In der Arbeit wurden Störfalldaten zusammengetragen und ausgewertet, aber es wurde kein für den Verspätungsabbau anzusetzender Wert ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass es für den jeweiligen Störfall nicht ausreichend viele Daten gibt, sodass sich kein

pauschaler Verspätungswert für einen Zug oder zumindest eine Linie daraus ableiten lässt. Zudem ist bei den Daten auch nicht bekannt, welche dispositiven Eingriffe den Betrieb nach Störungseintritt beeinflusst haben. Daher ist die statistisch-deterministische Methode zur Ermittlung einer Verspätungshöhe in der Einschwingphase nicht möglich.

Die konstruktive Methode ermöglicht eine zuggenaue Betrachtung in Abhängigkeit des Fahrplans des Regelbetriebs zu Störungsbeginn und der anschließenden Umsetzung des Störfallfahrplans. Dabei können die in Modul 4 definierten Störungseinflussbereiche und somit auch ein mehrfacher Verspätungsaufbau berücksichtigt werden. Neben den Störungseinflussbereichen kann die fahrplanminutengenaue Diskretisierung aus Modul 4 fortgeführt werden und so eine Konsistenz innerhalb der Arbeit ermöglicht werden.

Die weiteren Möglichkeiten der Simulation sind entsprechend der Zielsetzung nicht notwendig. Daher wird von dem Aufwand der Anschaffung und Spezifizierung einer zusätzlichen Software abgesehen.

Es wird somit im Weiteren je Zug der Verspätungsaufbau konstruktiv und anschließend der Verspätungsabbau konstruktiv-deterministisch basierend auf Chu (2014) ermittelt.

Methode zur Ermittlung der Einschwingdauer des Störfallprogramms

Die *Auslastung* und ihre Auswirkungen entstehen maßgebend in den unter Modul 4 (siehe Unterabschnitt 4.5.2) definierten Störungseinflussbereichen. Für jeden Störungseinflussbereich ist somit die Einschwingdauer zu ermitteln, wobei jeweils die Wechselwirkung eines anderen Störungseinflussbereichs zu berücksichtigen ist.

Gemäß Abschnitt 4.2 ist der Zeitpunkt des *Störungseintritts* zu jeder Minute gleichwahrscheinlich. Da der Störungszeitpunkt rein zufällig eintritt, kann zu jeder Minute ein anderes Szenario mit einer anderen Linie das vorderste Fahrzeug in der Warteschlange bilden. Dessen Bedienung hat einen Einfluss auf den Aufbau einer Warteschlange und die Verspätungen der anderen Fahrzeuge.

Es ist somit für jede Minute eines möglichen Störungseintritts die Einschwingdauer zu ermitteln. Hierzu können die aus Modul 4 (siehe auch Abschnitt 4.2) bekannten Fahrplanminuten verwendet werden. Der Zug, der am längsten zum Einschwingen braucht in der jeweiligen Fahrplanminute m, ist maßgebend für diese Fahrplanminute. Die mittlere Einschwingdauer ergibt sich über alle Fahrplanminuten.

Alle Fahrplanminuten des Untersuchungszeitraums stellen einen sehr umfassenden Betrachtungszeitraum dar. Um der Anforderung der geringen Rechenzeit (siehe Abschnitt 3.3 (a2)) gerecht zu werden, ist hier eine Einschränkung zu prüfen. Da der Schienenpersonennahverkehr sehr vertaktet ist, wiederholen sich die gleichen Konstellationen klassischerweise im Grundtakt als maßgebendes Zeitintervall. Die Rechenzeit lässt sich reduzieren, indem der Grundtakt betrachtet wird, der dann maßgebend für die Ermittlung der Einschwingdauer wird.

Für jeden Störungseinflussbereich sind dann im Zeitraum der maßgebende(n) Stunde(n) alle Fahrplanminuten und Züge einzeln zur Ermittlung der Einschwingdauer konstruktiv-deterministisch zu betrachten.

Zu den zu betrachtenden Fahrzeugen gehören Fahrten des Regelbetriebs, die sich bei Störungseintritt in einem Störungseinflussbereich und im Zulauf darauf befinden. Diese lassen sich wie folgt unterscheiden:

- Fahrzeuge, die im stabilen SFP auf dieser Strecke verkehren (grüne Züge), und
- Fahrzeuge, die während des Einschwingens auf dieser Strecke verkehren, bevor sie abgestellt oder umgeleitet werden (gelbe Züge).

Fahrzeuge der Kategorie rot, die sich im unmittelbaren Störbereich hinter der letzten Wendemöglichkeit befinden, finden hier keine weitere Betrachtung, da sie Gegenstand spezieller Dispositionsmaßnahmen sind, die stark fallabhängig sind und daher nicht vorgeplant werden.

Für die Fahrzeuge der Kategorie grün und gelb (siehe Unterabschnitt 3.6.2) ist jeweils eine Integration in das Störfallprogramm möglich, sodass sie im Modell betrachtet werden.

Das Modell dient der Bewertung der Planung. Daher bleiben die Züge in ihrer geplanten Reihenfolge und es findet keine Konfliktlösung außer Warten statt, da die Konflikte je nach Fahrplanminute anders auftreten und andere Lösungen benötigen. Die Optimierung kann dann bei Anwendung des SFP stattfinden.

Methode zur Ermittlung der Einschwingdauer eines Zuges und eines Störungseinflussbereichs

Je nach Fahrplanminute kann eine andere Linie den ersten Zug stellen, der auf einen Störungseinflussbereich zufährt und einen Verfügbarkeitskonflikt durch die nicht mehr oder nur eingeschränkt verfügbare Infrastruktur erfährt.

Hierfür wird für die betrachtete Fahrplanminute m das vorderste Fahrzeug betrachtet, das sich am nächsten zur letzten Wendemöglichkeit vor der Störung befindet. Wenn sich in diesem Knoten zwei Fahrzeuge befinden, so handelt es sich dabei um das Fahrzeug, das nach Fahrplan des Regelbetriebs als erstes in Richtung des Störungsortes fahren würde.

Um die ggfs. entstehende Warteschlange zu berücksichtigen, ist zudem die Erkennung eines Belegungskonfliktes des ersten Zuges mit dem folgenden Zug und Folgekonflikten notwendig. Der Ablauf des Betriebs erfolgt hierbei entsprechend dem Fahrplan ohne eine Konfliktlösung, die die Situation verbessert, also den Verspätungsaufbau mindert. Belegungskonflikte können auf der Infrastrukturkante und im Infrastrukturknoten entstehen. Gemäß Unterabschnitt 2.4 entstehen die Verspätungen maßgebend in Infrastrukturknoten, die zur Wende oder als Umleitungsbeginn genutzt werden. Um der Anforderung an eine geringe Rechenzeit (siehe Abschnitt 3.3 (a2)) nachzukommen, bleibt daher der problemadäquate Fokus auf die Störungseinflussbereiche erhalten und ggfs. auf Infrastrukturkanten entstehende Belegungskonflikte bleiben unberücksichtigt.

Manche Störungseinflussbereiche entstehen unabhängig von dem Infrastrukturverfügbarkeitskonflikt durch die Störung. Diese Warteschlangen entstehen durch die Belegungskonflikte in der Einschwingphase. Die Warteschlange entsteht somit – wenn überhaupt – erst mit der Ausrufung des Störfallprogramms.

Verspätungsabbau ist dann möglich, wenn die Zugfahrt keine weiteren Belegungskonflikte zu ihrem Nachteil erfährt. Diese können durch andere Störungseinflussbereiche, Belegungskonflikte durch verspätete Ankunft am Endbahnhof oder durch erneute Belegungskonflikte am SFP-Wendebahnhof entstehen.

Wenn keine Belegungskonflikte mehr auftreten, können die bestehenden Verspätungen abgebaut werden. Sollte dies nicht eintreten, ist das Betriebskonzept nicht einschwingfähig, da sich eine unendliche Einschwingdauer ergeben würde.

Gemäß Abschnitt 4.2 ist der Störungseintritt zu jeder Minute gleichwahrscheinlich, daher wird über alle Fahrplanminuten eines Störungseinflussbereichs die mittlere Einschwingdauer bestimmt. Da das Störfallprogramm erst eingeschwungen ist, wenn alle Züge planmäßig verkehren, ist der maßgebende Störungseinflussbereich über Maximalbildung zu ermitteln. Dessen mittlere Einschwingdauer kann für das Betriebskonzept angesetzt und bewertet werden.

In der Planung eines SFP erfolgt die Ermittlung der Einschwingdauer somit als gemitteltes Worst-Case-Szenario. Bei der Durchführung eines SFP können neben den Wendepuffern auch weitere Möglichkeiten zum schnelleren Verspätungsaufbau in Abhängigkeit der Betriebslage und Infrastrukturverfügbarkeit angewendet werden. Neben den Entscheidungen der Disponenten wurden von Crespo Materna (2020) Algorithmen, die das Einschwingen weiter vereinfachen und verkürzen sollen, ermittelt. Dies ist nicht Bestandteil der Planung (siehe Abschnitt 3.2).

Zusammenfassung

Die Ermittlung der Einschwingdauer erfolgt somit deterministisch, sowohl für den Verspätungsauf- als auch -abbau. Dabei wird für jeden Zug die Verspätung ermittelt und weiterbetrachtet, bis sie abgebaut ist. Die Ermittlung der Einschwingdauer erfolgt dabei für jeden Störungseinflussbereich über alle Fahrplanminuten eines maßgebenden Zeitintervalls, die für den Störungseinflussbereich gemittelt werden. Anschließend wird über Maximalbildung der für die Einschwingdauer maßgebende Störungseinflussbereich ermittelt und bewertet. Die Ermittlung der maßgebenden Einschwingdauer erfolgt jeweils in drei Phasen, die nun im Folgenden mit einer Vorgehensweise ergänzt werden.

4.6.3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise soll die Ermittlung der mittleren Einschwingdauer je Störungseinflussbereich ermöglichen. Gemäß Abschnitt 2.4 ist der Hauptverursacher von Verspätungen die SFP-Wende. Der dadurch entstehende Rückstau ist somit der kritischste Störungseinflussbereich, der meist am letzten nutzbaren Verkehrsknoten vor der Störung als SFP-Wendebahnhof verortet wird. Dieser wird daher im Folgenden als Referenz verwendet. Die Vorgehensweise bleibt bei einem anderen Störungseinflussbereich unberührt, ist allgemeingültig und nur durch Angleichung der relevanten Zeitbedarfe entsprechend Modul 1 bis 4 anzupassen.

Grüne Züge sind während der gesamten Einschwingphase Bestandteil der Betrachtung. Gelbe Züge, die abgestellt oder umgeleitet werden, befinden sich nur während eines Teils der Einschwingdauer – bis zur erfolgreichen Umsetzung der geplanten betrieblichen Maßnahme – im Störungseinflussbereich.

Wenn im Störungseinflussbereich Züge verkehren, die im Laufe des Einschwingens abgestellt werden oder laut Störfallfahrplan eigentlich auf einer Umleitung verkehren, so sind diese zunächst gelbe Züge und ggfs. Bestandteil einer Warteschlange. Bis zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung verkehren die umzuleitenden Fahrzeuge auf ihrem Regelweg. Anschließend sind abzustellende Züge zum nächstgelegenen Abstellbahnhof bzw. umzuleitende Züge auf die Umleitung zu fahren. Wenn dies abgeschlossen ist, sind diese Züge, gemäß Unterabschnitt 3.6.2, grüne Züge.

Die Bedienung der gelben Züge im Störungseinflussbereich findet somit während der Ermittlungs- und Entscheidungsphase und auch für einen gewissen Zeitraum darüber hinaus statt. Diese wenden entsprechend dem Vorgehen der anderen Fahrzeuge am SFP-Wendebahnhof und fahren ggfs. nach erneuter Wende am Start- bzw. Endbahnhof anschließend in die Abstellung oder auf der Umleitung. Bis

die Fahrzeuge diesen im Betriebskonzept durch die Maßnahme zugewiesenen Ort erreicht haben, werden sie wie die anderen Fahrzeuge als Bestandteil der Warteschlange behandelt.

Hierzu wird das Modell zur mittleren Auslegedauer im Störungseinflussbereich aus Modul 4 verwendet.

Bereits während der Ermittlungs- und Entscheidungsphase entstehen durch die unklare betriebliche Lage, beginnend mit dem vordersten Fahrzeug, Verspätungen, die einen Rückstau vor der Störung und somit eine Warteschlange erzeugen können (siehe auch Abschnitt 2.4 und Modul 4).

Diese sind für jeden in Modul 4 bestimmten Störungseinflussbereich fahrplanminutengenau zu betrachten. Dies bedeutet, dass im maßgebenden Zeitintervall jede Minute den Störungseintritt darstellen kann. Jede Fahrplanminute wird somit für einen möglichen Störungseintritt ausgewählt und die Einschwingdauer für diese Fahrplanminute ermittelt. Es ergibt sich für die Betrachtung jeder Fahrplanminute eine Aufteilung in folgende Phasen:

1. Verspätungsentwicklung des ersten Zuges während der Ermittlungs- und Entscheidungsphase,
2. Verspätungsentwicklung durch Staueffekte vor Störungseinflussbereichen und
3. Abbau der Verspätungen sowie Ermittlung der Einschwingdauer.

Für jede Fahrplanminute: Phase 1: Verspätungsentwicklung des ersten Zuges während der Ermittlungs- und Entscheidungsphase (gilt nur für den Störungseinflussbereich SFP-Wendebahnhof vor der Störung)

Der erste Zug kommt mit Störungsbeginn bzw. spätestens mit dem Erreichen der letzten Wendemöglichkeit vor dem Störungsort zum Halt und kann erst mit Beginn des SFP und der damit einhergehenden Entscheidung über das weitere Vorgehen weiterfahren.

Ermittlung der Submodule für die Phase 1

Für den Zeitpunkt des Störungseintritts ist der erste Zug zu bestimmen, der durch die Disposition bearbeitet werden kann und somit nicht einem roten Zug entspricht.

→ Submodul 1.1: Ermittle den vordersten Zug laut Regelfahrplan.

Um die Wende zu bestimmen, ist es notwendig, zu wissen, ob der Zug entsprechend dem Störfallfahrplan (grüner Zug) gewendet werden kann oder der Disponent darüber zu entscheiden hat (gelber Zug). Dazu ist der erste Zug der grünen oder gelben Kategorien zuzuordnen. Grüner und gelber Bereich des Zuges ergeben sich aus der im Störfallfahrplan zugeordneten betrieblichen Maßnahme und den deklarierten SFP-Wendebahnhöfen. Diese sind mit dem Zugstandort bei Störungseintritt abzugleichen.

→ Submodul 1.2: Definiere den gelben und den grünen Bereich des vordersten Zuges.

Zum Ende der Ermittlungs- und Entscheidungsphase steht der erste Zug mit grüner Kategorie bereits wartend im Wendebahnhof oder fährt noch zum Wendebahnhof, wenn die verbleibende Fahrzeit sehr groß war oder die Ermittlungs- oder Entscheidungsphase sehr klein angenommen wird.

Wenn der Zug bereits wartet, kann zum Zeitpunkt des Endes der Ermittlungs- und Entscheidungsphase die Wende beginnen. Hierzu ist zu ermitteln, auf welche Zugnummer gewendet werden soll. In Abhängigkeit der geplanten Abfahrtzeiten der Gegenrichtung und der Mindestwendedauer ist zu entscheiden, ob der Zug mit negativer Wende verspätet abfährt oder auf den nächsten Takt planmäßig positiv wendet.

Bei der negativen Wende ist es von Vorteil, dass die Belegungszeit reduziert wird. Nachteilig ist, dass der Zug mit einer Verspätung abfährt. Bei der positiven Wende ist es von Vorteil, dass der Zug planmäßig abfährt. Nachteilig ist, dass es dabei die lange Belegungszeit ggfs. das Entstehen einer Warteschlange weiter fördert.

Negative Wenden führen zu verspäteten Abfahrten und sind daher nicht immer empfehlenswert. Die Entscheidung wird aber nicht entsprechend eines Grundsatzes getroffen, sondern in der Regel wird taktabhängig entschieden. Meist kann ein geringer Verspätungswert durch eine negative Wende als akzeptabel angesehen werden bzw. es ist abzuwägen, ob die Höhe der Verspätung zeitnah abgebaut werden kann oder diese Zugfahrt besser ausfällt und eine Wende auf die nächste Leistung zu planen ist. Dieser Wert wird somit im Weiteren als Parameter für eine Entscheidung durch den Algorithmus eingebaut und kann durch den Ersteller abweichend eingestellt werden.

Sobald durch das Warten auf den nächsten Takt ein Konflikt mit einem nachfolgenden Zug entsteht, ist der Ersteller zu informieren und dieser kann die netztypische Entscheidung der lokalen Disponenten zur realitätsnahen Entscheidung eingeben.

Abhängig von der Entscheidung über eine negative oder positive Wende kann der Abfahrtszeitpunkt des ersten Zuges inkl. zugehöriger Verspätung für grün kategorisierte Fahrzeuge ermittelt werden.

→ Submodul 1.2.1: grüne Züge: Bestimme Abfahrtszeitpunkt nach Wende.

Bei einem ersten Zug gelber Kategorie erfolgt die Wende nicht im deklarierten SFP-Wendebahnhof, sodass das Vorgehen der grünen Kategorie zu erweitern ist. Ggfs. benötigt die Wende zusätzliche betriebliche Maßnahmen wie Rangieren oder Gleiswechsel, sodass die Züge evtl. nicht mit der im Störfallfahrplan angesetzten Mindestwendedauer am gewählten (SFP-)Wendebahnhof gewendet werden können. Je nach Betriebsstelle sind die Gegebenheiten sehr unterschiedlich und zudem abhängig von den Entscheidungen des EIU.

Hierbei ist daher auf das Modulsystem von Crespo (2020) (siehe auch Abschnitt 2.4) zu verweisen, das sich explizit mit der (teil-)automatisierten Entscheidungsunterstützung der Disposition bei Anwendung eines Störfallprogramms befasst. Neben der Ermittlung der Wendedauer ist zudem zu entscheiden, ob bereits folgende Fahrzeuge, die am vorgelagerten SFP-Wendebahnhof wenden, zuerst die Gegenrichtung befahren oder die Wende des Zuges der gelben Kategorie abwarten. Zur Planung der Wende und der Ermittlung der Wendedauer können die Algorithmen von Crespo (2020) als externes Modul implementiert werden, da diese bestimmen, wie der Zug behandelt werden soll, und dazu auch die Modellierung der Infrastruktur berücksichtigen, um besonders zeitsparende Ergebnisse zu ermitteln, oder es kann eine Entscheidung durch den Ersteller eingefordert werden.

→ Submodul 1.2.2: gelbe Züge: Bestimme Abfahrtszeitpunkt nach Wende.

Nach Phase 1 ist bekannt, wie lange der erste Zug den Wendebahnhof belegt und mit welcher Verspätung er diesen verlässt. Somit können nun in Phase 2 die folgenden Züge nachrücken und somit auch in die Betrachtung aufgenommen werden.

Für jede Fahrplanminute zeitgleich für alle Züge im Störungseinflussbereich durchführen: Phase 2: Verspätungszuwachs durch Staueffekte vor dem Störungseinflussbereich und deren Entwicklung

In Abhängigkeit der Verspätung des ersten Fahrzeugs und dessen Bedienung im Wendebahnhof kann eine Warteschlange entstehen. Die Fahrzeuge in der Warteschlange erhalten ggfs. eine Verspätung, die

vor Einfahrt in den Wendebahnhof entsteht, und verlassen diesen je nach Art der Wende – positiv oder negativ – auch wieder mit einer Verspätung.

Wenn ein Zug bei Abfahrt nach der Wende einen Verspätungsaufbau aufweist, muss weiterhin ein möglicher Verspätungsaufbau überprüft werden. Dieser kann durch andere oder denselben Störungseinflussbereich erzeugt werden. Wenn andere Störungseinflussbereiche auf dem Laufweg vorhanden sind, ist auch für einen Zug, der den SFP-Wendebahnhof zunächst verspätungsfrei verlassen hat, sicherzustellen, dass dieser nicht an anderer Stelle durch Belegungskonflikte verspätetet wird.

Entsprechend Unterabschnitt 4.6.2 beginnt der reine Verspätungsabbau (Phase 3), wenn keine weiteren Belegungskonflikte bei der Einfahrt in den Störungseinflussbereich auftreten. Diese Bedingung bedeutet, dass, wenn ein Zug in alle durchfahrenden Störungseinflussbereiche ohne Verspätungszunahme einfahren konnte, davon auszugehen ist, dass keine Warteschlangen mehr bestehen. Dies stellt dann das Ende der Phase 2 dar.

Im Folgenden werden nun die einzelnen Submodule zur Durchführung der Phase 2 ermittelt.

Ermittlung der Submodule für Phase 2

Die Betrachtung der Züge, die in einer Warteschlange auf Bedienung warten, beginnt ebenso mit Störungseintritt in der Fahrplanminute m, allerdings hängt ihre weitere Bedienung von der Bedienung des ersten Zuges in Phase 1 ab. Die dem ersten Zug folgenden Züge sind anhand des Fahrplans des Regelbetriebs zu ermitteln. Sie nutzen die gleichen Infrastrukturkanten und -knoten, lediglich zeitlich versetzt.

Wenn im Knoten mehr als ein Gleis zur Wende zur Verfügung steht, ist über die Reihenfolge bei Einlass in den Wendebahnhof und die dortige Zuordnung zu den Gleisen zu entscheiden. Dies wurde bereits für die Anwendung eines Störfallprogramms in der Einschwingphase durch Crespo Materna (2020) adressiert und ist ebenso wie die Behandlung der gelben Züge als externes Modul einzubauen.

Zunächst entsteht bei den folgenden Fahrzeugen aber auch ggfs. eine Verspätung durch die Ermittlungs- und Entscheidungsphase. Dabei rücken sie so nahe wie möglich an die Störung heran.

> → Submodul 2.1: Ermittlung der Verspätung der nachfolgenden Fahrzeuge nach Ablauf der Ermittlungs- und Entscheidungsphase.

Der früheste Zeitpunkt, an dem die folgenden Züge weiterfahren können, ist die SFP-Ausrufung. Da diese aber ggfs. einen Belegungskonflikt mit dem ersten bzw. dem vorherigen Zug haben, sind sie von dessen Bedienung abhängig. In diesem Fall entsteht eine weitere Wartezeit zu der aus der Ermittlungs- und Entscheidungsphase. Bei SFP-Ausrufung können die Fahrzeuge weiterfahren. Wenn ein Belegungskonflikt besteht, müssen sie auf Einfahrt in den Wendebahnhof warten. Der Abfahrtszeitpunkt der Weiterfahrt nach der Ermittlungs- und Entscheidungsphase hängt somit vom Zeitpunkt der SFP-Ausrufung ab. Der Ankunftszeitpunkt im SFP-Wendebahnhof ist im besten Fall die Fahrzeit dahin. Bei einem Belegungskonflikt ist die Fahrzeit um die verbleibende Sperrzeit des vorherigen Zuges bei Ankunft am Einfahrsignal des folgenden Zuges zu erweitern.

> → Submodul 2.2: Ermittlung des Zeitpunkts der Weiterfahrt der nachfolgenden Fahrzeuge nach SFP-Ausrufung und der Ankunft am SFP-Wendebahnhof.

Bei Erreichen des Wendebahnhofs werden analog dem Vorgehen in Submodul 1.2.1 die Wende und der Abfahrtszeitpunkt am SFP-Wendebahnhof für den Zug bestimmt.

> → Submodul 2.3: Ermittlung der Verspätungshöhe nach der Wende am SFP-Wendebahnhof vor der Störung.

Nach der Wende am SFP-Wendebahnhof fährt die Linie zurück zum Start-/Endbahnhof. Auf dem Laufweg dorthin oder auf dem Laufweg vom Start-/Endbahnhof zum Wendebahnhof könnten ggfs. andere Störungseinflussbereiche, die Belegungskonflikte und Verspätungen erzeugen, durchfahren werden.

Die bisher erarbeiteten zu nutzenden Submodule in Phase 2 dienten der Beschreibung für jeden folgenden Zug. Die Fahrt nach der Wende und mögliche Konflikte in weiteren Störungseinflussbereichen betreffen auch den ersten Zug. Ab Submodul 2.4 ist das weitere Vorgehen sowohl für den ersten Zug als auch für die folgenden Züge anzuwenden.

> → Submodul 2.4: Überprüfung, ob weitere Störungseinflussbereiche durchfahren werden.

Zunächst verlässt der Zug mit der ermittelten Verspätungshöhe den direkten Störungseinflussbereich und fährt in Richtung Start-/Endbahnhof weg von der Störung. Entsprechend dem Ergebnis aus Submodul 2.4 ist ggfs. eine Prüfung auf Belegungskonflikte und Verspätungsentstehung analog dem Vorgehen in Submodul 2.1 auf dem Laufweg in Richtung Start-/Endbahnhof durchzuführen.

Gemäß Unterabschnitt 4.6.2 werden außerhalb der Störungseinflussbereiche keine Verspätungen durch Belegungskonflikte berücksichtigt. Somit entspricht die aus Submodul 2.3 bekannte Abfahrtsverspätung der Verspätung, mit der das Fahrzeug in den Start-/Endbahnhof einfährt, wenn nicht durch weitere Störungseinflussbereiche, die in Submodul 2.4 ermittelt wurden, eine Veränderung erzeugt wurde. Bei der Wende im Start-/Endbahnhof können ggfs. über den Wendepuffer Verspätungen, wenn vorhanden, abgebaut/reduziert werden. Für die weitere deskriptive Betrachtung des Zuges muss die Verspätung, mit der das Fahrzeug den Start-/Endbahnhof wieder verlässt, ermittelt werden.

> → Submodul 2.5: Ermittlung der Verspätungshöhe nach Wende am Start-/Endbahnhof.

Mit dieser ermittelten Verspätungshöhe verlässt das Fahrzeug den Start-/Endbahnhof und fährt erneut in Richtung des Störungseinflussbereichs SFP-Wendebahnhof. Ggfs. ist entsprechend dem Ergebnis aus Submodul 2.4 eine Prüfung auf Belegungskonflikte und Verspätungsentstehung analog dem Vorgehen in den Submodulen 2.1 und 2.2. durchzuführen. Bei Erreichen des betrachteten Störungseinflussbereichs ist zu ermitteln, ob noch eine Warteschlange besteht und somit ein Belegungskonflikt entstehen würde, wenn der Zug dort ankommt. Hier gelten wieder die gleichen Annahmen und Vorgehen wie in den Submodulen 2.1 und 2.2.

Wenn nach einer weiteren Schleife der Submodule 2.2–2.5 für den Zug kein weiterer Verspätungsaufbau stattfindet, ist die Warteschlange abgebaut und es entstehen keine weiteren Verspätungen durch das Warten auf Bedienung im betrachteten Bahnhof, wodurch für alle Fahrzeuge der Verspätungsabbau in Phase 3 ermittelt werden kann.

Für jede Fahrplanminute und alle verspäteten Züge: Phase 3: Abbau der Verspätungen und Ermittlung der Einschwingdauer

Da nun kein weiterer Aufbau von Verspätungen erfolgt, wird eine vereinfachte Betrachtung des konstruktiv-deterministischen Abbaus der Verspätungen möglich. Hieran schließt sich die Ermittlung der Einschwingdauer an. Dies erfolgt unter Verwendung von Wendepuffern, der bereits in Submodul 2.5 berücksichtigt wurde.

Über die vorliegende Verspätung des Zuges, den verfügbaren Wendepuffer an den beiden Wendebahnhöfen und die Fahrtdauer dazwischen kann der Zeitraum für den Verspätungsabbau ermittelt werden. Dieser Zeitraum und die bis zum Beginn des Verspätungsabbaus bereits abgelaufene Störungsdauer ergeben dann die Dauer des Verspätungsabbaus eines Zuges.

> → Submodul 3.1: Berechnung der Zeit bis zum vollständigen Verspätungsabbau für jeden verspäteten Zug.

Für alle innerhalb der Fahrplanminute m verspäteten Fahrzeuge wurde die Zeit bis zum vollständigen Verspätungsabbau ermittelt. Wenn der Störfall somit in dieser Fahrplanminute m eintreten würde, ist das Einschwingen beendet, wenn der letzte Zug pünktlich bzw. ausgelegt (Ergebnis aus Modul 4) ist. Dieses Fahrzeug ist maßgebend für die Einschwingdauer dieser Fahrplanminute.

> → Submodul 3.2: Bestimmung der Einschwingdauer für die betrachtete Fahrplanminute m.

Über alle Fahrplanminuten: Bestimmung der mittleren Einschwingdauer

Nachdem alle drei Phasen für alle Fahrplanminuten des maßgebenden Zeitintervalls durchgeführt wurden, ist die mittlere Einschwingdauer des Betriebskonzepts zu bestimmen.

Für jeden Störungseinflussbereich wird die Einschwingdauer über alle Fahrplanminuten gemittelt, sodass sich die mittlere Einschwingdauer ergibt.

Erst wenn der letzte Störungseinflussbereich eingeschwungen ist, gilt das Störfallprogramm als eingeschwungen. Somit ist aus den mittleren Einschwingdauern der Störungseinflussbereiche für das Störfallprogramm die größte mittlere Einschwingdauer anzusetzen.

> → Bestimmung der mittleren Einschwingdauer.

Die mittlere Einschwingdauer ist durch einen Abgleich mit der vorgegebenen Einschwingdauer zu bewerten. Wenn diese eingehalten wird, beginnen die Erstellung und Bewertung eines Verkehrskonzepts. Wenn diese nicht eingehalten wird, dann gilt die Einschwingqualität des Betriebskonzepts als nicht ausreichend. Somit ist eine interaktive Überarbeitung durch den Ersteller auszulösen.

Im Folgenden werden die Algorithmen für die in Abbildung 4-13 zusammengefassten Submodule erarbeitet.

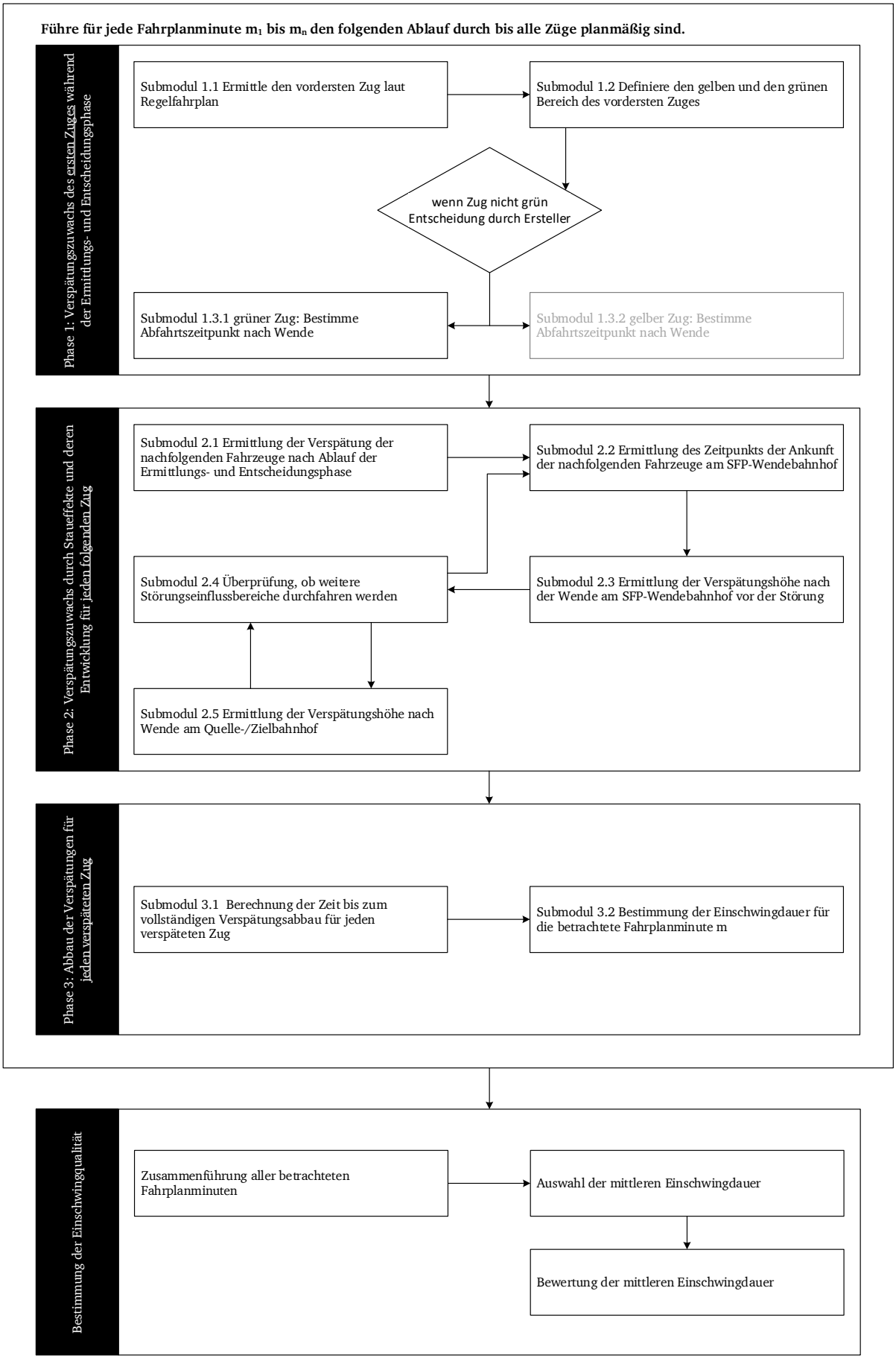


Abbildung 4-13: Modulsystem für die Bewertung der Einschwingqualität (eigene Darstellung)

4.6.4 Algorithmus

Nachdem in den Unterabschnitten Methode und Vorgehensweise erläutert wurde, welche Aufgaben der Algorithmus hat und wie der Input verarbeitet wird, um den gewünschten Output zu erreichen, erfolgt hier die formalere Notation der einzelnen Arbeitsschritte.

Für jeden Störungseinflussbereich SEB_1–SEB_n:

Für jede Fahrplanminute m bis m_n:

Phase 1: Verspätungsentwicklung des ersten Zuges während der Ermittlungs- und Entscheidungsphase (gilt nur für den Störungseinflussbereich SFP-Wendebahnhof vor der Störung)

Submodul 1.1: Ermittle den vordersten Zug laut Regelfahrplan

Fahrzeug n=1 ist das Fahrzeug, das zur Fahrplanminute m im Störungseinflussbereich am nächsten am roten Bereich ist, diesen aber noch nicht befahren hat.

Submodul 1.2: Definiere den gelben und den grünen Bereich des vordersten Zuges

Das vorderste Fahrzeug n=1 entspricht der Kategorie gelb, wenn es im Zeitraum von Störungsbeginn zur Fahrplanminute m bis Ende Ermittlungs- und Entscheidungsphase zu einem Verkehrsknoten in dem gelben Bereich fahren wird. Bis zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung fahren die Fahrzeuge so nah wie möglich an die Störung heran. Anschließend fahren die Fahrzeuge nur noch im grünen Bereich, also bis zu dem für sie deklarierten SFP-Wendebahnhof.

Definition unter Verwendung der Verkehrsknoten:

- roter Bereich: gestörte Verkehrsknoten, die durch Infrastruktureinschränkung nicht mehr nutzbar oder nicht für eine Wende geeignet sind,
- gelber Bereich: gestörte Verkehrsknoten, da diese bei Durchführung des SFP nicht mehr befahren werden sollen → Teilmenge der gestörten Verkehrsknoten, die nicht dem roten Bereich entsprechen,
- grüner Bereich: im SFP weiterhin verfügbare Verkehrsknoten.

Wenn ein gelber Zug vorliegt, muss der Ersteller entscheiden, ob dieser als erster nach der SFP-Ausrufung gewendet werden und in die Gegenrichtung fahren soll und somit bei Ankunft am SFP-Wendebahnhof nach Wende an einem anderen Bahnhof das erste grüne Fahrzeug wird. → Submodul 1.2.2.
Ansonsten verbleibt der gelbe Zug außerhalb des SFP zur Disposition durch den Anwender und der erste grüne Zug bei Störungseintritt ist der erste Zug. → Submodul 1.2.1.

Submodul 1.2.1 grüne Züge: Bestimme Abfahrtszeitpunkt nach Wende

$$t_{W,EE,1} = t_{EE} - t_{vFz,1,m}$$

mit:

$t_{W,EE,1}$	Verspätung des ersten Zuges nach der Ermittlungs- und Entscheidungsphase,
t_{EE}	Dauer der Ermittlungs- und Entscheidungsphase sowie
$t_{vZ,1,m}$	verbleibende Fahrzeit des ersten Zuges bei Störungseintritt zu Fahrplanminute m.

- Wenn $t_{W,EE,1} < 0$, ist das Fahrzeug zum Ende der Ermittlungs- und Entscheidungsphase noch unterwegs und es kann somit zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung nicht direkt mit der Wende begonnen werden. → frühester Wendebeginn zum Zeitpunkt der im Fahrplan des Regelbetriebs stehenden Ankunftszeit $T_{Ankunft,plan,SFP}$
- Wenn $t_{W,EE,1} \geq 0$, steht das Fahrzeug bereits und die Wende kann zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung beginnen. → frühester Wendebeginn zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung $T_{SFP,Beginn}$, mit $T_{SFP,Beginn} = T_m + t_{EE}$

Das früheste Ende der Wende und somit der frühestmögliche Abfahrtszeitpunkt $T_{Abfahrt,min}$ ergeben sich unter Verwendung der SFP-Mindestwendedauer zu:

für $t_{W,EE,1} < 0$ gilt:

$$T_{Abfahrt,min} = t_{minWende,SFP,Bhfx} + T_{Ankunft,plan,SFP}$$

für $t_{W,EE,1} \geq 0$ gilt:

$$T_{Abfahrt,min} = t_{minWende,SFP,Bhfx} + T_{SFP,Beginn}$$

mit:

$T_{Abfahrt,min}$	frühestmöglicher Abfahrtszeitpunkt,
$t_{minWende,SFP,Bhfx}$	Mindestwendedauer am gewählten (SFP-)Wendebahnhof (siehe dazu auch Unterabschnitt 4.3.4 g)),
$T_{SFP,Beginn}$	Zeitpunkt der SFP-Ausrufung und
$T_{Ankunft,plan,SFP}$	Ankunftszeit im SFP-Wendebahnhof nach Fahrplan des Regelbetriebs.

Die Abfahrt erfolgt frühestens nach der Mindestwendedauer am gewählten (SFP-)Wendebahnhof, ist aber trotzdem von dem Takt, auf den gewendet werden soll, abhängig. Die gewählte Abfahrtszeit $T_{gewAbfahrt}$ wird daher anhand der Algorithmen aus Modul 1 ermittelt. Wenn die Mindestwendedauer am gewählten (SFP-)Wendebahnhof vor gewählter Abfahrtszeit erfolgen kann, verlässt der Zug den Wendebahnhof planmäßig. Die Planmäßigkeit stellt sich somit bei Ankunft des Zuges mit ausreichender Wendedauer ein.

Submodul 1.2.2 gelbe Züge: Bestimme Abfahrtszeitpunkt nach Wende

Externes Modul unter Verwendung der Algorithmen von Crespo (2020). Entscheidung, wann ein gelber Zug zwischen die grünen Züge eingefädelt werden soll, liegt beim Ersteller. Wenn der gelbe Zug aufgrund eines in Modul 4 bestimmten Fahrzeugmangels zunächst bereitgestellt werden muss, ist der dafür vom Ersteller angegebene Werte als Abfahrtszeitpunkt zu verwenden.

Zeitgleich für jeden Zug: Phase 2: Verspätungszuwachs durch Staueffekte vor dem Störungseinflussbereich und deren Entwicklung

Submodul 2.1: Ermittlung der Verspätung der nachfolgenden Fahrzeuge nach Ablauf der Ermittlungs- und Entscheidungsphase zur Fahrplanminute m

$$t_{W,EE,n} = t_{EE} - t_{vFz,m}$$

mit:

$t_{W,EE,n}$ Verspätung des folgenden Zuges n nach der Ermittlungs- und Entscheidungsphase,
t_{EE} Dauer der Ermittlungs- und Entscheidungsphase sowie
$t_{vZ,n,m}$ verbleibende Fahrzeit des folgenden Zuges n bei Störungseintritt zu Fahrplanminute m.

- Wenn $t_{W,EE,n} < 0$, ist der Zug zum Ende der Ermittlungs- und Entscheidungsphase noch unterwegs und baut sich zunächst keine Verspätung auf.
  - Wenn die Bedienung des vorderen Zuges länger dauert als die verbleibende Fahrzeit des folgenden Zuges, entsteht ein Belegungskonflikt.

$$T_{gewAbfahrt,n-1} + t_{Sp,Ausfahrt,n-1} > T_{Ankunft,plan,n} - t_{Sp,Einfahrt,n}$$

mit:

$T_{gewAbfahrt,n-1}$ gewählte Abfahrtszeit des vorderen/ersten Zuges,
$T_{Ankunft,plan,n}$ Ankunftszeit nach Fahrplan des Regelbetriebs durch den folgenden Zug,
$t_{Sp,Ausfahrt,n-1}$ Sperrzeit für die Ausfahrt durch den vorderen/ersten Zug und
$t_{Sp,Einfahrt,n-1}$ Sperrzeit für die Einfahrt durch folgenden Zug.

  - Wenn die Bedienung des vorderen Zuges nicht länger dauert als die verbleibende Fahrzeit des folgenden Zuges, dann entsteht kein Belegungskonflikt. → springe zu Submodul 2.4

$$T_{gewAbfahrt,n-1} + t_{Sp,Ausfahrt,n-1} \leq T_{Ankunft,plan,n} - t_{Sp,Einfahrt,n}$$

- Wenn $t_{W,EE,n} \geq 0$, steht das Fahrzeug bereits (wartend), die Weiterfahrt könnte zum Zeitpunkt der SFP-Ausrufung beginnen. → früheste Weiterfahrt $T_{SFP,Beginn}$ mit $T_{SFP,Beginn} = T_m + t_{EE}$.

Submodul 2.2: Ermittlung des Zeitpunkts der Ankunft der nachfolgenden Fahrzeuge am SFP-Wendebahnhof

Die folgenden Züge rücken nacheinander im Blockabstand an den SFP-Wendebahnhof heran, sodass sie einfahren können, wenn der vordere Zug den Wendebahnhof verlassen hat. Wenn mehrere Gleise zur Wende zur Verfügung stehen, erfolgt die Zuweisung anhand der Algorithmen von Crespo (2020). Die Züge können somit jeweils einfahren, wenn das passende Gleis frei wird:

$$T_{Ankunft,n} = T_{gewAbfahrt,n-1} + t_{Sp,Ausfahrt,n-1} + t_{Sp,Einfahrt,n}$$

mit:

$T_{Ankunft,n}$ Ankunftszeitpunkt des folgenden Fahrzeugs am SFP-Wendebahnhof.

Dadurch ergibt sich ggfs. eine Verspätung $t_{w,Vh}$ bei Abfahrt am vorherigen Haltepunkt:

$$t_{w,vH} = T_{Ankunft,n} - T_{Abfahrt,vH} - t_{W,Einfahrt,n} - t_{Fahr}$$

mit:

$$t_{w,Einfahrt,n} = T_{Ankunft,n} - T_{Ankunft,plan,n} - t_{w,EE}$$

$T_{Abfahrt,plan,n,vH}$ geplante Abfahrtszeit des folgenden Fahrzeugs am vorherigen Haltepunkt und

$t_{w,Einfahrt,n}$ Wartezeit auf Einfahrt des folgenden Fahrzeugs.

Submodul 2.3: Ermittlung der Verspätungshöhe nach der Wende am SFP-Wendebahnhof vor der Störung

Das früheste Ende der Wende und somit der frühestmögliche Abfahrtszeitpunkt ergeben sich unter Verwendung der SFP-Mindestwendedauer zu:

$$T_{Abfahrt,min} = t_{minWende,SFP,Bhfx} + T_{Ankunft,n}.$$

Bei der Wende erfolgt die Abfahrt frühestens nach der Mindestwendedauer am gewählten (SFP-) Wendebahnhof. Hierzu können die möglichen Wendezeitpunkte anhand des Algorithmus aus Modul 1 in Unterabschnitt 4.3.4 g) ermittelt und durch den Ersteller entschieden werden.

Die Entscheidung kann im Sinne des Verspätungsabbaus anders ausfallen als für die stabile Phase. In der Praxis werden in der Einschwingphase die negativen Wenden mit außerplanmäßigen Wartezeiten, in Abhängigkeit ihrer Höhe, häufig verwendet, da die Alternativen der Ausfall eines Taktes und eine Warteschlange sind.

Anhand der gewählten Abfahrtszeit ergibt sich die Verspätung nach Wende:

$$t_{w,nachSFPWende} = T_{Abfahrt,planSFP} - T_{gewAbfahrt}$$

mit:

$t_{w,nachSFPWende}$ Verspätung nach der Wende am SFP-Bahnhof,

$T_{Abfahrt,plan,SFP}$ im Störfallfahrplan geplante Abfahrtszeit und

$T_{gewAbfahrt}$ gewählter Abfahrtszeitpunkt.

Submodul 2.4: Überprüfung, ob weitere Störungseinflussbereiche durchfahren werden

1. Vergleiche den Laufweg des Zuges (auch der nicht verspäteten) mit den in Modul 4 definierten Störungseinflussbereichen.
2. Wenn kein weiterer Störungsbereich durchfahren wird, entspricht die Verspätung nach Wende am SFP-Bahnhof der Verspätung vor Einfahrt in den nächsten Wendebahnhof $t_{W,vorEinfahrt} = t_{W,nachSFPWende}$. Gehe zu Submodul 2.5.
3. Für jeden weiteren Störungseinflussbereich, der durchfahren wird, führe 4. bis 6. in der Reihenfolge des Laufwegs durch.
4. Prüfe anhand Unterabschnitt 2.2.5 auf Belegungskonflikte.

5. Bei Vorliegen eines Belegungskonflikts entsteht eine Wartezeit. Diese kann anhand der Submodule 2.2 und 2.3 ermittelt werden.
6. Ermittle dann die sich ggfs. verändernde Verspätungshöhe, die bei der Einfahrt in den nächsten Störungseinflussbereich oder Wendebahnhof vorliegt.

Submodul 2.5: Ermittlung der Verspätungshöhe nach Wende am Start-/Endbahnhof

Zur Ermittlung der Verspätung, mit der der Start-/Endbahnhof verlassen wird, kann ein Teil der Algorithmen aus Modul 1 verwendet werden:

$$T_{frühmöglAbfahrt} = T_{Ankunft,SFP} + t_{minWende,SFP}$$
$$\text{wenn } T_{Abfahrt,plan,SFP} \geq T_{frühmöglAbfahrt}\text{; dann } t_{w,nachWende} = 0$$
$$\text{wenn } T_{Abfahrt,plan,SFP} < T_{frühmöglAbfahrt};$$
$$\text{dann } t_{w,nachSFPWende} = T_{Abfahrt,planSFP} - T_{gewAbfahrt}.$$

Wiederhole Submodul 2.4 für den Laufweg zum SFP-Wendebahnhof.

Für die Überprüfung eines erneuten Verspätungsaufbaus am SFP-Wendebahnhof und weitere durchfahrende Störungseinflussbereiche wiederhole die Schleife unter Fortschreibung der Zeit:

- Submodul 2.2,
- Submodul 2.3,
- Submodul 2.4,
- Submodul 2.5 und
- Submodul 2.4,

bis in allen durchfahrenen Störungseinflussbereichen kein weiterer Verspätungsaufbau für den Zug erkannt wird.

Dann beginnt Phase 3 der Betrachtung für diesen Zug ab dem Start-/Endbahnhof oder dem SFP-Wendebahnhof, an dem erstmals keine Verspätung mehr entsteht. Der letzte ermittelte $t_{W,vorEinfahrt}$ in diesen Bahnhof und der Ankunftszeitpunkt am Wendebahnhof, an dem keine Verspätung mehr entsteht $T_{Ankunft,SFP,Abbau}$, stellen den Ausgangspunkt für Phase 3 dar.

Für jeden verspäteten Zug: Phase 3: Abbau der Verspätungen und Ermittlung der Einschwingdauer

Submodul 3.1: Berechnung der Zeit bis zum vollständigen Verspätungsabbau für jeden verspäteten Zug

Bestimme die zum Verspätungsabbau nutzbaren Wendepuffer im Start-/Endbahnhof und im SFP-Wendebahnhof basierend auf Modul 1:

$$t_{Wendepuffer} = t_{vorhWende,SFP} - t_{minWende,SFP}$$

$$t_{vorhWende} = T_{Abfahrt,SFP} - T_{Ankunft,SFP}.$$

Wenn der Zug entsprechend dem Störfallfahrplan durch einen Linientausch wechselnde Wendebahnhöfe anfährt, sind für alle anzufahrenden Wendebahnhöfe die Wendepuffer zu ermitteln.

Die letzte ermittelte $t_{W,vorEinfahrt}$, bevor kein weiterer Verspätungsabbau erkannt wurde, ist schrittweise unter (mehrfacher) Verwendung der Wendepuffer in ihrer angefahrenen Reihenfolge bis

$t_{W,nachWendeSFP} = 0$ abzubauen. Die Planmäßigkeit stellt sich somit bei Ankunft des Zuges ein, wenn der für einen vollständigen Verspätungsabbau ausreicht.

Parallel dazu sind die benötigten Fahrtzeiten t_{Fahr} zwischen den Wendebahnhöfen und abschließend die davorliegende Einschwingdauer zu summieren:

$$t_{ED,f,m} = \sum_{n=1} t_{vorhWende,SFP} + \sum_{n=1} t_{Fahr} + T_{Ankunft,SFP,Abbau} - T_{SFP,Ausrufung}.$$

Submodul 3.2: Bestimmung der Einschwingdauer für die betrachtete Fahrplanminute m

Maßgebend für das Einschwingen einer Fahrplanminuten ist das Fahrzeug, das am längsten einschwingt. Hier sind die Fahrplanminuten und die Auslegedauern zu berücksichtigen und der Maximalwert zu bilden:

$$t_{ED,m,SEB} = \max\begin{cases} t_{ED,f,m} \\ t_{AD,m} \end{cases}.$$

Bestimmung der mittleren Einschwingdauer

Zusammenführung aller betrachteten Fahrplanminuten

$$\overline{t_{ED,SEB}} = \frac{\sum_{n=1}^{m} t_{ED}}{n_m}$$

Auswahl der mittleren Einschwingdauer

$$t_{ED} = \max(\overline{t_{ED,SEB}})$$

Bewertung der mittleren Einschwingdauer

Bedingung für eine Bewertung als ausreichend: $t_{ED} \leq t_{vorgebED}$

wenn Bedingung erfüllt: beginne Erstellung und Bewertung eines Verkehrskonzepts,
wenn Bedingung nicht erfüllt: löse interaktive Überarbeitung des Betriebskonzepts durch den Ersteller aus.

4.6.5 Zusammenfassung

Durch eine Weiterentwicklung des Einschwingmodells von Chu (2014) (siehe Abschnitt 2.4) entsprechend der Aufgabenstellung (siehe Abschnitt 3.1) wird für das Betriebskonzept eine Einschwingfähigkeit in angemessener Dauer sichergestellt und somit ein in der stabilen Phase funktionsfähiges Betriebskonzept bewertet.

In jedem Störungseinflussbereich werden für jede Minute eines möglichen Störungseintritts im maßgebenden Zeitintervall drei Phasen zur Ermittlung des Verspätungsaufbaus und -abbaus durchlaufen. Anschließend wird für jede Fahrplanminute die längste Einschwing-/Ausstelldauer gewählt und für jeden Störungseinflussbereich die mittlere Einschwingdauer ermittelt. Dabei wird der Störungseinflussbereich mit der längsten Einschwingdauer maßgebend. Diese wird anhand eines vorgegebenen Wertes bewertet und je nach Einordnung der Bewertung beginnen anschließend die Erstellung und Bewertung des Verkehrskonzepts oder eine Überarbeitung des Betriebskonzepts.

4.7 Zusammenfassung

Nach dem Ablauf der Module 1 bis 5 des Systembereichs Betriebskonzept, dargestellt in Abbildung 4-14, wurde dieses entsprechend den Anforderungen bewertet und kann bei ausreichender Bewertung weiterverwendet werden.

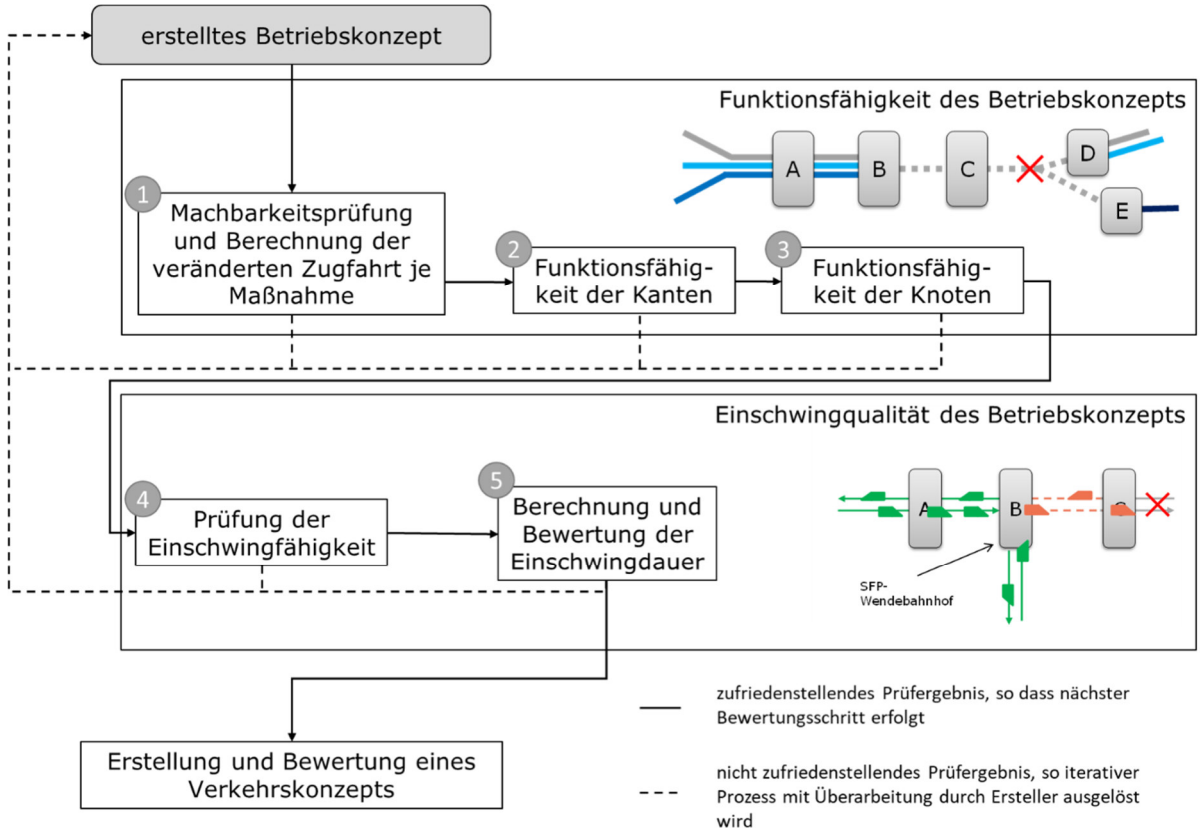


Abbildung 4-14: Modulsystem zur Bewertung des Betriebskonzepts (eigene Darstellung)

Dazu wird in Modul 1 bis 3 die Funktionsfähigkeit der stabilen Phase geprüft, indem die Machbarkeit jeder einzelnen Maßnahme festgestellt und anschließend das Zusammenwirken aller betrieblichen Maßnahmen geprüft wird. Dazu werden die Netzelemente, an denen durch mindestens eine betriebliche Maßnahme auslastungserhöhende Veränderungen stattfinden, auf eine Einhaltung des Belegungsgrads des Regelbetriebs bzw. nach UIC-Grenzwert geprüft.

Ab Modul 4 werden die eingeplanten Maßnahmen im Betriebskonzept nicht mehr in Bezug auf die Funktionsfähigkeit in der stabilen Phase, sondern auf deren Erreichbarkeit durch die Einschwingphase untersucht. Hierzu werden zunächst die Ausschlusskriterien der zügigen Zugzahlreduktion durch die Maßnahme Ausfall und die Stauentwicklung in Störungseinflussbereichen modelliert. Wenn keine Ausschlusskriterien vorliegen, wird anschließend die Dauer des Einschwingens bestimmt.

Sollten die Machbarkeit einer Maßnahme, die Funktionsfähigkeit der stabilen Phase, das Nicht-Vorhandensein von Ausschlusskriterien und/oder eine akzeptable Einschwingdauer nicht festgestellt werden, so wird jeweils ein interaktiver Prozess mit Überarbeitung der geplanten betrieblichen Maßnahmen durch den Ersteller ausgelöst.

Wenn die Einschwingdauer einer ausreichenden Einschwingqualität entspricht, so kann die Erstellung des Betriebskonzepts als abgeschlossen betrachtet und im Folgenden das Verkehrskonzept als zweiter Systembereich eines SFP erstellt und bewertet werden.

5 Verkehrskonzept

5.1 Einleitung

Die Bewertung von Störfallprogrammen setzt sich gemäß Abbildung 3-2 aus den zwei übergeordneten Systembereichen Betriebskonzept und Verkehrskonzept zusammen. Nachdem in Kapitel 4 das Betriebskonzept auf Funktionsfähigkeit und Einschwingqualität geprüft wurde, werden in den folgenden Abschnitten die untergeordneten Module für den Systembereich Verkehrskonzept hergeleitet. Für jedes Modul werden Methode, Vorgehensweise und Algorithmus problemadäquat erarbeitet.

Die Anforderungen an das Ergebnis dieses Kapitels wurden unter Abschnitt 3.3 (e2) dokumentiert und zur Verwendung in den Modulen mit den Anforderungen (f2) und (g2) untersetzt.

Grundlage und zur Verfügung stehender Input für die Erstellung eines Verkehrskonzepts ist ein geprüftes Betriebskonzept für einen definierten Störfall. Bestandteil dessen Bewertung ist in Modul 1 die grobe Abschätzung der Kundenwirkungen je betrieblicher Maßnahme. Im Hinblick auf den in Abschnitt 3.4.1 diskutierten Zielkonflikt ist dies nicht ausreichend. Ziel dieses Kapitels ist es daher, eine kundenorientierte Erstellung eines Störfallprogramms durch Einbezug der verkehrlichen Wirkungen zu ermöglichen.

Gemäß Abschnitt 2.2.5 sind betriebliche Konfliktlösungen klassischerweise NP-schwer. Für das Verkehrskonzept liegen keine vergleichbaren Problemstellungen vor. Da die Problemgröße eines Störfallprogramms im Rahmen der Arbeit von einer Lösung der betrieblichen Konflikte um die verkehrlichen Maßnahmen im Störfall erweitert wird, wurde in Abbildung 3-2 eine übergeordnete Systemarchitektur erarbeitet, die das Problem in Teilprobleme zerlegt. Für den Systembereich Verkehrskonzept sind dies die beiden Teilprobleme Erstellung und Bewertung.

Das Verkehrskonzept wird basierend auf dem Störfall und einem dafür geplanten Betriebskonzept erstellt und anschließend bewertet, um eine kundenorientierte Bewertung des Störfallprogramms zu erreichen und ggfs. eine kundenorientierte Verbesserung des Betriebskonzepts auszulösen.

Für die Teilprobleme des Systembereichs werden im Weiteren zunächst die Problemgröße genauer analysiert und anschließend eine Methode und Vorgehensweise zum Umgang mit dieser erarbeitet, bevor dann die Erstellung und Bewertung für die Entwicklung der Algorithmen modular aufgebaut werden.

5.2 Problemgröße

Bisher werden in der Praxis die meisten Störfallprogramme für einen Störfall in einem S-Bahnnetz erstellt. Unter der Annahme, dass Verbindungen ausschließlich im Untersuchungsraum S-Bahnnetz stattfinden, könnte dieses als ein geschlossenes System betrachtet werden. Für die im Untersuchungsraum S-Bahnnetz enthaltene Anzahl der Linien, deren Zugfahrten und deren bediente Verkehrsknoten würde sich eine linear wachsende Problemgröße in Abhängigkeit der Größe des S-Bahnnetzes ergeben.

Diese Begrenzung des Untersuchungsraums ist aber im Rahmen der Aufgabenstellung und des adressierten Mobilitätsverhalten im ÖPNV nicht ausreichend: Die Anforderungen der Fahrgäste zu Eignung und Individualisierung (siehe Abschnitt 3.3 (e2)) erfordern, dass sich das Angebot nicht nur auf das gestörte Verkehrsmittel bezieht, sondern berücksichtigt, dass alternative Verbindungen mehrere Verkehrsmittel des Nahverkehrs (siehe Unterabschnitt 2.5.1) umfassen. Die Problemgröße ist somit nicht nur das S-Bahnnetz, sondern das Nahverkehrsnetz.

Die Nutzung des Nahverkehrsnetzes wird klassischerweise anhand des sequenziellen Vier-Stufen-Modells aus Unterabschnitt 2.5.2. abgebildet. Die Fläche des Nahverkehrsnetzes wird im Vier-Stufen-Modells in Verkehrszellen unterteilt. Die erste Stufe des Modells ermittelt den Mobilitätsbedarf als Verkehrserzeugung und verknüpft die Verkehrszellen in der zweiten Stufe zur Verkehrsverteilung in Form von Relationen.

In jeder Zelle kann Mobilitätsbedarf für eine Relation innerhalb der Zelle, sowie zu jeder anderen Zelle bestehen. Somit wächst die Problemgröße der Relationen im Nahverkehrsnetz über die Anzahl der Verkehrszellen quadratisch. Je nach Bevölkerungsstruktur und -dichte können die Dichte und Größe der Verkehrszellen in den außenliegenden, ländlichen Lagen des Nahverkehrsnetz einen geringeren Mobilitätsbedarf im ÖPNV als im stadtnahen Zentrum aufweisen, sodass dort ein unterquadratisches Wachstum anzunehmen ist. In Abschätzung zur sicheren Seite wird aber trotzdem ein quadratisches Wachstum der Relationen angenommen.

Eine Relation stellt aber nur die Beziehung von Start und Ziel des Fahrgastes aus den verkehrserzeugenden Verkehrszellen im Nahverkehrsnetz dar. Umgesetzt wird diese im Rahmen einer Verbindung. Zur Detaillierung von Relationen in Verbindungen der Fahrgäste wird daher gemäß der dritten und vierten Stufe des Vier-Stufen-Modells (siehe Unterabschnitt 2.5.2) eine Verkehrsmittel- und Routenwahl benötigt. Daher ist die quadratisch wachsende Zahl der Relationen im Nahverkehrsnetz nicht ausreichend um die Problemgröße zu beschreiben.

Gemäß Abschnitt 3.6.3 wird eine Verbindung durch die Eigenschaften der Reise beschrieben. Demnach beginnt eine Verbindung mit dem Aktionsknoten Einstiegshaltestelle. Der Zugang zu dieser vom Start, bspw. von Zuhause oder der Arbeitsstätte, erfolgt klassischerweise zu Fuß, mit dem MIV (Auto, Fahrrad, Taxi etc.) oder über den Zulauf aus dem öffentlichen Fernverkehr (Flugzeug, SPFV etc.). Eine Einstiegsstelle kann somit durch verschiedene Verkehrsmittel erreicht werden; zudem können vom Start aus unterschiedliche Einstiegshaltestellen den Beginn der Route im Nahverkehrsnetz darstellen.

Von der Einstiegshaltestelle aus können – je nach Route – eine bis x Umsteigehaltestellen oder direkt die Ausstiegshaltestelle erreicht werden. Eine Route besteht somit aus mindestens zwei Aktionsknoten. Gemäß Abbildung 2-8 stehen für die Aktionskanten – je nach Verfügbarkeit – bis zu fünf öffentliche Verkehrsmittel, genauer S-Bahn, SFNV, U-Bahn, Tram oder Bus, zur Verfügung. An jedem Aktionsknoten Umsteigehaltestelle können sich die Verkehrsmittel der Route verändern. Zudem ergeben sich an jeder Haltestelle die Eigenschaften des Aktionsknotens entsprechend der Definition der Reisekette in Unterabschnitt 3.6.3 und unterscheiden sich somit routenabhängig.

Beim Routing kann durch die Verknüpfung der Aktionsknoten, unter Einhaltung der maximalen Umsteigeanzahl und Verwendung der jeweils verfügbaren Verkehrsmittel auf den Aktionskanten, somit eine Vielzahl von Routen zur Erschließung einer Relation ermittelt werden. Gemäß den Definitionen in Unterabschnitt 3.6.3 ist eine Route nicht gleichbedeutend mit einer nutzbaren oder attraktiven Verbindung für den Fahrgast.

Zur Verbindungsermittlung ist die Route mit Zeiten zu versehen. Gemäß Abbildung 3-10 sind dies Abfahrts- und Ankunftszeiten, Fahrzeiten und die sich ergebenden Eigenschaften eines Aktionsknotens Umsteigehaltestelle, die verdeutlichen, ob eine Verbindung nutzbar (bspw. Umsteigezeit ausreichend) oder attraktiv (bspw. Umsteigezeit enthält keine hohen Wartezeiten am Bahnsteig) für den Fahrgast ist. Dies hängt vom Takt der genutzten Verkehrsmittel ab, wodurch nicht jede Route zu jeder Zeit eine identische Verbindung ermöglicht.

Die Kombinationen der einzelnen Aktionsknoten und -kanten zu einer Verbindung sind mehrfach möglich. Diese Kombinationsmöglichkeiten erzeugen eine Problemgröße, die sich in einer Baumstruktur

verzweigt, die in Abbildung 5-1 vereinfacht dargestellt ist. Die Ermittlung der Verbindung basierend auf Routen ist in der vereinfachten Darstellung nicht abgebildet. Zudem ist die Baumstruktur auch nicht zwingend so regelmäßig wie in der Abbildung dargestellt, da nicht alle Verkehrsmittel immer verfügbar sind. Dies würde den Baum vereinfachen, allerdings kann ein Verkehrsmittel auch unterschiedliche Aktionsknoten erreichen, von denen aus eine sinnvolle Route erstellt werden kann.

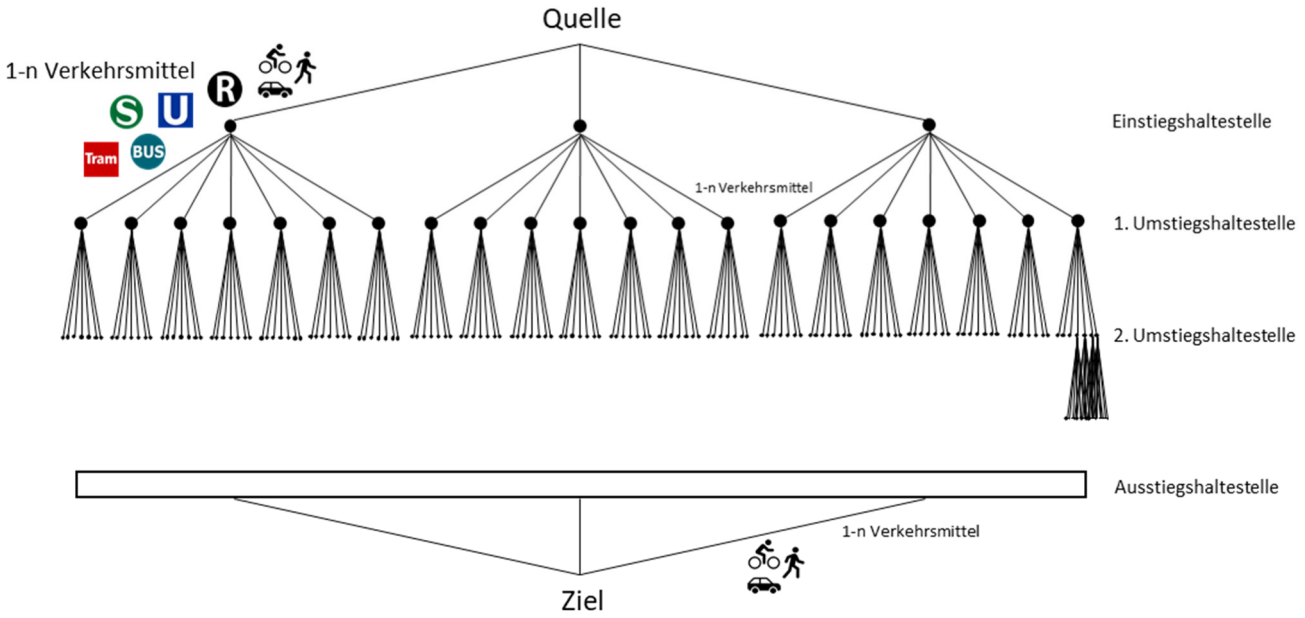


Abbildung 5-1: Baumstruktur der Ermittlung einer Verbindung einer Relation (eigene Darstellung)

Durch die Baumstruktur ist davon auszugehen, dass eine NP-schwere Problemgröße analog zur Problemgröße im Betrieb (siehe Unterabschnitt 2.2.5) vorliegt. Um die anforderungsgemäße rechenzeitarme Erstellung und Bewertung von Verkehrskonzepten zu ermöglichen, können die in Unterabschnitt 2.2.5 genannten Methoden zur Bearbeitung von komplexen Problemen zu verwendet werden.

Fahrgäste können in ihren Verbindungen von Einstiegshaltestelle bis Ausstiegshaltestellen neben dem ÖPNV auch den Fernverkehr (Bahn, Schiff und Luft) oder den MIV nutzen. Beginn und Ende der Verbindung erweitern sich dabei vom Nahbereich bis hin zu europa- und weltweiten Relationen. Zudem würde dies eine weitere Erhöhung der Anzahl der Verkehrsmittel erzeugen. Sowohl die Ausweitung der Relationen als auch der Verkehrsmittel entsprechen nicht der Zielsetzung eines kundenorientierten Störfallprogramms im Schienennahverkehr, daher wird eine Begrenzung des Betrachtungsraums auf das Nahverkehrsnetz vorgenommen.

Für das Verkehrskonzept wird festgelegt, dass der Einbruchs- und Ausbruchsort in das Nahverkehrsnetz als Einstiegs- oder Ausstiegshaltestelle (Aktionsknoten) der Verbindung dienen und somit ggfs. nicht der eigentliche Start bzw. das eigentliche Ziel innerhalb der verkehrserzeugenden Verkehrszellen. Daher bleibt die Problemgröße in Bezug auf die Relationen quadratisch wachsend.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es sich ähnlich komplex wie bei der betrieblichen Routensuche im Netz (siehe Abschnitt 2.1) verhält und von einer NP-schweren Problemgröße auszugehen ist. Um die damit verbundenen Probleme zu bearbeiten, muss im Sinne der Anforderung zur geringen Rechenzeit im Folgenden eine Möglichkeit zur näherungsweisen Lösung des Problems gefunden werden.

5.3 Methode

Um NP-schwere Probleme näherungsweise zu lösen, stehen die in Abschnitt 2.2.5 dargestellten Methoden zur Verfügung. Vor der Wahl der problemadäquaten Methoden soll ein Schneiden in Teilprobleme zur Modularisierung geprüft werden.

Zur Ermittlung eines Verkehrskonzeptes, also zur Erstellung eines Angebots mit verkehrlichen Maßnahmen für Fahrgäste im Störfall, ist zunächst einmal zu ermitteln, welche Verbindungskonflikte für den Fahrgast durch Störfall und Betriebskonzept entstehen. Im nächsten Schritt sind dann Lösungen für die Verbindungskonflikte zu ermitteln. Dies erinnert an den eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Ansatz KE/KL zur Konflikterkennung und -lösung (siehe auch Unterabschnitt 2.2.5).

Zur Konfliktlösung kann entweder eine Heuristik zur Ermittlung einer besten Lösung verwendet werden oder zunächst eine Ermittlung möglicher Alternativen erfolgen, die anschließend bewertet werden und aus denen eine beste Lösung ausgewählt wird.

Eine Heuristik, die direkt nach dem besten Ergebnis sucht, geht klassischerweise schrittweise vor und folgt dabei immer dem besten Zwischenergebnis, also bspw. der am besten bewerteten Aktionskante. Dies hat den Vorteil, dass keine Wiederholungen nötig sind. Nachteilig daran ist jedoch, dass die Nutzung aussichtsreichster Zwischenergebnisse die angestrebte Ausstiegshaltestelle der Verbindung zunächst nicht berücksichtigt und diese somit nach einer unbestimmten Anzahl Zwischenergebnisse findet. Zudem ist der Algorithmus stark davon abhängig was als Bewertung für ein aussichtsreichstes Zwischenergebnis definiert wird. Es könnten somit Alternativen zur Verfügung stehen, die in Summe attraktiv für den Fahrgast sind, aber nicht die aussichtsreichsten Zwischenergebnisse bieten und daher nicht gefunden werden.

Wenn mehrere Verbindungsalternativen bestimmt werden, kann aus diesen eine beste Alternative gewählt werden. Die Definition der besten Alternative kann dabei anhand eines einheitlichen kundenorientierten Bewertungsmaßstabs erfolgen, der mehrere Kriterien und zudem mehrere Abschnitte der Lösung beinhaltet und diese integriert bewertet. Nachteilig dabei ist der Rechenzeitaufwand zu Ermittlung mehrerer Alternativen, der aber bei Verwendung einer bestehenden, gut funktionierenden Fahrplanauskunft (siehe Unterabschnitt 3.1.2) vertretbar erscheint. Die Verbindungsermittlung ist daher nicht neu zu gestalten, sondern es ist ein Vorgehen zu erarbeiten, wie bestehende Software und Algorithmen einer Fahrplanauskunft rechenzeitarm eingesetzt werden können, um Verbindungskonflikte zu bestimmen und anschließend zu lösen.

In einer Anwendung zur Fahrplanauskunft werden die Alternativen zur Bedienung der angefragten Relation meist chronologisch aufgelistet und unterliegen bereits bei der Ermittlung im Fahrplanauskunftssystem Anforderungen, die bestimmen, welche Verbindungen ausgegeben werden. In der Praxis eingesetzte Fahrplanauskunftssysteme stehen jedem Fahrgast im Regelbetrieb zur Verbindungsauskunft zur Verfügung. Die Fahrplanauskunft schließt bei der Verbindungsermittlung anhand ihrer implementierten Anforderungen klassischerweise besonders unattraktive Verbindungen, wenn bessere vorhanden sind. Die damit ausgegebenen Verbindungen stellen somit eine gewohnte Aufbereitung von Verbindungen dar und können somit grundsätzlich weiterverwendet werden.

Im Störfall sind aber ggfs. keine der regulär angezeigten, attraktiven Verbindungen vorhanden. Daher können im Störfall, bei Verfügbarkeit, auch Verbindungen angezeigt werden, die im Regelbetrieb nicht angezeigt werden. Somit ist die Anzeige einer Verbindung in der Fahrplanauskunft im Störfall nicht zwingend eine attraktive Verbindung, sondern ggfs. die einzige Möglichkeit, um die Relation zu bedienen. Gemäß der Anforderung Kundenorientierung/Akzeptanz aus Abschnitt 3.3 (g2) soll der Verkehr im Störfall weiterhin attraktiv für den Fahrgast sein. Somit kann eine Verbindung zu Erfüllung

einer Relation nicht unabhängig von der Wahrnehmung durch den Fahrgast als Alternative angesetzt werden. Ggfs. ist die Wahrnehmung der Alternative so unattraktiv, dass sie nicht als Lösung angesetzt werden kann. Daher ist für die alternativen Verbindungen, die durch die Fahrplanauskunft im Störfall ermittelt werden, eine Bewertung zu entwickeln, sodass die beste Alternative in der Wahrnehmung der Fahrgäste als Lösung ausgewählt werden kann bzw. Alternativen als nicht attraktiv ausgeschlossen werden können.

Für die Auswahl der besten Lösung ist eine Bewertung der Auswirkungen auf den einzelnen Fahrgast vorzunehmen, welche zur Erfüllung der anforderungsgemäßen, logischen Konsistenz über alle Teilprobleme hinweg einheitlich sein sollte. Daher sind vor der Erarbeitung der Module zur Ermittlung des Verkehrskonzepts die Bewertungsmaßstäbe für ein Verkehrskonzept und seine Maßnahmen festzulegen. So wird sichergestellt, dass bereits bei der Erstellung des Verkehrskonzepts nach diesen Maßstäben gehandelt wird, bevor es zur gesamtheitlichen Bewertung des Verkehrskonzepts kommt. Jede Wahl einer Alternative zur Lösung eines Verbindungskonfliktes eines Fahrgastes berücksichtigt somit bereits die abschließend gesamthaft anzuwendenden Bewertungsmaßstäbe.

Neben der Auswirkung, die ein Verbindungskonflikt je Fahrgast erzeugt, ist auch zu berücksichtigen wie viele Fahrgäste pro Verbindungskonflikt betroffen sind. Gemäß der Anforderung Vollständigkeit aus Abschnitt 3.3 (e2) ist die Betroffenheit aller Fahrgäste abzubilden. Somit sind die Verbindungskonflikte und entsprechend auch die angebotenen Lösungen mit Fahrgastzahlen zu belegen. Die Aufbereitung der Fahrgastdaten ist gemäß Unterabschnitt 3.1.2 nicht Bestandteil der Aufgabenstellung, sondern wird als verfügbarer Input angesetzt.

Zusammengefasst wird das Problem des Systembereichs Verkehrskonzept somit in die Teilprobleme Verbindungskonflikterkennung, Konfliktlösung durch Alternativen und Bewertung geschnitten. Gemäß Abschnitt 3.2 kann eine strukturierte Bearbeitung der Teilprobleme durch Modularisierung erfolgen. Die Module sollen dabei in der genannten Reihenfolge der Teilprobleme und anforderungsgemäß möglichst rechenzeitarm durchlaufen werden sollen. In jedem Modulabschnitt wird im zweiten Unterabschnitt die problemadäquate Methode zur Problemlösung erarbeitet. Zunächst werden die Teilprobleme im folgenden Abschnitt mit einer Vorgehensweise zur Modularisierung untersetzt oder bei Bedarf weiter aufgeteilt.

5.4 Vorgehensweise

Die Teilprobleme Verbindungskonflikterkennung, Konfliktlösung durch Alternativen und Bewertung werden im Folgenden modularisiert um so eine Vorgehensweise zur Erstellung und Bewertung eines Verkehrskonzepts aufzubauen.

Das erste Teilproblem der Verbindungskonflikterkennung dient dazu, die im Betriebskonzept erzeugten Abweichungen zu ermitteln. Diese entstehen an den im Regelbetrieb bestehenden Verbindungen, die zunächst im Rahmen einer *Verbindungskonflikterkennung* in Modul 6 detektiert werden.

Für jeden erkannten Verbindungskonflikt ist anschließend ein Vorgehen zum zweiten Teilproblem Konfliktlösung durch Alternativen je Verbindungskonflikt zu bestimmen. Entsprechend der Anforderungen Information, Nachvollziehbarkeit und Individualisierung (siehe Abschnitt 3.3 (e2)) ist jeder Fahrgast so schnell wie möglich mit den relevante Informationen zu seinem Verbindungskonflikt und einer passenden alternativen Verbindung zu versorgen. Die Kommunikation kann gemäß Unterabschnitt 2.5.1 in zwei Kommunikationskanäle differenziert werden, die Lösungsalternativen entweder individuell oder kollektiv kommunizieren.

Gemäß Unterabschnitt 2.5.1 kann die individuelle Kommunikation eine individuelle Lösung für den individuellen Verbindungskonflikt bspw. durch Abfrage per App etc. an einen einzelnen Fahrgast kommunizieren. Kollektive Kommunikationskanäle, wie bspw. Anzeiger oder Durchsagen, können gemäß Unterabschnitt 2.5.1 keine individuellen Informationen übergeben. Sie benötigen daher einheitliche Anweisungen für eine Gruppe an Fahrgästen und stellen somit nicht zwingend die beste Lösung für den individuellen Verbindungskonflikt eines einzelnen Fahrgastes bereit.

Um die Anforderung Individualisierung zu adressieren, erfolgt zunächst eine individuelle *Konfliktlösungsalternativensuche* im Modul 7. Da aber im Störfall, gemäß Unterabschnitt 2.5.1, kollektive Kommunikationskanäle weiterhin eine große Rolle spielen, ist zudem eine Konzepterstellung, die kollektive Lösungen beinhaltet, zu entwickeln. Da kollektive Kommunikationskanäle keine individuellen Informationen anbieten können, adressieren sie Fahrgastströme, die Fahrgäste mit ähnlichem Mobilitätsverhalten bündeln. Da diese Kommunikationskanäle sehr präsent sind und die Information regelmäßig übermitteln, wird davon ausgegangen, dass diese bei Verfügbarkeit statt der individuellen Lösung durch den Fahrgast genutzt werden.

Diese *Verkehrskonzepterstellung* stellt Modul 8 dar. Gefundene Lösungen (individuell sowie kollektiv) entsprechen den ausgewählten verkehrlichen Maßnahmen, die für einen Störfall und dessen zugehöriges Betriebskonzept Anwendung finden sollen.

Das dritte Teilproblem adressiert die Bewertung der gefundenen Lösungen. Neben der Verbindungskonflikterkennung und -lösung ist auch ein Vorgehen zur anforderungsgemäßen kundenorientierten Bewertung zu entwickeln. Dies erfolgt abschließend als kundenorientierte *Konzeptbewertung* im Modul 9. Output des Modulsystems können ein positiv bewertetes Verkehrskonzept oder bei negativer Konzeptbewertung eine Rückkopplung zur interaktiven Anpassung der Maßnahmen in den Modulen des Betriebskonzepts oder den Modulen 6 und anschließend 7 sein.

In Modul 9 findet eine Bewertung des Gesamtkonzepts statt; in den Modulen 7 und 8 werden aber gemäß Abschnitt 5.3 bereits beste Lösungen, die die Qualität des Gesamtkonzepts beeinflussen, ausgewählt. Hierbei sollten zur Erfüllung der Anforderung der logischen Konsistenz (siehe Abschnitt 3.3 (e2)) die Bewertungsmaßstäbe der abschließenden Bewertung bereits im Verlauf der Erstellung Anwendung finden. Es ergibt sich zusammenfassend für die Struktur der folgenden Abschnitte zuerst die Notwendigkeit der Herleitung der Bewertungsmaßstäbe, bevor anschließend die Module 6 bis 9 und deren Algorithmen konzipiert werden.

Zusammengefasst, dargestellt in Abbildung 5-2, identifiziert zunächst die Verbindungskonflikterkennung (Modul 6) alle durch Störung und Betriebskonzept induzierten Verbindungskonflikte. Anschließend ermittelt die Konfliktlösungsalternativensuche (Modul 7) Alternativen und bestimmt die beste Lösung für einen einzelnen Fahrgast, die per individuellen Kommunikationskanälen kommuniziert werden kann. Aufgrund der Relevanz von kollektiven Kommunikationskanälen im Störfall werden in der Verkehrskonzepterstellung (Modul 8) zudem Lösungen für Fahrgastströme ermittelt, welche einen Teil der individuellen Lösungen im Verkehrskonzept ersetzen. Dieses wird dann abschließend in der Verkehrskonzeptbewertung (Modul 9) anhand der vorher festgelegten Bewertungsmaßstäbe auf seine kundenorientierte Qualität im Gesamten untersucht.

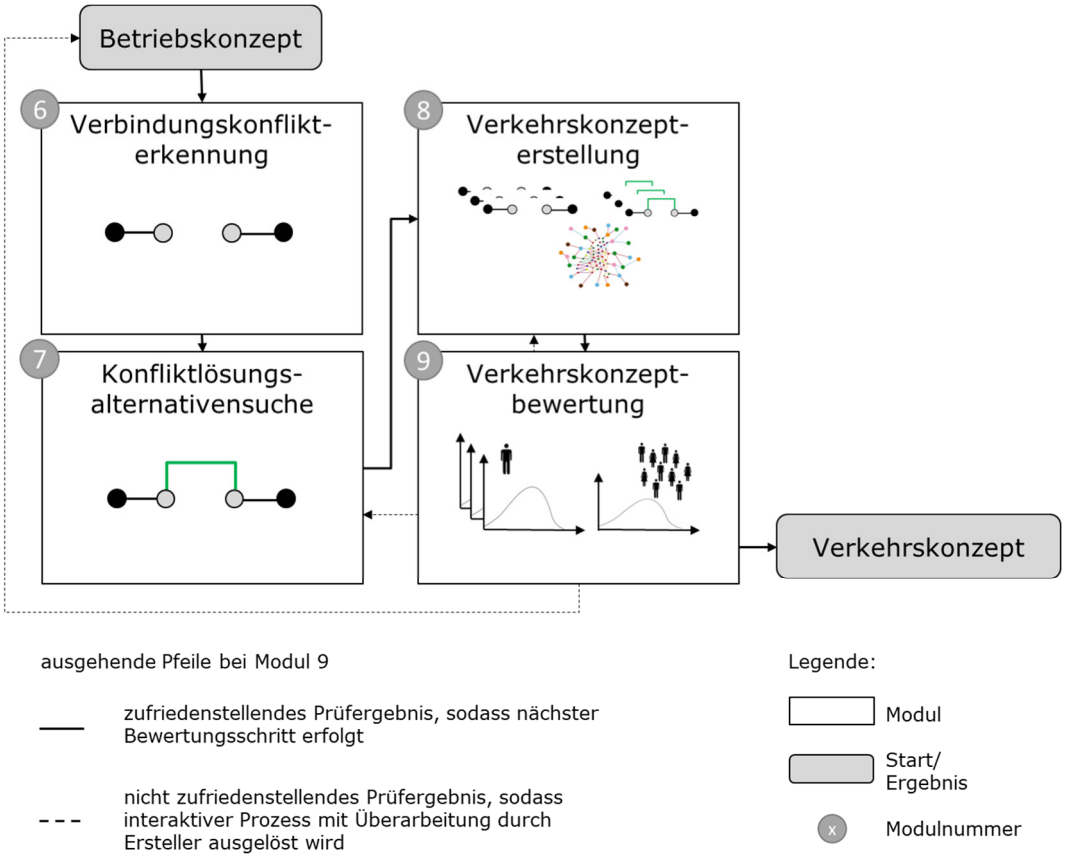


Abbildung 5-2: Module zur Erstellung und Bewertung eines Verkehrskonzepts (eigene Darstellung)

5.5 Kundenorientierte Bewertung eines Verkehrskonzepts und der verkehrlichen Maßnahmen

Das Ziel der Arbeit besteht darin, sicherzustellen, dass ein Störfallprogramm (bestehend aus Betriebskonzept und Verkehrskonzept) kundenorientiert ist (siehe Abschnitt 3.2).

Anhand des Verkehrskonzepts lassen sich die Auswirkungen der betrieblichen Maßnahmen auf den einzelnen Fahrgast abbilden. Die im Verkehrskonzept geplanten verkehrlichen Maßnahmen benötigen ausreichende Maßnahmenakzeptanz durch den Fahrgast, sodass dieser bereit ist, die Empfehlungen umzusetzen (siehe Unterabschnitt 2.5.1). Daher ist in diesem Abschnitt nun eine Bewertungsmethode zu erarbeiten, die konsistent eine Aussage über die kundenorientierte Qualität der Maßnahmen und des Störfallprogramms ermöglicht (Output).

Die Anforderungen an die Bewertung und deren Ergebnis basieren auf den Anforderungen an ein kundenorientiertes Störfallprogramm und den Anforderungen an das Verkehrskonzept aus Abschnitt 3.3. Zusammengefasst ergibt sich aus diesen Anforderungen, dass

- die Akzeptanz einer verkehrlichen Maßnahme aus der Attraktivität der Maßnahme für einen Fahrgast entsteht.
- eine Maßnahme nur attraktiv für den Fahrgast ist, wenn sie zudem die grundlegenden Anforderungen an die Machbarkeit und Verständlichkeit erfüllt.
- dass für die Bewertung alle Fahrgäste gleich wichtig sind.
- dass die Fahrgäste trotz Störung ihr gewünschtes Ziel erreichen und zwar am besten mit so wenigen Abweichungen (sowohl Route als auch zeitlich) wie möglich.

Ermittlung von Methode und Vorgehen zur Bewertung

Klassischerweise werden häufig zeitliche Abweichungen der Züge vom Fahrplan zur Beschreibung der Auswirkungen einer Störung verwendet. Die Auswirkungen eines Störfalls resultieren aber nicht nur in der Veränderung der Fahrtdauer eines betroffenen Zuges, sondern können ggfs. sowohl weitere zeitliche, als auch andere Eigenschaften der Reisekette (siehe Unterabschnitt 3.6.4) betreffen.

Gemäß Unterabschnitt 2.5.1 reagiert der Fahrgast auf maßgebende Änderungen des Angebots mit Änderungen seiner Verkehrsmittel- und/oder Routenwahl. Im Störfall hat der Fahrgast vor der Störung bereits seine Verkehrsmittel- und Routenwahl getroffen und muss nun sein Verhalten gezwungenermaßen anpassen. Gemäß den Anforderungen sollen die angebotenen Alternativen attraktiv sein und vom Fahrgast akzeptiert werden. Daher ist es nötig, zu berücksichtigen, wie die veränderten Angebotsmerkmale die Eigenschaften der Reisekette verändern und durch den Fahrgast wahrgenommen und anhand seiner subjektiven Empfindungen bewertet werden.

Eine etablierte Größe zur Abbildung der menschlichen Wahrnehmung des Verkehrsangebots und das resultierende Mobilitätsverhalten ist gemäß Unterabschnitt 2.5.1 der Verkehrswiderstand, der aus verschiedenen Komponenten der Reisezeit gebildet werden kann. Walther et al. (1997, S. 91) kommt zu dem Schluss, dass sich „mit dessen Hilfe […] alle Entscheidungsprozesse im Personenverkehr zu verlässig modellieren lassen“. Daher wird er hier als Bewertungsmaßstab für die einzelnen Veränderungen in jeder betroffenen Reisekette, die bereits ermittelte mögliche Konfliktlösungen erzeugen, verwendet. So kann die beste Alternative für einen erkannten Verbindungskonflikt unter Berücksichtigung der persönlichen Rahmenbedingungen und Bedürfnisse eines Fahrgastes anhand der Widerstandsveränderung einer Reisekette gewählt werden und eine gesamthafte Bewertung erfolgen.

Die von Walther entwickelten Zeitbewertungsfunktionen des Verkehrswiderstands dienen dabei einem simultanen Planungsalgorithmus zur Bewertung von geplanten Maßnahmen zur langfristigen Angebotsveränderung, wie bspw. Tarifänderungen, Taktanpassungen, Ausbauten. Ein Störfall hingegen tritt kurzfristig auf. Eine Anwendung der Widerstandsfunktionen und der Zeitbewertungsfunktionen für kurzfristiges und dynamisches Verkehrsmanagement würde eine Überprüfung der Tauglichkeit des Vorgehens nach Walther (1991) erfordern und ggfs. Anpassungen nötig machen. Im Rahmen dieser Arbeit werden aber Störfallprogramme adressiert. Diese werden für häufig auftretende Störfälle geplant und finden im Falle des Auftretens eines Störfalls wiederkehrend Anwendung. Zudem sollen die Störfallprogramme gemäß der Anforderung Zuverlässigkeit (siehe Abschnitt 3.3 (a2)) nicht zu stark vom regulären Mobilitätsverhalten abweichen und die wiederholende Anwendung eines Störfallprogramms führt zu einer gewissen Bekanntheit der Maßnahmen und somit einer Gewöhnung der Fahrgäste (siehe Unterabschnitt 2.3.4). Es wird somit von einer regelmäßigen Form der Wahrnehmung von Angebotsqualität in Störfällen bei Anwendung von Störfallprogrammen ausgegangen, sodass die Widerstandsbewertung nach Walther genutzt werden kann. In der Praxis können nach einem Anwendungszeitraum bei Bedarf die Werte und Funktionen aktualisiert werden. Dies ist gemäß Unterabschnitt 3.1.2 nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Um anforderungsgemäß alle Fahrgäste in die Bewertung aufzunehmen, müssen auch Fahrgäste ohne alternative Lösung, für die daher keine Widerstandsveränderung ermittelt werden kann, Bestandteil der Verkehrskonzeptbewertung in Modul 9 werden. Die Anforderung der Vollständigkeit (siehe Abschnitt 3.3 (a2)) fordert, dass jeder betroffene Fahrgast von den Maßnahmen berücksichtigt wird. Dies ist nicht immer möglich. Durch einen Zielerreichungsgrad kann der Anteil der Fahrgäste ohne alternative Lösung ermittelt werden. Dieser Bewertungsmaßstab ermittelt somit die Einhaltung einer Anforderung, trifft aber keine Aussage über die, gemäß Anforderung Kundenorientierung/Akzeptanz (siehe Abschnitt 3.3 (g2)) relevante, vom Fahrgast wahrgenommene Qualität des gesamten Verkehrskonzepts. Modul 9

benötigt daher einen Algorithmus, der die Auswirkungen für Fahrgäste ohne Konfliktlösung bewertet, sodass diese im Ergebnis von Modul 9 integriert sind.

Es erfolgt nun eine Ausdetaillierung zur Ermittlung der Widerstandsveränderung, indem zunächst alle Eigenschaften der Reisekette auf mögliche Veränderungen und ihre Auswirkungen untersucht werden. Anschließend können die als relevant für die Widerstandsveränderung identifizierten Eigenschaften in einer Bewertungsfunktion zusammengeführt werden.

Ermittlung der möglichen Veränderungen in der Reisekette für den Fahrgast

Um eine Bewertung basierend auf der individuellen Betroffenheit eines Fahrgasts aufzubauen, werden alle möglichen Veränderungen der Eigenschaften der Reisekette (siehe Unterabschnitt 3.6.4) identifiziert und hinsichtlich der Ausprägungen der möglichen Veränderungen analysiert. Die Einordnungen, wie sie in die Berechnung der Widerstandsveränderung eingehen können, werden in Tabelle 5-1 dargestellt.

Tabelle 5-1: Eigenschaften der Reise für die Widerstandsbewertung (eigene Darstellung)

Eigenschaft der Reisekette		mögliche Veränderung der Eigenschaft	Eingang in die Widerstandsbewertung
Aktionsknoten	Einstiegs-haltestelle	▪ geringfügig möglich, wenn fußläufig von der ursprünglichen Einstiegshaltestelle ▪ verändert die Relation	angepasste Zugangszeit zu Haltestellen
	Umsteige-haltestelle	▪ verändert die Route ▪ Servicequalität Umsteigehaltestellen ▪ Barrierefreiheit	Veränderung der Aufenthalts- und Umstiegsqualität
	Ausstiegs-haltestelle	▪ geringfügig möglich, wenn fußläufig von der ursprünglichen Einstiegshaltestelle ▪ verändert die Relation	angepasste Abgangszeit von Haltestellen
zeitliche Eigenschaften	Startzeit	▪ verspäteter Start an der Einstiegshaltestelle ▪ verfrühter Start an der Einstiegshaltestelle ist keine anzunehmende Möglichkeit	Wartezeiten am Bahnsteig
	Endzeit	▪ verspätetes Ende an der Ausstiegshaltestelle ▪ verfrühtes Ende an der Ausstiegshaltestelle	setzt sich aus allen zeitlichen Veränderungen der Reisekette zusammen
	Beförderungs-dauer	▪ Verlängerung oder Verkürzung ▪ veränderte Endzeit an der Ausstiegshaltestelle	setzt sich aus allen zeitlichen Veränderungen der Reisekette zusammen
	Abfahrtszeit	▪ früher: nur an den Aktionsknoten: Umsteigehaltestellen möglich (wenn Umsteigezeit machbar) ▪ später: nur an den Aktionsknoten: Einstiegs- und Umsteigehaltestelle	Auswirkungen zeigen sich in den Eigenschaften Umsteigezeit, Wartezeiten und Fahrtdauern

	Ankunftszeit	▪ früher: nur an den Aktionsknoten: Ausstiegs- und Umsteigehaltestelle ▪ später: nur an den Aktionsknoten: Ausstiegs- und Umsteigehaltestelle (wenn Umsteigedauer machbar)	Auswirkungen zeigen sich in den Eigenschaften Umsteigezeit, Wartezeiten und Fahrtdauern
	Fahrtdauer	▪ Verkürzung oder Verlängerung durch Veränderungen der Aktionskante(n)	veränderte Fahrtdauer (keine Wartezeit, da längere Fahrtdauer bei Einstieg bekannt)
Eigenschaften eines Aktionsknotens	Bahnsteig	▪ verändert sich in Abhängigkeit der Eigenschaften der Aktionskanten	resultiert ggfs. in veränderten Fußwegezeiten
	Fußwege-zeiten	▪ ggfs. Veränderung bei Bahnsteigwechsel von Zu- oder Abbringer	Bestandteil der Veränderung von Umsteigezeiten
	Umsteige-zeiten	▪ Verkürzung oder Verlängerung durch Veränderungen einer oder beider Aktionskanten → verbindungsspezifisch ▪ setzt sich aus Veränderung bei Fußwegezeiten und/oder Wartezeiten am Bahnsteig zusammen	Umsteigezeiten je Umstieg
Eigenschaften einer Aktionskante	Zugnummer	▪ Veränderungen, die sich ergeben, werden durch die anderen Eigenschaften ausgedrückt	keine Relevanz
	Linien-nummer	▪ Veränderungen, die sich ergeben, werden durch die anderen Eigenschaften ausgedrückt	keine Relevanz
	Verkehrs-mittel	▪ Veränderungen an Bedienungsqualität und Beförderungsqualität	Abbildung über die Auswirkungen des Verkehrsmittelwechsels über die zeitlichen Eigenschaften
Qualitätseigen-schaften	Anzahl der Umstiege	▪ Erhöhung oder Verringerung der Anzahl der Umstiege ▪ verändert die Route	Bewertung der Anzahl der Umstiege
	Kosten	▪ ausgeblendet wegen der Anforderung zur Kostenneutralität	keine Relevanz

Bewertungsfunktion der Maßnahmen durch den Reisenden

Die in der Spalte „Eingang in die Widerstandsbewertung“ dokumentierten Veränderungen der Eigenschaften werden im Weiteren konsolidiert und basierend auf Unterabschnitt 2.5.1 in einer Funktion zur Berechnung der Widerstandsveränderung zusammengeführt.

Für die Veränderung des Widerstands des Fahrgasts durch die Alternative ergeben sich somit folgende Eigenschaften als Bestandteile der Bewertungsfunktion:

- Veränderung der Fahrtdauer (geplant und außerplanmäßig),
- Veränderung der Wartezeit am Bahnsteig (an der Einstiegshaltestelle),
- Veränderung der Umsteigezeit,
- Veränderung der Anzahl der Umstiege,
- Veränderung der Zugangs- und Abgangszeiten zu/von Haltestellen durch Fußwege und
- Veränderung der Aufenthalts- und Umstiegsqualität.

Dies ermöglicht die Erstellung einer problemadäquaten Bewertungsfunktion für die Widerstandsveränderung basierend auf dem in Unterabschnitt 2.5.1 beschriebenen Standardvorgehen.

Fahrzeitverlängerungen entstehen zum einen durch Verbindungen, die für den Störfall geplant eine längere Fahrzeit aufweisen. Hierbei handelt es sich um störfallfahrplan-induzierte Fahrtdauerveränderung und verbindungsinduzierte Fahrtdauerveränderungen gemäß Unterabschnitt 3.6.4. Der Fahrgast befindet sich somit länger im Verkehrsmittel, dies ist aber bekannt und wird somit als Fahrzeitanpassung ohne weitere Zeitbewertung berücksichtigt.

Zum anderen entstehen Fahrzeitverlängerungen durch Verbindungen mit Verkehrsmitteln, die ungeplant verspätet sind, und dies somit nicht der kommunizierten Verbindungsalternative entspricht. Hierbei handelt es sich um einschwinginduzierte Fahrtdauerverlängerungen gemäß Unterabschnitt 3.6.4. Diese Zeitanteile werden durch den Fahrgast negativ bewertet und daher anhand einen Zeitbewertungsfaktors gewichtet.

In der Literatur sind keine Zeitbewertungsfunktionen für die Aufenthalts- und Umstiegsqualität enthalten und es wäre eine qualitative Einordnung jedes Aktionsknotens anhand der regionalen Gegebenheiten notwendig. Da dies beides als nicht gegeben angesehen wird, ist die Veränderung der Aufenthalts- und Umstiegsqualität nicht Bestandteil der Bewertungsfunktion. Sollten hierzu weitere Forschungsarbeiten und Datenerhebungen erfolgen, kann dies als weitere Summand in der Funktion ergänzt werden. Es ergibt sich somit basierend auf Walther (siehe Unterabschnitt 2.5.1) folgende Bewertungsfunktion:

$$\Delta W = \underbrace{\left(t_{F,an,neu} \cdot ZB_F - t_{F,an,alt} \cdot ZB_F\right)}_{\text{Widerstandveränderung durch Anpassung der Zugangszeit bei veränderter Einstiegshaltestelle}} + \underbrace{\left(t_{Fahrt,neu} - t_{Fahrt,alt}\right)}_{\text{Widerstandveränderung durch Anpassung der Fahrzeit}} +$$

$$\underbrace{\left(t_{W,Bstg,neu} \cdot ZB_{W,Bstg} - t_{W,Bstg,alt} \cdot ZB_{W,Bstg}\right)}_{\text{Widerstandveränderung durch Anpassung der Wartezeit am Bahnsteig an der Einstiegshaltestelle}} + \underbrace{\left(\sum w_{U,neu} - \sum w_{u,alt}\right)}_{\text{Widerstandveränderung durch Anpassung der Umstiege (Dauer und Anzahl)}} +$$

$$\underbrace{\left(t_{W,Fzg,} \cdot ZB_{W,Fzg}\right)}_{\text{Widerstandveränderung durch Wartezeit im verspäteten Fahrzeug}} + \underbrace{\left(t_{F,\,ab,neu} \cdot ZB_F - t_{F,ab,alt} \cdot ZB_F\right)}_{\text{Widerstandveränderung durch Anpassung der Abgangszeit bei veränderter Ausstiegshaltestelle}}$$

dabei gilt:

$$\sum w_U = t_{U1} \cdot ZB_U + (a \cdot t_{U2} \cdot ZB_U) + (b \cdot t_{U3} \cdot ZB_U) + \cdots + (b \cdot t_{Un} \cdot ZB_U)$$

mit:

w_U	Widerstand der Umstiege,
t_{Un}	Umsteigezeit je Umstieg n,
a	Parameter zur verstärkten Gewichtung des zweiten Umstieges,
b	Parameter zur verstärkten Gewichtung ab dem dritten Umstieg,
t_F	Fußwegezeiten des Zu- oder Abgangs,
$t_{W,Bstg}$	Wartezeiten, die am Bahnsteig der Einstiegshaltestelle geduldet werden müssen,
$t_{W,Fzg}$	Wartezeiten, die in einem verspäteten Fahrzeug geduldet werden müssen,
t_{Fahrt}	Fahrzeiten sowie
ZB	jeweilig zugehöriger Zeitbewertungsfaktor entsprechend Unterabschnitt 2.5.1.

Der Ansatz von Walther konzipiert die Bewertung durch Wahrnehmung der Angebotsqualität zur Anwendung auf langfristige Maßnahmen, wie die in Unterabschnitt 2.5.1 genannten Beispiele zu Benzinpreiserhöhungen oder Parkgebühren. Hingegen entstehen außerplanmäßige Fahrzeitverlängerungen in Form von Verspätungen in Abhängigkeit der Betriebslage bzw. des Störfalls. Hierfür wird daher auch ein weiterer Zeitbewertungsfaktor benötigt, der Verspätungen, die der Fahrgast im Fahrzeug unterwegs erleidet, bewertet. Dazu ist keine Funktion bekannt, zudem ist die außerplanmäßige Fahrzeitverlängerung, abweichend von kommunizierten Verbindungen, nicht der zu bewertende Standardfall. Daher wird nach Norta (2012) basierend auf Maidment (1988), ein konstanter Wert von 2,5 als $ZB_{W,Fzg}$ gewählt, der aber bei neuen Forschungserkenntnissen problemlos aktualisiert oder durch eine Funktion ersetzt werden kann.

Eine Befragung zur Bewertung von Maßnahmen zur Reisendenlenkung in Störfallsituationen wurde von Boltze und Gillich (2017) durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass die Anzahl an Umstiegen bei den meisten Fahrgästen bei zwei Umstiegen liegt. Es wird daher davon ausgegangen, dass zwei Umstiege für die Fahrgäste akzeptabel sind, wobei im Störfall ein zusätzlicher Umstieg nicht unwahrscheinlich erscheint. Daher werden die einzelnen Umstiege nicht anhand ihres Zeitbedarfs, sondern auch anhand ihrer Anzahl zunehmend gewichtet.

Gemäß der Anforderung an Zuverlässigkeit für die Fahrgäste sind die Abweichungen gering zu halten. Veränderungen von der Regelverbindung sollen klein gehalten werden, da das Abweichen von Gewohnheiten einen Aufwand darstellt und somit als eine unattraktive Erfahrung für den Fahrgast eingestuft werden kann. Auch wenn bspw. die Freigabe eines Fernverkehrszuges die Fahrzeiten reduzieren würde, so entsteht dem Fahrgast ein Mehraufwand durch Informieren und Umorientieren.

Daher kann durch das Verkehrskonzept in der Wahrnehmung keine Verbesserung im Vergleich zum Regelbetrieb erreicht werden. Daher gilt $\Delta W = 0$ für $\Delta W < 0$.

Die Berechnung von ΔW gilt dabei für einen Verbindungskonflikt und einen Fahrgast. Gemäß der Anforderung Vollständigkeit in Abschnitt 3.3 (a2) sind alle von Maßnahmen betroffenen Fahrgäste im Rahmen einer Bewertung berücksichtigen. Die Bewertung der Widerstandsveränderung ist daher anhand der Anzahl der von diesem Verbindungskonflikt betroffenen Fahrgäste zu gewichten, wenn Durchschnitte gebildet werden müssen.

Das Verkehrskonzept und seine Maßnahmen adressieren nur die Fahrgäste bei denen eine Alternative notwendig ist. Im Sinne der Anforderung Zuverlässigkeit aus Abschnitt 3.3 (a2) soll keine Optimierung weiterhin funktionierende Verbindungen, bspw. durch Umleitungsnutzung, geplant werden. Die Fahrgäste die weiterhin ihre für den Regelbetrieb geplante Verbindung ohne Veränderung nutzen können, werden daher auch nicht in der Bewertung berücksichtigt.

Zusammenfassung

Zur Abbildung der Auswirkungen auf den Fahrgast in dessen Wahrnehmung werden Verkehrswiderstandsveränderungen ermittelt. Die möglichen Veränderungen in der Reisekette wurden hergeleitet und die relevanten in einer Bewertungsfunktion zusammengeführt. Dies kann in den folgenden Modulen genutzt werden, wenn eine Bewertung erforderlich wird – zumindest aber in Modul 9 zur Verkehrskonzeptbewertung.

5.6 Modul 6: Verbindungskonflikterkennung

5.6.1 Einleitung

Das Ziel des Moduls „Verbindungskonflikterkennung“ ist es, diejenigen Verbindungen und Relationen, auf denen das SFP eine Veränderung der Reisekette (siehe Unterabschnitt 3.6.4) für den Fahrgast im ÖPNV erzeugt (Verbindung nicht mehr vorhanden/Relation nicht mehr vorhanden), zu finden.

Der Input ist ein geprüftes Betriebskonzept und das Ergebnis die Liste der erkannten Verbindungskonflikte.

Definition Verbindungskonflikt

Relevant für die Frage, ob ein Verbindungskonflikt vorliegt, ist, ob der Fahrgast negative Veränderungen in seiner geplanten Reisekette hinnehmen muss. Ist das der Fall, liegt ein Verbindungskonflikt vor. Ist dies nicht der Fall, liegt kein Verbindungskonflikt vor.

Gemäß Abschnitt 2.5.1 hängt der Widerstand für den Fahrgast von der Attraktivität seiner gewählten Verbindung ab. Genau dann, wenn dieser steigt, liegt die im vorigen Absatz genannte negative Veränderung in seiner geplanten Reisekette vor (z. B. Fahrzeitverlängerung, zusätzlicher Umstieg). Somit eignet sich der Widerstand als Kenngröße zur Bestimmung, ob ein Verbindungskonflikt vorliegt. Diese in der Widerstandserhöhung abgebildete verminderte Attraktivität reicht von wahrnehmbarer Einschränkung für den Reisenden durch Verschlechterung der Verbindung bis hin zu einer Verbindung, die gar nicht mehr verfügbar ist.

Anforderungen

Die Bestimmung der Anforderungen an die Verbindungskonflikterkennung und deren Ergebnis basieren auf den Anforderungen an ein kundenorientiertes Störfallprogramm und den Anforderungen an den Bestandteil des Verkehrskonzeptes (siehe Abschnitt 3.3). Im Folgenden sind daraus die modulrelevanten Anforderungen ausgewählt und spezifiziert. In Klammern wird der Anforderungsbereich, zu dem die einzelne Anforderung gehört, ergänzt:

- Vollständigkeit (e2): Um jeden Fahrgast zu berücksichtigen, sind alle regulären Verbindungen, die im Störfall nicht mehr verfügbar sind, zu ermitteln.
- Weiterentwicklungsfähigkeit/Operationalität/geringe Rechenzeit (a2): Um zukünftige Weiterentwicklungen hin zur Echtzeitdisposition von Störfällen zu ermöglichen, ist dazu eine zügige Ermittlung von Verbindungskonflikten wichtig. Damit für eine Weiterentwicklung inkl. Echtzeitdisposition der Störfälle keine neue Methode zur Verbindungskonflikterkennung erstellt werden muss, ist darauf zu achten, dass das nun entwickelte Vorgehen leicht adaptiert und mit kurzer Rechenzeit umgesetzt werden kann. Zudem ist die kurze Rechenzeit für die Nutzerfreundlichkeit des Tools eine Anforderung, die für alle Algorithmen gilt.
- Eignung (e2): Um jeden Fahrgast mit geeigneten Inhalten zuverlässig informieren zu können, ist eine eindeutige Aussage zu seiner Betroffenheit zu ermöglichen. Es ist somit eine verbindungsbezogene Ermittlung der Verbindungskonflikte durchzuführen.
- integriertes SFP – für Betrieb und Verkehr (a2)/Anleitung – Iteration (f2): Die Verbindungskonflikterkennung ist die Basis für die verkehrliche Konfliktlösung. Aber auch ein optimales Verkehrskonzept (situationsabhängig von dem zugrundeliegenden Betriebskonzept) kann ggf. nicht jeden Fahrgast ans Ziel bringen. Wenn betriebliches Verbesserungspotential besteht, sollte dieses eindeutig aufgezeigt werden können.
- Individualisierung/Nachvollziehbarkeit (e2): Individuelle Verbindungskonflikte dienen als Grundlage für die individuellen Lösungen. Zudem muss aber beim Aufbau eines Verkehrskonzepts auch vom Individuum auf die Masse aller Fahrgäste abstrahiert werden (siehe Abschnitt 5.3). Um jeden Fahrgast informieren zu können, muss ein Verkehrskonzept aufgebaut werden, das individuelle und allgemein kommunizierbare Lösungen für die konfliktären Verbindungen ermitteln kann. Hierzu muss der erarbeitete Output, Verbindungskonflikt und seine Ursachen, weiterverwendbar für die beiden Arten der verkehrlichen Konfliktlösung und deren aufbauende Kommunikation an den Fahrgast sein.

Zusammengefasst ergibt sich folgende allgemeine Bedingung für die Verbindungskonflikterkennung: Wenn sich der Widerstand für den Fahrgast durch ein SFP erhöht, ist für den Fahrgast eine

Einschränkung durch Störung und Betriebskonzept gegeben. Diese Verbindungskonflikte sind im Rahmen von Modul 6 zu erkennen.

5.6.2 Methode

Bei der Erstellung eines Verkehrskonzepts kann von einem NP-schweren Problem ausgegangen werden (siehe Abschnitt 5.2). Zum Umgang mit der NP-Schwere wurden bereits Teilprobleme modularisiert. Weiterhin ist trotzdem, entsprechend der Methode in Abschnitt 3.4, die Einschränkung der Problemgröße zur Reduktion der Rechenzeit anzustreben.

Die Anforderungen zeigen, dass die Verbindungskonflikterkennung sowohl schnell als auch zugleich vollständig erfolgen muss. Abhängig von der Problemgröße kann dies ein Widerspruch sein. Da alle konfliktären Verbindungen bestimmt werden sollen, muss eine vollständige Lösung gefunden werden. Die Methode hierfür sollte aber trotzdem möglichst rechenzeitarm agieren. Hierzu sind Schleifen zu vermeiden und der Suchraum ist (ohne Verlust der Vollständigkeit) klar einzugrenzen.

Um basierend auf dem Verkehrskonzept ein betriebliches Verbesserungspotential aufzeigen zu können, muss den Verbindungskonflikten ihre betriebliche Ursache zugeordnet werden. Zudem sind die Verbindungskonflikte auch für Informationszwecke aufzubereiten.

Zusammenfassend ergibt sich aus den Anforderungen, dass ein Suchalgorithmus mit beschränktem Suchraum benötigt wird, der ein vollständiges und eindeutiges Ergebnis liefert. Daraus sind bei Bedarf Rückschlüsse auf Anpassungen im Betriebskonzept zu ziehen und bei Anwendung des Störfallprogramms Informationen für den Reisenden bereitzustellen.

Im Weiteren werden zunächst Möglichkeiten erörtert, um die Problemgröße anforderungsgerecht einzuschränken, und anschließend wird eine Methode dafür ausgewählt und detailliert, bevor in den folgenden Unterabschnitten Vorgehensweise und Algorithmus erarbeitet werden.

Möglichkeiten zur Einschränkung der Problemgröße zur Ermittlung der Verbindungskonflikte

Aus den Anforderungen hat sich ergeben, dass die Problemgröße einzuschränken ist, indem der Suchraum entsprechend einzugrenzen ist, wobei weiterhin ein vollständiges und eindeutiges, aber schnelles Ergebnis ermöglicht werden soll. Die Baumstruktur aus Abschnitt 5.2 gibt den möglichen Suchraum für Verbindungskonflikte vor, wobei nur die Verkehrskanten relevant sind, die mit einer durch eine Maßnahme adressierten Zugfahrt belegt sind. Ziel ist es nun, die davon betroffenen Verbindungen zu finden, ohne alle anderen, nicht konfliktären Verbindungen ebenso zu untersuchen.

Das in dieser Arbeit betrachtete System (siehe Abschnitt 1.1) besteht aus den drei Einheiten: Infrastruktur (Fahrzeug und Fahrweg), Betrieb und Verkehr. Diese drei Einheiten bilden eine Grundlage für die Beschreibung der Auswirkungen in der Störung (siehe Abbildung 5-3).

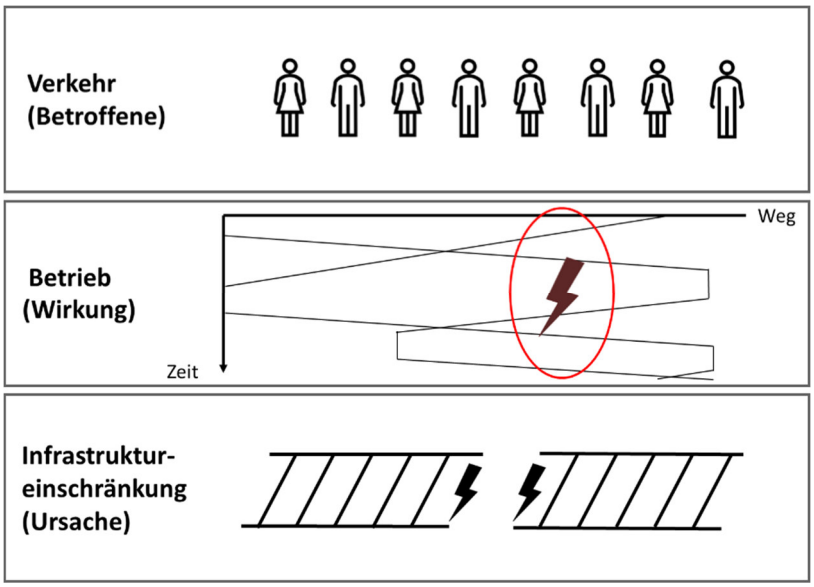


Abbildung 5-3: Auswirkungen einer Störung im betrachteten System (eigene Darstellung)

Eine Störung verursacht eine eingeschränkte Infrastruktur. Ein SFP beinhaltet betriebliche Maßnahmen, die eine *Wirkung* auf die Zugfahrten des Regelbetriebs erzeugen. Die Verbindungen, die Fahrgäste im Regelbetrieb nutzen möchten, können sowohl im direkten räumlichen Zusammenhang mit der Ursache und deren dortigen Wirkungen (bspw. geplante Verbindung würde im direkten Störungsbereich verkehren) als auch nur durch die Wirkung (bspw. Entfall von Verstärkerfahrten auf der gesamten Linie) verändert werden und machen den Fahrgast somit zu dem *Betroffenen,* der sein Mobilitätsverhalten durch entfallende Verbindungen anpassen muss.

Im Weiteren sollen diese drei Ansatzpunkte hinsichtlich ihrer Eignung zur Reduktion der Problemgröße untersucht werden.

Infrastruktur: Ursache

Einschränkungen der Infrastrukturverfügbarkeit einzelner Betriebsstellen oder Strecken können eine (vollständige) Einschränkung des Verkehrs herbeiführen.

Zudem werden bei der Erstellung von Betriebskonzepten auch Maßnahmen auf Linien/Zugfahrten angewendet, die keine betroffene Betriebsstelle/Strecke durchfahren, um bspw. Kapazitäten auf Umleitstrecken oder in Wendebahnhöfen zu schaffen (siehe Unterabschnitt 3.1.2). Die Infrastruktur ist daher als alleiniges Kriterium zur Verbindungskonflikterkennung nicht ausreichend.

Betrieb: Wirkung

Durch die Störung müssen betriebliche Maßnahmen zur Aufrechterhaltung und Stabilisierung des Betriebs angewandt werden.

Die Maßnahmen des Betriebskonzepts führen zu Angebotsveränderungen, wie Fahrzeitverlängerungen, verbunden mit geänderten Ankunfts- und Abfahrtszeiten und (Teil-)Ausfällen, die in verspäteten Ankünften, Anschlussverlusten oder Relationsausfällen resultieren. Alle diese Maßnahmen führen zu Widerstandsveränderungen.

Somit lassen sich Verbindungskonflikte anhand betrieblicher Maßnahmen identifizieren. Umgekehrt entstehen Verbindungskonflikte nur, wenn betriebliche Maßnahmen eine Verbindung betreffen. Da die betrieblichen Maßnahmen ggfs. nur Laufwegabschnitte eines Zuges betreffen, muss nicht jede Verbindung mit einem Zug, dem eine betriebliche Maßnahme zugeordnet wurde, konfliktär sein.

Verkehr: Betroffene

Für die Fahrgäste ist es relevant, die Information zu erhalten, ob sie zu den von der Störung betroffenen Fahrgästen gehören. Hierzu könnte eine Prüfung auf Funktionsfähigkeit jeder einzelnen im Regelbetrieb möglichen Verbindung erfolgen, aber dies wurde bereits zu Abschnittsbeginn aufgrund der Problemgröße ausgeschlossen.

Daher wird nun nach einer Möglichkeit zur Einschränkung dieser gesucht. Ausgehend vom Betroffenen besteht die Möglichkeit zur Begrenzung des Lösungsraums, indem mehrere Relationen auf Teilabschnitten gebündelt werden. Die Zusammenfassung der Fahrgäste zu typischen Strömen auf viel genutzten Teilabschnitten von Relationen würde eine Einschränkung des Suchraums bedeuten, da nur eine reduzierte Anzahl an Verbindungen dieser Relationen auf Verfügbarkeit überprüft werden müsste. Dies bedeutet aber trotzdem eine Überprüfung einer Vielzahl von Verbindungen, die nicht konfliktär sind.

Auswahl der Methode zur Einschränkung der Problemgröße

Zur Auswahl der Methode wird zunächst eine abwägende Diskussion der einzelnen vorgestellten Einheiten durchgeführt.

Bei Verwendung der *Infrastruktur* als Ausgangspunkt zum Aufbau einer Methode und dem anschließenden Vorgehen und Algorithmus würde die Verbindungskonflikterkennung auf gestörten Betriebsstellen basieren. Wie beschrieben, sind aber weitere Schritte notwendig, um festzustellen, ob und welche Verbindung tatsächlich konfliktär wäre. Zunächst würde das Produkt der drei Größen (Anzahl der betroffenen Betriebsstellen, Anzahl der betroffenen Zugfahrten je Betriebsstelle und Anzahl der betroffenen Verbindungen je Zugfahrt) ermittelt werden, sodass das Problem groß bleibt. Dieses vergrößert sich zudem, wenn mehrere Betriebsstellen auf einer Strecke ohne Abzweigungen und Zugwenden betroffen sind, da es hierbei zu mehrfacher Verbindungskonflikterkennung käme, obwohl dies eigentlich nur einmal erforderlich ist.

Zudem fehlen die konfliktären Verbindungen, die die betroffenen Betriebsstellen nicht beinhalten, aber durch die betrieblichen Maßnahmen trotzdem auftreten. Die Anforderung der Vollständigkeit ist daher nicht ohne Weiteres erfüllt.

Bei der Verwendung der *betrieb*lichen Veränderungen als Ausgangspunkt zum Aufbau einer Methode und dem anschließenden Vorgehen und Algorithmus ist nicht jede Verbindung, die einen Zug enthält, dem eine betriebliche Maßnahme zugeordnet wurde, konfliktär. Eine Ausnahme bildet die Maßnahme Ausfall, bei der alle zugehörigen Verbindungen als zwingend konfliktär bestimmbar sind. Die von anderen Maßnahmen, die nicht den gesamten Laufweg verändern, betroffenen Züge benötigen jedoch weitere Ermittlungsschritte, in denen die Verortung der Maßnahme mit einer Verortung der Verbindung abgeglichen wird.

Bei der Verwendung der *verkehr*lichen Veränderungen als Ausgangspunkt zum Aufbau einer Methode und dem anschließenden Vorgehen und Algorithmus müssten Fahrgäste gebündelt werden, um einen vollständigen Vergleich aller Verbindungen des Regelbetriebs zu vermeiden. Die Datenlage zu Reisendenströmen ist meist von eingeschränkter Aussagekraft, zudem erzeugt die Bündelung zur Eingrenzung des Suchraums zugleich eine Einschränkung der Ergebnismenge der konfliktären Verbindungen, sodass die Anforderung der Vollständigkeit daher nicht erfüllt wäre.

Durch die Anforderung, dass jeder Fahrgast gleich wichtig ist (siehe Unterabschnitt 3.3 (e2)), ist zwingend die Anforderung der Vollständigkeit in diesem Modul zu erfüllen. Wenn nur Verbindungskonflikte für ausgewählte Reisendenströme ermittelt werden, sind sowohl

modulspezifische als auch allgemeine Anforderungen nicht erfüllt. Eine rein infrastrukturbezogene Betrachtung kann ebenso die Anforderung der Vollständigkeit nicht erfüllen.

Diese Anforderung kann nur erfüllt werden, wenn der Betrieb als Ausgangspunkt zur Verbindungskonflikterkennung verwendet wird.

Der Suchraum aller Verbindungen kann zum einen so durchsucht werden, dass Verbindungen gesucht werden, die weiterhin verfügbar sind, oder zum anderen so durchsucht werden, dass Verbindungen gesucht werden, die konfliktär sind. Entsprechend dem Ziel des Moduls sind die konfliktären Verbindungen zu ermitteln.

Zunächst sind einmal alle Verbindungen im Untersuchungsraum und -zeitraum in der computergestützten Fahrplanauskunft abzufragen. Um die Rechenzeit im Weiteren zu verringern, können die Verbindungen anhand ihrer Aktionsknoten in den Aktionskanten entsprechende Verbindungsabschnitte geteilt und diese den Zügen, die das Verkehrsmittel des Verbindungsabschnitts darstellen, attribuiert werden. So entsteht ein eingegrenzter Suchraum, da weitergehend nur die Menge der Züge durchsucht werden muss, um konfliktäre Verbindungsabschnitte und somit Verbindungskonflikte zu ermitteln.

Die aufwendige Ermittlung aller möglichen Verbindungen im Untersuchungszeitraum und -raum in einer bestehenden Fahrplanauskunft muss zunächst genau einmal durchgeführt werden. Anschließend kann deren Aufbereitung in Abschnitten als Attribute an den Zügen für alle Betriebskonzepte im identischen Untersuchungsraum und -zeitraum wiederverwendet werden.

Anhand des Betriebskonzepts können die unveränderten, veränderten und ausfallenden Züge sowie die dadurch betroffenen Verkehrsknoten und -kanten ermittelt werden. Diese können dann mit den Verbindungsabschnitten abgeglichen werden, um somit eine betriebskonzeptspezifische Verbindungskonfliktermittlung zu ermöglichen.

Im Weiteren werden dafür nun die Vorgehensweise und der Algorithmus erarbeitet.

5.6.3 Vorgehensweise

In diesem Unterabschnitt werden die möglichen Inputbestandteile und die in Unterabschnitt 5.6.2 entwickelte Methode verwendet, um eine Vorgehensweise zur Verbindungskonflikterkennung zu erarbeiten. Output der Vorgehensweise ist die vollständige Menge konfliktärer Verbindungen, aus der Teilmengen anhand der konfliktären Verbindungsabschnitte abgerufen werden können, sodass eine Rückkopplung zur Verbesserung des Betriebskonzepts bei Bedarf zielführend ermöglicht werden kann.

Für alle Störfallprogramme mit gleichem Untersuchungsraum und -zeitraum:
Abfrage aller möglichen Verbindungen und deren Attribuierung an zugehörige Züge

Für den betrachteten Untersuchungsraum und -zeitraum werden in einer computergestützten Fahrplanauskunft einmal die verfügbaren Verbindungen einschließlich der Aktionsknoten im Betrachtungsraum ausgelesen. Dabei beginnt und/oder endet die Verbindung im Untersuchungszeitraum. Verbindungsbeginn nach einem Zulauf aus dem Luftverkehr kann bspw. der S-Bahnhof am Flughafen sein.

Jede Verbindung ist anhand der Aktionsknoten in Verbindungsabschnitte entsprechend der Aktionskanten zu teilen. Für jeden Verbindungsabschnitt sind die beiden Aktionsknoten und die verbindende Aktionskante zu speichern.

Gemäß Abbildung 5-1 ist die Anzahl der Verbindungen höher als die Anzahl der Züge. Daher werden nun im Folgenden alle verkehrenden Züge aus den abgefragten Verbindungen ausgelesen. Anschließend werden diesen die Verbindungsabschnitte attribuiert, in denen sie Verwendung finden.

Es liegen somit abschließend alle Züge mit Verbindungsabschnittsattributen vor.

Für ein vorliegendes Betriebskonzept:
Ermittlung konfliktärer Verbindungen je Zug eines Betriebskonzepts

Aus dem Betriebskonzept sind diejenigen Züge zu ermitteln, die eine betriebliche Maßnahme erhalten. Für diese Züge sind die Verkehrsknoten und -kanten zu bestimmen, die aufgrund der Maßnahme nicht mehr entsprechend dem Fahrplan im Regelbetrieb genutzt werden.

Die gemäß Unterabschnitt 3.6.1 zu berücksichtigenden betrieblichen Maßnahmen, werden dazu wie folgt benannt:

- bm = 1 Ausfall
- bm = 2 Teilausfall
- bm = 3 Teilausfall mit Ersatz
- bm = 4 Umleitung
- bm = 5 Umleitung mit Teilausfall
- bm = 6 Umleitung mit Teilausfall und Ersatz
- bm = 7 Fahrplanmaßnahmen, die zu maßnahmeninduzierten zeitlichen Verschiebungen im Störfallfahrplan zum Fahrplan des Regelbetriebs führen

Der Zustand der Verkehrsknoten und -kanten im Störfall kann von unveränderter Nutzung, über veränderte (räumlich oder zeitlich) Nutzung bis hin zur Nicht-Nutzung beschrieben werden. Ein Verbindungskonflikt kann durch die beiden Letzteren ausgelöst werden. Daher sind zu ermitteln:

- Nicht-Nutzung: gestörte Verkehrsknoten und -kanten (Bsp. Teilausfälle)
  - gestörte Verkehrsknoten (gKnotV)
  - gestörte Verkehrskanten (gKantV)
    Beide Untereinheiten erzeugen Verbindungskonflikte und stellen somit relevante Untereinheiten zur Ermittlung dar.
- veränderte Nutzung (Bsp. Wenden oder Umleitung)
  - räumliche Veränderung
    Die räumliche Veränderung eines Verkehrsknotens entsteht bei der Nutzung eines neuen Knotens für einen Halt. Die Einbindung im Rahmen der neuen Verbindungsmöglichkeiten als Konfliktlösungsalternativen zeigt sich aber in den Verbindungen des Regelbetriebs nicht. Die dafür entfallenden Halte werden durch gKnotV bereits erkannt. Die räumliche Veränderung einer Verkehrskante verdeutlicht den neuen Fahrtverlauf des Zuges, womit ein Fahrgast als Nutzer einer umgeleiteten Fahrt erkannt werden kann. Die ausfallenden Verkehrskanten die eigentlich gKantV sind, werden bei räumliche Veränderung zu einer vKantV. Die räumlich veränderte Verkehrskante stellt daher eine relevante Untereinheit dar. Dies erzeugt aber nicht zwingend einen Verbindungskonflikt. Daher sind die räumlichen Veränderungen nicht relevant.

- zeitliche Veränderung
  Die zeitliche Veränderung eines Verkehrsknotens (vKnotV) entsteht bei veränderten Ankunfts- und Abfahrtszeiten. Diese können Verbindungskonflikte in der Reisekette erzeugen, wodurch sie eine relevante Untereinheit darstellen. Die zeitlichen Veränderungen auf Verkehrskanten durch veränderte Fahrtdauern resultieren nur dann in einem wahrnehmbaren Unterschied und somit ggfs. Verbindungskonflikt für den Fahrgast, wenn sich dadurch die Ankunfts- und Abfahrtszeiten innerhalb seiner Reisekette verändern. Die Betrachtung der zeitlichen Veränderung eines Verkehrsknotens ist somit ausreichend.

Die veränderten und gestörten Verkehrsknoten und -kanten werden jeweils an den Zug attribuiert und im weiteren Störabschnitt genannt.

Für die Züge mit der betrieblichen Maßnahme Ausfall sind alle attribuierten Verbindungsabschnitte nicht mehr möglich und somit die jeweils verknüpften Verbindungen konfliktär.

Für die Züge mit den restlichen betrieblichen Maßnahmen ist festzustellen, ob diese zu Verbindungskonflikten für den Fahrgast führen. Die am Zug attribuierten Verbindungsabschnitte sind mit dem attribuierte Störabschnitt abzugleichen. Wenn dabei mindestens eine Aktionskante und/oder -knoten der Verbindungsabschnitte mit einer Verkehrskante und/oder -knoten des Störabschnitts übereinstimmt, entsteht ein Verbindungskonflikt.

Ein veränderter Verkehrsknoten könnte auch eine Verfrühung darstellen und die Verbindung wäre somit Teil der konfliktären Menge, die in die Bewertung eingeht, wenn sich eine Widerstanderhöhung ergibt, für die aber anforderungsgemäß keine Alternative gesucht wird.

Bei den Verbindungen die eine Verspätung beinhalten, ist der betroffene Aktionsknoten näher zu betrachten. Verspätete Ankünfte am Aktionsknoten Ziel erzeugen eine konfliktäre Verbindung, da dies zu einer Widerstandveränderung führt. Wenn der Umstieg durch die Verspätung nicht mehr möglich ist, erzeugt die verspätete Ankunft am Aktionsknoten Umstieg eine konfliktäre Verbindung für die eine Alternative zu ermitteln ist. Wenn der Umstieg durch die Verspätung weiterhin möglich ist, erzeugt die verspätete Ankunft am Aktionsknoten Umstieg eine konfliktäre Verbindung, die in die Bewertung eingeht, wenn sich eine Widerstanderhöhung ergibt, für die aber anforderungsgemäß keine Alternative gesucht wird.

Jedem erkannten Verbindungskonflikt ist anschließend noch die Anzahl der Fahrgäste, die die Verbindung im Regelbetrieb nutzen wollten, zuzuordnen.

5.6.4 Algorithmus

Nachdem in den Unterabschnitten Methode und Vorgehensweise erläutert wurde, welche Aufgaben der Algorithmus hat und wie der Input verarbeitet wird, um den gewünschten Output zu erreichen, erfolgt hier die formalere Notation der einzelnen Arbeitsschritte.

Abbildung 5-4 bietet eine Übersicht der Schritte und ihre Zuordnung zur Ermittlung und Attribuierung von Verbindungsabschnitten für einen Untersuchungsraum und -zeitraum sowie die Ermittlung konfliktärer Verbindungen je Zug eines Betriebskonzepts.

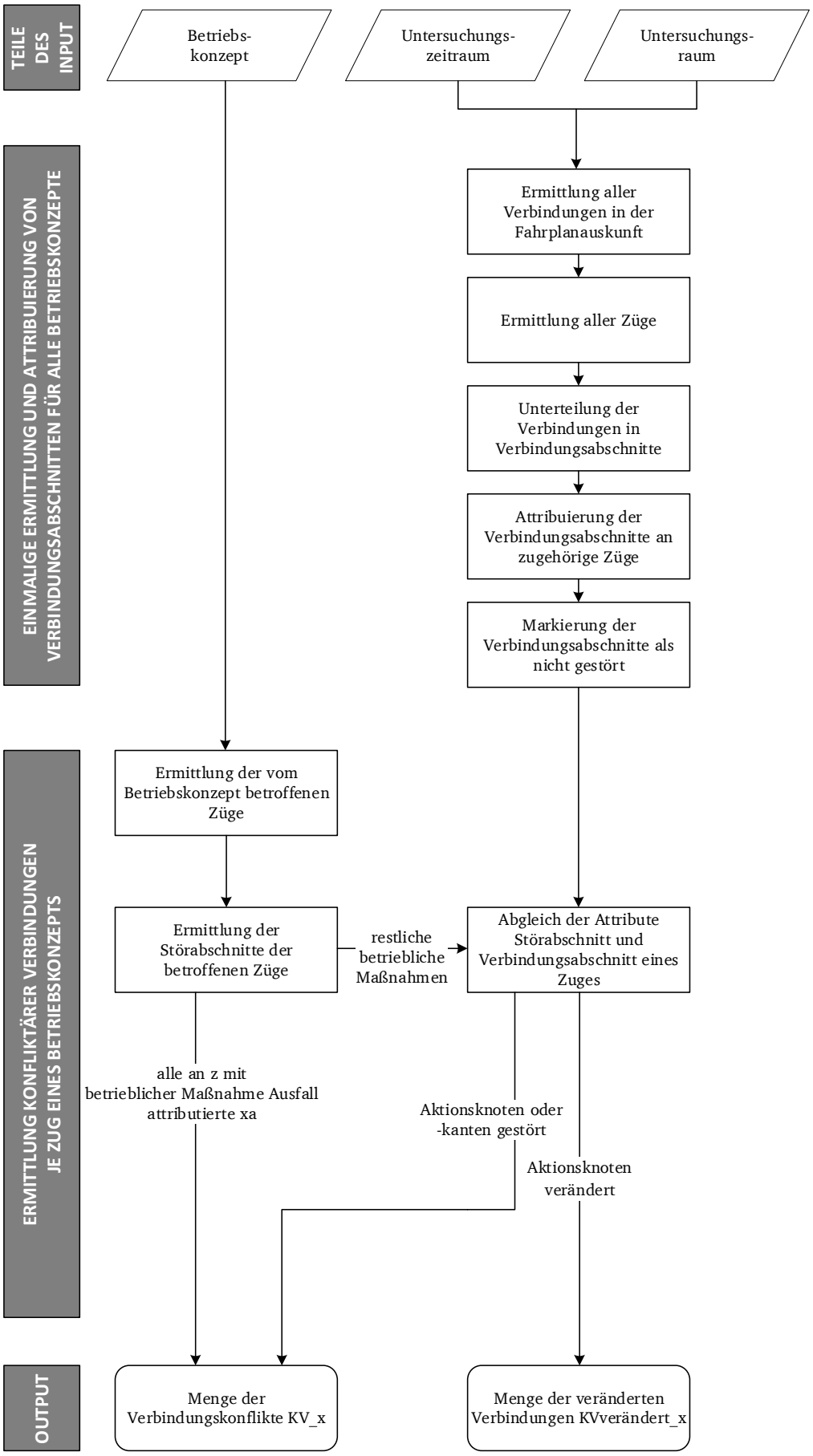


Abbildung 5-4: Übersicht der Verbindungskonflikterkennung (eigene Darstellung)

Einmalige Ermittlung und Attribuierung von Verbindungsabschnitten für alle Betriebskonzepte

1. Ermittle für t_U und Untersuchungsraum alle Verbindungen in dem externen Modul „computergestützte Fahrplanauskunft“.

1.1 Untersuchungszeitraum t_U: Verbindungen gehören zum Untersuchungszeitraum, wenn mindestens

- die Abfahrtszeit an der Einstiegshaltestelle oder
- die Ankunftszeit an der Ausstiegshaltestelle

im Untersuchungszeitraum liegen.

1.2 Das gewünschte Nahverkehrsnetz und dessen Umfang ist als Untersuchungsraum durch den Ersteller zu definieren.

2. Ermittle für t_U und Untersuchungsraum alle Züge z.

3. Teile jede ermittelte Verbindung x in Verbindungsabschnitte xa entsprechend der KantA, beginnend bei KnotA mit n zu KnotA mit n+1.

3.1 Ermittle für jeden Verbindungsabschnitt xa die zugehörigen KnotV und KantV und verknüpfe diese mit dem Verbindungsabschnitt xa.

3.2. Für alle xa mit einer KantA Verkehrsmittel= Zug, attribuiere xa an den entsprechenden z.

3.3 Setze für alle Verbindungsabschnitte xa aller Verbindungen x die Eigenschaft „gestört ja(j)/nein(n)“ auf „n“, sodass gilt $xa_{gestört} = n$.

Ermittlung konfliktärer Verbindungen je Zug eines Betriebskonzepts

1. Ermittle alle z mit einer betrieblichen Maßnahme bm.

2. Ermittle für jeden z mit bm die Störungsabschnitte zStör anhand der gKantV, gKnotV und vKnotV und attribuiere sie z.

3. Für jeden Zug z mit zStör:

3.1 Wenn zStör an einem z mit bm= 1 attribuiert ist, gilt für alle an z attribuierten xa $xa_{gestört} = j$.

3.2 Wenn zStör an einem z mit bm ≠ 1 attribuiert ist, führe folgende Schritte zum Abgleich von zStör mit an z attribuierten xa durch:

- Prüfe Funktion von KnotA und KantA von xa durch Abgleich der verknüpften KnotV und KantV von xa mit der mit zStör verknüpften gKantV, gKnotV und vKnotV.
  - Wenn ein KnotA des xa einem gKnotV von zStör entspricht, dann gilt $xa_{gestört} = j$.
  - Wenn ein KantV des xa einer gKantV von zStör entspricht, dann gilt $xa_{gestört} = j$.
  - Wenn ein KnotA des xa einem vKnotV von zStör entspricht, dann prüfe:
    - für KnotA = Umstieg: Prüfe Machbarkeit des geplanten Umstiegs.
      - Machbarkeit gegeben, wenn gilt: verbleibende Umsteigezeit ≥ als notwendig angegebene Umsteigezeit
        - Wenn machbar, ermittle für verknüpfte x veränderte Fahrzeit und Wartezeit am Bahnsteig,

ermittle die Widerstandsveränderungen anhand der Bewertungsfunktion aus Abschnitt 5.5.
        - Speichere x in der Menge KVunverändert_x.
    - Machbarkeit nicht gegeben, wenn gilt: durch verbleibende Umsteigezeit < als notwendig angegebene Umsteigezeit, dann gilt $xa_{gestört} = j$.
- für KnotA = Ausstiegshaltestelle: Ermittle planmäßige Verspätung $t_{w,plan,SFP}$ im Störfall bei Ankunft.
    - Wenn $t_{w,plan,SFP} > 0$, dann gilt $xa_{gestört} = j$.
    - Wenn $t_{w,plan,SFP} \leq 0$, dann gilt $xa_{gestört} = n$.

Für alle gestörten Verbindungabschnitte:

4. Ermittle für jedes x für das mind. ein $xa_{gestört} = j$ gilt, den Verbindungskonfliktbeginn durch den ersten gestörten Aktionsknoten gKnotA1.

5. Füge jedes x inkl. der Information zu Verbindungskonfliktbeginn der Menge der gestörten Verbindungskonflikte KV_x hinzu.

6. Attribuiere jedem x der Mengen KV_x und KVunverändert_x die Fahrgastzahlen.

5.6.5 Zusammenfassung

Wenn sich Verbindungen durch betriebliche Maßnahmen verändern oder wegen diesen alternative Verbindungen genutzt werden müssen, entstehen Veränderungen des Verkehrswiderstands. Wenn eine Veränderung des Verkehrswiderstands entsteht, liegt ein Verbindungskonflikt vor.

Durch die hohe Problemgröße der im Regelbetrieb möglichen Verbindungen wurden Möglichkeiten diskutiert, um die Suche nach den im Störfall konfliktären Verbindungen rechenzeiteffizienter zu ermöglichen als eine Überprüfung jeder einzelnen Verbindung des Regelbetriebs. Um alle relevanten Verbindungskonflikte auch bei eingegrenztem Suchraum vollständig zu ermitteln, wurde ein Algorithmus zur Verbindungskonflikterkennung entwickelt. Dieser identifiziert die Verbindungskonflikte anhand der Änderungen des Regelbetriebs durch das Betriebskonzept.

Dazu werden alle Verbindungen ermittelt und in Verbindungsabschnitte geteilt. Diese werden anschließend den Zügen, die für den Verbindungsabschnitt genutzt werden, attribuiert. Dieses Zwischenergebnis kann für alle SFP mit identischem Untersuchungsraum und -zeitraum weiterverwendet werden. Für ein geplantes Betriebskonzept muss anschließend nur die Menge der Züge mit betrieblichen Maßnahmen durchsucht werden. Dabei werden die attribuierten Verbindungsabschnitte mit den durch betriebliche Maßnahmen gestörten Verkehrsknoten und -kanten der Züge abgeglichen, und bei Übereinstimmung ein Verbindungskonflikt erkannt. Auf diese Weise erfolgt eine vollständige Ermittlung der Verbindungskonflikte für einen definierten Untersuchungszeitraum zielgerichtet und ohne unnötige Schleifen.

5.7 Modul 7: Konfliktlösungsalternativensuche

5.7.1 Einleitung

Ziel des Moduls „Konfliktlösungsalternativensuche“ ist die Ermittlung von individuellen Konfliktlösungsalternativen und die Auswahl der am besten machbaren und akzeptablen Lösung für die

im vorherigen Modul erkannten Verbindungskonflikte unter Verwendung einer bestehenden Fahrplanauskunft.

Input sind das geprüfte Betriebskonzept und die Liste der erkannten Verbindungskonflikte, das Ergebnis ist eine Auswahl von einzelkonfliktbezogenen Konfliktlösungen und eine Sammlung an weiteren nicht gewählten Lösungsalternativen.

Definition Konfliktlösungsalternativen

Notwendige Voraussetzung für die Suche nach Konfliktlösungsalternativen ist das Vorliegen eines Verbindungskonflikts aus Modul 6 (siehe Abschnitt 5.6) und die damit zusammenhängende Widerstandserhöhung (siehe Abschnitt 5.5). Für Fahrgäste mit einem Verbindungskonflikt erfolgt ein Rerouting anhand einer Konfliktlösungsalternative.

Es gilt die übergeordnete Anforderung der Verkehrskonzepterstellung, wenige Veränderungen für die Passagiere und somit Zuverlässigkeit zu erreichen (siehe Abschnitt 3.23.3 (a2)). Fahrgäste, deren Verbindung nicht von dem SFP im Sinne einer potenziellen Widerstandserhöhung betroffen ist, sollen daher kein planmäßiges Rerouting erhalten, auch dann nicht, wenn sie durch Umleitungen neue direktere Verbindungen inkl. entsprechender Widerstandsreduktion nutzen könnten. Fahrgäste, die ihr Ziel mit der ursprünglichen Verbindung pünktlich erreichen und eine Widerstandserhöhung durch Verführungen in der Reisekette (z. B. frühere Ankunft an einem geplanten Umstieg) erhalten, werden ebenso nicht neu geroutet.

Für die Lösung eines Verbindungskonflikts können erfahrungsgemäß mehrere Verbindungsalternativen zur Verfügung stehen. Aus diesen zu ermittelnden Konfliktlösungsalternativen soll dem Modulziel entsprechend die *beste umsetzbare und akzeptable* Alternative bestimmt werden. Dieses Ziel ergibt sich aus der gewählten Methode in Unterabschnitt 5.3, dass aus vorliegenden Alternativen die beste Alternative als Lösung gewählt wird. Grundlegende Anforderungen an die Alternativen sind dabei die praktische Relevanz (Unterabschnitt 3.3 (e2)), die eine Umsetzbarkeit durch den Fahrgast fordert, und die Akzeptanz (Unterabschnitt 3.3 (g2)). Die *beste* Alternative für das Rerouting der Fahrgäste definiert sich entsprechend Abschnitt 5.5 durch die geringste Widerstandsveränderung.

Die Bewertung der ermittelten Konfliktlösungsalternativen vor Auswahl der besten Lösung untergliedert sich zudem noch in die *Umsetzbarkeit*: der Fahrgast kann die Verbindung entsprechend den im Regelbetrieb gültigen Zeiten wahrscheinlich umsetzen (bspw. Einhaltung von Umsteigezeiten, siehe dazu Abschnitt 5.2) können; und in die *Akzeptanz*: die Anzahl der Umstiege darf eine festzulegende absolute Anzahl nicht überschreiten (siehe Unterabschnitt 5.5 Tabelle 5-1), sodass davon ausgegangen werden kann, dass der Fahrgast die empfohlene Alternative wahrscheinlich umsetzt.

Bei einer Widerstandsberechnung aller Alternativen entsteht eine hohe Problemgröße aus der Summe aller konfliktären Verbindungen und ihrer Alternativmöglichkeiten, die sich aus den Zeitpunkten für Abfahrt und Ankunft, mehreren Verkehrsmitteln sowie deren Kombination zusammensetzen.

Anforderungen

Die Bestimmung der Anforderungen an die Konfliktlösungsalternativensuche und deren Ergebnis basieren auf den Anforderungen an ein kundenorientiertes Störfallprogramm und den Anforderungen an den SFP-Bestandteil Verkehrskonzept (siehe Abschnitt 3.3). Im Folgenden sind daraus die modulrelevanten Anforderungen ausgewählt und spezifiziert. In Klammern wird der Anforderungsbereich, zu dem die einzelne Anforderung gehört, ergänzt:

- Vollständigkeit (e2): Jeder Fahrgast soll eine Lösung für seinen Verbindungskonflikt angeboten bekommen.
- Weiterentwicklungsfähigkeit/Operationalität/geringe Rechenzeit (a2): Um zukünftige Weiterentwicklungen hin zur Echtzeitdisposition von Störfällen zu ermöglichen, ist dazu eine zügige Ermittlung von Konfliktlösungsalternativen wichtig. Damit in diesem Fall kein neues Modul zur Lösungssuche erstellt werden muss, ist darauf zu achten, dass das nun entwickelte Vorgehen leicht adaptiert und mit kurzer Rechenzeit umgesetzt werden kann. Deswegen soll auch die Verbindungsermittlung der Alternativen auf erprobte und zuverlässige Vorgehensweise mit funktionierenden und bekannten Schnittstellen erfolgen.
- Eignung/Individualisierung/Information (e2)/Akzeptanz (g2): Um jeden Fahrgast zuverlässig informieren zu können, ist eine eindeutige Aussage zu der besten Lösungsalternative entsprechend seiner Konfliktbetroffenheit zu ermöglichen. Es ist somit eine verbindungsbezogene Ermittlung der Alternativen durchzuführen. Um daraus die beste Alternative anzubieten, muss die Attraktivität der Alternativen für den Fahrgast bewertet werden.
- Mobilitätserhaltung/Zuverlässigkeit (a2)/Nachvollziehbarkeit (e2): Der Fahrgast soll das öffentliche Verkehrssystem trotz Störung als eine zuverlässige Mobilitätsoption wahrnehmen. Die beste Alternative soll unter Berücksichtigung eines steten Mobilitätsverhaltens gefunden werden und so wenig wie möglich von der Verbindung ohne Störfall abweichen.

Zusammengefasst ergibt sich folgende allgemeine Bedingung für die Konfliktlösungsalternativensuche: Wenn ein Verbindungskonflikt aus Modul 5 vorliegt, sind mehrere Alternativen zu bestimmen und die beste davon auszuwählen. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Fahrgast die Alternative mit der geringsten Widerstandsveränderung als attraktivste Lösung betrachtet und diese wahrscheinlich umsetzt. Diese Konfliktlösungsalternativen sind im Rahmen von Modul 6 zu ermitteln sowie zu bewerten und anschließend ist die beste Alternative als Lösung auszuwählen.

5.7.2 Methode

Die Methode zur Konfliktlösungsalternativensuche wird unter Berücksichtigung der Anforderungen an das Ergebnis bestimmt. Wie in Modul 6 erfolgt die Suche nach den Alternativen unter Verwendung einer bestehenden Verbindungsermittlung als computergestützte Fahrplanauskunft. Im Folgenden wird aus den Anforderungen abgeleitet, welche Möglichkeiten zur Reduktion der Problemgröße bestehen, um die Anzahl an Abfragen zu verringern.

Die Anforderungen zeigen, dass die Konfliktlösungsalternativensuche sowohl schnell als auch zugleich vollständig erfolgen soll. Abhängig von der Problemgröße kann dies ein Widerspruch sein. Für jeden Verbindungskonflikt sollen Lösungsalternativen bestimmt werden, dies ist aber nicht gleichbedeutend damit, dass alle möglichen Alternativen zu bestimmen sind.

Um den Widerspruch aufzulösen und rechenzeitarm Alternativen zu finden, ist eine Methode zu entwickeln, die zielgerichtet Alternativen ermittelt und somit entsprechend Unterabschnitt 2.2.5 als Heuristik den Lösungsraum nur teilweise durchsucht. Um sicherzustellen, dass die gefundenen Alternativen trotzdem mit hoher Wahrscheinlichkeit die beste Lösung enthalten, ist eine problemadäquate Einschränkung zu ermitteln. Diese sollte dabei die genannte Umsetzbarkeit und

Akzeptanz durch den Fahrgast berücksichtigen. Die Ermittlung aller alternativen Verbindungen könnte aber den Anforderungen einer schnellen Lösungsermittlung entgegenstehen.

Alternativen werden nur für Verbindungskonflikte und nicht zur Verbesserung weiterhin verfügbarer Verbindungen ermittelt. Dadurch wird die Anzahl der zu ermittelnden Verbindungsalternativen bereits eingeschränkt. Aufgrund der Vielzahl von möglichen Verkehrsmitteln und deren Kombination (siehe Abschnitt 5.2), die lediglich durch die akzeptanzbeschränkte Anzahl an Umstiegen (siehe Abschnitt 5.5) begrenzt ist, ergibt sich über alle Verbindungskonflikte eine hohe Anzahl an Alternativen, die zu ermitteln und bewerten sind.

Es ist eine Methode zu entwickeln, mit der die Konfliktlösungsalternativensuche in einer computergestützten Fahrplanauskunft effizient umgesetzt werden kann. Dazu wird im Folgenden zunächst untersucht, wie die Problemgröße anforderungsgerecht eingeschränkt werden kann.

Einschränkung der Problemgröße zur Ermittlung der Lösungsalternativen

Die Attraktivität einer Lösungsalternative bestimmt sich durch deren Umsetzbarkeit, Akzeptanz und die resultierende Höhe der Widerstandsveränderung für den Fahrgast. Vereinfacht kann zunächst angenommen werden, dass je mehr die Alternative von der geplanten Verbindung abweicht, desto höher ist die Widerstandsveränderung.

Es scheint daher sinnvoll, zunächst der ursprünglichen Reisekette verwandte Alternativen zu verwenden, die zudem gut bezüglich der Umsetzbarkeit überprüft und kommuniziert werden können. Anschließend kann dann, um eine möglichst weitgehende Einschränkung des Suchraums aufrechtzuerhalten, schrittweise der Veränderungsumfang der Eigenschaften erhöht werden.

Die Angebotseigenschaften der Reise wurden bereits in Bezug auf mögliche Veränderungen analysiert (siehe Tabelle 5-1) und anschließend in die Bewertungsfunktion (siehe Unterabschnitt 5.5) integriert.

Ausschlaggebende Veränderungen, die sich für den Fahrgast ergeben, können anhand der Eigenschaften der Reise vollständig abgebildet werden. Hierzu werden die Angebotseigenschaften in Tabelle 5-2 aufgelistet. Bei Vorliegen einer Alternative kann der Verbindungskonflikt anhand des Umfangs der erzeugten Veränderungen kategorisiert werden. Dabei gibt es jeweils zwingende Veränderungen von Eigenschaften, bei denen von einer größeren Widerstandsveränderung auszugehen ist, sodass der Verbindungskonflikt der nächsten Kategorie zugeordnet werden kann. Es können auch mehrere Eigenschaften eine zwingende Einstufung auslösen, wobei das Vorliegen einer dieser Eigenschaften (markiert mit *) ausreicht.

Im Weiteren wird zwischen Verbindungskonflikten unterschieden, bei denen die Relation zwischen Quelle und Ziel weiterhin erhalten werden kann. Die Reisekette zur Umsetzung der Relation entspricht nicht mehr dem Ablauf aus dem Regelbetrieb. Dies sind die Verbindungskonflikte.

Bei Verbindungskonflikten, bei denen die Relation zwischen Quelle und Ziel nicht mehr verbunden werden kann, entsteht ein Relationskonflikt. Dies stellt einen deutlichen Unterschied in der Höhe der Widerstandsveränderung dar. Da diese eine erfolglose Lösungssuche beschreiben, werden sie im Weiteren ungelöste Verbindungskonflikte genannt.

Die Verbindungskonflikte können weitergehend differenziert werden, je nachdem, wie viele und welche Eigenschaften der Reise verändert werden (Start (S), Ziel (Z), Umstieg (XY)):

- zugbezogen: von S nach Z über XY mit Linie L um XX Uhr (Entfall eines Zuges bspw. Taktverstärker),
- linienbezogen: von S nach Z über XY mit Linie L *(um XX Uhr)* (Bsp. Entfall einer Linie, auf deren genutzter Route eine andere Linie parallel verläuft),
- routenbezogen: von S nach Z über XY *(mit Linie L und Linie L um XX Uhr)* (Bsp. Umleitung der Linie mit resultierendem, verändertem Umsteigepunkt),
- qualitätsbezogen: von S nach Z über XY und WX *(mit Linie L und Linie L um XX Uhr)* (Bsp. Nutzung anderer Verkehrsmittel, die die Anzahl der Umstiege verändern).

Tabelle 5-2: Kategorisierung der Verbindungskonflikte (eigene Darstellung)

		Verbindungskonflikte				Relationskonflikte
		zugbezogen	linienbezogen	routenbezogen	qualitätsbezogen	
Eigenschaften ...						
... der Zeit	Startzeit	x	x	x	x	x
	Fahrtdauer gesamt	x	x	x	x	x
	Beförderungsdauer		x	x	x	x
	Endzeit	x	x	x	x	x
...eines Aktionsknoten	Gleise/Bahnsteige	x	x	x	x	x
	Fußwegzeiten	x	x	x	x	x
	Umstiegszeiten	x	x	x	x	x
...einer Aktionskante	Zugnummer	X	x	x	x	x
	Liniennummer		X*	x	x	x
	Verkehrsmittel		X*	x	x	x
Aktionsknoten	Startpunkt					X*
	Umsteigepunkt			X	x	x
	Zielpunkt					X*
... der Qualität	Anzahl der Umstiege				X	x
	Kosten					

x mögliche Veränderungen in der Reisekette X zwingende Veränderungen in der Reisekette * min. eine davon verändert

Zusammenfassend ist festzustellen, dass erzwungene Abweichungen von der geplanten Verbindung Widerstandserhöhungen erzeugen. Um im Weiteren eine Einschränkung der Problemgröße zu ermöglichen, wird daher angenommen, dass je mehr veränderte Eigenschaften bei einer Konfliktlösungsalternative nötig sind, desto größer ist die mögliche Widerstandserhöhung.

Daher ist für einen Verbindungskonflikt zunächst nach Alternativen mit Veränderungen der Eigenschaften in der Kategorie der zugbezogenen Verbindungskonflikte zu suchen. Anschließend kann die Anzahl der Eigenschaften bei Bedarf schrittweise anhand der Kategorien erhöht werden. Dies schränkt den Suchraum deutlich ein und bricht die Suche ab, wenn in einer Kategorie Alternativen gefunden werden, sodass von einer deutlichen Verkürzung der Rechenzeit im Vergleich zu einer vollständigen Alternativensuche auszugehen ist.

Zudem ist es für die Verkehrsqualität des Fahrgasts wichtig, sicherzustellen, dass die Alternativen nutzbar bzw. Anpassungen und Kommunikation im Störfall gut möglich sind. Der beste Zugang zu Informationen und Daten, um dies umzusetzen, liegt dem EVU innerhalb des eigenen Systems vor.

Es ist somit ein hierarchisch strukturiertes Vorgehen, beginnend im eigenen System, zur Suche der Konfliktlösungsalternativen in der computergestützten Fahrplanauskunft zu erstellen.

Innerhalb jeder Hierarchieebene erfolgen die Ermittlung sowie strukturierte Bestimmung von machbaren und attraktiven Alternativen und die Auswahl der besten Lösung anhand von:

- Ermittlung aller möglichen Konfliktlösungsalternativen einer Hierarchieebene und
- der weiterführenden Untersuchung aller ermittelten Konfliktlösungsalternativen auf
    a) Umsetzbarkeit,
    b) Bewertung der Akzeptanz durch den Fahrgast und
    c) Auswahl der besten Alternative für den Fahrgast.

5.7.3 Vorgehensweise

Zur Ermittlung der Konfliktlösungsalternativen wird der Input – ermittelte Verbindungskonflikte und Betriebskonzept – aufbereitet, detailliert und strukturiert, um anschließend einen Algorithmus darauf aufbauend zu erstellen. Output der Vorgehensweise ist für jeden Verbindungskonflikt eine Menge an Lösungsalternativen mit einer Teilmenge an umsetzbaren und attraktiven Alternativen, aus denen eine beste Alternative bestimmt wird.

Die Suche nach den Konfliktlösungsalternativen erfolgt wie auch die Konflikterkennung unter Verwendung einer bestehenden computergestützten Fahrplanauskunft zur Verbindungsermittlung. Es ist nun zu bestimmen, wie die Abfrage der Verbindungen schnell und zielführend erfolgen kann. Zusammenfassend ergibt sich aus den Anforderungen, dass ein Suchalgorithmus benötigt wird, der unter Verwendung einer computergestützten Fahrplanauskunft zum einen problemadäquate alternative Verbindungen ermittelt und zum anderen deren Machbarkeit bestimmt, die Attraktivität bewertet und final die beste Alternative auswählt.

Die Fahrplanauskunft enthält klassischerweise alle Verbindungen des öffentlichen Nahverkehrs und des Bahnfernverkehrs. Individuelle Verkehrsangebote, wie die örtliche Verfügbarkeit von Mietfahrrädern und -autos, Park-and-Ride u. a., sowie deren Einbezug in die Reisekette erfolgen dort bisher i. d. R. nicht. Da die Lösungsalternativen für S-Bahnstörungen zu ermitteln sind, ist von einer großen Nutzerzahl auszugehen. Für diesen Fall sind somit die individuellen Lösungen nicht relevant.

Aus den formalen Angebotstypen in Abbildung 2-8 ist der SPNV durch den Störfall eingeschränkt. Der SPFV und der übrige ÖPNV bleiben davon meist unberührt. Zudem sind die weiteren Angebote, die dem Personenbeförderungsgesetz unterliegen, verfügbar. Diese sind aber i. d. R. entweder nicht im Fahrplanauskunftssystem enthalten oder erzeugen zusätzliche Kosten für den Fahrgast. Die Alternativen sollen aber anforderungsgemäß kostenneutral für den Fahrgast sein. Es besteht die Möglichkeit einer Kostenübernahme bspw. durch Taxigutscheine. Dies bedarf aber einer Entscheidung des Erstellers. Daher sind sie zunächst nicht Teil der Konfliktlösungsalternativensuche.

Mit den im Störfallfahrplan verbleibenden Angeboten von SPNV und dem übrigem ÖPNV sowie SPFV können die Fahrgäste umgeleitet werden. Bei deren Anwendung kann, außer bei der Lösung von zugbezogenen Verbindungskonflikten im SPNV, jede Kategorie an Verbindungskonflikten auftreten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die abweichenden Eigenschaften zunehmen, je größer und weiter entfernt vom Verbindungskonflikt das Angebot ist, das durchsucht wird.

Daher ergeben sich folgende Stufen, in denen das Angebot im Störfall betrachtet werden kann.

1. Störfallfahrplan im EVU eigenen System,
2. Fahrplan des Regelbetriebs außerhalb des eigenen EVU, aber weiterhin im System des ÖPNV,
3. Fahrplan des Regelbetriebs im SPNV.

Zusätzlich zu den Angeboten, die im Regelbetrieb bereits bestehen, können weitere Maßnahmen (siehe Unterabschnitt 2.5.3) für die verkehrliche Abwicklung in Betracht gezogen werden. Hierzu gehören die verkehrlichen Maßnahmen wie bspw. Taxigutscheine, Busnotverkehre und die zusätzliche Bereitstellung von Wagen an verkehrenden Zügen. Diese Maßnahmen sind allerdings nicht überall einsetzbar, kostenintensiv und müssen in ihrer Sinnhaftigkeit situationsabhängig individuell z. B. auch im Hinblick auf die meist hohe Nutzeranzahl bewertet werden.

Daher können sie nicht Bestandteil der allgemeinen Suche der Konfliktlösungsalternativen sein, sondern nur eine erstellergeprüfte und individuelle Ergänzungslösung darstellen. Sollte es im ÖPV nicht lösbare Verbindungskonflikte geben, so sollte der Ersteller auf diese weiteren Maßnahmen hingewiesen werden, die dann von ihm eigenständig zu überprüfen und zu bewerten sind. Dem Ersteller kann für diese verkehrlichen Maßnahmen lediglich aufzeigt werden, wo eine Anwendung sinnhaft, bspw. bei einer Häufung an Relationskonflikten, sein kann.

Anders verhält es sich mit den Maßnahmen, die unter 1.–3. genannt wurden und die trotz Störung weiterhin bestehende Angebote nutzen und keinen Eingriff in den Betrieb darstellen, nicht kostenintensiv sind und ggfs. für eine größere Menge an Fahrgästen nutzbar sind. Für die Verbindungskonflikte ist daher nun das im Rahmen der Methode festgelegte, hierarchisch strukturierte Vorgehen zu ermitteln. Um die Widerstandserhöhung durch eine Alternative gering zu halten, wurde bei der Methodenentwicklung darauf eingegangen, dass anzunehmen ist, dass diese geringer gehalten werden kann, wenn die Abweichungen von der konfliktären Verbindung klein bleiben.

Zudem wurde im Unterabschnitt 5.7.2 festgehalten, dass der beste Zugang zu Informationen und Daten, um dies umzusetzen, dem EVU innerhalb des eigenen Systems vorliegen. Die Schätzung der Auslastung ist bereits im eigenen EVU anspruchsvoll, die Abschätzung der Auslastung systemfremder Verkehrsmittel ohne Daten ist für das EVU noch schwieriger abzuschätzen. Durch die fehlenden Informationen zur Auslastung und den fehlenden Kontakt zum dortigen Personal ergibt sich gegenüber den eigenen Angeboten ggfs. eine verringerte die Qualität der Kommunikation und das Risiko einer Überlastung in anderen Verkehrsmitteln, für die keine Maßnahmen durch das SFP sichergestellt werden können.

Bei der Verwendung von Angeboten aus dem eigenen System können die Wege für den Fahrgast in Teilen geringgehalten werden. S-Bahnen halten meist an örtlich nah beieinanderliegenden Bahnsteigen. Zudem stellt der Wechsel auf andere öffentliche Nahverkehrsmittel oftmals eine Komfortabwertung und eine Erhöhung der Fahrtdauer für die Fahrgäste dar. Daher wird die Hierarchie mit dem eigenen System begonnen und über den ÖPNV auf den öffentlichen Personenfernverkehr (ÖPFV) erweitert.

zu 1.: EVU eigenes System wie S- und Regionalbahnen

Das Rerouting der Fahrgäste im eigenen System bietet zwei Möglichkeiten:

- andere Verbindung (zeitliche und ggf. örtliche Verlagerung) oder
- andere Route (zeitliche, örtliche und räumliche Verlagerung des Fahrgasts).

Grundsätzlich sollen so wenige Veränderungen für den Fahrgast wie möglich erreicht werden. In diesem Kontext wäre somit eine andere Verbindung einer neuen Route vorzuziehen, da diese für den Fahrgast weniger zu ändern scheint. Allerdings kann die Widerstandserhöhung ggf. durch eine andere Route reduziert werden und ist somit, entsprechend der Berücksichtigung in der Bewertungsfunktion aus Abschnitt 5.5, wichtiger für den Fahrgast. Daher werden sowohl alternative Verbindungen als auch Routen berücksichtigt.

Daher sind alle Verbindungen innerhalb der Hierarchieebene zu ermitteln.

zu 2.: ÖPNV

Bei dem Rerouting der Fahrgäste im System des ÖPNV werden Busse, Straßenbahnen und U-Bahnen in die Alternativensuche miteinbezogen. Durch die Nutzung eines abweichenden Verkehrsmittels findet auf jeden Fall eine Veränderung auf der Aktionskante statt. Da diese Verkehrsmittel i. d. R. nicht auf dem S-Bahn-Gleis verkehren, verändern sich üblicherweise die Eigenschaften des Aktionsknotens. Eine zeitliche und räumliche Verlagerung von Aktionsknoten ist wahrscheinlich, aber nicht zwingend. Da die Alternative anforderungsgemäß kostenneutral sein soll und im ÖPNV davon auszugehen ist, dass diese einem Verbund angehört und daher das Ticket der Fahrgäste für die Nutzung gültig ist, werden alle ÖPNV-Angebote berücksichtigt.

Da die Widerstandsveränderung von vielen zeitlichen Eigenschaften bestimmt wird und die Fahrtdauer in einem Verkehrsmittel darin beinhaltet ist, wird keine allgemeine Präferenz der Verkehrsmittel festgelegt, wie bspw., dass die U-Bahn gegenüber einem Bus zu bevorzugen wäre. Die Nutzbarkeit für den Fahrgast ist bei allen Verkehrsmitteln des ÖPNV gegeben, sodass keine weitere Eingrenzung des Suchraums innerhalb der Hierarchieebene angewendet wird.

Daher sind alle Verbindungen innerhalb der Hierarchieebene zu ermitteln.

zu 3.: ÖPFV

Bei dem Rerouting der Fahrgäste im System des ÖPFV werden Fernzüge in die Alternativensuche miteinbezogen. Durch die Nutzung eines abweichenden Verkehrsmittels findet auf jeden Fall eine Veränderung auf der Aktionskante statt. Da diese meist nicht auf dem S-Bahn-Gleis verkehren, kommt es auch meist zu einer Veränderung der Eigenschaften des Aktionsknotens. Eine zeitliche und räumliche Verlagerung von Aktionsknoten ist wahrscheinlich, aber nicht zwingend.

Die Fernverkehrszüge gehören nicht zu dem Angebot der Verkehrsverbünde und sind somit für die Fahrgäste mit einem Verbundticket nicht ohne Freigabe nutzbar. Es ist somit mit dem jeweils anbietenden EVU abzusprechen, ob die Produkte bei der Anwendung eines SFP genutzt werden dürfen. Dies erfolgt selten pauschal, sondern nur für ausgewählte Fernverkehrsprodukte. Hierdurch entstehen ggfs. Kosten für das EVU, aber nicht für den Fahrgast. Die abgestimmten, freigegebenen Züge sind somit vorher durch den Ersteller anzugeben.

Daher sind nur die Verbindungen mit freigegebenen Zügen innerhalb der Hierarchieebene zu ermitteln.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Hierarchieebenen bei der Suche nach Konfliktlösungsalternativen (KLA):

- KLA 1: Umleitung der Fahrgäste im eigenen System,
- KLA 2: Umleitung der Fahrgäste im Verbund des ÖPNV,
- KLA 3: Freigabe für Nutzung anderer Züge des SPFV/des SPNV außerhalb des Verbundes und
- KLA 4: Bestellung alternativer Verkehre SEV, Taxi, mehr Wagen am bestehenden Zug.

Der Aufbau des Algorithmus basiert somit auf dem ermittelten Ansatz einer Suchhierarchie für die in Hierarchieebenen kategorisierten Arten der Konfliktlösungsalternativen. Er sucht, wie in Abbildung 5-5 dargestellt, zunächst nach machbaren und attraktiven Lösungen im Modul „computergestützte Fahrplanauskunft“, beginnend mit den KLA der Hierarchieebene 1, bei jeweiligem Mangel an Ergebnissen weitergehend bis hin zur Hierarchieebene 3. Die Hierarchieebene 4 wird im Modul der Konfliktlösungsalternativensuche nicht weiter berücksichtigt, da sie jeweils einen Eingriff des Erstellers erfordert. Bei der Suche in einer höheren Hierarchieebene sind die Verkehrsmittel der niedrigeren Hierarchieebenen nicht auszuschließen, sondern ebenfalls zu verwenden.

Wenn die Suche in einer Hierarchieebene mindestens eine umsetzbare und attraktive Konfliktlösungsalternative bestimmen konnte, endet die Suche nach weiteren Konfliktlösungsalternativen für den betrachteten Verbindungskonflikt. Die Eingrenzung des Suchraums erfolgt im Sinne der angestrebten Verkürzung der Rechenzeit. Somit erfolgt dann keine Suche in den nachfolgenden Hierarchieebenen. Wenn in einer Hierarchieebene keine umsetzbare und attraktive Konfliktlösungsalternative gefunden werden kann, erfolgt die Suche in der nächsten Hierarchieebene. Wenn in allen drei Hierarchieebenen keine umsetzbare und attraktive Konfliktlösungsalternative festgestellt werden kann, dann verbleibt der Verbindungskonflikt ungelöst und stellt somit einen Relationskonflikt dar.

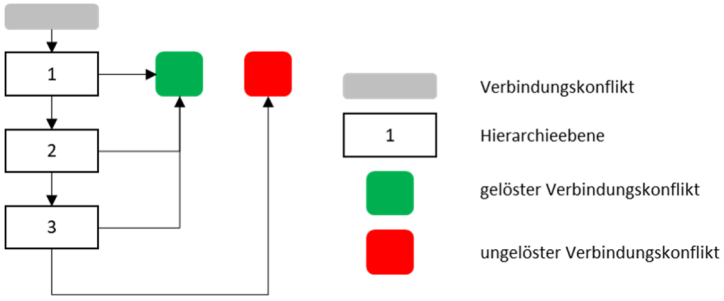


Abbildung 5-5: Vorgehen zur Bestimmung von Konfliktlösungsalternativen (eigene Darstellung)

Im Weiteren wird das Vorgehen innerhalb einer Hierarchieebene zur Ermittlung, Umsetzbarkeitsprüfung und Bewertung der Konfliktlösungsalternativen und der Auswahl der besten Alternative detailliert.

Ermittlung aller möglichen Konfliktlösungsalternativen dieser Hierarchieebene

Für den vorliegenden Verbindungskonflikt werden die möglichen Konfliktlösungsalternativen der zu untersuchenden Hierarchieebene ermittelt. Die Nutzung der Alternative durch den Fahrgast kann an unterschiedlichen Aktionsknoten beginnen. Zum einen kann bereits an der Einstiegshaltestelle oder auf dem Weg zu einem gestörten Aktionsknoten für einen Umstieg eine Alternative genutzt werden. Zum anderen erfährt der Fahrgast ggfs. erst an dem gestörten Aktionsknoten von der Störung und nutzt von dort aus eine Alternative. Wenn der gestörte Aktionsknoten somit nicht der Einstiegshaltestelle entspricht, ist für sowohl beginnend an der Einstiegshaltestelle und beginnend an dem gestörten Aktionsknoten eine beste Konfliktlösungsalternative zu bestimmen. Beginn der Alternativensuche ist dabei die Abfahrtszeit im Fahrplan des Regelbetriebs an der Einstiegs-/bzw. Umstiegshaltestelle. Die Alternativensuche endet nach dem Grundtakt, einschließlich der Berücksichtigung des folgenden Zuges der Linie des gestörten Zuges. Dieser nächste Takt des gestörten Zuges stellt dann entweder eine Konfliktlösung (bspw. bei Entfall von Taktverstärkern) oder den nächsten Verbindungskonflikt (bspw. bei Ausfall der Linie) dar.

Bei Ermittlung jeder Alternative wird ein Abgleich mit der dem Verbindungskonflikt zugrundeliegenden Verbindung des Regelbetriebs durchgeführt und ermittelt, welche Eigenschaften der Verbindung sich verändern, und dies dokumentiert.

Sofern in einer Hierarchieebene eine oder mehrere Konfliktlösungsalternativen vorhanden sind, werden diese anschließend weiterführend auf ihre Machbarkeit untersucht, bewertet und eine beste neue Verbindung bestimmt.

Umsetzbarkeitsprüfung aller ermittelten Konfliktlösungsalternativen

Bei der Überprüfung der Umsetzbarkeit ist zu klären, ob der Fahrgast nach Ankunft an dem Ort der Reisekette, an dem der Verbindungskonflikt offensichtlich wird, die Chance hat, die Alternative umzusetzen. Der Zeitpunkt, zu dem ein von einem Verbindungskonflikt betroffener Fahrgast von diesem erfährt, kann von dem Beginn der Reise bis hin zum Abfahrtszeitpunkt des konfliktären Zuges $T_{Abfahrturspüngl}$ variieren. Dies ist nicht bekannt und kann sich im Laufe der Störungsdauer ggfs. verändern, wobei auch da nicht zwingend davon ausgegangen werden kann, dass die Fahrgäste sich aktiv informieren und somit über einen laufenden Störfall Bescheid wissen.

Um die Machbarkeit für den Fahrgast sicherzustellen, wird daher der späteste Informationszeitpunkt, somit der reguläre Zeitpunkt der Abfahrt des konfliktären Zuges, angesetzt.

Nachdem der Fahrgast informiert wurde, dass seine konfliktäre Verbindung nicht verfügbar ist, entsteht ein Zeitbedarf, in dem sich der Fahrgast vor Abfahrt der Alternative zum einen über die Alternative und die örtlichen Gegebenheiten informieren und zum anderen ggf. eine Ortsveränderung vornehmen muss.

Einerseits benötigt der Fahrgast einige Minuten, um sich zu informieren, welche Alternative für ihn besteht. Der Reisende benötigt somit die Zeit $t_{Kenntnis}$, um die Störung und die angebotene Alternative zur Kenntnis zu nehmen und ggf. auch um diese zu verstehen und für sich selbst zu bewerten.

Andererseits kann die Alternative eine örtliche Veränderung wie die Abfahrt an einem anderen Bahnsteig beinhalten. Hierzu muss ein Abgleich der Bahnsteige von konfliktärer und neuer Verbindung erfolgen und bei einer Veränderung des Bahnsteigs die Fußwegzeit $t_{Fußweg}$ ermittelt werden.

Der Zeitbedarf sollte vor dem Abfahrtszeitpunkt der Alternative $T_{AbfahrtAlt}$ zur Verfügung stehen. Er ist somit mit der Zeit, die dem Fahrgast bis dahin bis zum Abfahrtszeitpunkt der Alternative verbleibt, abzugleichen. Der Fahrgast muss die Möglichkeit haben, bis spätestens zum Abfahrtszeitpunkt am Bahnsteig anzukommen. Wenn diese Bedingung nicht erfüllt ist, kann die Alternative nicht angeboten werden.

Ist die Umsetzbarkeit nicht gegeben, wird diese Alternative gelöscht. Ist die Umsetzbarkeit gegeben, bleibt diese Bestandteil der Alternativen für den betrachteten Verbindungskonflikt und wird weiter untersucht.

Bewertung der Akzeptanz aller ermittelten Konfliktlösungsalternativen

Alle umsetzbaren Konfliktlösungsalternativen werden entsprechend der Kategorie des Verbindungskonflikts eingeordnet und gespeichert. Diese können dann in der Praxis zur Aufbereitung von Informationen genutzt werden.

Zudem liegt bei den qualitätsbezogenen Verbindungskonflikten gemäß Tabelle 5-2 eine Veränderung der Anzahl der Umstiege vor. Diese wurde in Tabelle 5-1 mit einem Maximalgrenzwert für die absolute Anzahl versehen, der somit auf Einhaltung zu überprüfen ist. Basierend auf den Erhebungen von Boltze und Gillich (2017) (siehe auch Unterabschnitt 5.5) werden im Rahmen dieser Arbeit drei Umstiege als Maximalwert gesetzt, der von Fahrgästen bei einer Verbindung wahrscheinlich akzeptiert wird.

Aus der Literatur ergeben sich keine weiteren Grenzwerte. Es können aber bei Bedarf aus der Praxis weitere Eigenschaften mit einem Maximalwert versehen und überprüft werden, dies kann bspw. die Verspätung am Zielort sein, die bspw. in manchen Verkehrsverbünden mit einer Grenze beworben wird (RMV 23.05.2022). Da dies nicht allgemeingültig ist, wird es nicht weiter berücksichtigt, sondern kann im Rahmen eines Softwareentwicklungsprozesses in der Praxis festgelegt werden.

Es erfolgt somit im ersten Schritt der Bewertung eine Zuordnung der Alternative zur Kategorie des Verbindungskonflikts anhand der Eigenschaften, die eine zwingende Veränderung erzeugen (siehe Tabelle 5-2). Für die qualitätsbezogenen Verbindungskonflikte wird die Akzeptanz anhand der Anzahl der Umstiege geprüft. Alle umsetzbaren Konfliktlösungsalternativen aus den Kategorien der zug-, linien- und routenbezogenen Verbindungskonflikte sowie die akzeptablen Konfliktlösungsalternativen aus der Kategorie der qualitätsbezogenen Verbindungskonflikte eignen sich für die Auswahl der besten Konfliktlösungsalternative.

Ist die Akzeptanz nicht gegeben, wird diese Alternative gelöscht. Ist die Akzeptanz gegeben, bleibt diese Bestandteil der Alternativen für den betrachteten Verbindungskonflikt und wird weiter untersucht.

Auswahl der besten Konfliktlösungsalternative der Hierarchieebene als Lösung

Aus allen verbliebenen Alternativen muss nun die beste Lösung gewählt werden. In Abschnitt 5.3 wurde hierfür die Widerstandsberechnung als passende Methode ausgewählt. Diese ist somit für jede Alternative durchzuführen und die mit dem besten Ergebnis auszuwählen.

Ein Fahrgast kann zu Verbindungsbeginn oder unterwegs von der Alternative erfahren. Wenn für Verbindungsbeginn und unterwegs unterschiedliche Alternativen vorliegen, werden zwei beste Alternativen ermittelt. Wenn die bessere Alternative unterwegs zu wählen ist, steht sie allen vom Konflikt betroffenen Fahrgästen offen, so dass diese weiterführend zu wählen ist. Sollte dies nicht der Fall sein, werden beide Alternativen als beste Lösung gespeichert, wobei, entsprechend des bereits verwendeten Worst-Case-Szenarios, die schlechtere Bewertung der beiden Alternativen weiterverwendet werden soll.

Sollte es zwei Alternativen mit identischem Bewertungsergebnis geben, so könnte eine Erweiterung der Bewertung diskutiert werden. Allerdings wurde bereits in Abschnitt 5.3 ausgeführt, welche weiteren Eigenschaften die Wahrnehmung und Akzeptanz eines Fahrgasts beeinflussen und warum diese trotzdem nicht Bestandteil der Berechnung sein sollen oder können. Daher werden diese auch zu diesem Zeitpunkt des Vorgehens, der wahrscheinlich aufgrund der Vielfalt der Verbindungsoptionen in einem Nahverkehrsnetz eher selten auftritt, nicht ergänzt. Für diesen eher unwahrscheinlichen Fall ist eine zufällige Auswahl aus den gleichwertigen Alternativen durch den Rechner zu treffen.

5.7.4 Algorithmus

Nachdem in den Unterabschnitten Methode und Vorgehensweise erläutert wurde, welche Aufgaben der Algorithmus hat und wie der Input verarbeitet wird, um den gewünschten Output zu erreichen, erfolgt hier die formalere Notation der einzelnen Arbeitsschritte. Zur Übersicht ist der Ablauf in Abbildung 5-6 zusammengefasst dargestellt.

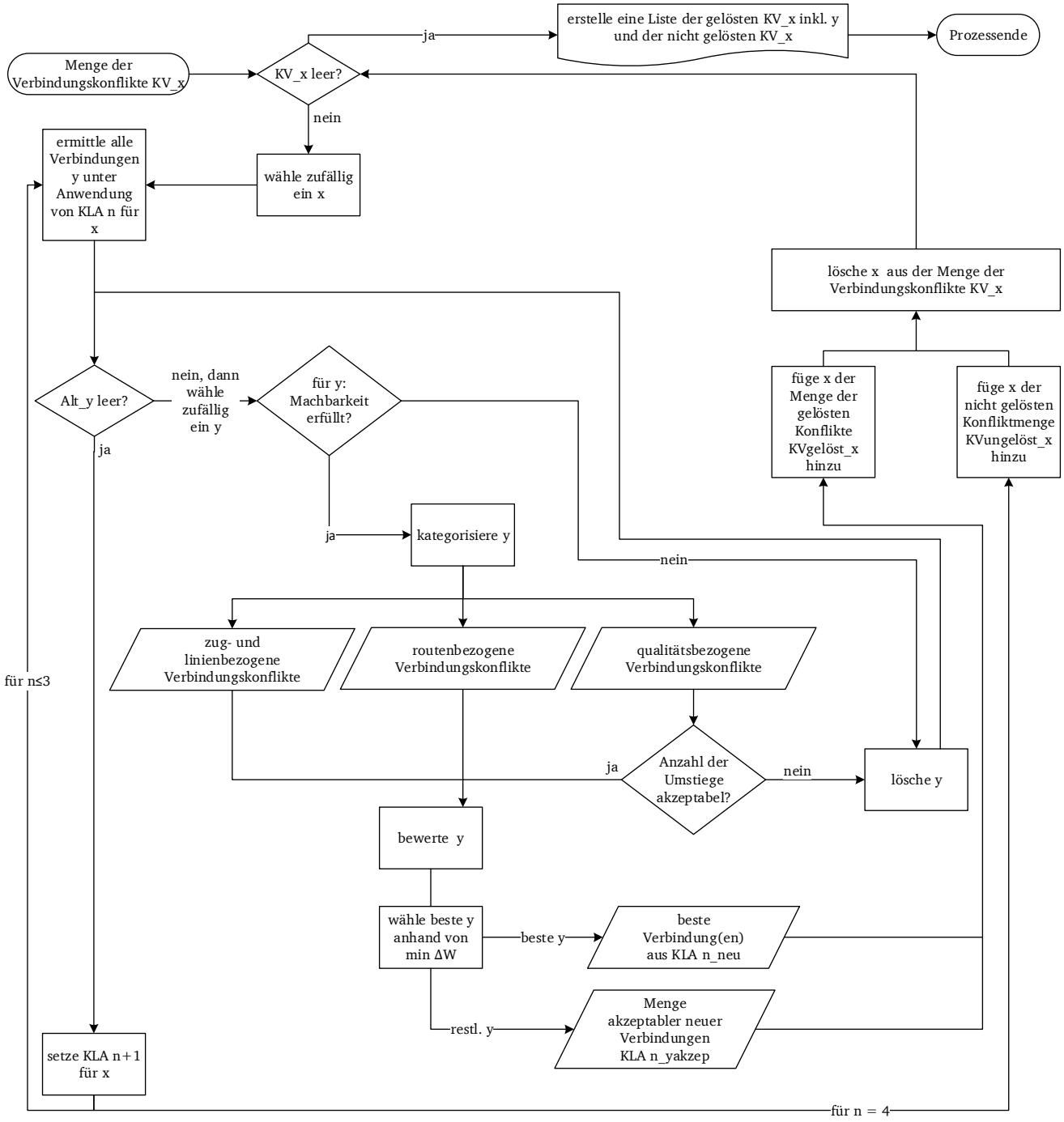


Abbildung 5-6: Algorithmus zur Konfliktlösungsalternativensuche (eigene Darstellung)

Für alle Verbindungskonflikte:

- Importiere die Menge aller Verbindungskonflikte KV_x aus Modul 6.
- Wenn KV_x ≠ ∅, wähle zufällig einen Verbindungskonflikt für die folgenden Schritte.
- Für den zufällig ausgewählten Verbindungskonflikt x:
  - führe die unter „Für einen zufällig ausgewählten Verbindungskonflikt x:“ genannten Schritte durch, bis der Verbindungskonflikt der Menge der gelösten oder ungelösten Verbindungskonflikte hinzugefügt werden kann.
  - dann lösche ihn aus KV_x.

- Wähle den nächsten Verbindungskonflikt zufällig aus, führe die zuvor genannten Punkte durch und
- wiederhole bis KV_x = ∅: Prozessende.

Für einen zufällig ausgewählten Verbindungskonflikt x:

Ermittlung der möglichen Konfliktlösungsalternativen innerhalb einer Hierarchieebene n

- Bestimme die aktuelle Hierarchieebene n und die Verkehrsmittel der zugehörigen KLA n (bei KLA 1 ausschließlich KLA 1; bei KLA 2 sind KLA 1 und KLA 2 zu verwenden, und bei KLA 3 sind KLA 1, KLA 2 und KLA 3 zu verwenden).
- Ermittle in dem Modul „computergestützte Fahrplanauskunft“ Konfliktlösungsalternativen als Verbindungen y
  - für die Relation des Verbindungskonflikts (Aktionsknoten Einstiegs- und Ausstiegshaltestelle)
  - unter Verwendung der Verkehrsmittel der KLA n und
  - beginnend zur Abfahrtszeit im Fahrplan des Regelbetriebs an KnotA = Einstiegshaltestelle
    - Wenn gKnotA1 = Einstiegshaltestelle, ermittle die möglichen y für die Relation.
    - Wenn gKnotA1 = Umstieg, ermittle zusätzlich die möglichen y beginnend an gKnotA bis zur Ausstiegshaltestelle.
  - bis einschließlich der Abfahrtszeit des Zuges der Linie des Zuges welcher x ausgelöst hat.
- Füge jede ermittelte Verbindung y der Menge Alt_y für den Verbindungskonflikt x hinzu

Für jede Verbindung y aus der Menge Alt_y des Verbindungskonflikts x:

- Für Alt_y = ∅: gehe zu KLA n+1; wenn aktuell KLA 3, dann füge Verbindungskonflikt x der Menge der ungelösten Verbindungskonflikte KVungelöst_x hinzu und lösche x aus KV_x.
- Für Alt_y ≠ ∅: wähle zufällig eine y aus der Menge Alt_y und gehe zu a).

a) Umsetzbarkeitsprüfung aller ermittelten Konfliktlösungsalternativen

Überprüfe y ∈ Alt_y auf Umsetzbarkeit für den Fahrgast am gKnotA1.

- Gleiche die Bahnsteige am gKnotA1 für x und y ab.
  - Wenn kein Unterschied vorliegt, gehe zu b).
  - Wenn ein Unterschied vorliegt, führe die folgenden Schritte aus.
- Bei Abweichung prüfe auf die Machbarkeitbedingung: $t_{Kenntnis} + t_{Fußweg} \leq T_{AbfahrtAlt} - T_{Abfahrturspüngl}$
  - Wenn Bedingung eingehalten wird, dann gehe zu b).
  - Wenn Bedingung nicht eingehalten wird, dann lösche y aus Alt_y und wähle nächste y.

- Für Alt_y = ∅: gehe zu KLA n+1; wenn aktuell KLA 3, dann füge Verbindungskonflikt x der Menge der ungelösten Verbindungskonflikte KVungelöst_x hinzu und lösche x aus KV_x.
- Für Alt_y ≠ ∅: Wähle zufällig eine y aus der Menge Alt_y und führe a) aus.

b) Bewertung der Akzeptanz aller ermittelten Konfliktlösungsalternativen

Überprüfe y ∈ Alt_y auf Akzeptanz für den Fahrgast.

- Sortiere y entsprechend Tabelle 5-2 in Kategorien:
  - y ∈ {zug- und linienbezogene Verbindungskonflikte}
  - y ∈ {routenbezogene Verbindungskonflikte}
  - y ∈ {qualitätsbezogene Verbindungskonflikte}
    - Gleiche Anzahl der Umstiege mit der maximalen Anzahl ab.
    - Akzeptabel, wenn Eigenschaft Anzahl der Umstiege von y < maximale Anzahl Umstiege; dann gehe zum nächsten Schritt.
    - Nicht akzeptabel, wenn Eigenschaft Anzahl der Umstiege von y > maximale Anzahl Umstiege; dann lösche y aus Alt_y und wähle nächste y.
- Lege einen Speicher der akzeptablen kategorisierten Alternativen zur Nutzung in externen Modulen zur Reisendeninformation an und speichere die sortierte Verbindung y.

<u>Für die Menge Alt_y des Verbindungskonflikts x:</u>

- Für Alt_y = ∅: gehe zu KLA n+1; wenn aktuell KLA 3, dann füge Verbindungskonflikt x der Menge der ungelösten Verbindungskonflikte KVungelöst_x hinzu und lösche x aus KV_x.
- Für Alt_y ≠ ∅: führe für alle y ∈ Alt_y c) durch.

c) Auswahl der (zwei) besten Konfliktlösungsalternative(n) der aktuellen Hierarchieebene als Lösung

Wähle die beste(n) Alternative(n) y ∈ Alt_y.

- Berechne die Widerstandsveränderung ΔW für jede y entsprechend Unterabschnitt 5.5.
- Wähle die beste = geringste Widerstandsveränderung y aus für:
  - Abweichung von x beginnend an der Einstiegshaltestelle von x
  - Wenn Einstiegshaltestelle ≠ gKantA1, wähle die beste Alternative beginnend an gKantA1 = Umstieg von x.
    - Vergleiche die ΔW der beiden Alternativen:
    - Wenn y beginnend an gKantA1 = Umstieg minΔW aufweist, wähle nur y beginnend an gKantA1 = Umstieg für x.
    - Wenn y beginnend an gKantA1 = Umstieg nicht minΔW aufweist, verwende y an gKantA1 = Umstieg für die folgende Bewertung.
    - Behalte y an gKantA1 = Einstieg für Kommunikation.
  - Speichere x inkl. der beste(n) Alternativen in der Menge KVgelöst_x.

- Speichere die restlichen y inkl. der Information zu x in der Menge akzeptabler Alternativen KLAn_yakzep.
- Lösche x aus KV_x und
- wiederhole den gesamten Ablauf: wähle nächsten Verbindungskonflikt zufällig aus bis KV_x = ∅ gilt

5.7.5 Zusammenfassung

Konfliktlösungsalternativen werden benötigt, wenn Verbindungskonflikte bestehen. Die erzeugten Erhöhungen des Widerstands für den Fahrgast sollen dabei geringgehalten werden.

Zur effektiven Ermittlung der Alternativen wird ein hierarchischer Algorithmus erstellt, um Konfliktlösungsalternativen in einem externen Modul „Fahrplanauskunft“ zu ermitteln. Die Verbindung des Fahrgasts wird nur schrittweise und nur bei zwingendem Bedarf von seinen Mobilitätsgewohnheiten im EVU eigenen System entfernt.

Für jede ermittelte Alternative erfolgen eine Überprüfung auf Machbarkeit und eine Widerstandsbewertung, sodass für die betrachtete Hierarchieebene eine beste Lösung gewählt werden kann. Sobald auf einer Hierarchieebene eine beste Lösung ermittelt werden kann, terminiert der Algorithmus die Suche für den betrachteten Verbindungskonflikt und ignoriert die möglicherweise noch folgenden Hierarchieebenen.

In diesem Modul werden somit für jeden Verbindungskonflikt ein bis zwei individuelle beste Lösungen ermittelt. Für die Kommunikation über kollektive Medien ist im folgenden Abschnitt eine Lösungssuche für Fahrgastströme zu entwickeln.

5.8 Modul 8: Verkehrskonzepterstellung

5.8.1 Einleitung

Ziel des achten Moduls ist die Erstellung eines kommunizierbaren und umsetzbaren Verkehrskonzepts entsprechend der allgemeinen Zielsetzung in Abschnitt 5.1 und Kapitel 3. Verwendbare Vorarbeiten sind das Betriebskonzept, die in Modul 6 ermittelten Verbindungskonflikte sowie die in Modul 7 ermittelten und bewerteten Konfliktlösungsalternativen.

Die Bestimmung der Anforderungen an die Verkehrskonzepterstellung und deren Ergebnis basieren auf den Anforderungen an ein kundenorientiertes Störfallprogramm und den Anforderungen an den SFP-Bestandteil Verkehrskonzept (siehe Abschnitt 3.3). Im Folgenden sind daraus die modulrelevanten Anforderungen ausgewählt und spezifiziert. In Klammern wird der Anforderungsbereich, zu dem die einzelne Anforderung gehört, ergänzt:

- Information (a2 und e2): Die Fahrgäste sollen zu der Lösung für ihren Verbindungskonflikt über die kollektiven Kommunikationskanäle (siehe Abschnitt 2.5.1) auf Verkehrskanten und in den Verkehrsknoten (bspw. Durchsagen und Anzeiger im Zug und Bahnsteig) informiert werden.
- praktische Relevanz/Zuverlässigkeit (e2): Es muss sichergestellt werden, dass das Verkehrskonzept einen funktionsfähigen Zustand abbildet, der nicht durch Fehlplanungen Abweichungen erzeugt wird. Kollektive Informationen sollen ihre Gültigkeit während der gesamten Störungsdauer nicht verändern. Ein Fahrgaststrom gilt somit durchgängig für einen Störfall und adressiert Routen und nicht Verbindungen, da

diese Informationen nicht mit Uhrzeiten versehen sind, sondern im gesamten Untersuchungszeitraum gelten.
- Nachvollziehbarkeit (e2): Die Inhalte des Verkehrskonzepts müssen gut wahrnehmbar und merkbar sein.
- Kundenorientierung/Akzeptanz (g2): Für ein kundenorientiertes Verkehrskonzept muss die Sichtweise des Fahrgastes bei der Auswahl der verkehrlichen Maßnahmen des Verkehrskonzepts berücksichtigt werden.

Die Anforderungen zeigen, dass die Individuallösungen, die bisher in Modul 7 (siehe Abschnitt 5.7) ermittelt wurden, relevant, aber nicht ausreichend sind, da sie nicht allgemeingültig und kollektiv kommuniziert werden können. Allgemeingültig bedeutet, dass bspw. eine Durchsage eine breite Masse an Fahrgästen erreicht und ihnen eine Hilfestellung bei der Gestaltung ihrer Verbindung im Störfall gibt. Da diese kollektiven Informationen über unterschiedliche Medien und Betriebspersonale kommuniziert werden und den Fahrgast im Rahmen seiner Reisekette mehrfach erreichen, wird davon ausgegangen, dass die Fahrgäste kollektive Lösungen nutzen, wenn diese verfügbar sind.

Wenn für einen Verbindungskonflikt keine kollektive Lösung angeboten wird, muss sich der Fahrgast über die individuellen Kommunikationskanäle informieren und bekommt daher die individuelle Lösung angeboten. Somit sind im Rahmen des Moduls Verkehrskonzepterstellung nicht alle individuellen Konfliktlösungen aus Modul 7 zu ersetzen. Die weiterhin benötigten individuellen Konfliktlösungen, wenn keine kollektiven Lösungen vorliegen, werden Bestandteil des Verkehrskonzepts.

Zusammengefasst ergeben sich daher als möglicher Input das geprüfte Betriebskonzept und die einzelkonfliktbezogenen Konfliktlösungsalternativen. Die Funktion des Moduls 8 ist die Erstellung von kommunizierbaren kollektiver Lösungen als Teil eines bewertbaren Verkehrskonzepts. Output des Moduls ist ein Verkehrskonzept bestehend aus kollektiven Lösungen, individuellen Lösungen (aus Modul 7), veränderten Verbindungen (aus Modul 6) und bekannten ungelösten Verbindungskonflikten.

Im Weiteren ist eine Methode zu erarbeiten, wie kollektive Lösungen für ein Verkehrskonzept erstellt werden können.

5.8.2 Methode

Die Methode zur Verkehrskonzepterstellung wird unter Berücksichtigung der Anforderungen an das Ergebnis bestimmt. Als Ausgangspunkt liegen nach der Konfliktlösungsalternativensuche in Modul 7 die beiden Teilmengen der ungelösten und der gelösten Verbindungskonflikte vor. Für jeden gelösten Verbindungskonflikt liegen nach Modul 7 in der Menge beste Lösung ein bis zwei individuelle Lösungen vor, die entsprechend dem gestörten Aktionsknoten gewählt wurden. Zudem sind weitere umsetzbare, akzeptable, nicht als beste bewertete Konfliktlösungsalternativen in der Menge KLA n_yakzep gespeichert (siehe Unterabschnitt 5.7.4)

Modul 8 stehen somit als Input zum einen die in Modul 7 ermittelten Konfliktlösungsalternativen und zum anderen die Verbindungsermittlung der Fahrplanauskunft zur Verfügung. Ebenso wie in Modul 7 können weitere verkehrliche Maßnahmen aus KLA 4 nicht automatisiert eingebunden werden. Somit können keine anderen Lösungen gefunden werden. Daher wird mit allen in Modul 7 als machbar ermittelten Alternativen weitergearbeitet. Ungelöste Verbindungskonflikte bleiben daher auch unverändert wie in Modul 7 bestehen.

Den Fahrgästen können mit kollektiven Informationskanälen grobgranulare Informationen mitgeteilt werden, wenn ihre Routen teilweise oder vollständig übereinstimmen, und die Information die jeweils relevanten Aktionsknoten und zugehörigen Kanten zur Konfliktlösung enthält. Um Fahrgäste mit

kollektiver Kommunikation zu lenken, können Fahrgäste an wichtigen Verkehrsknoten für eine gemeinsame Führung bis zu einem anderen wichtigen Verkehrsknoten in einem Fahrgaststrom zusammengefasst werden. Am Ende der gemeinsamen Route erfolgt dann die Weiterfahrt oder der Anschluss an eine individuelle Weiterführung der Reisekette zur eigentlichen Endhaltestelle.

Kollektive Informationen sind gemäß Unterabschnitt 2.5.1 herausfordernd für die Wahrnehmung. Daher ist die Anzahl der Informationen und somit auch der Fahrgastströme, die kommuniziert werden können, zu begrenzen.

Definition Fahrgaststrom

Fahrgäste können einen Fahrgaststrom bilden, wenn sie ein ähnliches Ziel, einen ähnlichen Reiseverlauf oder ein identisches (Zwischen-)Ziel mit gleicher Route bzw. gleichem Abschnitt einer Route haben. Um viele Abschnitte der Routen von Fahrgästen auf einem Fahrgaststrom zu vereinen, sollen wichtige Verkehrsknoten im Netz, an denen eine Rückführung auf ihre eigentliche Route möglich ist, dabei als Aktionsknoten des Fahrgaststroms dienen. Kommuniziert werden somit Routen oder Teile davon und wichtige Verkehrsknoten im Netz. Im besten Fall nutzen die Fahrgastströme somit eine Route zwischen zwei wichtigen Verkehrsknoten im Netz.

Als Beispiele können hierfür „Alle Fahrgäste in Richtung Flughafen nutzen bitte die Linie …“ oder „Alle Fahrgäste mit Zwischenziel Hauptbahnhof steigen bitte an Haltestelle AB aus und nutzen bitte XY zur Weiterfahrt.“ angeführt werden.

Fahrgäste müssen somit Aktionsknoten ggfs. eigenständig identifizieren und ihren Fahrtverlauf anpassen, nachdem sie durch Richtungsanweisungen mit Umsteigepunkten und zugehörigen Verkehrsmitteln/Linien informiert wurden. Daraus ergibt sich, dass ein Fahrgaststrom eine mit Fahrgastzahlen versehene Route ist, die (Teil-)Konfliktlösungen für Fahrgäste mit unterschiedlichen Verbindungskonflikten anbietet.

Gemäß Unterabschnitt 2.5.1 ist die menschliche Aufnahmefähigkeit von Informationen begrenzt, sodass nur eine begrenzte Anzahl an Lösungen kollektiv kommuniziert werden kann. Die Bündelung der Fahrgäste auf einem Fahrgaststrom kann dazu führen, dass nicht jeder Fahrgast die beste Alternative kommuniziert bekommt (d. h. seine Individuallösung wäre eine andere).

Verwendung von Fahrgastströmen zur Erstellung kollektiver Lösungen

Es sind somit standardisierte Fahrgastströme im Untersuchungszeitraum zu modellieren und eine Auswahl davon als kollektive Lösung zu ermitteln. Da eine Vielzahl an Alternativen aus Modul 7 so weiterzuverarbeiten ist, dass nur eine kleine Anzahl kollektiven Lösungen ausgewählt wird, soll das Problem in Teilprobleme zerlegt werden.

Zunächst sind Fahrgäste anhand ihrer Routen zu Fahrgastströmen zu bündeln und anschließend eine kleine Anzahl davon auszuwählen. Ein ausgewählter Fahrgaststrom wird, im Weiteren zur klaren Unterscheidung, Fahrgastkorridor genannt. Für eine Auswahl der Fahrgastkorridore werden Kriterien benötigt. Hierzu ist auch eine Bewertung der Fahrgastströme erforderlich.

Um eine konsistente Bewertung aller verkehrlichen Maßnahmen zu erhalten, sollte die kundenorientierte Bewertung der Fahrgastströme zur Festlegung der Fahrgastkorridore anhand der Widerstandsveränderung gemäß Abschnitt 5.5 ermittelt werden.

Wenn eine Route im Störfall durch viele Fahrgäste genutzt wird, besteht das Risiko einer Überlastung der Kapazität der Verkehrsmittel. Dies sollte in der Planung der Fahrgastkorridore vermieden werden.

Es existiert somit der Bedarf, die Auslastung der Verkehrsmittel in den Fahrgastkorridoren zu überprüfen. Hierzu ist eine Engpassanalyse und ggfs. -lösung notwendig.

In Bezug auf die Ergebnisqualität des Verkehrskonzepts sind folgende Einschränkungen zu berücksichtigen: Gemäß Unterabschnitt 5.5 sind zur Bewertung Fahrgastzahlen notwendig. Diese finden in Modul 8 zudem auch Anwendung bei der Engpassanalyse. Gemäß Unterabschnitt 3.1.2 ist die Ermittlung, Aufbereitung und Bereitstellung der Daten nicht Bestandteil der Arbeit, sondern die Informationen über die Fahrgäste und ihre Verbindungen werden als gegebener Input je Verbindungskonflikt betrachtet. Da jedem Verbindungskonflikt Fahrgäste zugeordnet werden und die Engpässe in Abhängigkeit der Fahrgäste analysiert werden ist, ist bei Anwendung der Algorithmen von einer Auswirkung der Datenqualität und Granularität auf das Ergebnis auszugehen.

Im folgenden Unterabschnitt erfolgt die Untersetzung der in der Methode erarbeiteten Teilprobleme als Submodule zur Bildung eines Verkehrskonzepts, wie Abbildung 5-7 dargestellt. Im ersten Submodul werden Fahrgastströme ermittelt. Aus diesen wird im zweiten Submodul eine begrenzte Anzahl zur kommunizierende Fahrgastkorridore ausgewählt. Das dritte und vierte Submodul überprüfen diese Auswahl auf Engpässe und verändern ggfs. diese Auswahl im Rahmen einer Engpasslösung. Abschließend werden im fünften Submodul die kollektiven und verbleibenden notwendigen individuellen Konfliktlösungen, unveränderte, konfliktäre Verbindungen und ungelöste Verbindungskonflikte in einem Verkehrskonzept zusammengeführt werden.

5.8.3 Vorgehensweise

Zusammengefasst ergibt sich eine Reduktion der Problemgröße durch das Schneiden in Teilprobleme. Die so in Unterabschnitt 5.8.2 entstandenen Submodule für die Erstellung der kollektiven Lösungen und des aufbauenden Verkehrskonzepts sind in Abbildung 5-7 dargestellt. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine im Verkehrskonzept über mehrere Module konsistente Verwendung der Bewertung. Zudem werden die Alternativen aus Modul 7 weiterverwendet und keine neue Verbindungsermittlung benötigt. Dies unterstützt eine konsistente, rechenzeitarme Vorgehensweise zur Erstellung eines Verkehrskonzepts.

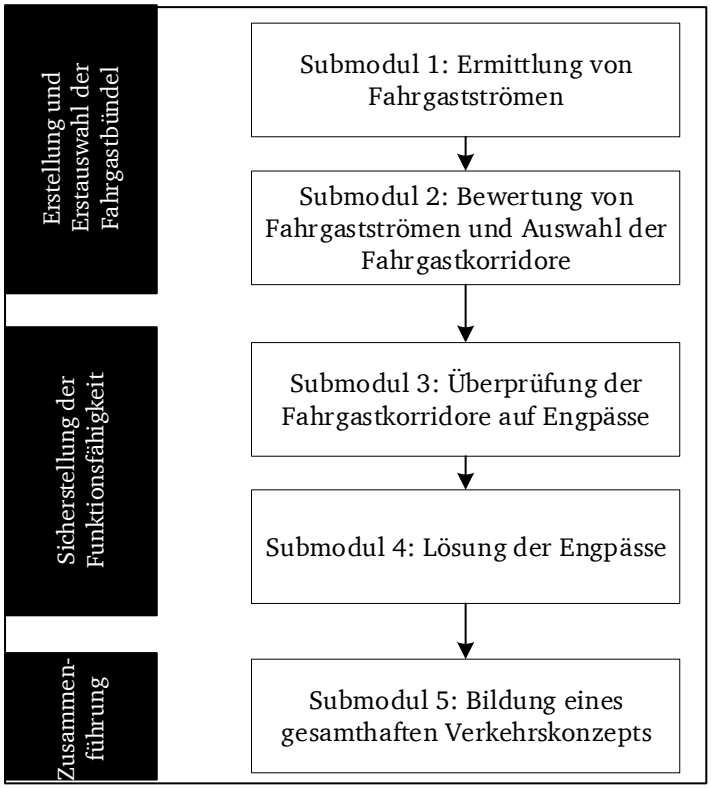


Abbildung 5-7: Vorgehensweise zur Verkehrskonzepterstellung (eigene Darstellung)

Die Ermittlung der Fahrgastströme in Submodul 1 erfolgt unter Verwendung der Ergebnisse aus Modul 7. Die Ermittlung des Vorgehens im Submodul 2 zur Bewertung von Fahrgaststrømen und der Auswahl von Fahrgastkorridoren legt fest, nach welchen Maßstäben ein im ersten Submodul gebildeter Fahrgaststrom als relevant und attraktiv für einen Fahrgastkorridor eingestuft wird.

Um die Fahrgastströme in Submodul 1 zielführend zu ermitteln, sollten die Maßstäbe, anhand derer die Auswahl eines Fahrgastkorridors in Submodul 2 erfolgt, bekannt sein. Daher wird ähnlich wie bei der Herleitung der vier Module für das Verkehrskonzept (siehe Abschnitt 5.3) zunächst das Submodul zur Bewertung konzipiert.

Submodul 2: Bewertung von Fahrgastströmen und Auswahl der Fahrgastkorridore

Funktion des Submoduls: Bewertung aller in Submodul 1 ermittelten Fahrgastströme und Auswahl der möglichen Fahrgastkorridore

Entsprechend Unterabschnitt 2.5.1 wird angenommen, dass die Aufnahmefähigkeit und Geduld der Fahrgäste (in einer Störung) begrenzt sind. Das Verständnis für übermittelte Informationen hängt von der Menge und der Relevanz für den jeweiligen Fahrgast ab. Daher ist die Korridorzahl entsprechend durch einen festzulegenden Parameter zu begrenzen. Dieser wird für diese Arbeit je auf die Störung zulaufendem Netzast zu 3 gewählt. D. h. in einem Zug/an einem Bahnsteig kann es Ansagen zu bis zu drei möglichen (Zwischen-)Zielen und der zugehörigen Route geben. Zulaufende Netzäste werden anhand der Linien des Regelbetriebs durch den Ersteller festgelegt.

Je nach Lage der Störung im Netz ist aber davon auszugehen, dass mehr Fahrgastströme bestehen, aus denen drei zur Kommunikation als Fahrgastkorridor ausgewählt werden müssen. Hierzu ist eine Bewertung zu entwickeln.

Gemäß der Anforderung zur Kundenorientierung wurde in Unterabschnitt 5.5 eine Bewertung entwickelt, die eine möglichst geringe Widerstandsveränderung gegenüber dem Regelbetrieb anstrebt. Da die als machbar, ermittelten Konfliktlösungsalternativen aus Modul 7 genutzt werden, liegen je Alternative bereits Bewertungen der Widerstandsveränderung in Bezug auf den zugehörigen Verbindungskonflikt vor. Wenn ein Fahrgaststrom mehrere Verbindungskonflikte (in Teilen) adressiert, sind dabei jeweils die Fahrgäste und der Abschnitt des gelösten Verbindungskonflikts zu berücksichtigen.

Für die Verbindungskonflikte, die in einem Fahrgaststrom durch eine andere Konfliktlösungsalternative, als in Modul 7 gewählt, gelöst werden, ist die Berechnung der Widerstandsveränderung anhand der Formel aus Abschnitt 5.5 erneut durchzuführen. Sofern mehrere Konfliktlösungsalternativen aus Modul 7 zusammengefasst werden, werden deren Widerstandsveränderungen anhand ihrer Fahrgastzahlen gewichtet. Jeder Fahrgaststrom bezieht sich somit auf die damit zu lösenden Verbindungskonflikte aus Modul 6 und den ihnen zugeordneten Fahrgästen.

Um eine ungleiche Mehrfachbewertung von einzelnen Verbindungskonflikten zu vermeiden, darf ein Verbindungskonflikt nur einem Fahrgaststrom zugeordnet werden. Dies erfolgt gemäß der Anforderung Zuverlässigkeit (siehe Unterabschnitt 3.3 (a2)) erstens anhand des Erreichens der gewünschten Ausstiegshaltestelle, zweites anhand des Erreichens der gewohnten Umsteigehaltestelle oder drittens anhand einer Teillösung, die die geringste Widerstandserhöhung erzeugt.

Da die Bewertung immer eine Widerstandsveränderung ermittelt, werden die durch einen Fahrgaststrom adressierten Verbindungskonflikte aus Modul 6 und die Bewertung der angewendeten Konfliktlösungsalternativen aus Modul 7 weiterverwendet.

Wenn die Fahrgastkorridore nur Teile der Konfliktlösungsalternativen verwenden, lösen sie ggfs. nur einen Teil des Verbindungskonflikts. In diesen Fällen ist die Widerstandsveränderung aus dem Fahrgastkorridor und den zusätzlichen individuellen Lösungen zu summieren.

Die auszuwählenden Fahrgastkorridore sollen das Netz grobgranular kommunizierbar erschließen. Eine Erschließung des Netzes ist durch eine Festlegung von zu erfüllenden Korridorarten sicherzustellen. Da es pro zulaufendem Netzast maximal drei Korridore geben soll, können maximal drei Korridorarten definiert werden.

Die drei Arten an Korridoren können u. a. durch ihren Korridorendpunkt beschrieben werden, da dieser die Anbindung an den Rest des Netzes ermöglicht und somit die Erschließung des Netzes sicherstellt.

1. Der Korridor soll einen Anschluss an den Fernverkehr und viele ÖPNV-Anschlussmöglichkeiten ermöglichen. → Korridorendpunkt am Hauptbahnhof (oder einem anderen Bahnhof, der diese Funktionen erfüllt und hierfür durch den Ersteller festgelegt wurde)
2. Die Störung trennt ein Netz meist in zwei Teile. Die Erschließung der anderen Seite der Störung ist für die Fahrgäste besonders relevant. → Korridorendpunkt liegt auf der anderen Seite
3. Durch die Störung können gestörte Verkehrsknoten nicht mehr mit dem betrachteten Verkehrsmittel erreicht werden. Ein Korridor sollte daher den gestörten Bereich erschließen.

So wie die zulaufenden Netzäste sind auch die jeweiligen Korridorendpunkte eines Netzastes anhand dieser Kriterien durch den Ersteller auszuwählen.

Wenn die Korridorarten von mehreren Fahrgastströmen erschlossen werden, so erfolgt jeweils die Auswahl des Fahrgaststroms als Fahrgastkorridor anhand der geringsten durchschnittlichen Widerstandserhöhung über aller Fahrgäste des Fahrgaststroms. Wenn in einer Zulaufrichtung die angestrebten Korridorendpunkte direkt erreichbar bleiben, so kann durch den Ersteller ein anderer Verkehrsknoten bestimmt werden.

Für die restlichen, nicht als Korridor berücksichtigten Fahrgastströme ist zu überprüfen, ob sie ggfs. in den ausgewählten Korridoren gebündelt werden können. Hierzu ist zu kontrollieren, ob der Korridorbeginn vom anderen Fahrgaststrombeginn sowie das Fahrgaststromende vom Korridorende aus zu erreichen ist. Ansonsten wird für diese Fahrgäste auf die ermittelte Individuallösung verwiesen. Wenn die gewählten Fahrgastströme nach Auswahl als Teillösungen für Fahrgäste gewählt werden, so ist die durchschnittliche Widerstandsveränderung und die Fahrgastzahl des Fahrgaststroms zu aktualisieren. Dies dient nur der abschließenden Bewertung in Submodul 5 und soll keinen iterativen Auswahlprozess auslösen, da die Fahrgäste bereits anforderungsgemäß zugeordnet waren und dies nur die zweitbeste Wahl für die Fahrgäste darstellt.

Submodul 1: Ermittlung von Fahrgastströmen

Funktion des Submoduls: Suche von Routen, die sich als Fahrgastströme eignen

In der Ermittlung des Vorgehens für Submodul 2 wurde bereits deutlich, dass die Fahrgastkorridore eine Erschließungsfunktion haben. Um Fahrgastströme zu ermitteln, die sich als Fahrgastkorridor eignen, werden die in Modul 7 ermittelten Konfliktlösungsalternativen auf sinnvolle, gemeinsame Routen(teile) durchsucht.

Um diese Suche zu strukturieren, kann das Problem zudem in Teilprobleme geschnitten werden.

Die gewünschten Arten der Korridorendpunkte wurden bereits bestimmt. Es bleibt somit noch zu ermitteln, wo der Fahrgaststrom beginnt und über welche Route er den Korridorendpunkt erreicht. Fahrgastströme können an Verkehrsknoten beginnen, die nicht zugleich Aktionsknoten für den Fahrgast sein müssen. Dieser kann bspw. auch während der Nutzung der Aktionskante über die kollektive Lösung informiert werden und seine Verbindung entsprechend anpassen. Startpunkt ist ein Verkehrsknoten ab dem über Aktionskanten die weiteren Aktionsknoten oder der Korridorendpunkt erreicht wird. Dazu ergeben sich folgende Schritte:

1. Festlegen, an welchen Verkehrsknoten die Suche beginnen soll → Definition Startpunkte
2. Welche Aktionskanten sind an den Startpunkten angeschlossen? → Ermittlung der Verkehrsmittel und Linien, die dort verkehren
3. Welche sinnvollen Aktionsknoten werden mit den Aktionskanten erreicht? → Definition Anschlusspunkte
4. Wiederholung von 2. und 3. zur Erstellung von Fahrgastströmen mit Umstieg→ Festlegung der Abbruchkriterien.

<u>Definition Startpunkte</u>

Fahrgastströme sollen zielgerichtet und nicht für das gesamte Netz ermittelt werden. Dies wäre auch nicht zweckmäßig, da viele Ströme existieren können, die nicht den Störbereich nutzen und somit nicht von der Störung betroffen sind. Daher ist eine problemgerechte Einschränkung des Suchraums für die Fahrgastströme nötig.

Der Störbereich teilt das Netz meist in drei Teile: einen direkt gestörten Bereich ohne Betrieb und meist zwei die Störung umgebende Seiten. Der direkte Störbereich sowie die für den Fahrgast gegenüberliegende Seite sind nicht mehr direkt anfahrbar.

Nun soll durch die Korridore eine Erschließung des geteilten Netzes ermöglicht werden. Hierzu besteht besonderer Bedarf an den Verkehrsknoten mit in eine Richtung anschließender gestörter Verkehrskanten vor der Störung bzw. den entfallenden Abschnitten. Dies sind bspw. SFP-Wendebahnhöfe und somit zwingend Ausgangspunkt der Betrachtung zur Ermittlung der Startpunkte für die Suche.

Grundsätzlich kann zunächst untersucht werden, wie die Verkehrsknoten mit in einer Richtung anschließender gestörter Verkehrskante direkt mit den gestörten Verkehrsknoten verbunden werden können. Dies würde grundlegend ermöglichen, dass jeder gestörte Knoten erreicht werden kann. Gegenfalls besteht aber Bedarf, von einem gestörten Knoten zu einem anderen gestörten Knoten zu kommen. Wenn nur ausgehend von Verkehrsknoten mit anschließender gestörter Verkehrskante gesucht wird, müsste in diesem Fall am Verkehrsknoten mit anschließender gestörter Verkehrskante umgestiegen werden. Dies ist aber ggfs. nicht nötig, wenn eine andere qualitativ bessere Möglichkeit vorliegt, die eine direkte Verbindung ermöglicht. Zudem sollen Fahrgastströme auch zur Verbindung der beiden getrennten Netzteile dienen. Dies kann auch großräumiger geschehen und nicht nur durch eine Verbindung der beiden Verkehrsknoten mit anschließender gestörter Verkehrskante. Es bestehen somit unterschiedliche Möglichkeiten, um das gestörte Netz zu erschließen.

In Abbildung 5-8 werden die verschiedenen Erschließungsfunktionen dargestellt, anhand derer die Startpunkte ermittelt werden sollen. Dabei ist die Störung zwischen den Verkehrsknoten D und E verortet, der Störbereich reicht von C bis F, sodass dort keine S-Bahnen verkehren können. C und F dienen dabei einer Linie als SFP-Wendebahnhof, B und G dienen als vorgelagerter SFP-Wendebahnhof für eine andere Linie.

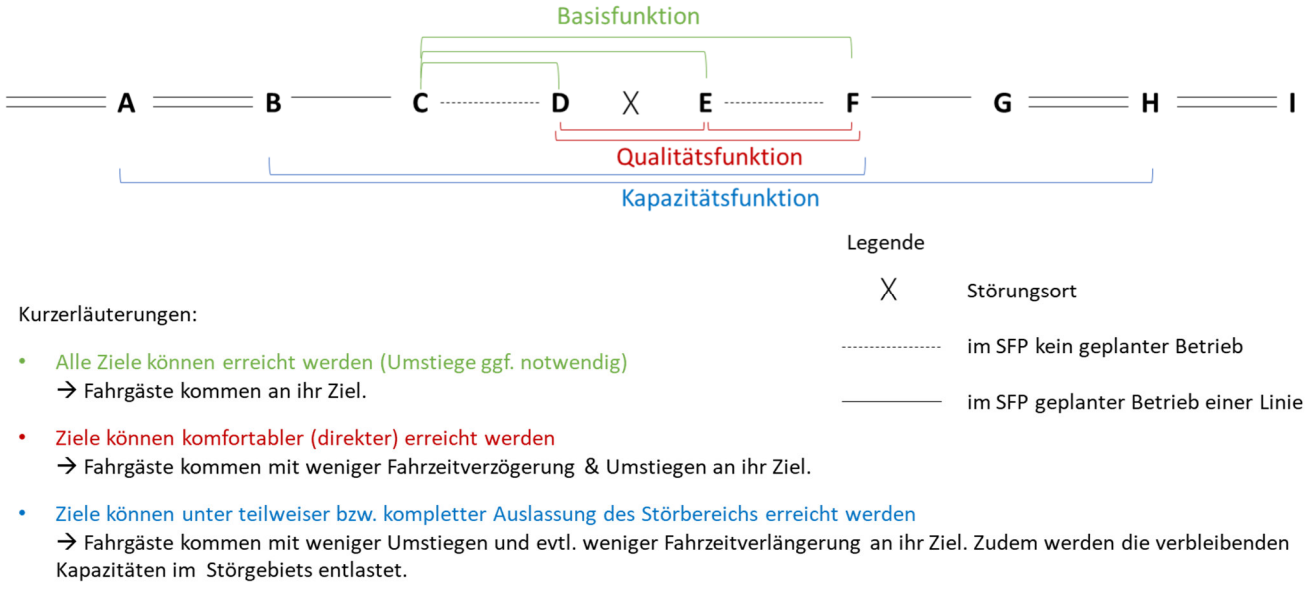


Abbildung 5-8: Erschließungsfunktionen (eigene Darstellung)

Die Basisfunktion der Erschließung ermöglicht, dass alle gestörten Verkehrsknoten erreicht werden können. Dies ist aber ggfs. sehr umständlich. In der Abbildung müsste man unter Verwendung der Basisfunktion bspw., um von D nach E zu kommen, in C umsteigen. Die Relation D nach E ist aber direkt

erschließbar. Ziele können komfortabler erreicht werden, wenn bspw. weniger Fahrtzeitverlängerungen und Umstiege entstehen. Dies wird im Weiteren als Qualitätsfunktion bezeichnet.

Diese beiden Funktionen ermöglichen die Verbindung durch Erschließung des direkten Störbereichs. Hierzu können mit der Kapazitätsfunktion Ziele unter (teilweiser) Auslassung des Störbereichs erschlossen werden, d. h. weniger Umstiege und ggfs. weniger Fahrtzeitverlängerungen. Die Bezeichnung Kapazitätsfunktion bezieht sich darauf, dass die verkehrliche Auslastung im Störbereich reduziert wird, da die Fahrgäste diesen Bereich nicht zwingend nutzen müssen, wenn ihre Ausstiegshaltestelle dort nicht liegt.

Um nun Startpunkte zu definieren, ist zu klären, was wichtige Verkehrsknoten sind. Für die Basis- und Qualitätsfunktion sind dies:

- Verkehrsknoten, die durch die betrieblichen Maßnahmen teilweise bzw. komplett entfallen, bspw. komplette entfallende Halte durch Betriebskonzept oder Störungsbereich (gKnotV),
- Verkehrsknoten, die durch das Betriebskonzept einen temporären Endpunkt im Netz darstellen, bspw. SFP-Wendebahnhof (KnotV mit anschließender gKantV), und
- alle Verkehrsknoten, an denen die Maßnahmen Umleitung/Umleitung mit Ersatz eine initiale Veränderung der Infrastrukturnutzung erfahren (KnotV mit anschließender vKantV).

Diese sind somit zwingende Startpunkt für die Suche. Gegebenenfalls sind an den genannten Verkehrsknoten nur wenige oder stark widerstandsverändernde Alternativen verfügbar, da der Verkehrsknoten nur schlecht an den ÖPNV angeschlossen ist. Daher ist zu prüfen, ob die Möglichkeit besteht, dass ein Umstieg für die Fahrgäste vor dem Erreichen des SFP-Wendebahnhofs des Zuges sinnvoller ist.

An diesen Verkehrsknoten beginnen oder enden Fahrgastströme mit Kapazitätsfunktion. Im Weiteren ist zu klären, welche Verkehrsknoten dafür zusätzliche sinnvolle Startpunkte darstellen.

Aufgrund der Problemgröße wurde bereits festgelegt, dass nicht alle Verkehrsknoten im Netz als Startpunkt dienen können. Daher wird ein Vorgehen zum Auffinden von weiteren bzw. sinnvolleren Startpunkten, um die bisherige Eingrenzung des Suchraums zu erweitern, benötigt.

Bedarf besteht bei Fahrgästen, die auf einen der Startpunkte der Basis- und Qualitätsfunktion zufahren, da diese Linie durch das SFP unterbrochen wird. Daher ist zu betrachten, welche Verkehrsknoten dazu vorgelagert auf der Verkehrskante liegen und eine Kapazitätsfunktion ermöglichen könnten. Schrittweise für jeden Verkehrsknoten, der auf den zulaufenden Verkehrskanten der S-Bahn liegt, ist zu prüfen, ob sie sich als Startpunkt qualifizieren, da dort zusätzliche Verkehrsmittel oder weitere Linien verfügbar sind.

Nachdem alle Verkehrsknoten ermittelt wurden, die einen Startpunkt für einen Fahrgaststrom darstellen können, ist zu ermitteln, ob dort auch ein Fahrgaststrom als Verbindung mit einem Endpunkt entsprechend den Anforderungen abbildbar ist.

Ermittlung der Verkehrsmittel und Linien, die dort verkehren

Um die Erschließung des Netzes vom Startpunkt aus zu erfassen, ist zunächst zu klären, welche Aktionskanten dort angeboten werden. In den Konfliktlösungsalternativen sind für die Startpunkte alle Aktionskanten zu ermitteln, die im Störfall am Startpunkt verkehren. Dies ist sowohl in Richtung als auch weg vom Störbereich zu erledigen, denn es ist nicht zwingend, dass sich nur sinnvolle Korridore

ergeben, wenn ausschließlich die Aktionskanten in Richtung der Störung behandelt werden. Zudem kann es auch Aktionskanten geben, die nicht in klarem Richtungsbezug zur Störung verlaufen.

Dabei sind Aktionskanten zu verwenden, die im Untersuchungszeitraum regelmäßig angeboten werden.

Die Relevanz der Aktionskanten zur Erschließung des Netzes ergibt sich erst durch die Anschlusspunkte, die auf ihnen liegen. Deren Funktion ist daher nun zu definieren.

Definition Anschlusspunkte

Für die Ermittlung aller Anschlusspunkte, die auf den verfügbaren Verkehrskanten liegen, ist zunächst festzulegen, wann ein Verkehrsknoten sinnvoll zu einem Aktionsknoten als Anschlusspunkt werden kann.

Anschlusspunkte sind:

- andere Startpunkte der Basis- und Qualitätsfunktion
    - die mit dem aktuellen Startpunkt nicht durch eine Verkehrskante des gestörten Verkehrsmittels verbunden sind oder
    - bei denen gKantV oder vKantV vorliegt (entfallene und eingeschränkte Verkehrsknoten, SFP-Wendebahnhöfe, „Umleitungsbeginn“, Verkehrsknoten auf der anderen Seite der Störung)
- regulär angefahrene Aktionsknoten mit folgender Qualifikation:
    - Umsteigepunkt zu anderen Verkehrsmitteln/Linien
    - Fernverkehrsanschlusspunkte
    - stellen die vor dem Störfall bestehende direkte Verbindung von Startpunkt und Anschlusspunkt unter Verwendung anderer Verkehrskanten her.

Keine Anschlusspunkte sind:

- Verkehrsknoten, die nur von der genutzten Verkehrskante und
- Verkehrsknoten, die nur von den gleichen Verkehrskanten wie am Startpunkt

erreichbar sind.

An den Anschlusspunkten finden Schleifen mit erneuter Verkehrskantenermittlung und anschließender Suche von Anschlusspunkten für Umsteigeverbindungen statt.

Da entsprechend Tabelle 5-1 Umsteigeverbindungen nicht beliebig viele Umstiege haben sollen und dies auch nicht anforderungsgerecht kommunizierbar wäre, ist im Folgenden festzulegen, wie viele Schleifen stattfinden sollen und unter welchen Kriterien der Algorithmus seine Suche abbricht.

Festlegung der Abbruchkriterien

Durch die Abbruchkriterien ist sicherzustellen, dass die Rechenzeit nicht unnötig lang wird und zudem nicht zu viele unbrauchbare Ergebnisse generiert werden. Daher ist jeder Suchlauf von einem Startpunkt ausgehend zu beenden, wenn

a. ein möglicher Korridorendpunkt (siehe Korridorarten in Submodul 2) erreicht wird oder
b. insgesamt max. drei Schleifen (zwei Umstiege) durchlaufen wurden.

zu a.: Wenn der Hauptbahnhof oder ein Startpunkt auf der anderen Seite der Störung erreicht wird, wird dieser Fahrgaststrom direkt der Lösungsteilmenge für die Auswahl eines Fahrgastkorridors innerhalb dieser Korridorart hinzugefügt.

zu b.: Nach drei Schleifen ist die maximale Anzahl der akzeptablen Umstiege, die in Modul 7 angewendet wird (siehe Unterabschnitt 5.7.3), noch nicht erreicht, aber mehr als zwei Umstiege sind per Durchsage oder Anzeige nicht gut kommunizierbar. Zudem erscheint es sehr wahrscheinlich, dass am Anfang oder Ende des Fahrgaststroms nochmal umgestiegen wird, um nach der Einstiegshaltestelle den Fahrgaststrom zu nutzen oder anschließend die Ausstiegshaltestelle zu erreichen.

Die Fahrgäste sollen mit den Fahrgaststrømen direkt an ihr Ziel, zurück auf die vor der Störung in der Verbindung geplante S-Bahn-Linie oder den geplanten Umstieg auf ÖPNV/ÖPFV geführt werden. Daher muss der Korridorendpunkt nach den max. drei Schleifen ein Verkehrsknoten der Hierarchieebene KLA 1 sein (siehe Unterabschnitt 5.7.3). Nur diese Fahrgastströme werden den Lösungsteilmengen der Korridorarten hinzugefügt.

Zusammenfassend ergeben sich daher folgende Schritte zur Ermittlung der Fahrgastströme.

1. Auswahl von Startpunkten, an denen die Suche von Routen im gesamten Netz beginnt.
2. Ermittlung aller Linien aller Verkehrsmittel, die diese Startpunkte im Störfall weiterhin bedienen.
3. Ermittlung aller Anschlusspunkte, die auf den gefundenen Verkehrskanten liegen.
4. Bis zu zwei weitere Schleifen der Schritte 2.–3. für Umsteigeanbindungen an den Anschlusspunkten.

Diese sind exemplarisch in Abbildung 5-9 für den Startpunkt Hauptwache dargestellt.

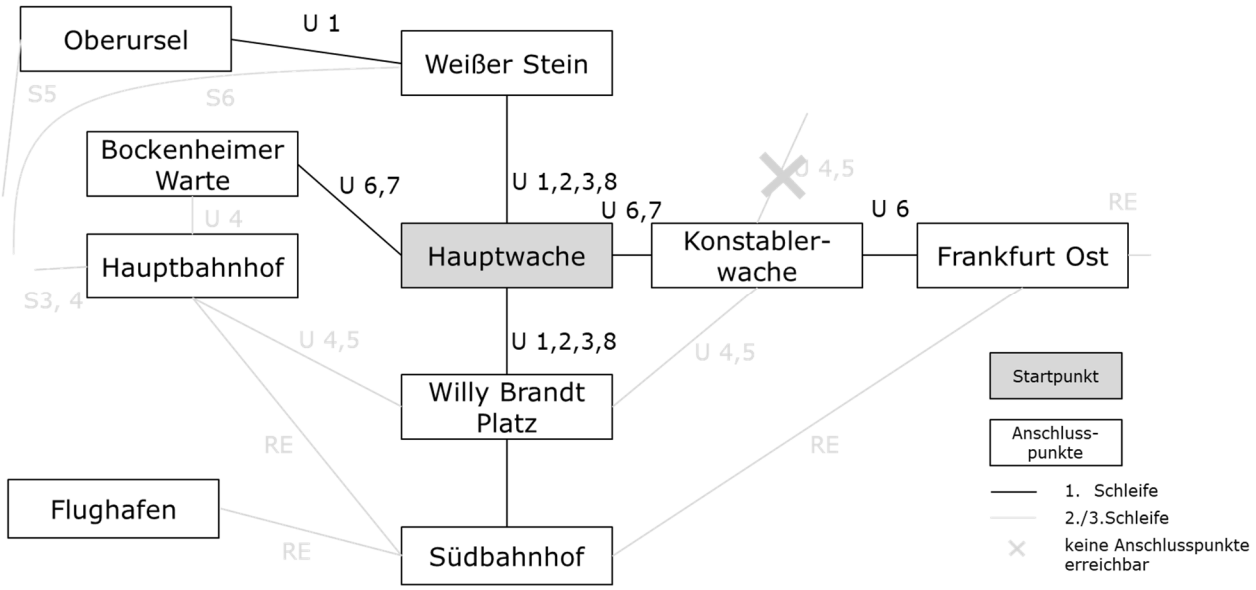


Abbildung 5-9: Beispiel der möglichen Schleifen einer Fahrgaststromermittlung (eigene Darstellung)

Submodul 3: Überprüfung der Fahrgastkorridore auf Engpässe

Die Fahrgastkorridore bündeln die Fahrgäste mehrerer Verbindungskonflikte und Konfliktlösungsalternativen. Diese Fahrgäste nutzen diese Route somit in Teilen oder gänzlich zusätzlich im Vergleich zum Regelbetrieb; daher kann das Verkehrsangebot dort ggfs. (in Teilen) nicht ausreichend sein.

Sollte es zu Überlastungen der Verkehrsmittel auf diesen Routen kommen, so führen diese zu Wartezeiten (bspw. verlängerter Fahrgastwechsel durch Behinderungen oder Warten auf den nächsten Takt) oder schlimmstenfalls zu sicherheitskritischen Situationen (bspw. Überbelegung von Zügen oder

Bahnsteigen, die dann geräumt werden müssen). Dies gefährdet die Funktionsfähigkeit von Betriebs- und Verkehrskonzept und ist zudem unattraktiv für den Fahrgast und je nach Grad der Überlastung gefährlich.

Kritische Überlastungen dürfen nicht durch Kommunikation von Fahrgastkorridoren erzeugt werden. Daher ist eine Kapazitätsprüfung der Verkehrsknoten und - kanten auf Engpässe entlang des Fahrgastkorridors notwendig.

Engpässe können an folgenden Stellen in Bezug auf eine oder mehrere Linien entstehen:

- in den Fahrzeugen der zugehörigen Verkehrsmittel: Bezug zu (Teilen) einer Linie,
- an der Haltestelle: Bezug zu mehreren Linien, die dort verkehren und deren Fahrgäste dort warten,
- Wechselwirkung Fahrzeug/Bahnsteig (Behinderung der Fahrgäste, die ein-/aussteigen, und der Wartenden am Bahnsteig): Bezug zu einzelnen stark ausgelasteten Linien sowie an der Haltestelle wartenden Fahrgästen anderer Linien.

Um die Engpässe zu ermitteln, sind Werte zur Auslastung im Regelbetrieb zu verwenden. Für die Verkehrsmittel des Nahverkehrs gibt es bereits einen methodischen Ansatz, wie diese geschätzt werden können (siehe Unterabschnitt 2.5.3). Die Algorithmen von Crespo (2020) können dafür als externes Modul eingebunden werden, wenn keine Daten zur Auslastung im Nahverkehrsverbund vorliegen. Für die Linien des eigenen Unternehmens werden Datensätze oder Schätzungen vorausgesetzt, die einen groben Auslastungswert zur Hauptverkehrszeit ausgeben.

Diese vorliegenden Auslastungswerte sind dann um die zusätzlichen Fahrgäste des Korridors zu ergänzen, diese entstammen den Verbindungskonflikten und deren zugeordneter Anzahl an betroffenen Fahrgästen. Die Ermittlung oder Schätzung dieser Daten ist nicht Teil dieser Arbeit (siehe Abschnitt 3.1.2) und wird vorausgesetzt.

Engpässe können somit kanten- oder knotenbezogen ermittelt werden:

- kantenbezogener Engpass: Fahrzeugüberlastung,
- knotenbezogener Engpass: Bahnsteig-/Fahrgastwechselüberlastung.

Die Berechnung der Auslastung von Bahnsteigen und Fahrzeugen kann bei Implementierung der Algorithmen anhand bestehender unternehmensinterner Planungssoftware oder bestehenden Formeln erstellt werden. Die Daten zu den Kapazitäten von Bahnsteigen und Fahrzeugen sollten dabei unternehmensintern vorliegen. Zur Verteilung der Fahrgäste und deren Ankunftsverteilung am Bahnsteig gibt es abgeschlossene und laufende Forschungsarbeiten wie bspw. Renzel und Brüning (2021) und Forschungzentrum Jülich GmbH (01.08.2018-31.07.2022) die dann Anwendung finden können. Dies erfordert daher keinen neuen wissenschaftlich anspruchsvollen Algorithmus, sondern eine softwaretechnische Umsetzung bestehender Forschungsarbeiten. Daher wird die Ermittlung der Engpässe als externes Modul angesetzt.

Für jeden Engpass können anhand regionaler Vorgaben und der jeweils gültigen Richtlinien gestaffelte Grenz- und Toleranzwerte für die Verkehrsqualität in Fahrzeug und an der Station eingeführt werden. Die Staffelung orientiert sich dabei an den branchenüblichen Vorgaben des Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2001, S. 30) zum Sitzplatzangebot. Dort wurden für das Stundenmittel 65%, für die 20 Minuten-Spitze 85% und als Maximalwert für Ausnahmesituationen 100% des Platzangebots angesetzt.

Daraus wird eine Staffelung der Grenzwerte sowohl für Fahrzeug und Bahnsteig abgeleitet:

- massive Überschreitung des maximalen Grenzwertes >100%,
- Überschreitung des Toleranzbereichs des Qualitätskennwertes >80%,
- geringe Überschreitung des Qualitätskennwertes >65% sowie
- unterhalb des Qualitätskennwertes.

Die Höhe der massiven Überschreitung ist ein festzulegender Wert, der die sicherheitskritischen Situationen abbildet. Eine geringe Überschreitung innerhalb des Toleranzbereichs wird im Kontext des nur eingeschränkt verfügbaren Angebots in der Störung als akzeptabel eingestuft. Somit gelten Werte oberhalb des Toleranzbereichs als Engpass.

Wenn die Engpassanalyse eines Korridors zuggenau durchgeführt wird, ist festzulegen, wann ein Engpass besteht. Bereits der erste Zug mit einer Überlastung löst eine weitere Untersuchung aus, da er nicht alle Fahrgäste transportieren kann. Diese nutzen mit zeitlichem Verschub, der in der Bewertung dieser Fahrgäste zu berücksichtigen ist, das nächste Fahrzeug. Dieses sollte dabei die Überlastung abbauen. Wenn dies nicht der Fall ist und eine kontinuierliche Überlastung entsteht, bei der nicht sichergestellt werden kann, dass und in welchem Zug die Fahrgäste befördert werden können, liegt ein Engpass vor, der zu lösen ist.

Es ist somit im Folgenden ein Vorgehen zu erarbeiten, das die als Engpass eingestuften Überlastungen löst.

Submodul 4: Lösung der Engpässe

Für Engpässe ist nun ein Vorgehen zur Engpasslösung zu bestimmen. Engpässe werden im Betrieb klassischerweise durch zeitlichen oder räumlichen Verschub gelöst und reduzieren so die Auslastung.

Beim *zeitlichen Verschub* erhöht sich die Widerstandsveränderung, da dies bedeuten würde, dass Fahrgäste auf die nächsten Fahrten warten müssen. Warten am Bahnsteig im Rahmen eines Umstiegs wird besonders negativ bewertet (siehe Unterabschnitt 2.5.1). Daher ist der zeitliche Verschub für die verkehrliche Betrachtung keine gute Lösung für den Fahrgast. Zudem sammeln sich die zusätzlichen Fahrgäste von jedem Takt und führen zu ggfs. weiterem Aufbau des Engpasses im Verlauf des Untersuchungszeitraums sowie zur Überlastung des Bahnsteigs.

Daher ist der *räumliche Verschub* der Fahrgäste zu präferieren. Dies bedeutet, dass ein Fahrgastkorridor aufgelöst wird und ein räumlich anders verlaufender Fahrgaststrom stattdessen als Fahrgastkorridor kommuniziert wird. Dabei sollte die Korridorart erhalten bleiben. Wenn sich räumlich keine Lösung ergeben sollte, ist der zeitliche Verschub, im Sinne von Warten auf die nächste Fahrt, die Zwangslösung für einen ungelösten Engpass. Dies ist aber nur möglich, wenn der Engpass in einem Fahrzeug entsteht.

Bei der Lösungssuche ist darauf zu achten, dass eine Lösung gefunden werden kann und keine weiteren Engpässe als Folgekonflikte aus der Lösung entstehen. Dies kann bei einer parallelen Suche für verschiedene Engpässe nicht ausgeschlossen werden. Es ist somit eine asynchrone Lösungssuche anzustreben. Diese ist mit dem größten Engpass und dem dort größten Fahrgastkorridor zu beginnen, da davon auszugehen ist, dass dessen Lösung kleinere Engpässe mitlösen kann.

Der größte Engpass definiert sich durch die Anzahl der Fahrgäste oberhalb des Toleranzbereichs und nicht durch die prozentuale Überschreitung der Kapazitätsgrenzen. Dabei sind Engpässe, die sicherheitskritische Situationen auslösen, zwingend zu lösen.

Aus dem Submodul 1 sind die neben der Erstauswahl weiteren möglichen Fahrgastströme bereits bekannt. Es muss somit nicht das Netz erneut auf Routen durchsucht werden, sondern nur die bereits bestehenden Teillösungsmengen für die Korridorarten. Bei der Suche muss sichergestellt werden, dass

eine Lösung gefunden bzw. der Algorithmus terminiert wird und nicht eine zu lange Laufzeit wg. beliebiger Kombination der Möglichkeiten entsteht.

Dieser Sachverhalt ermöglicht die Anwendung des klassischen Vorgehens von Metaheuristiken (siehe Abschnitt 2.2.5), die auf das vorliegende Problem angepasst werden kann. Das metaheuristische Vorgehen ermöglicht dabei eine rechenzeitarme Lösung, da es keine neue Routensuche benötigt, sondern bestehende Inhalte der Nachbarschaft verwendet. Es überprüft somit die bereits ermittelten Fahrgastströme auf ihre Anwendbarkeit zur Engpasslösung. Das Vorgehen wird dann pro Engpass zur Lösungssuche durchlaufen.

Wenn keine Lösung mit vollständiger Auflösung des Engpasses zu finden ist, wird dieser zurückgestellt. Es soll dann zunächst der zweitgrößte noch vorliegende Engpass gelöst werden. Anschließend ist dann wieder der größte, somit der zurückgestellte, Engpass zu lösen.

Auf einem Fahrgastkorridor werden mehrere Verbindungskonflikte zusammengelegt. Durch die Engpasslösung besteht die Möglichkeit, dass der nun als Fahrgastkorridor gewählte Fahrgaststrom ggfs. nicht alle Verbindungskonflikte, die vorher auf dem Korridor lagen, adressiert. Die Fahrgastzahl des Fahrgastkorridors ergibt sich durch den gewählten Fahrgaststrom und verändert sich ggfs. somit. Die verbleibenden Fahrgäste sind dann wieder ihrer individuellen Alternative und deren Bewertung zuzuweisen.

Wichtig ist aber nicht nur das Ermitteln einer Lösung je Engpass, sondern insbesondere das Erreichen eines engpassfreien Verkehrskonzepts. Da jeder Engpass nacheinander geprüft wird, ist sicherzustellen, dass der Algorithmus bei der Lösungssuche keine Folgeengpässe oder eine Verschlechterung erzeugt, die einen erneuten Durchlauf fordern. Das Terminieren des Algorithmus und das Erreichen eines Ergebnisses für das gesamte Konzept sind sicherzustellen.

Zudem ist zu untersuchen, was passiert, wenn ein Engpass auch nach mehrfachem Lösungsversuch nicht lösbar bleibt. Hierfür ist dann zunächst die größtmögliche Verbesserung zu ermitteln und dem Ersteller anzuzeigen. Dieser kann dann manuell eingreifen. Hierzu hat er mehrere Möglichkeiten:

- Akzeptieren eines zeitlichen Verschubs bei Fahrzeugengpässen mit Wartezeiten für die Reisenden. Dies ist in die Bewertung durch den erhöhten Widerstand aufzunehmen.
- Überarbeitung des Betriebskonzepts, um das Angebot zu erhöhen.
- Überarbeitung des Verkehrskonzepts durch zusätzliches verkehrliches Angebot mit Maßnahmen der Hierarchieebene KLA 4 (siehe Unterabschnitt 5.7.4). Dies ist in der Bewertung zu beachten, da diese Maßnahmen potenziell auch ungelöste Verbindungskonflikte lösen können.
- Wenn ein Engpass nicht lösbar ist und auch durch manuelle Maßnahmen des Erstellers nicht verbessert werden kann, dann muss für die sicherheitskritischen Fälle vermerkt werden, wo es zu Gefahrensituationen kommen kann, und es sollten vorsorglich bei Störungseintritt direkt Fahrgastlenker eingesetzt werden.

Ein Engpass ist so weit wie möglich mit den hier gesetzten Rahmenbedingungen zu lösen. Es ist aufgrund der Problemgröße keine Optimierung und auch möglicherweise keine vollständige Lösung verfügbar, sodass im ungünstigsten Fall auch nach manuellem Eingriff, durch zu große Angebotseinschränkungen der Störung, nicht gelöste Engpässe im Verkehrskonzept verbleiben.

Dies wirkt zunächst nicht zielführend, allerdings bleibt hier festzuhalten, dass dieser Fall als selten einzuschätzen ist und eine optimierte oder ausgeweitete Routensuche die Anforderung der geringen Rechenzeit konterkariert, nur unattraktivere Verbindungen für den Fahrgast finden kann und nicht

zwingend ein besseres Ergebnis erzeugt, da nur grobe, geschätzte Daten zu den Fahrgastflüssen und Auslastungen vorhanden sind. Zudem können bei Betriebskonzepten mit sehr stark eingeschränktem Betrieb aufgrund des stark reduzierten Angebots nicht immer Lösungen gefunden werden. Es erscheint zudem wenig zielführend, da der Untersuchungszeitraum von der Hauptverkehrszeit ausgeht, die nicht immer zum Störungszeitpunkt vorliegt, und somit auch nicht immer ein Engpass tatsächlich auftritt.

Submodul 5: Bildung eines gesamthaften Verkehrskonzepts

Nachdem die Engpasslösung beendet ist, kann entsprechend Abbildung 5-10 die Zusammenstellung der zu kommunizierenden Fahrgastkorridore als kollektive Lösungen, der individuellen Lösungen und der verbleibenden ungelösten Verbindungskonflikte sowie der veränderten Verbindungen erfolgen.

Abbildung 5-10: Bewertungsbestandteile der Verkehrskonzeptbewertung (eigene Darstellung)

Wenn das Verkehrskonzept eine ausreichende Bewertung erhält, können mit diesen Ergebnissen Maßnahmen zur Kommunikation durch den Ersteller erarbeitet werden. Dieses Konzept bildet für die Algorithmen im Folgenden die Grundlage für die Bewertung des Verkehrskonzepts in Modul 9 und somit des Störfallprogramms.

Bei der Zusammenstellung ist zu erfassen, welche gelösten Verbindungskonflikte aus Modul 7 in einem Fahrgastkorridor aus Modul 8 aufgehen. Aufgrund der öffentlichen Kommunikation der Fahrgastkorridore ist davon auszugehen, dass diese bevorzugt genutzt werden.

Für die Lösungen, sowohl kollektiv als auch individuell, sind bereits im Rahmen der Auswahl die zugehörigen Widerstandsveränderungen ermittelt worden, sodass diese Werte für die in Modul 9 anschließende Konzeptbewertung genutzt werden können.

Da es bei dem erstellen Verkehrskonzept nur eine zuverlässige Anwendung in der stabilen Phase erfolgen kann, sind nur die Verbindungskonflikte dieses Zeitraums zu berücksichtigen. Gemäß Abschnitt 3.5 sind die Verbindungskonflikte in der Einschwingphase zur Auflösung des in Abschnitt 3.4 diskutieren Zielkonflikts Bestandteil von Modul 10.

5.8.4 Algorithmus

Nachdem in den Unterabschnitten Methode und Vorgehensweise erläutert wurde, welche Aufgaben der Algorithmus hat und wie der Input verarbeitet wird, um den gewünschten Output zu erreichen, erfolgt hier die formalere Notation der einzelnen Arbeitsschritte.

Vor Beginn des Algorithmus sind durch den Ersteller folgende Dinge festzulegen:

- die je auf die Störung zulaufendem Netzäste durch Angabe von jeweilige Angabe der zusammen zu betrachtenden Linien aus dem Regelbetrieb und deren jeweiligen Startbahnhöfen sowie
- die gewünschten Ep_x für jeden auf die Störung zulaufenden Netzast.

Submodul 1: Ermittlung von Fahrgastströmen für jeden zulaufenden Netzast

1. Ermittlung aller möglichen Startpunkte Sp_x. Ermittle alle Verkehrsknoten KnotV des gestörten Verkehrsmittels im Untersuchungsraum. Dabei ist ein KnotV = Sp_x, wenn gilt:

   - KnotV = gKnotV oder
   - KnotV = KnotV mit in eine Richtung anschließender gKantV oder
   - KnotV = KnotV mit anschließender vKantV
   - Ermittle zudem weitere Sp_x ausgehend von den KnotV mit anschließender gKantV:
     - Ermittle Menge aller verfügbaren KantV bei KnotV mit anschließender gKantV.
     - Prüfe auf der KantV eines Zuges bis KnotV = Endbahnhof alle auf der KantV liegenden KnotV auf Verfügbarkeit weiterer KantV
       - Wenn KantV ⊆ verfügbare KantV bei KnotV mit anschließender gKantV, dann KnotV ≠ Sp_x.
       - Wenn KantV ∉ verfügbare KantV bei KnotV mit anschließender gKantV, dann KnotV = Sp_x.

2. Ermittlung der Verkehrsmittel und Linien, die an dem KnotV = Sp_x verkehren

   - Für Sp_{x1} bis Sp_{xn}:
   - Ermittle Menge aller verfügbaren KantV an Sp_{x1} unter Verwendung der y, die in Modul 7 in beste Verbindung(en) aus KLA n_neu und in der Menge akzeptabler neuer Verbindungen KLA n_yakzep gespeichert wurden.

3. Ermittlung möglicher Anschlusspunkte Ap_x je ermittelter KantV

   - Ermittle alle KnotV, die auf ermittelter KantV liegen.
   - KnotV = Ap_x, wenn gilt:
     - in den Mengen beste Verbindung(en) aus KLA n_neu und in der Menge akzeptabler neuer Verbindungen KLA n_yakzep ist ein y vorhanden, dass den KnotV als KnotA nutzt.
     - KnotV = Sp_x für den gilt
       - Sp_x ≠ Sp_{x1} und
       - Verbindung Sp_{x1} und Sp_x erfolgt nicht durch eine KantV des gestörten Verkehrsmittels
       - oder
       - KnotV die weitere KantV anbieten
         - KnotV = AP_x, wenn am KnotV eine neue KantV existiert
         - KnotV ≠ AP_x, wenn am KnotV keine neue KantV existiert

4. Wiederhole 2. und 3. für KnotV = Ap_x bis zum Erreichen eines Korridorendpunkts Ep_x

   - Wenn in der ersten oder zweiten Wiederholung von 2. und 3. die Suche ein Ep_x ermitteltet, nutze dieses weitergehend als Ap_x um ggfs. weitere Ep_x über diese Route zu erreichen.
   - Wiederhole bis die maximale Wiederholungszahl 2 erreicht ist.

5. Erstelle die Teilmengen aus den möglichen Fahrgastströmen für die gefundenen Routen von Sp_x nach Ep_x entsprechend anhand der durch Ersteller definierten drei Korridorarten für den zulaufenden Netzast.

Submodul 2: Bewertung von Fahrgastströmen und Auswahl der Fahrgastkorridore

1. Ordne den möglichen Fahrgastströmen die Verbindungskonflikte und die Fahrgastzahlen zu.

    - Ein Verbindungskonflikt x gehört dabei zu einem Fahrgaststrom, wenn eine für ihn konfliktlösende Verbindungen y darin verwendet wird.
    - Sollte ein Verbindungskonflikt x durch das Vorhandensein mehrere konfliktlösender y mehreren Fahrgastströmen zugeordnet werden können, wird er einem Fahrgaststrom über y anhand folgender Prioritäten zugeordnet:
        - 1. y erreicht KnotA = in x geplante Ausstiegshaltestelle
        - 2. y erreicht KnotA = in x geplante Umstiegshaltestelle
        - 3. Fahrgaststrom löst einen Teil von x durch einen neuen KnotA von dem aus die geplanten KnotA erreichbar sind.
        - wenn in einer Priorität mehrere Möglichkeiten bestehen, ist die mit min ΔW von y zu x

2. Ermittlung der Widerstandsveränderung für jeden Fahrgaststrom innerhalb der drei Teilmengen

Berechne die durchschnittliche Widerstandsveränderung je Fahrgaststrom entsprechend der Abschnitt 5.5 über alle von den im Fahrgaststrom enthaltenen Verbindungskonflikten und deren Fahrgästen mit:

$$\emptyset \Delta W = \frac{\sum_{x=1} \Delta \mathrm{W} \cdot Fg_x}{\sum_{x=1} Fg_x}$$

mit:

⌀ ΔW	durchschnittliche Widerstandsveränderung [WE],
ΔW_x	Widerstandsveränderung für einen Verbindungskonflikt x und
Fg_x	Fahrgäste des Verbindungskonflikts x.

3. Wähle den Fahrgastkorridor je Korridorart je zulaufendem Netzast.

    - Für jede Korridorart, die verfügbar ist, wähle den Fahrgaststrom mit der min ΔW.
    - Wenn in Submodul 1 für eine Korridorart auf einem zulaufenden Netzast kein Fahrgaststrom ermittelt werden konnte, kann die Korridorart auf dem zulaufenden Netzast nicht angeboten werden.
        - Dabei gilt je zulaufendem Netzast:
        - 1. Korridorart nicht verfügbar, wenn der Korridorendpunkt EP_x in der zulaufendem Netzast weiterhin direkt erreichbar ist,
        - 2. Korridorart nicht verfügbar, wenn zugehörige Teilmenge ∅.
        - Melde an Ersteller zurück für: Wahl von anderem Korridorendpunkt oder Reduktion der Anzahl der Fahrgastkorridore.

- Prüfe nach Auswahl der drei Korridore, ob weitere x mit nachrangiger Priorität den gewählten Fahrgastströmen zugeordnet werden können. Wenn ja, aktualisiere die Fahrgastzahlen und die Bewertung für die drei Fahrgastströme.
- Speichere die x die nicht in den Fahrgastströmen aufgehen, ihre zugehörige y und ihre Bewertung als Verbindungskonflikte mit individuellen Lösungen.

Submodul 3: Überprüfung der Fahrgastkorridore auf Engpässe

Überprüfe für alle Verkehrskanten und Verkehrsknoten die von Fahrgastkorridoren genutzt werden:

1. Prüfe auf die Überlastung der Belegung der Bahnsteige
    - Ermittle die Auslastung im Untersuchungszeitraum aus eintreffenden und abfahrenden Fahrgästen in einem externen Modul.
    - Ordne die Auslastung entsprechend den festgelegten Grenzwerten (Parameter) einer Kategorie zu.
    - Bei Zuordnung zu a. oder b., ordne den Engpass der Teilmenge massive Überschreitung bzw. der Teilmenge Überschreitung des Toleranzbereichs zu.
2. Prüfe auf die Überlastung der Belegung der Fahrzeuge
    - Ermittle die Auslastung im Untersuchungszeitraum aus ein- und aussteigenden Fahrgästen in einem externen Modul.
    - Ordne die Auslastung entsprechend den festgelegten Grenzwerten (Parameter) einer Kategorie zu
    - Bei Zuordnung zu a. oder b. ordne den Engpass der Teilmenge massive Überschreitung bzw. der Teilmenge Überschreitung des Toleranzbereichs zu
    - Wenn eine Überlastung eines Zuges detektiert wird, prüfe welche folgende Leistung die verbleibenden Fahrgäste an den gewünschten Aktionsknoten befördern kann, und ob deren verbleibende Kapazität dafür ausreicht.
        - Wenn ja, wird der Zug nicht als Engpass gespeichert. Passe die Bewertung für diese Fahrgäste durch Warten am Bahnsteig an der Einstiegshaltestelle bzw. die Umsteigezeit an
        - Wenn nein, liegt ein Engpass vor der in Submodul 4 zu lösen ist.

Submodul 4: Lösung der Engpässe

Die Engpässe der Stufe a) sind zwingend zu lösen. Die Engpässe der Stufe b) sind auf Lösung zu prüfen. Führe dazu folgende Schritte durch:

1. Wähle den größten Engpass und beginne mit der Lösungssuche.
    - Dabei gilt: größter Engpass = Verkehrsknoten bzw. Verkehrskante mit größter Anzahl an Fahrgäste über dem Grenzwert.
2. Bestimme eine Startlösung L.
    - L sind die Fahrgastkorridore, die den überlasteten Verkehrsknoten bzw. die überlastete Verkehrskante nutzen.
    - Wähle dabei den Fahrgastkorridor mit der größten Anzahl an Fahrgästen und suche nach eine Alternative in den folgenden Schritten.
3. Definiere eine Nachbarschaft N von zu L ähnlichen Lösungen.

- Die Nachbarschaft N besteht aus den Fahrgastströmen, die die gleiche Korridorart auf dem zulaufenden Netzast des Engpasses darstellen.

4. Suche Nachbarschaft vollständig ab und bestimme die beste Lösung.
   - Der Fahrgaststrom soll den gleichen Korridorendpunkt erreichen.
   - Wen mehrere Fahrgastströme den gleichen Korridorendpunkt erreichen, ist der Fahrgaststrom mit der niedrigsten durchschnittlichen Widerstandsveränderung zu wählen.
   - Wenn keine Lösung vorliegt, stelle betrachteten Engpass zurück und gehe zu 1. mit dem nächstgrößten Engpass.
5. Beginne erneut bei 1.
   - Verbleiben nur noch Engpässe, die bereits geprüft wurden, und für die keine Lösung gefunden werden kann, breche ab und lasse den Ersteller anhand der Möglichkeiten aus Unterabschnitt 5.8.3 entscheiden.

Um Folgeengpässe zur Engpasslösung zu vermeiden, werden sind folgende Verbote für die Schritte 2.–4. zu berücksichtigen:

- keine Verschlechterung von anderen Engpässen und
- keine Erzeugung von neuen Engpässen.

Submodul 5: Bildung eines gesamthaften Verkehrskonzepts

1. Erstelle ein gesamthaftes Verkehrskonzept aus den folgenden Mengen:

   - unveränderte Verbindungen die einen Verbindungskonflikt darstellen aber keine Alternative benötigen aus Modul 6 (KVunverändert_x),
   - Fahrgastkorridore mit Fahrgastzahl und zugehörigen Widerstandsveränderungen (Teilmenge von KVgelöst_x),
   - individuelle Lösungen mit Fahrgastzahl und zugehörigen Widerstandsveränderungen (Teilmenge von KVgelöst_x) (je nach Ergebnis des Algorithmus in Unterabschnitt 5.7.4 liegen für ein x zwei beste y vor) und
   - ungelöste Verbindungskonflikte mit zugehörigen Fahrgastzahlen (KVungelöst_x).

2. Reduziere die Mengen um die Verbindungskonflikte und ihre zugehörigen Fahrgäste, die während der Einschwingphase auftreten, d. h. für alle gKantA1, die vor Ablauf von t_{ED} im Fahrplan des Regelbetriebs auftreten.

5.8.5 Zusammenfassung

Fahrgastkorridore werden zur einheitlichen Verbindungskommunikation benötigt. Aufgrund der kollektiven Kommunikation der Fahrgastkorridore wird davon ausgegangen, dass diese bevorzugt genutzt werden. Da die Fahrgastkorridore das Netz erschließen sollen, wurden drei Korridorarten festgelegt, die je zulaufendem Netzast ermöglicht werden sollen. Diese sollen einen Anschluss an den Fernverkehr und des Bereichs auf der anderen Seite der Störung ermöglichen.

Zur Ermittlung der Korridore werden zunächst aus den in Modul 7 bestimmten Alternativen Fahrgastströme bestimmt und zur Belegung der drei relevanten Korridorarten zur Netzerschließung ausgewählt. Die durchschnittlichen Widerstandsveränderungen sollen dabei geringgehalten werden. Die ausgewählten Fahrgastkorridore werden auf Engpässe untersucht und bei Vorliegen gelöst.

Um alle von Verbindungskonflikten betroffenen Fahrgäste berücksichtigen, wird abschließend ein gesamthaftes Verkehrskonzept erstellt, das kollektive und individuelle Lösungen, unveränderte, konfliktäre Verbindungen sowie die ungelösten Verbindungskonflikte in der stabilen Phase beinhaltet.

Für die Lösungen, sowohl kollektiv als auch individuell, wurden die zugehörigen Widerstandsveränderungen ermittelt und können im nun anschließenden Abschnitt zur Verkehrskonzeptbewertung weiterverwendet werden.

5.9 Modul 9: Verkehrskonzeptbewertung

5.9.1 Einleitung

Ziel des neunten Moduls ist die Bewertung des erstellten Verkehrskonzepts, um sicherzustellen, dass das erstellte Verkehrskonzept entsprechend der allgemeinen Zielsetzung in Abschnitt 5.1 und Kapitel 3 kundenorientiert ist.

Der Ersteller erhält anhand der Bewertung eine Aussage über die Qualität des Verkehrskonzepts und kann darauf aufbauend Entscheidungen zu weiteren betrieblichen oder verkehrlichen Maßnahmen treffen. Zudem wird ihm der Abgleich zweier Störfallprogramme (teil-)automatisiert ermöglicht.

In Abschnitt 5.5 wurden die beiden Bewertungsmaßstäbe Zielerreichungsgrad und Widerstandsveränderung durch die verkehrlichen Maßnahmen als relevant für die kundenorientierte Bewertung festgelegt. Für deren Nutzung im Rahmen der Konzeptbewertung sind die entsprechenden Anforderungen zu berücksichtigen.

Die Anforderungen an die Verkehrskonzeptbewertung wurden bereits in Abschnitt 3.2 (f2) erfasst und werden hier weiterverwendet. Die Anforderungen zeigen, dass die Kundenorientierung durch die Konzeptbewertung überprüft werden soll. Bei einer Bewertung mit „nicht ausreichend“ ist (teil-)automatisiert eine Überarbeitung des Betriebskonzepts und/oder des Verkehrskonzepts anzustoßen. Nachdem Anpassungen durch den Ersteller vorgenommen worden sind, kann die angepasste Version mit der Vorgängerversion verglichen werden, um so zu sehen, ob die Eingaben das Konzept verbessert haben.

Eine Bewertung mit zwei einzelnen Maßstäben (hier: Zielerreichungsgrad und Widerstandsveränderung) kann allerdings in einem Zielkonflikt bezüglich der Wertigkeit der beiden Maßstäbe resultieren und würde eine Abwägung erfordern, welcher Maßstab wichtiger ist.

Um im Hinblick auf die Anforderung an eine nachvollziehbare und objektive Konzeptbewertung aus den beiden Maßstäben, die für sich stehend eine hilfreiche Aussagekraft haben können, eine gesamthafte Aussage zu ermöglichen, sind diese in ein Bewertungssystem zu integrieren.

Zusammengefasst ist für das Verkehrskonzept bestehend aus kollektiven und individuellen Lösungen sowie ungelösten Verbindungskonflikten – jeweils mit einer Fahrgastanzahl versehen – anhand der Bewertungsmaßstäbe (Zielerreichungsgrad und Widerstandserhöhungen) aus Abschnitt 5.5 ein Bewertungssystem zur verkehrlichen Konzeptbewertung zu entwickeln. Dessen Ergebnis soll eine (vergleichbare) Abschätzung der kundenorientierten Qualität des Verkehrskonzepts inkl. der evtl. Auslösung eines interaktiven Prozesses zur Anpassung des Betriebs- und/oder Verkehrskonzepts (bei Bedarf) ermöglichen.

Im Weiteren sind Methode und Vorgehensweise zu erarbeiten, wie die Bewertungsmaßstäbe anforderungsgerecht in einem Bewertungssystem zusammengeführt und auf ein Verkehrskonzept angewendet werden können.

5.9.2 Methode

Aus den Anforderungen an die Bewertung und das SFP ergeben sich für die Methode die folgenden Randbedingungen.

Die einzelnen verkehrlichen Maßnahmen wurden in den vorangegangenen Modulen anhand ihrer Attraktivität ausgewählt. Im Gegensatz zur Widerstandsveränderung wurde der Zielerreichungsgrad dabei nicht verwendet, da bisher nur alternative Lösungen zu bewerten waren.

Die Widerstandserhöhung wird je Lösung bestimmt. Der Zielerreichungsgrad wird hingegen einmal für das Verkehrskonzept insgesamt ermittelt. Somit können diese beiden Bewertungsmaßstäbe nicht direkt miteinander verrechnet werden.

Für eine Zusammenfassung einzelner Bewertungen für eine Bewertung des gesamten Verkehrskonzepts ist die Anzahl der betroffenen Fahrgäste anforderungsgemäß zu berücksichtigen. Dies gilt auch für die Fahrgäste, für die keine Lösungsalternative angeboten wird, sondern weiterhin ein ungelöster Verbindungskonflikt vorliegt. Dazu ist jeder Verbindungskonflikt (gelöst oder ungelöst) mit der davon betroffenen Fahrgastanzahl zu gewichten.

Um eine objektive Bewertung zu ermöglichen, muss das Ergebnis eine eindeutige Aussage treffen und darf keine Abwägung zwischen zwei Bewertungsmaßstäben durch den Ersteller erfordern. Daher müssen beide Maßstäbe in einem Bewertungssystem vereint werden, wozu aber zunächst die ungelösten Verbindungskonflikte bewertbar gemacht werden müssen.

Entwicklung eines Bewertungssystems

In Abschnitt 5.5 wurden die beiden Bewertungsmaßstäbe Zielerreichungsgrad und Widerstandsveränderung definiert. Der Zielerreichungsgrad gibt an, für wie viele Fahrgäste Lösungen gefunden werden bezogen auf alle Fahrgäste mit Verbindungskonflikten. Die Widerstandsveränderung ist der Bewertungsmaßstab, der eine Aussage über die Qualität der gefundenen Lösungen bietet. Gemäß den Anforderungen müssen diese Bewertungsmaßstäbe zusammengeführt werden.

Die gefundenen Lösungen sind bereits Bestandteil des Zielerreichungsgrads, allerdings ermöglicht dieser keine Aussage über die Qualität der angebotenen Alternativen. Daher verbleibt der zweite Bewertungsmaßstab zur integrierten Verwendung. Somit wird eine Integration der Fahrgäste, die ihr Ziel nicht erreichen und somit einen ungelösten Verbindungskonflikt haben, in die durchschnittliche Widerstandsveränderung notwendig.

Ein ungelöster Verbindungskonflikt bedeutet, dass keine oder keine akzeptable Lösung unter Anwendung der Bewertungsmaßstäbe mit parametrisierten Grenzwerten in Modul 7 oder 8 gefunden wurde, die als Bestandteil in das Verkehrskonzept integriert werden konnte.

Für diese Fahrgäste gibt es somit bisher keine ermittelte Widerstandsveränderung. Diese ist aber notwendig, um diese Fahrgäste im Bewertungssystem zu berücksichtigen, wodurch sich die Notwendigkeit ergibt, eine Methode zur Bewertung der Widerstandsveränderung bei ungelösten Verbindungskonflikten zu entwickeln.

<u>Methode zur Bestimmung der Widerstandsveränderung bei ungelösten Verbindungskonflikten</u>

Für die ungelösten Verbindungskonflikte existiert keine Lösung für den Störfall. Wenn ein Verbindungskonflikt ungelöst ist, bedeutet dies, dass es keine (akzeptable) Alternative im Verkehrsverbund gibt, die den Abgleich ermöglichen würde.

Für den Fahrgast bestehen bei ungelöste Verbindungskonflikt die folgenden verbleibenden Möglichkeiten im Verkehrssystem im Individualverkehr:

- motorisiert: Automobil, Mitfahrten, Roller, Taxi etc.,
- nicht motorisiert: zu Fuß, Fahrrad etc.

Neben der Nutzung der Angebote des Individualverkehrs kann der Fahrgast zudem seine Fahrt verschieben, d. h. auf die Verfügbarkeit des ÖPNV nach Störungsende warten oder seine Fahrt abbrechen bzw. nicht beginnen. Außerdem kann er auf eigenen Wunsch den ÖPFV oder eine nicht kostenneutrale Alternative nutzen oder eine Verbindung wählen, die über den Grenzwerten für die Anzahl an Umstiegen liegt. Es besteht daher eine Vielzahl an Möglichkeiten, sodass der Widerstand nicht zwingend gegen unendlich geht, aber trotzdem deutlich steigt.

Die Wahl aus den verbleibenden Möglichkeiten ist je nach individueller Situation (bspw. Verfügbarkeit eines Individual-Verkehrsmittels, Reiseweite, Gepäck und Mobilitätseinschränkung sowie Reisezweck) und der Störung (bspw. Größe des betroffenen Gebiets, Lage im Netz und Dauer) so unterschiedlich, dass keine Aussage getroffen werden kann, wie die individuelle Entscheidung eines Fahrgasts bezüglich der vielfältigen Möglichkeiten erfolgt.

Daher ist zu überprüfen, wie die Ermittlung der Widerstandsveränderung unabhängig von der Kenntnis der individuellen Entscheidungen der Fahrgäste geschätzt werden kann.

Um einen Zusammenhang zum vorliegenden Störfall und dessen Auswirkungen zu erzeugen, kann eine Bewertung der ungelösten Verbindungskonflikte in Abhängigkeit von den gelösten, bewerteten Verbindungskonflikten in Betracht gezogen werden. Dazu könnten die ungelösten Verbindungskonflikte z. B. über ein parametrisiertes Perzentil oder den Maximalwert der Widerstände der gelösten Verbindungskonflikte bewertet werden.

Der Ablauf wäre dabei wie folgt: Die ungelösten Verbindungskonflikte würden mit einem Wert belegt werden und anschließend mit diesem in das Bewertungssystem eingehen. Wenn der Ersteller aufgrund des Ergebnisses des Bewertungssystems Maßnahmen manuell einplant, um einen Teil der ungelösten Verbindungskonflikte zu lösen, wird anschließend eine erneute Konzeptbewertung durchgeführt. In der erneuten Konzeptbewertung wäre ein Teil der zuvor ungelösten Verbindungskonflikte nun gelöst und das Perzentil bzw. der Maximalwert, der für die verbleibenden ungelösten Verbindungskonflikte entsteht, würde sich verändern. Somit würde ein verbleibender ungelöster Verbindungskonflikt nach Adressierung der anderen Verbindungskonflikte nun anders bewertet werden.

Für den Fahrgast bleibt der Verbindungskonflikt jedoch gleich. Zudem hängt dessen Wahrnehmung nicht von den Lösungen, die für die anderen Fahrgäste gefunden werden, ab. Daher kann die Bestimmung der Widerstandsveränderungen bei ungelösten Verbindungskonflikten nicht an die Widerstandsveränderung der gelösten Verbindungskonflikte gekoppelt werden.

Um die Widerstandsveränderung zu ermitteln werden daher die Möglichkeiten der Fahrgäste ohne Konfliktlösung genauer betrachtet. Für diese besteht ähnlich der Konfliktlösungsarten im Bahnbetrieb (siehe Unterabschnitt 2.2.5) die Möglichkeit der räumlichen oder zeitlichen Verlagerung und die eines Ausfalls. Eine räumliche Verlagerung ist mit der Wahl eines verbleibenden Verkehrsmittels gleichzusetzen. Die zeitliche Verlagerung bedeutet das Abwarten bis Störungsende. Der Ausfall bedeutet einen Verzicht auf die Fahrt.

Je nach persönlicher Situation stehen einem Fahrgast aber nicht alle Lösungen zur Verfügung. So kann ein Fahrgast auf der Heimfahrt von seinem Arbeitsplatz nicht auf die Fahrt verzichten. Auf dem Hinweg zur Arbeit kann jedoch ggfs. auf die Fahrt verzichtet werden, wenn bspw. die für selbst disponiertes

Arbeiten besteht. Da Daten zu diesen Entscheidungen auf individueller Ebene sehr schwer zu erheben wären, sind die Möglichkeiten so zusammenzufassen, dass Daten dazu erhoben werden können. Eine anschließende Erhebung der Daten und deren weitere Aufbereitung sowie Verwendung ist gemäß Unterabschnitt 3.1.2 nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Es ergibt sich daher eine Aufteilung der Fahrgäste in eine Gruppe, die die Möglichkeit hat sich für ein anderes Verkehrsmittel oder für das Zuhause bleiben zu entscheiden. Sie nutzen somit entweder die räumliche Verlagerung oder den Ausfall der Fahrt. Die andere Gruppe an Fahrgästen hat keine Möglichkeit zu entscheiden, da sie bereits unterwegs sind, die Fahrt zwingend antreten müssen oder keine anderen Verkehrsmittel nutzen können.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Fahrgastgruppe mit Entscheidungsmöglichkeit ihre Entscheidung anhand der verbleibenden Fahrzeugfolgezeit trifft. Da diese in dem Störungszeitraum sehr hoch ist, entscheiden sie sich die Fahrgäste dieser Gruppe für eine andere Möglichkeit, wie bspw. das Zuhause bleiben. Dazu kann der Zusammenhang zwischen Fahrzeugfolgezeit und der mittleren Wartezeit im öffentlichen Personenverkehr nach Walther et al. (1997, S. 22) angesetzt werden. Dieser nähert sich für Fahrzeugfolgezeiten über 60 Minuten einem t_w von 8 Minuten an. Diese werden klassischerweise anhand der Zeitbewertungsfunktion für das Warten am Bahnsteig (siehe Unterabschnitt 2.5.1) bewertet.

Der Fahrgastgruppe ohne Entscheidungsmöglichkeit hat, verbleibt nur das Warten auf das Störungsende um ihre Fahrt fortzuführen. Diese Wartezeiten sind somit mit der Zeitbewertungsfunktion für die Wartezeit am Bahnsteig an der Einstiegshaltestelle zu bewerten. Da die Zeitbewertungsfunktion für hohe Zeitwerte sehr hohe Bewertungen liefert, gehen diese Widerstandsveränderungen gegen unendlich. Hierbei ist anzumerken, dass die Kalibrierung der Zeitbewertungsfunktion nicht auf diese langen Wartezeiten ausgelegt ist. Eine Neukalibrierung liegt gemäß Unterabschnitt 3.1.2 nicht in-scope dieser Arbeit, könnte aber ggfs. bei einer Implementierung notwendig werden.

Es ergibt sich somit ein Bewertungssystem, das sowohl Zielerreichungsgrad als auch Widerstandsveränderungen berücksichtigt, indem es ungelöste Verbindungskonflikte (Nicht-Zielerreichungsgrad = 100% minus Zielerreichungsgrad) mit einer Widerstandsveränderung belegt und so eine durchschnittliche Widerstandsveränderung über alle, von einem Verbindungskonflikt betroffenen Fahrgäste, ausgibt.

Die Konzeptbewertung soll eine Aussage über die Änderung der Qualität des Verkehrskonzepts ermöglichen und zudem bei einer Bewertung mit „nicht ausreichend“ nicht nur die Überarbeitung auslösen, sondern auch den Ersteller leiten. Neben dem Bedarf an Maßnahmen für ungelöste Verbindungskonflikte kann auch Bedarf zur Verbesserung der Alternativen für bereits gelöste Verbindungskonflikte bestehen.

Zur Methode der Verkehrskonzeptbewertung lässt sich zusammenzufassen, dass die beiden Bewertungsmaßstäbe in einem Bewertungssystem zusammenzufassen sind, um so eine Qualitätsaussage über das für die stabile Phase geplante Verkehrskonzept treffen zu können.

Um alle Verbindungskonflikte in diesem System zu berücksichtigen und einen gesamthaften Durchschnitt der Widerstandsveränderung zu ermitteln, muss zunächst den ungelösten Verbindungskonflikten eine Widerstandsveränderung zugewiesen werden. Da die Verhaltensweisen der Fahrgäste mit ungelöstem Verbindungskonflikt höchst individuell und von vielen Rahmenbedingungen abhängig sind, lassen sie sich im nur grob abschätzen. Um diese Abschätzung durchzuführen werden die Fahrgäste mit ungelöstem Konflikt in zwei Gruppen aufgeteilt und bewertet.

5.9.3 Vorgehensweise

Zur Vervollständigung der im vorherigen Unterabschnitt entwickelten Methode ist in diesem und dem folgenden Unterabschnitt die Bewertung für ungelöste Verbindungskonflikte zu algorithmieren und mit der aus Abschnitt 5.5. vorliegenden Bewertung zu dem angestrebten Bewertungsmaßstab zu integrieren. Entsprechend Abbildung 5-11 sind dazu die Berechnungsschritte unter Verwendung des angebenden Inputs mit einer Vorgehensweise zu untersetzen.

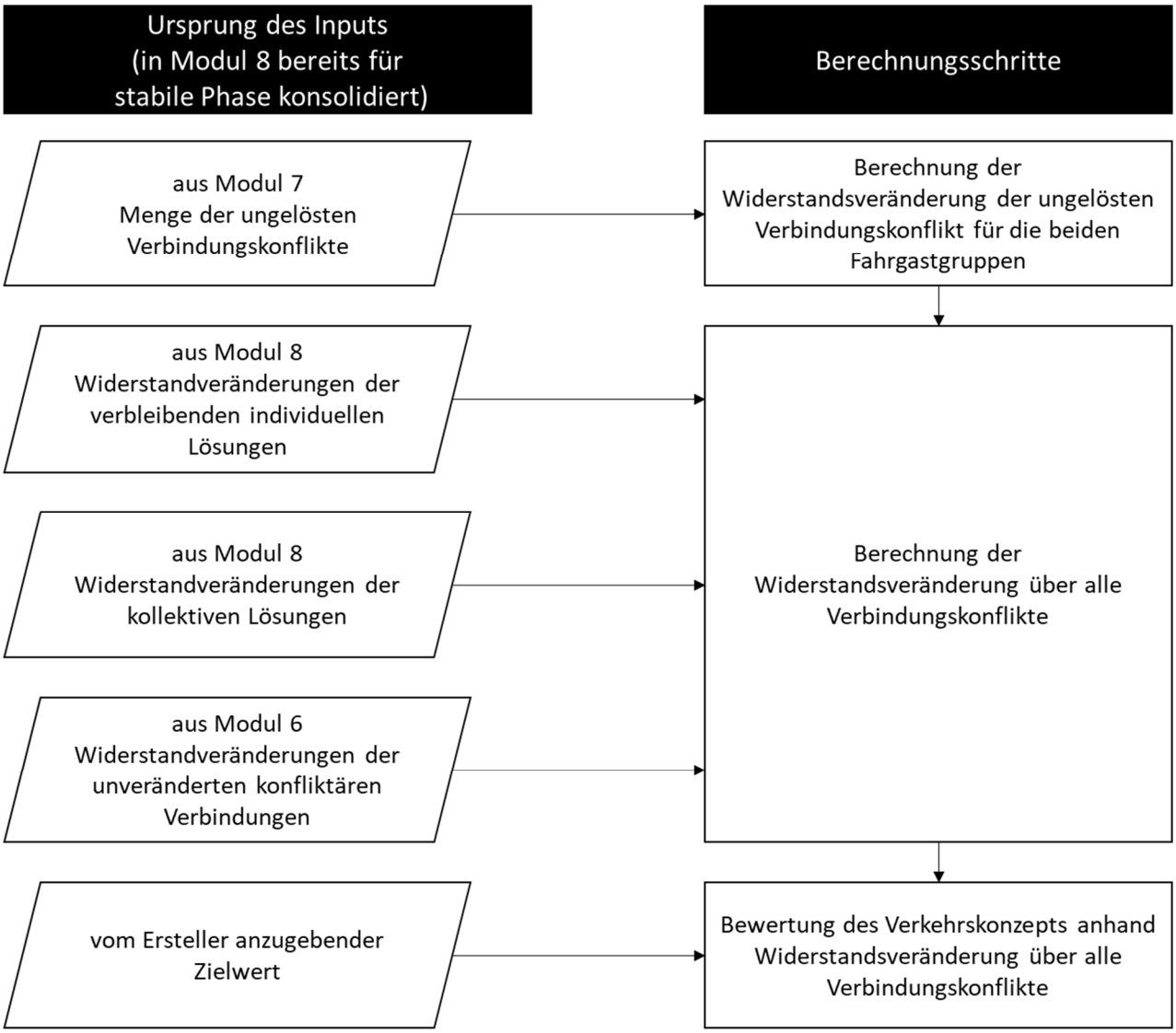


Abbildung 5-11: Input und Vorgehen der Verkehrskonzeptbewertung (eigene Darstellung)

Berechnung der Widerstandsveränderung der ungelösten Verbindungskonflikte

Die ungelösten Verbindungskonflikte wurden in Modul 7 erfasst und werden nun bewertet. Die zugehörige Anzahl an Fahrgästen hat sich vor dem Störfall für eine Fahrt mit dem ÖPNV entschieden, welcher nun für ihre Relation nicht mehr verfügbar ist. Zur Ermittlung der resultierenden Widerstandserhöhung werden die Fahrgäste der ungelösten Verbindungskonflikte einer der beiden in Unterabschnitt 5.9.2 hergeleiteten Gruppen zugeordnet.

Für die Fahrgäste mit Entscheidungsmöglichkeit erfolgt eine Bewertung des ungelösten Verbindungskonflikts anhand der Möglichkeit zuhause zu bleiben oder das Verkehrsmittel zu wechseln. Für die Gruppe der Fahrgäste ohne Entscheidungsmöglichkeit erfolgt eine Bewertung des ungelösten

Verbindungskonflikts anhand der Wartezeit bis die Störung behoben ist und die Maßnahmen des Störfallprogramms beendet werden. Die Wartezeit ergibt sich aus der Differenz des Endes der SFP Anwendung und der geplanten Abfahrt der konfliktären Verbindung. Da alle Verbindungen im Untersuchungszeitraum durchgängig unverändert konfliktär sind und die Wartezeit im Verlauf des Untersuchungszeitraums immer weiter abnimmt, wird als Störungszeitpunkt der Beginn des Untersuchungszeitraums angenommen. Auf diesen ist dann eine Anwendungsdauer des SFP aufzurechnen um den Zeitpunkt der Rückführung in den Regelbetrieb zu bestimmen. Die typische Anwendungsdauer für das geplante Betriebskonzept ist durch den Ersteller anzugeben.

Berechnung der Widerstandsveränderung über alle Verbindungskonflikte

Die Widerstandsveränderung wird für alle von einem Verbindungskonflikt betroffenen Fahrgäste ermittelt. Dabei lassen dich zudem die durchschnittlichen Widerstandsveränderungen für die gelösten und ungelösten Verbindungskonflikte ermitteln. Diese können den Ersteller bei einer ggfs. nötigen interaktiven Überarbeitung leiten. Eine Übersicht dazu ist in Abbildung 5-12 dargestellt. Relevant für die Bewertung des Verkehrskonzepts ist dabei die durchschnittliche Widerstandsveränderung über alle Verbindungskonflikte mit Gewichtung über alle betroffenen Fahrgäste.

Für die individuellen Konfliktlösungen können nach Modul 7, wenn der gestörte Aktionsknoten eine Umsteigehaltestelle darstellt, können ggfs. zwei beste Alternativen vorliegen. Dabei wurde eine Alternative für die Bewertung bereits in Modul 7 ausgewählt. Wenn die Alternative mit Beginn an der Umsteigehaltestelle besser ist, als die an der Einstiegshaltestelle, werden alle Fahrgäste des Verbindungskonflikts der Alternative beginnend an der Umsteigehaltestelle zugeordnet. Wenn die Alternative an der Einstiegshaltestelle eine geringere Widerstandsveränderung aufweist, dann ist davon auszugehen, dass diese bevorzugt wird. Da aber die Information an diesem Ort ggfs. nicht so intensiv kommuniziert wird oder der Fahrgast bereits im Zug sitzt, werden gemäß einem Worst-Case-Szenario alle Fahrgäste mit der Widerstandsveränderung für die Alternative beginnend an der Umstiegshaltestelle bewertet.

Widerstandsveränderungen zur Bewertung des Verkehrskonzepts in der stabilen Phase		
durchschnittliche Widerstandsveränderung über die ungelösten Verbindungskonflikte $ØΔw_{ugK}$	durchschnittliche Widerstandsveränderung über die gelösten Verbindungskonflikte $ØΔw_{gK}$	durchschnittliche Widerstandsveränderung über die unveränderten, konfliktären Verbindungen $ØΔw_{uvK}$
durchschnittliche Widerstandsveränderung aller Verbindungskonflikte in der stabilen Phase $ØΔw_{stabil}$		

Abbildung 5-12: zu berücksichtigende Widerstandsveränderungen aller Verbindungskonflikte in der stabilen Phase (eigene Darstellung)

Bewertung des Verkehrskonzepts anhand Widerstandsveränderung über alle Verbindungskonflikte

Die Bewertung dieser Widerstandsveränderung über alle von Verbindungskonflikten betroffenen Fahrgäste in der stabilen Phase des Störfalls kann durch einen Abgleich mit der vorgegebenen Zielfunktion für eine maximal akzeptable Widerstandserhöhung erfolgen. Wenn diese eingehalten wird, beginnt die integrierte Bewertung des Störfallprogramms. Wenn diese nicht eingehalten wird, dann gilt die kundenorientierte Qualität des Verkehrskonzepts als nicht ausreichend. Somit ist eine interaktive Überarbeitung durch den Ersteller auszulösen. Dieser kann zur Verbesserung Maßnahmen im Betriebskonzept anpassen und Maßnahmen der KLA 4 im Verkehrskonzept einplanen.

5.9.4 Algorithmus

Nachdem in den Unterabschnitten Methode und Vorgehensweise erläutert wurde, welche Aufgaben der Algorithmus hat und wie der für die stabile Phase konsolidierte Input aus Modul 8 verarbeitet wird, um den gewünschten Output zu erreichen, erfolgt hier die formalere Notation der einzelnen Arbeitsschritte, die in Abbildung 5-13 dargestellt sind.

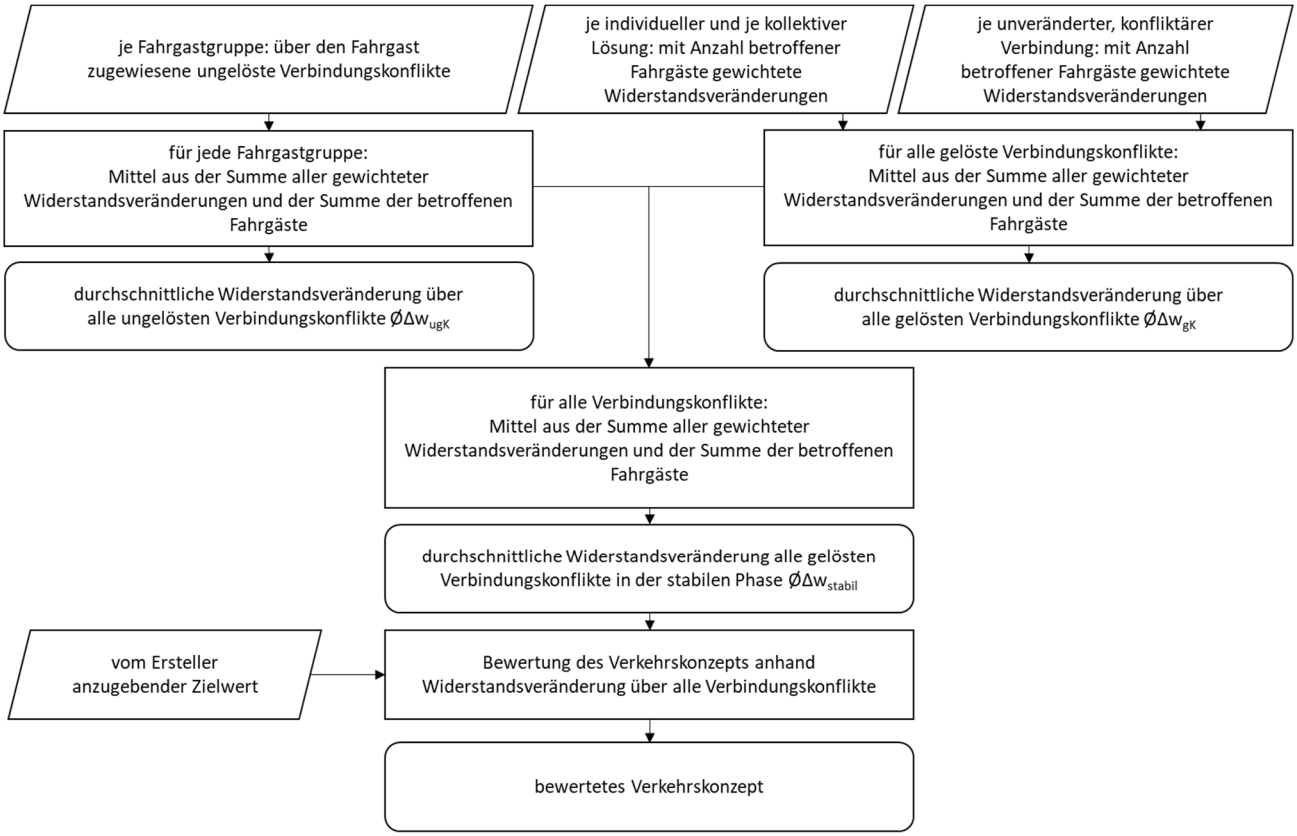


Abbildung 5-13: Arbeitsschritte zur Verkehrskonzeptbewertung (eigene Darstellung)

Ermittlung des Inputs zu den ungelösten Verbindungskonflikten:

1. Weise jeden von einem ungelösten Verbindungkonflikt betroffenen Fahrgast zu einer der beiden Gruppen zu.:

- Fahrgast mit Entscheidungsmöglichkeit oder
- Fahrgast ohne Entscheidungsmöglichkeit.

2. Berechne die Widerstandsveränderung für Fahrgäste mit Entscheidungsmöglichkeit $\Delta W_{ugK,mE}$:

$$\Delta W_{ugK,mW} = 8 \cdot ZB_w = 8 \cdot 0{,}342126 + 1{,}043384 * e^{0{,}167255 \cdot 8} = 34{,}55 \text{ WE}$$

Daher wird eine pauschale Widerstandsveränderung von 35 WE für die Fahrgäste, die sich für den räumlichen Verschub oder den Ausfall entscheiden können, festgelegt.

3. Berechne die Widerstandsveränderung für Fahrgäste ohne Entscheidungsmöglichkeit $\Delta W_{ugK,oE}$

$$\Delta W_{ugK,oW} = t_W \cdot ZB_w$$

mit:

$$t_W = T_{SFP,Ende} - T_{ab,kVx}$$

$$T_{SFP,Ende} = T_{Stör} + T_{SFP,Anwend}$$

dabei sei $T_{Stör}$ der Beginn von t_U

$T_{SFP,Ende}$	Ende der Anwendung des Störfallprogramms (Beginn der Rückführung),
$T_{ab,kVx}$	geplanter Abfahrtszeitpunkt der konfliktären Verbindung und
$T_{SFP,Anwend}$	vom Ersteller anzugebende typische Anwendungsdauer des SFP.

Ermittlung der durchschnittlichen Widerstandsveränderungen in Abhängigkeit der Verbindungskonfliktmenge

$$Ø\Delta w = \frac{\sum_{x=1} \Delta W \cdot Fg_x}{\sum_{x=1} Fg_x}$$

für $Ø\Delta w_{uvK}$ ist x ∈ KVunverändert_x
für $Ø\Delta w_{ugK}$ ist x ∈ KVungelöst_x
für $Ø\Delta w_{gK}$ ist x ∈ KVgelöst_x
für $Ø\Delta w_{stabil}$ ist x ∈ KVunverändert_x, KVungelöst_x oder KVgelöst_x

mit:

⌀ Δw	durchschnittliche Widerstandsveränderung [WE],
ΔW_x	Widerstandsveränderung für einen Verbindungskonflikt x und
Fg_x	Fahrgäste des Verbindungskonflikts x.

Bewertung des Verkehrskonzepts anhand Widerstandsveränderung über alle Verbindungskonflikte

Prüfe die Bedingung: $Ø\Delta w_{stabil} \leq Ø\Delta w_{vorgeb}$.

Wenn Bedingung erfüllt: beginne integrierte Bewertung des Störfallprogramms.
Wenn Bedingung nicht erfüllt: löse interaktive Überarbeitung des Betriebs- und Verkehrskonzepts durch den Ersteller aus.

5.9.5 Zusammenfassung

Die Aufbereitung der Bewertungsmaßstäbe in einem Bewertungssystem erfolgt so, dass eine Einordnung des Verkehrskonzepts über eine Zielfunktion und auch eine gesamthafte Einschätzung über die Qualität der stabilen Phase des Störfallprogramms durch das Verkehrskonzept möglich werden – und ggfs. ein interaktiver Prozess zur Überarbeitung durch den Ersteller ausgelöst wird.

Hierzu werden die beiden Bewertungsmaßstäbe über gelöste und ungelöste Verbindungskonflikte hinweg im qualitätsabhängigen Maßstab der Widerstandsveränderung zu einem Bewertungssystem vereint.

Je nach regionalen Vorgaben und Zielsetzungen können weitere auf den Bewertungsmaßstäben basierende und darüberhinausgehende Kenngrößen und Darstellungen im Unterstützungssystem zur Planung implementiert werden, die den Ersteller bei der Verbesserung mit manuellen Maßnahmen (betrieblich wie auch verkehrlich) leiten.

Die Konzeptbewertung gilt nur für den Zeitraum, in dem das Verkehrskonzept funktionsfähig anwendbar ist. Somit gilt die Qualitätsaussage nur in der stabilen Phase des Betriebskonzepts.

In den Konfliktlösungen verwendete Zugfahrten entstammen dem Betriebskonzept, die während der Einschwingphase ggfs. verspätet verkehren. Es besteht somit weiterhin ein Zielkonflikt (siehe Abschnitt

3.4) und es ist noch keine kundenorientierte Qualitätsaussage zum SFP für die beiden in dieser Arbeit adressierte SFP-Phasen insgesamt verfügbar.

Im Folgenden ist daher durch eine Bewertung des gesamten Störfallprogramms unter Einbezug von Betriebs- und Verkehrskonzept sowie Einschwing- und stabiler Phase die Kundenorientierung festzustellen.

6 Kundenorientierte Bewertung eines Störfallprogramms (Modul 10)

6.1 Einleitung

Im Rahmen der Arbeit wurden Algorithmen erarbeitet, die den Erstellungsprozess eines Betriebskonzepts unterstützen und durch die Überprüfung der Funktionsfähigkeit eine stabile betriebliche Phase garantieren. Der Übergang nach Ausrufen des SFP in die stabile Phase wurde anschließend modelliert und über eine durchschnittliche Einschwingdauer ein betrieblicher Qualitätsmaßstab beschrieben.

Anschließend wurden Algorithmen erarbeitet, die basierend auf der durch das Betriebskonzept veränderten Angebotssituation ein Verkehrskonzept kundenorientiert erstellen und bewerten. Dieses wird durch den verkehrlichen Qualitätsmaßstab der durchschnittlichen Widerstandsveränderung über alle Verbindungskonflikte beschrieben. Dieser Maßstab wurde in der Verkehrskonzeptbewertung in Modul 9 entwickelt. Dabei konnten ungelöste und gelöste Verbindungskonflikte in einer Bewertung integriert werden, die sich auf die vollständige Umsetzung des Verkehrskonzepts in der betrieblich stabilen Phase bezieht.

Da sich die bisherige verkehrliche Bewertung der betrieblichen und verkehrlichen Maßnahmen nur auf die stabile Phase bezieht, bleibt weiterhin ein Teil des Zielkonflikts zwischen Betrieb und Verkehr (siehe Abschnitt 3.4) in Bezug auf die Auswirkungen auf die Fahrgäste für die Dauer der Einschwingphase bestehen.

Gemäß der Anforderung einer kundenorientierten Bewertung (siehe Abschnitt 3.3 (a2)) ist die Qualität eines Störfallprogramms für den Fahrgast zu bewerten. Ein Störfallprogramm beginnt mit dem Zeitpunkt der SFP-Ausrufung und beinhaltet im Rahmen dieser Arbeit die Berücksichtigung der Einschwingphase und der stabilen Phase (siehe Unterabschnitt 3.1.2). Die davorliegende Ermittlungs- und Entscheidungsphase erzeugt zwar Auswirkungen auf die Fahrgäste, allerdings unabhängig vom geplanten Störfallprogramm, das hier zu bewerten ist. Daher ist sie nicht direkter Bestandteil der weiteren Betrachtung. Über ihre angesetzte Dauer entstehen Verspätungen, die jedoch die Einschwingdauer und die während dieser Zeit auftretenden Verspätungen beeinflussen. Sie nimmt somit – entsprechend der Wahrnehmung der Kunden – indirekten Einfluss auf die Bewertung.

Dies entspricht den Anforderungen an ein kundenorientiertes Störfallprogramm gemäß Abschnitt 3.3. nach denen alle durch das SFP erzeugten Auswirkungen auf den Fahrgast in der Bewertung zu berücksichtigen sind.

Die kundenorientierte Bewertung eines Störfallprogramms ist für die beiden in dieser Arbeit adressierten SFP-Phasen (Einschwing- und stabile Phase; siehe Abschnitt 3.1.2) notwendig, um dem Ersteller zu ermöglichen, Vergleiche zweier und mehrerer SFP für einen Störfall vorzunehmen. Da nicht für jeden Störfall mehrere SFP erstellt werden, soll die Bewertung den Ersteller ebenfalls befähigen, die Qualität eines einzelnen SFP einzuschätzen und ggfs. Nacharbeiten als interaktiven Prozess auslösen. Da eine kundenorientierte Bewertung der Einschwingphase noch nicht vorliegt, sind im Weiteren Methode und Vorgehen zu erarbeiten.

6.2 Methode

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Fahrgäste ein Interesse an einem schnellen Einschwingen haben, da dann das Verkehrskonzept zuverlässig funktioniert. Dies lässt den betrieblichen Qualitätsmaßstab kundenorientiert wirken. Ein schnelles Einschwingen kann entsprechend dem

Zielkonflikt aus Abschnitt 3.4 aber durch viele Ausfälle erreicht werden. Dies entspricht jedoch nicht zwingend den Interessen der Fahrgäste, da es eine starke Reduzierung des Verkehrsangebots erzeugt.

Um eine kundenorientierte Bewertung der Einschwingphase zu erreichen, ist dafür ein weiterer Bewertungsmaßstab zu entwickeln. Für diesen besteht gemäß Abschnitt 6.1 die Notwendigkeit, die bisher nicht bekannten verkehrlichen Auswirkungen für den Zeitraum der Einschwingdauer zu erfassen.

Entwicklung einer kundenorientierten Bewertungsgröße für die Einschwingphase

In der Einschwingphase verkehren noch nicht alle Züge entsprechend des Störfallfahrplans und haben teilweise Verspätungen. Diese Verspätungen können Verbindungskonflikte erzeugen oder verstärken, sodass es gegenüber den Konfliktlösungen, die in den Modulen 7 und 8 für den gesamten Zeitraum t_U, unter Annahme einer stabilen Phase, gefunden wurden, zu weiteren Qualitätseinschränkungen kommen kann.

Die verspäteten Züge verändern zunächst einmal die Fahrtdauer der Fahrgäste. Dies erzeugt zum einen Verbindungskonflikte, ähnlich zu den Verbindungskonflikten mit veränderter Verbindung (KVunverändert_x), bei denen keine Lösungsalternative notwendig wird, aber eine Widerstandsveränderung eintritt. Zum anderen können durch die Fahrtdauerveränderungen auch Anschlüsse verpasst werden, so dass eine Alternative notwendig wird.

Verbindungskonflikte, die bei Anwendung eines SFP durch zusätzliche dispositive Maßnahmen entstehen, sind gemäß Unterabschnitt 3.1.2 nicht Bestandteil dieser Arbeit, die sich ausschließlich auf die Planung von Störfallprogrammen bezieht.

Für diese zusätzlichen Verbindungskonflikte und die ggfs. gestörten Konfliktlösungen der Einschwingphase sind Relation und Route entsprechend der stabilen Phase möglich, nur die Verbindung ist gestört. Aufgrund der mit der Einschwingphase verbundenen Unsicherheiten bezüglich des Betriebsgeschehens wird als vereinfachte Lösung für diese Verbindungskonflikte das Warten der Fahrgäste auf Weiterfahrt mit dem nächsten Takt, der die Route erschließt, angesetzt. Dies erzeugt eine Verlängerung der Beförderungsdauer, die sich aus Wartezeiten am Bahnsteig und im Zug zusammensetzt.

In Abschnitt 5.5 wurde ein anforderungsgerechter Bewertungsmaßstab für die vom Fahrgast wahrgenommene Angebotsqualität entwickelt. Dieser fand in den Modulen 7, 8 und 9 zur Maßnahmenauswahl und Konzeptbewertung bereits einheitlich Anwendung. Im Hinblick auf die Konsistenz, der in dieser Arbeit verwendeten Bewertungen, stellt der Bewertungsmaßstab aus Abschnitt 5.5 den Ausgangspunkt für die Entwicklung der kundenorientierten Bewertungsgröße für die Einschwingphase dar. Es ist somit zu untersuchen, ob auch für die Einschwingphase eine durchschnittliche Widerstandsveränderung aller Fahrgäste mit Verbindungskonflikt als Qualitätsmaßstab ermittelt werden kann.

Zur Einschwingphase ist bisher die durchschnittliche Einschwingdauer als Qualitätsmaßstab für das Betriebskonzept (siehe Abschnitte 4.2.2 und 4.6) bekannt, die wie bereits diskutiert aufgrund des verbleibenden Zielkonflikts nicht kundenorientiert ist. Die Einschwingdauer legt allerdings offen, in welchem durchschnittlichen Zeitraum die Konfliktlösungen des Verkehrskonzepts aus der stabilen Phase ggfs. nur unzuverlässig funktionieren und der Fahrgast mit Abweichungen vom Störfallprogramm umgehen muss. Für diese Dauer sind entsprechend der Überlegung im vorigen Absatz die zusätzlichen Widerstandserhöhungen zu ermitteln.

Eine Möglichkeit wäre eine pauschale Pönalisierung aller in der stabilen Phase konfliktären Verbindungen, z. B. anhand einer pauschalen Widerstandserhöhung. Alternativ können die tatsächlich

von der Unzuverlässigkeit betroffenen Konfliktlösungen und die zusätzlichen Verbindungskonflikte identifiziert und deren Auswirkungen abgeleitet werden.

Der Vorteil einer pauschalen Lösung ist die zu erwartende geringe Rechenzeit. Von Nachteil ist, dass keine Referenzen in der Literatur vorliegen, die eine Festlegung der Höhe eines pauschalen Aufschlages ermöglichen. Zudem sind nicht alle Konfliktlösungen in der Einschwingphase unzuverlässig und somit negativer zu bewerten. Ebenso nachteilig ist, dass durch die betrieblichen Abweichungen Verbindungskonflikte entstehen können, die es in der stabilen Phase nicht gibt.

Die Identifikation von Abweichungen und zusätzlichen Verbindungskonflikten ist aufwendiger, sowohl in der Konzeption als auch in der Rechenzeit. Dafür ermöglicht diese Möglichkeit aber ein Ergebnis, das eine Qualität, die vergleichbar zu im Rahmen dieser Arbeit bereits entwickelten Bewertungen ist, aufweist. Zudem erfüllt es die Anforderungen an Vollständigkeit, kundenorientierte Bewertung und ein integriertes SFP für Betrieb und Verkehr. Daher wird die aufwendigere Methode mit einem besseren Ergebnis weiterverfolgt.

Diese wird nun im Weiteren entwickelt und anschließend mit einer Vorgehensweise und Algorithmen detailliert.

Identifikation der zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikte

In Modul 6 wurden alle Verbindungskonflikte für der Untersuchungszeitraum bestimmt. In Modul 7 bzw. 8 wurden je Verbindungskonflikt mögliche Alternativen ermittelt, die für den Zeitraum der mittleren Einschwingdauer, bei der abschließenden Konzepterstellung in Unterabschnitt 5.8.4 (Submodul 5 2.) aus den verschiedenen Mengen mit konfliktären Verbindungen entfernt wurden. Daher sind sie nicht Bestandteil der Bewertung in Modul 9. Je nach Verspätung der Züge bestehen diese Verbindungskonflikte unverändert und die ermittelten Alternativen können verwendet werden, oder die Verbindungskonflikte verändern sich durch einen Anschlusskonflikt. Zudem können durch die Verspätungen in der Einschwingphase zusätzliche Verbindungskonflikte auftreten, die in Modul 6 bisher nicht ermittelt wurden.

Diese beiden Arten an veränderten und zusätzlichen Verbindungskonflikten entstehen durch die verspäteten Zugfahrten, die eine Verspätung durch einen Nothalt bei Störungseintritt oder durch eine Warteschlange vor Störungseinflussbereich erhalten. Diese Zugfahrten wurden bereits bei der Ermittlung der mittleren Einschwingdauer berücksichtigt, da sie zu einer Einschwingdauer größer Null führen (siehe Abschnitt 4.6). Alle im Zeitraum der Einschwingdauer verkehrenden Fahrten, die Teil der Ermittlung in Modul 5 sind und in der Einschwingphase Verspätungen aufweisen, erzeugen somit potentiell zusätzliche oder veränderte Verbindungskonflikte durch die Verspätung an den Aktionsknoten der Verbindungen der Fahrgäste.

Für die Bewertung der zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikte ist die Verspätung für jeden dieser Züge zu ermitteln. Dies kann anhand zweier Möglichkeiten erfolgen. Zum einen wird in Modul 5 die Einschwingdauer als Mittel über Fahrplanminuten, zu denen die Störung eintreten kann und deren resultierenden Verspätungen, ermittelt. Somit können auch in jeder Fahrplanminute andere zusätzliche oder veränderte Verbindungskonflikte auftreten.

Um eine anforderungsgemäße Vollständigkeit zu erreichen, könnte für jede Fahrplanminute, die ihr zugehörigen Verbindungskonflikte einzeln betrachtet werden. Dies würde bedeuten, dass ein Verbindungskonflikt je nach Fahrplanminute anders ausgeprägt ist und eine Vielzahl an Widerstandsveränderungen für den durch einen Zug erzeugten Verbindungskonflikt analog zum Vorgehen bei der Ermittlung der Einschwingdauer eines Zuges gemittelt werden müsste. Dies ist sehr

aufwendig, wodurch die Erfüllung der Anforderung an eine geringe Rechenzeit nicht erfüllt werden kann.

Zum anderen könnte im Sinne einer geringeren Rechenzeit, statt der bereits ausgeschlossenen pauschalen Widerstandserhöhung, für jeden Zug eine zu verwendende mittlere Verspätung ermittelt werden, der dann die zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikte erzeugt. In Modul 5 sind für jeden Zug Verspätungswerte für jede Fahrplanminute hinterlegt. Ein zuggenauer mittlerer Verspätungswert der Einschwingphase würde berücksichtigten, dass nicht alle Verbindungskonflikte verändert werden, zusätzliche Verbindungskonflikte entstehen können, und trotzdem Rechenzeit sparen.

Es ist somit im Folgenden zwischen den beiden Möglichkeiten abzuwägen und eine Auswahl zu treffen.

Eine Anwendung des fahrplanminutengenauen Vorgehens zur Ermittlung der Verbindungskonflikte in der Einschwingphase zur Erfüllung der Anforderung Vollständigkeit steht in deutlichem Kontrast zur Anforderung einer geringen Rechenzeit.

In Modul 6 bis 8 werden zunächst einmal alle Verbindungskonflikte inkl. Lösungen für den gesamten Untersuchungszeitraum ermittelt. Anschließend wird je nach Höhe der mittleren Einschwingdauer der entsprechende Teil davon aus den für die stabile Phase zu bewertenden Mengen der Verbindungskonflikte entfernt. Wenn nun die Bewertung der Verbindungskonflikte der Einschwingphase fahrplanminutengenau ermittelt wird, wäre dies nicht konsistent mit der Verwendung der mittleren Einschwingdauer in Modul 9 bei Betrachtung der stabilen Phase.

Daher ist von einem fahrplanminutengenauen Vorgehen für die Bestimmung von Verbindungskonflikten in der Einschwingphase abzusehen und für die verspäteten Züge im Zeitraum der mittleren Einschwingdauer eine mittlere Verspätung durch Einschwingen für die gesamte mittlere Einschwingdauer vereinfacht festzulegen.

Da die mittlere Einschwingdauer verwendet wird, wird aus Konsistenzgründen eine mittlere Verspätung eines Zuges über alle betrachteten Fahrplanminuten, die zur Ermittlung der mittleren Einschwingdauer nötig waren, gewählt. Dabei sind alle Verspätungswerte, auch null Minuten, im Durchschnitt zu berücksichtigen.

Die durchschnittliche Verspätung eines Zuges kann somit als weiteres Attribut des Zuges, analog zum Vorgehen in Modul 6, erstellt werden und somit das Vorgehen aus Modul 6 unter Verwendung des zusätzlichen Attributs weitergenutzt werden, wodurch eine konsistente Verbindungskonfliktermittlung in stabiler und Einschwingphase erfolgt.

<u>Auswirkungen der zusätzlichen Verbindungskonflikte auf den betroffenen Fahrgast</u>

Die Art der Auswirkung von Verspätungen auf die Aktionsknoten der Reisekette (siehe Unterabschnitt 3.6.4) ist unterschiedlich und kann mit den folgenden vier Fällen beschrieben werden:

- mögliche Art der Auswirkung
  - Fall 1: verspätete Ankunft am Aktionsknoten Ausstiegshaltestelle
  - Fall 2: verspätete Ankunft am Aktionsknoten Umsteigehaltestelle: verspätete Ankunft führt zu Anschlussverlust
  - Fall 3: verspätete Ankunft am Aktionsknoten Umsteigehaltestelle: verspätete Ankunft führt nicht zu Anschlussverlust
  - Fall 4: verspätete Abfahrt am Aktionsknoten Einstiegs- oder Umsteigehaltestelle: verspätete Abfahrt führt am nächsten Aktionsknoten zu den Fällen 1–4

- resultierende Veränderungen in der Reisekette je nach Art der Auswirkung
  - Fall 1: Nach Fahrt im verspäteten Zug ist kein Umstieg mehr nötig, sondern der Ankunftszeitpunkt an der Ausstiegshaltestelle verschiebt sich. Es entsteht somit eine Verlängerung der Beförderungsdauer durch Wartezeit im Fahrzeug.
  - Fall 2: Nach Fahrt im verspäteten Zug ist ein Umstieg nötig und die verfügbare Zeit nicht ausreichend. Sie ist so verkürzt, dass der Anschluss nicht erreicht wird. Es entsteht somit zunächst Wartezeit im Fahrzeug und anschließend Wartezeit am Bahnsteig bis zum folgenden Takt des geplanten Anschlusses.
  - Fall 3: Nach Fahrt im verspäteten Zug ist ein Umstieg nötig und die verfügbare Zeit ausreichend. Die für den Umstieg verfügbare Zeit verkürzt sich und die vorher dort beinhaltete Wartezeit am Bahnsteig wird zu einer Wartezeit im Fahrzeug.
  - Fall 4: Vor dem Einstieg in eine verspätete Fahrt entsteht eine Wartezeit am Bahnsteig. Je nach Auswirkung und Wechselwirkungen der verspäteten Abfahrt entstehen möglicherweise zudem die Veränderungen der Fälle 1–4 am folgenden Aktionsknoten.

Durch die einschwinginduzierten Fahrtdauerverlängerungen entstehen Auswirkungen auf die Reisekette, wodurch, analog zum Vorgehen bei der Erstellung der Bewertung eines Verkehrskonzepts (siehe Abschnitt 5.5), Widerstandsveränderungen erzeugt werden. Alle in den vier Fällen genannten Angebotseigenschaften sind bereits in der Bewertungsfunktion aus Abschnitt 5.5 enthalten. Folglich kann die aus Abschnitt 5.5 bestehende Bewertungsfunktion weiterverwendet werden. Nach Abschnitt 2.5.1 wird das Warten am Bahnsteig und das Umsteigen negativer bewertet als Verspätungen im Fahrzeug. Dies kann bei Fall 3 dazu führen, dass der Widerstand sinken könnte. Gemäß Unterabschnitt 5.5 gilt $\Delta W = 0$ für die Fälle mit $\Delta W < 0$.

Integration der Bewertungsgrößen in einem Bewertungssystem für Störfallprogramme

Neben der durchschnittlichen Widerstandsveränderung in der stabilen Phase (aus Abschnitt 5.9.4) lässt sich mit der beschriebenen Methode auch die durchschnittliche Widerstandsveränderung der Einschwingphase konsistent ermitteln.

Analog zur Verkehrskonzeptbewertung (siehe Abschnitt 5.9) erfolgt die Zusammenführung der beiden Phasen anhand der übergeordneten Anforderung, dass jeder Fahrgast gleich bedeutsam ist. Somit werden die beiden einzelnen Bewertungsergebnisse der Phasen gewichtet mit der Anzahl der jeweils betroffenen Fahrgäste zu einer Bewertungsgröße integriert.

6.3 Vorgehensweise

Zusammengefasst ergibt sich, dass die Auswirkungen von Zugverspätungen in der Einschwingphase als Widerstandsveränderung abgebildet werden können, um so eine Bewertung des Angebots durch den Fahrgast für diese Phase zu ermöglichen. Dies stellt somit eine Erweiterung der Bewertung des Angebots durch den Fahrgast bis zum Erreichen der stabilen Phase dar. Dies geschieht unter Verwendung des gleichen verkehrlichen Qualitätsmaßstabs wie für das stabile Verkehrskonzept, sodass beide Bewertungsgrößen in einer Bewertung für das gesamte SFP integriert werden können. Dazu ist im Folgenden das Vorgehen für die in Tabelle 6-1 nummerierten Schritte zu erarbeiten.

Tabelle 6-1: Vorgehen für die gesamthafte Bewertung eines Störfallprogramms (eigene Darstellung)

<table>
<tr><th colspan="2">Einschwingphase</th><th>stabile Phase</th></tr>
<tr><td rowspan="3">für jeden in der Einschwingphase gemäß Modul 5 verspäteten Zug</td><td>1. Extraktion der Verspätung aus Modul 5 und Attribuierung einer mittleren Verspätung</td><td rowspan="4">Verwendung des Bewertungsergebnisses aus Abschnitt 5.9</td></tr>
<tr><td>2. Ermittlung der zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikte anhand der attribuierten mittleren Verspätung (analog zum Vorgehen aus Modul 6)</td></tr>
<tr><td>3. Ggfs. vereinfachte Bestimmung einer Lösungsalternative und verkehrliche Bewertung der zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikte</td></tr>
<tr><td colspan="2">4. verkehrliche Bewertung der Einschwingphase über alle Verbindungskonflikte der Phase</td></tr>
<tr><td colspan="3">5. Integration der Bewertungen der Einschwingphase und der stabilen Phase in einer SFP-Bewertung</td></tr>
</table>

1. Extraktion der betrieblichen Informationen aus dem Einschwingmodell

Im Modell zur Einschwingdauer werden für jede Fahrplanminute die entstehenden Wartezeiten je Zug entlang dessen Laufweg bestimmt. Die ermittelten Verspätungen eines Zuges sind jeweils für die Ankünfte an den Verkehrsknoten des Laufwegs auszulesen und über alle Fahrplanminuten zu mitteln. Diese mittlere Verspätung in der Einschwingphase wird dem Zug attribuiert.

2. Ermittlung der zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikte

Alle Züge, die eine mittlere Verspätung durch Einschwingen attribuiert haben, durchlaufen erneut den Teil „Ermittlung konfliktärer Verbindungen je Zug eines Betriebskonzepts“ der Verbindungskonfliktermittlung in Modul 6. Dabei sind anhand der am Zug attribuierten Verspätungen bei Ankunft an den Verkehrsknoten, die am Zug attribuierten Verbindungsabschnitte xa zu prüfen.

3. Bewertung der zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikte

Für jeden zusätzlichen Verbindungskonflikt ist eine vereinfachte Konfliktlösung, durch Warten auf den nächsten Zug der den nächsten im Regelbetrieb geplanten Aktionsknoten erreicht, vorzunehmen.

Wenn durch die attribuierte Verbindung ein veränderter Verbindungskonflikt entsteht, ist zu prüfen, ob die bereits in Modul 7 zugeordnete Alternative y weiterhin machbar ist. Wenn sie nicht machbar ist, ist analog zum zusätzlichen Verbindungskonflikt eine vereinfachte Konfliktlösung vorzunehmen.

Für die weiterhin machbaren und die neuen Konfliktlösungen sind anschließend die Widerstandsveränderungen entsprechend Abschnitt 5.5 zu berechnen.

4. Ermittlung eines Bewertungsergebnisses für die Einschwingphase

Die Widerstandsveränderung jedes zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikts und jedes Verbindungskonflikts mit unveränderter Verbindung ist mit der Anzahl der Fahrgäste zu gewichten. Zudem sind die restlichen herausgerechneten Verbindungskonflikte (siehe Unterabschnitt 5.8.4 Submodul 5 2.) mit ihrer Bewertung aus Modul 8 zu berücksichtigen. Anschließend ist eine durchschnittliche Widerstandsveränderung über alle Fahrgäste für die Einschwingphase zu berechnen. Dies ist zusammengefasst in Abbildung 6-1 dargestellt.

Widerstandsveränderungen zur Bewertung des Verkehrskonzepts in der Einschwingphase		
durchschnittliche Widerstandsveränderung über die unveränderten, konfliktären Verbindungen $ØΔw_{euvK}$	durchschnittliche Widerstandsveränderung über die zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikte $ØΔw_{eK}$	durchschnittliche Widerstandsveränderung über alle verbleibenden Verbindungskonflikte $ØΔw_{esK}$
durchschnittliche Widerstandsveränderung aller Verbindungskonflikte in der Einschwingphase $ØΔw_{einschwing}$		

Abbildung 6-1: zu berücksichtigende Widerstandsveränderungen aller Verbindungskonflikte in der Einschwingphase (eigene Darstellung)

5. Integration der Bewertungen der Einschwingphase und der stabilen Phase in einer SFP-Bewertung

Die für die Einschwingphase ermittelten Widerstandsveränderungen sind mit den Widerstandsveränderungen der stabilen Phase zu verrechnen. Die Verrechnung erfolgt über eine Gewichtung anhand der betroffenen Fahrgäste.

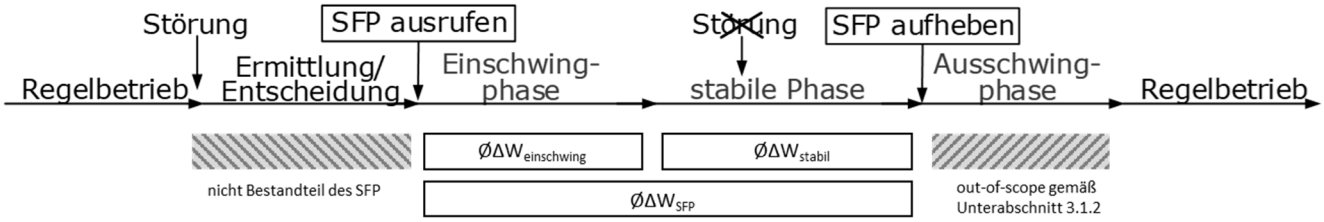


Abbildung 6-2: kundenorientierte Bewertung eines Störfallprogramms (eigene Darstellung basierend auf Chu et al. (2012, S. 48))

Das beschriebene Vorgehen ermöglicht die Ermittlung einer durchschnittlichen Widerstandserhöhung der Einschwingphase einschließlich der Ermittlungs- und Entscheidungsphase, einer durchschnittlichen Widerstandserhöhung der stabilen Phase und die Zusammenführung in einer gesamthaften SFP-Bewertung (siehe dazu Abbildung 6-2) und wird im Folgenden als Algortihmus dokumentiert.

6.4 Algorithmus

Nachdem in den Unterabschnitten Methode und Vorgehensweise erläutert wurde, welche Aufgaben der Algorithmus hat und wie der Input verarbeitet wird, um den gewünschten Output zu erreichen, erfolgt hier die formalere Notation der einzelnen Arbeitsschritte.

1. Extraktion der betrieblichen Informationen aus dem Einschwingmodell

- Bestimme alle Züge, die in Modul 5 mit einer Verspätung durch Einschwingen attribuiert wurden.

- Ermittle pro Zug für alle Fahrplanminuten m t_W entlang des Laufwegs für die Ankünfte an den Verkehrsknoten.
  - die Züge, die sich durch einen Störungseinflussbereich in einer Warteschlange befinden und somit nachrücken, erhalten gemäß Submodul 2.2 in Unterabschnitt 4.6.4 eine zusätzliche Verspätung durch Warten auf Einfahrt in den SFP-Wendebahnhof
    - bei der ersten Warteschlange zusätzlich zur bestehenden Wartezeit aus der Ermittlungs- und Entscheidungsphase $t_{w,EE}$ oder
    - bei den weiteren Warteschlagen zusätzlich zur bereits bestehenden $t_{w,nachSFPWende}$
  - die Züge, die nicht auf einen Störungseinflussbereich zufahren, weisen gemäß Submodul 2.3 in Unterabschnitt 4.6.4 bis zum nächsten Störungseinflussbereich oder der nächsten Wende die Verspätung bei Abfahrt am Wendebahnhof mit $t_{w,nachSFPWende}$ auf
- Summiere alle t_w bei Ankunft an einem Verkehrsknoten und bilde einen Mittelwert über alle Fahrplanminuten je Verkehrsknoten.
- Attribuiere den Mittelwert $t_{w,Ankunft,mittel,VKnot}$ je Verkehrsknoten an den Zug z.

2. Ermittlung der zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikte

- Führe für jedes z mit einer attribuierten $t_{w,Ankunft,mittel,VKnot}$ die Schritte 2.-7. aus Modul 6 zu Ermittlung konfliktärer Verbindungen je Zug eines Betriebskonzepts durch. Dabei sind folgende Anpassungen vorzunehmen:
  - Passe bei 6. die vKnotV anhand $t_{w,Ankunft,mittel,VKnot}$ an die Einschwingphase an.
  - Erstelle neue Mengen für die Einschwingphase und nenne sie: KVeinschwing_x und KVeinschwingunverändert_x.
- Prüfe jeden gefundenen Verbindungskonflikt der Menge KVeinschwing_x, ob er zusätzlich oder verändert gegenüber der stabilen Phase ist.
  - Ein zusätzlicher Verbindungskonflikt liegt vor, wenn der Verbindungsabschnitt xa in der stabilen Phase nicht konfliktär war.
  - Ein veränderter Verbindungskonflikt liegt vor, wenn der Verbindungsabschnitt auch bei der Verbindungskonfliktermittlung der stabilen Phase als konfliktär erkannt wurde.
- Ermittle in den Mengen der Verbindungskonflikte, die in Unterabschnitt 5.8.4 Submodul 5 2. aus der stabilen Phase entfernt wurden, die Verbindungskonflikte die keinen Zug mit dem Attribut durch mittlere Verspätung durch Einschwingen aufweisen. Diese Verbindungskonflikte, treten sowohl in stabiler und Einschwingphase identisch auf. Erstelle mit diesen die Menge KVeinschwingstabil_x und attribuiere jedem Verbindungskonflikt, die in Modul 7 bzw. 8 ermittelte Widerstandsveränderung.

3. Bewertung der zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikte

- Ermittle eine Konfliktlösung für die Verbindungskonflikte der Menge KVeinschwing_x.

- für die zusätzlichen Verbindungskonflikte: Führe eine vereinfachte Konfliktlösung durch: Warten auf den nächsten Zug, der den nächsten KnotA der geplanten Verbindung erreicht.
- für die veränderten Verbindungskonflikte: Ermittle die in der stabilen Phase ermittelte Alternative y. Führe eine vereinfachte Konfliktlösung durch: Warten auf den nächsten Zug, der den nächsten KnotA der für die stabile Phase ermittelten Alternative y erreicht.

- Verbindungskonflikte der Menge KVunveränderteinschwing_x benötigen keine Konfliktlösung.
- Bewerte jeden Verbindungskonflikt aus den Mengen KVeinschwing_x und KVeinschwingunverändert_x anhand der Bewertungsfunktion aus Abschnitt 5.5 durch die vorliegende Widerstandsveränderung.

4. Ermittlung eines Bewertungsergebnisses für die Einschwingphase

$$Ø\Delta w = \frac{\sum_{x=1} \Delta W_x \cdot Fg_x}{\sum_{x=1} Fg_x}$$

für $Ø\Delta w_{euvK}$ ist x ∈ KVeinschwingunverändert_x
für $Ø\Delta w_{eK}$ ist x ∈ KVeinschwing_x
für $Ø\Delta w_{esK}$ ist x ∈ KVeinschwingstabil_x
für $Ø\Delta w_{einschwing}$ ist x ∈ KVeinschwingunverändert_x, KVeinschwing_x oder KVeinschwingstabil_x

mit:

⌀ Δw	durchschnittliche Widerstandsveränderung [WE],
ΔW_x	Widerstandsveränderung für einen Verbindungskonflikt x und
Fg_x	Fahrgäste des Verbindungskonflikts x.

5. Integration der Bewertungen der Einschwingphase und der stabilen Phase in einer SFP-Bewertung

$$Ø\Delta w_{SFP} = \frac{Ø\Delta w_{einschwing} \cdot \sum Fg_{einschwing} + Ø\Delta w_{stabil} \cdot \sum Fg_{stabil}}{\sum Fg_{einschwing} + \sum Fg_{stabil}}$$

Bedingung: $Ø\Delta w_{SFP} \leq Ø\Delta w_{vorgeb}$

mit:

$\varnothing\ \Delta w_{einschwing}$	durchschnittliche Widerstandsveränderung [WE] in der Einschwingphase,
$\varnothing\ \Delta w_{stabil}$	durchschnittliche Widerstandsveränderung [WE] in der stabilen Phase,
$Fg_{einschwing}$	Fahrgäste mit Verbindungskonflikt in der Einschwingphase und
Fg_{stabil}	Fahrgäste mit Verbindungskonflikt in der stabilen Phase.

Wenn Bedingung erfüllt: kundenorientierte Bewertung des Störfallprogramms ist ausreichend und die Planung des SFP abgeschlossen.

Wenn Bedingung nicht erfüllt: löse interaktive Überarbeitung des Betriebs- und Verkehrskonzepts durch den Ersteller aus.

6.5 Zusammenfassung

Die Bewertung des Störfallprogramms führt die Auswirkungen von Betriebskonzept und Verkehrskonzept auf den Fahrgast zusammen, sodass eine gesamthafte Einordnung der verkehrlichen Auswirkungen über Einschwingphase und stabile Phase ermöglicht wird. Dazu wurde der in Abschnitt 5.5 entwickelte und bereits in Abschnitt 5.9 verwendete Bewertungsmaßstab erneut genutzt und für die Einschwingphase entsprechend erweitert.

Unter Verwendung der Ergebnisse aus Abschnitt 4.6 wurden zusätzliche und veränderte Verbindungskonflikte in der Einschwinghase anhand einer mittleren Verspätung der Züge bestimmt, bei Bedarf vereinfacht gelöst und anschließend mit einer Widerstandsveränderung bewertet. Dieses Vorgehen erlaubt, unter Berücksichtigung der in Modul 8 für die stabile Phase entfernten und ggfs. für die Einschwingphase verbleibenden Verbindungskonflikte, eine verkehrliche Bewertung der Einschwingphase und somit gesamthafte Einschätzung zur Qualität des Störfallprogramms und macht diese vergleichbar.

Damit ist es gelungen, entsprechend der Zielsetzung in Abschnitt 3.1 ein Modell für die angestrebte Kundenorientierung von Störfallprogrammen zu realisieren, da das geplante Betriebskonzept nun bewertet und um ein Verkehrskonzept erweitert werden kann. Ein Störfallprogramm stellt somit eine integrierte Planung von Maßnahmen für Züge und Fahrgäste dar. Durch eine kundenorientierte Bewertung des Störfallprogramms anhand eines Zielfunktion, wird sichergestellt, dass die Wahrnehmung der verbleibenden Angebotsqualität durch den Fahrgast im Störfall umfassend in der Planung berücksichtigt wird.

Es wurde somit im Rahmen der gesamten Arbeit ein Unterstützungssystem für SFP-Ersteller als Modulsystem aufgebaut und mit Algorithmen untersetzt, was die (teil-)automatisierte Planung mit einem Fokus auf die Fahrgäste ermöglicht. Im folgenden Kapitel zum Anwendungsbeispiel werden Teile davon demonstriert.

7 Anwendungsbeispiel

7.1 Einleitung

In diesem Kapitel soll das erarbeitete System zur Unterstützung der Planung von integrierten Störfallprogrammen in Auszügen exemplarisch demonstriert werden. Ziel ist es, die Eignung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Module zu verdeutlichen. Hierzu werden in Abschnitt 7.2 die Module 1 bis 5 zur Bewertung eines Betriebskonzepts in Ausschnitten auf ein geplantes Betriebskonzept angewendet. Anschließend werden in Abschnitt 7.3 die Module 6 bis 9 zur Erstellung und Bewertung eines Verkehrskonzepts in Ausschnitten angewendet. Abschließend wird in Abschnitt 7.4 eine integrierte Bewertung eines Störfallprogramms anhand von Modul 10 demonstriert.

Die Algorithmen wurden entwickelt, um die Planung von Störfallprogrammen zu erleichtern, da dies sehr aufwendig und komplex ist. Daher wird hier auch jeweils nur ein Teil der nötigen Schritte eines Moduls auf ausgewählte Züge, Bereiche oder Verbindungen angewendet. Ziel dabei ist jeweils das Vorgehen zu demonstrieren und mögliche Ergebnisse und deren Nutzen zu verdeutlichen. Die Beispiele reduzieren dabei die Komplexität stark und lassen die Fahrgastzahlen komplett unbeachtet, da eine Integration fiktiver Zahlen keinen Mehrwert bringt und es sich dabei maßgeblich um Gewichtungsberechnungen handelt.

Das Beispiel erfolgt anhand eines exemplarischen Betriebskonzept das in Abbildung 7-1 dargestellt ist. Hierbei wird davon ausgegangen, dass lediglich der S-Bahnverkehr durch einen Störfall eingeschränkt wird, und die restlichen Schienenverkehre nach Fahrplan des Regelbetriebs verkehren können.

Dabei erhalten alle Züge der S-Bahnlinien folgende Maßnahmen, dargestellt in Tabelle 7-1:

Tabelle 7-1: betriebliche Maßnahmen der Linien im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung)

Linie	Maßnahme	SFP-Wendebahnhof	Umleitungs-beginn	sonstige Anpassungen im Störfallfahrplan
3	Teilausfall mit Ersatz (bm3)	FFM Hauptbahnhof tief	-	Linientausch bei Wende in FFM Hauptbahnhof tief auf Gleis 103
		Langen		
4	Teilausfall (bm2)	FFM Hauptbahnhof tief	-	
5	Teilausfall (bm2)	FFM Rödelheim	-	-
6	Umleitung mit Teilausfall (bm 5)	FFM Hauptbahnhof hoch	FFM West	-
1, 2, 8, 9	Gleiswechsel (bm 7)		-	FFM Hauptbahnhof tief Gleis 104

Als Untersuchungszeitraum werden vier Stunden von 6:30 bis 10:30 Uhr festgelegt. Untersuchungsraum sind das S-Bahn-Netz Frankfurt und der zugehörige Rhein-Main-Verkehrsverbund.

Ein Auszug aus den Fahrplänen und weitere Inputwerte sind in Anlage 4 dokumentiert.

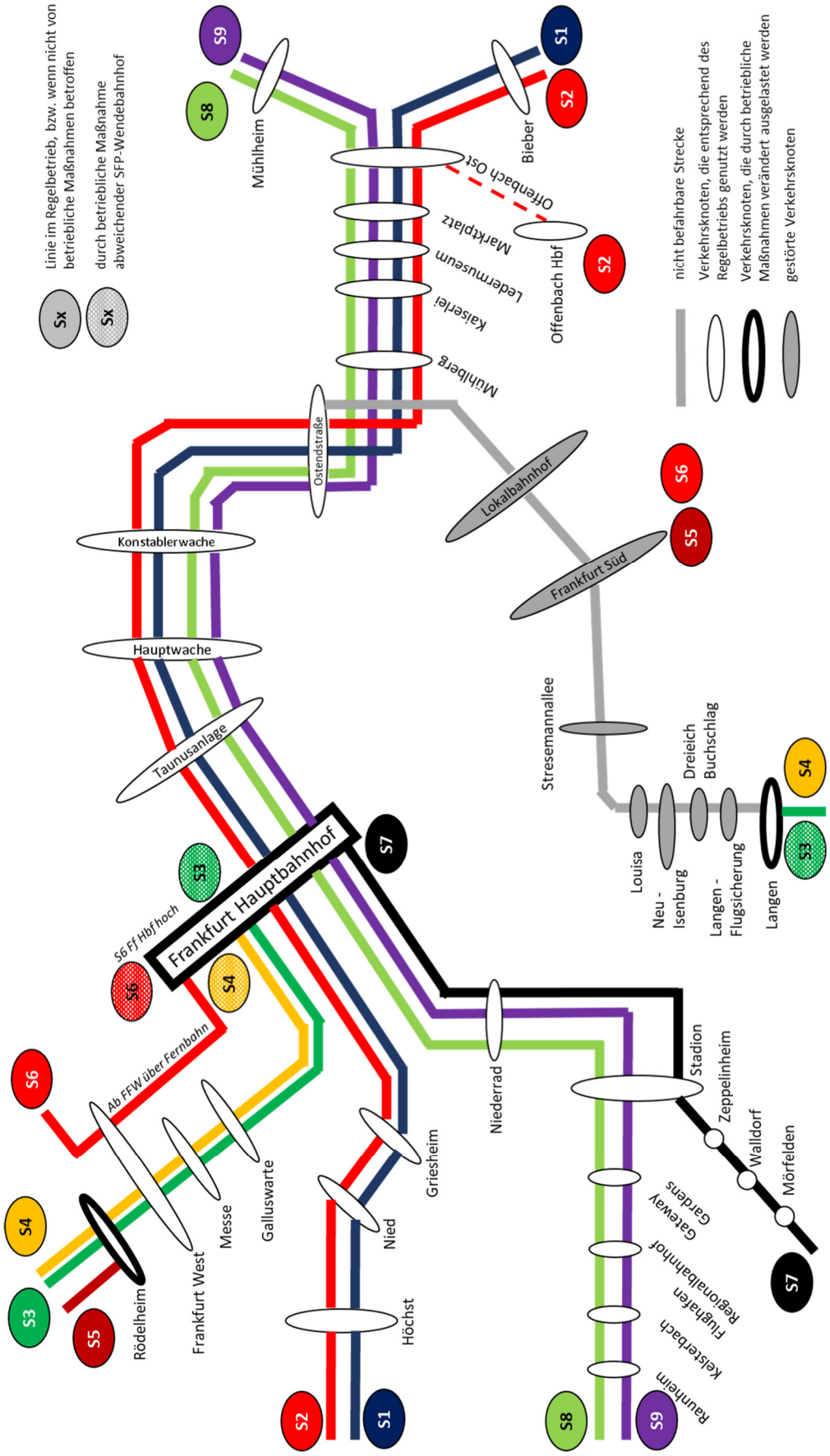


Abbildung 7-1: Darstellung des für das Anwendungsbeispiel angenommenen Störfallprogramms (eigene Darstellung und inhaltliche Adaption basierend auf Angaben von DB Regio AG)

7.2 Betriebskonzept

7.2.1 Modul 1: Machbarkeitsprüfung und Berechnung der veränderten Zugfahrt je Maßnahme

Die Maßnahmen der Linien S3 und S4 hängen durch den Linientausch bei der Wende zusammen. Daher erfolgt die Betrachtung der SFP-Wende in Frankfurt Hauptbahnhof tief für diese beiden Linien gemeinsam. Für die SFP-Wenden werden die Zeitbedarfe entsprechend Unterabschnitt 4.3.4 g) in Tabelle 7-2 ermittelt.

Tabelle 7-2: Ermittlung der Wenden und der zugehörigen Zeiten für die Linien S3 und S4 (eigene Darstellung)

S4	30 Minuten Takt jeweils zur Minute	
Ankunft in FFM Hauptbahnhof tief aus Kronberg	32	2
Abfahrt in FFM Hauptbahnhof tief Richtung Kronberg: $T_{gewAbfahrt}$ für S3 im Störfallfahrplan	59	29

S3	30 Minuten Takt jeweils zur Minute	
Ankunft in FFM Hauptbahnhof tief **aus Bad Soden**	47	17
Abfahrt in FFM Hauptbahnhof tief Richtung Bad Soden: $T_{gewAbfahrt}$ für S4 im Störfallfahrplan	44	14

SFP-Wende	zur Minute	
Wende mit einem Triebfahrzeugführer		
S4 auf S3: $T_{frühmöglAbfahrt}$	41	11
S3 auf S4: $T_{frühmöglAbfahrt}$	56	26
S4 auf S3: $T_{gewAbfahrt} \geq T_{frühmöglAbfahrt}$	44 > 41 → positive Wende	14 > 11 → positive Wende
S3 auf S3: $T_{gewAbfahrt} \geq T_{frühmöglAbfahrt}$	59 > 56 → positive Wende	29 > 26 → positive Wende
	[min]	[s]
S4 auf S3: $t_{vorhWende,SFP}$	12	720
S3 auf S4: $t_{vorhWende,SFP}$	12	720
$t_{minWende,SFP,1TF}$	9	540
$t_{Wendepuffer}$	3	180

Die Umleitung der S6 um 8:20 Uhr in Frankfurt West wird gemäß Unterabschnitt 4.3.4 b) und g) auf die Machbarkeit der Wende in Frankfurt Hauptbahnhof hoch überprüft. Dabei wird vom Ersteller eine positive Wende auf den im Regelbetrieb existierenden Takt um 08:34 Uhr als $T_{gewAbfahrt}$ angestrebt.

- $t_{Fahrt,Ul} = 4$ min
- $T_{Ankunft} = T_{ab,lBSt,Regel} + t_{Fahr,Ul} + \sum_{i=1}^{n} t_{Halt,i} + t_{Fahr,UlEnde}$ = 08:20 Uhr + 4 min + 0 min +0 min =8:24 Uhr
- $t_{minWende,SFP} = t_{minWende,Ril} + t_{Wendezuschlag,SFP}$ = 6 min + 3 min = 9 min
- $T_{frühmöglAbfahrt} = T_{Ankunft,SFP} + t_{minWende,SFP}$ = 8:24 Uhr + 9 min = 8:33 Uhr
- $T_{gewAbfahrt} \geq T_{frühmöglAbfahrt}$, positive Wende möglich, sonst negative Wende nötig
- 08: 33 $Uhr \leq$ 08: 34 Uhr; daher positive Wende möglich.

7.2.2 Modul 2: Funktionsfähigkeit der betroffenen Kanten

Für die umgeleitete S6 sind gemäß Unterabschnitt 4.4.4 die mittleren Wartezeiten bei Ein-/Ausfädeln auf die Umleitungsstrecke zu ermitteln. Die angenommenen Inputwerte sind in Anlage 4 dargestellt.

Da der SFP-Wendebahnhof nicht auf dem Laufweg des Fahrplans des Regelbetriebs liegt, gibt es kein Ausfädeln nach Abbildung 4-8. In Tabelle 7-3 wird das Einfädeln auf die Umleitungsstrecke berechnet und anschließend erneut die Wende mit der angepassten Fahrzeit überprüft.

Tabelle 7-3: Ermittlung der mittleren Wartezeit auf Einfädeln und finale Überprüfung der Umleitung (eigene Darstellung)

Berechnung der planmäßigen Wartezeiten für Einfädeln		
mittlere Zugfolgezeit t_{am}	9,60	[min]
Ankunftsrate λ	0,10	[-]
Bedienungsrate μ	0,61	[-]
ρ	0,17	[-]
Variationskoeffizient V_b	1,00	[-]
mittlere Bedienzeit t_{bm}	1,64	[min]
mittlere Wartezeit $t_{wm} = t_{wEinfädeln}$	**0,34**	[min]

Anpassung von $t_{Fahrt,Ul}$	**4,34**	[min]

Abfahrt FFM West $T_{ab,lBST,Regel}$	07:20:00
Ankunft FFM Hbf hoch $T_{Ankunft}$	07:24:20
früheste Abfahrt FFM Hbf hoch nach Wende $T_{frühmöglAbfahrt,GL}$	07:33:20
geplante Abfahrt FFM Hbf hoch nach Wende West $T_{FgewAbfahrt,GL}$	07:34:00
Prüfung	machbar

7.2.3 Modul 3: Funktionsfähigkeit der betroffenen Knoten

Gemäß Unterabschnitt 4.4.6 ist der Belegungsgrad in dem von betrieblichen Maßnahmen betroffenen Knoten zu überprüfen. Dies wird in diesem Unterabschnitt für Frankfurt Hauptbahnhof tief demonstriert. Die angenommenen Inputwerte sind in Anlage 4 dargestellt.

Aufgrund des Umfangs ist die Erfassung der Fahr- und Belegungszeiten anhand von Fahrtypen in Anlage 4 dargestellt. Daraus ergeben sich für die Gleise 101 -104 die Werte in Tabelle 7-4.

Tabelle 7-4: Überprüfung der Belegung in Frankfurt Hauptbahnhof tief (eigene Darstellung)

Gleis i	Fahrten in t_U [-]	Belegungszeit [min]	Belegungszeit im Regelbetrieb	Belegungsgrad ρ nach UIC 2013
101	0	0	88	0,00
102	48	88	88	0,74
103	16	221	88	1,85
104	48	88	88	0,74

In diesem Fall würde das Entscheidungsunterstützungssystem den Ersteller auf die Überschreitung beider Grenzwerte in Gleis 103 hinweisen und einen interaktiven Prozess zur Überarbeitung der betrieblichen Maßnahmen beginnen. Das Beispiel verdeutlicht bei Gleis 102 und 104, dass es der Grenzwert nach UIC-Kodex 406 bereits im Regelbetrieb in dem hoch ausgelasteten Bereich einer S-Bahnstammstrecke nicht eingehalten wird und es daher sinnvoll ist, auch den Grenzwert mit Bezug auf den Regelbetrieb zu verwenden. Trotzdem besteht die Gefahr, dass beide Grenzwerte für die dichte Taktung auf Stammstrecken im Störfall zu streng sein könnten. Das System sollte daher den Ersteller anhand der ermittelten Grenzwerte final über den Einsatz der Maßnahme entscheiden lassen.

7.2.4 Modul 4: Überprüfung der Einschwingfähigkeit

Im Anwendungsbeispiel soll nun das Auslegen der Fahrzeuge der Linie S4, die aufgrund des Teilausfalls ggfs. überschüssig sind, und die Rückführung der gelben Fahrzeuge der Linien S3 und S4 betrachtet werden. Die Linien S3 und S4 werden dabei gemeinsam betrachtet, da der Störfallfahrplan einen Linienwechsel bei Wende am SFP-Wendebahnhof vorsieht und somit die Umläufe der beiden Linien verknüpft sind.

Dabei werden folgende Abstellbahnhöfe und Wendebahnhöfe (siehe Tabelle 7-5) durch den Ersteller angegeben. Als Fahrplanfester wird der Zeitraum 7:30 bis 8:00 Uhr für das Beispiel festgelegt. Gestörte Verkehrsknoten sind:

- FFM Lokalbahnhof,
- FFM Süd,
- FFM Stresemannallee,
- FFM Louisa,
- Neu-Isenburg,
- Dreieich-Buchschlag und
- Langen Flugsicherung.

Tabelle 7-5: mögliche Abstell- und Wendebahnhöfe für die S 4 (eigene Darstellung)

Teilausfall S 4 - Auslegen der Fahrzeuge im Süden			
nördlich		**südlich**	
Abstellbahnhof	FFM Hauptbahnhof Außenbahnhof	Abstellbahnhof	Darmstadt Hauptbahnhof Abstellung
spätester Wendebahnhof	Ostendstraße	spätester Wendebahnhof	Langen

In Tabelle 7-6 werden die Standorte der Fahrzeuge je nach Eintretenszeitpunkt der Störung zu den Fahrplanminuten im Fahrplanfenster abgebildet. Aus den Standorten ergeben sich gemäß Unterabschnitt 3.6.2 die Kategorien der Züge. Davon abhängig werden die Fahrzeuge, die fehlen oder überschüssig sind, und die zurückzuführenden gelben Züge je Fahrplanminute ermittelt.

Bei einem Fahrzeugmangel ist der Ersteller zu informieren. Dieser muss bestätigen, dass es bei Eintreten des Falls eine Lösung gibt und angeben wie lange die Umsetzung dieser dauert. In diesem Beispiel wird eine kurzfristige Bereitstellung innerhalb von 15 Minuten angenommen.

Wenn ein Fahrzeugüberschuss besteht, wird anhand des überschüssigen Umlaufs ermittelt, welcher Zug abzustellen ist und die Dauer dafür ermittelt. Die Dauer ergibt sich aus der nötigen Fahrzeit bis zum Hauptbahnhof. Dort wird die Abstellung vorbereitet und dann durch Ausfahrt in den Außenbahnhof durchgeführt. Wenn der Zug die Belegung des Bahnsteiggleises beendet hat, ist die Kapazität freigegeben und der Zug gilt als aus dem System ausgelegt. Daher ist der Fahrzeit zum Hauptbahnhof gemäß Unterabschnitt 4.5.4 noch $t_{B,Ausfall,ohneWende} = t_{Sp} + t_{Vb,ohneWende}$ hinzuzufügen. Die Ergebnisse dazu sind Tabelle 7-9 Spalte Abstellung zu entnehmen.

Zudem wird ermittelt, wie lange es dauert, die gelben Züge zurückzuführen, bis sie sich an einem Standort der grünen Kategorie befinden. Die Dauer der Rückführung wird in Tabelle 7-7 abgebildet. Diese ergibt sich aus den Fahrzeiten im Regelbetrieb und ggfs. nötigen Wenden.

Zur besseren Übersicht wurde in Tabelle 7-6 und Tabelle 7-7 eine gemeinsame Darstellung von S3 und S4 in den beiden Störungseinflussbereichen der beiden SFP-Wendebahnhöfe FFM Hauptbahnhof tief und Langen gewählt. Da die mittlere Auslegedauer je Störungseinflussbereich ermittelt wird, erfolgt für deren Ermittlung eine Trennung in Tabelle 7-9 und Tabelle 7-8. Für den Störungseinflussbereich FFM Hauptbahnhof tief ist dies nur ein Auszug, da nur die Linien S3 und S4 dort betrachtet wurden.

Die mittlere Auslegedauer schätzt ab, wann in dem betrachteten Störungseinflussbereich die Eigenschaften der stabilen Phase in Bezug auf Zuganzahl und Zugstandort entsprechend des Störfallfahrplans erwartet werden können. Dieser Wert kann anschließend mit einer vorgegebenen Zielfunktion des Erstellers abgeglichen und somit bewertet werden.

Tabelle 7-6: Standorte der den Umläufen zugeordneten Züge bei Störungseintritt zur jeweiligen Fahrplanminute m (eigene Darstellung)

m	Uhrzeit	Umlauf 1	2	3	4	5	6	7	8	9	Anzahl roter Züge	Züge im Süden	Züge im Norden	Gelbe Züge
1	07:30	rot	grün nord	grün süd	rot	grün nord	grün nord	rot	grün nord	grün nord	3	1	5	0
2	07:31	rot	grün nord	grün süd	rot	grün nord	grün nord	rot	grün nord	grün nord	3	1	5	0
3	07:32	rot	grün nord	grün süd	rot	grün nord	grün nord	rot	gelb nord	grün nord	3	1	5	1
4	07:33	rot	grün nord	grün süd	rot	grün nord	grün nord	rot	gelb nord	grün nord	3	1	5	1
5	07:34	rot	grün nord	grün süd	rot	grün nord	grün nord	rot	gelb nord	grün nord	3	1	5	1
6	07:35	gelb nord	grün nord	grün süd	rot	grün nord	grün nord	rot	gelb nord	grün nord	2	1	6	2
7	07:36	gelb nord	grün nord	grün süd	rot	grün nord	grün nord	rot	gelb nord	grün nord	2	1	6	2
8	07:37	gelb nord	grün nord	grün süd	rot	grün nord	grün nord	rot	gelb nord	grün nord	2	1	6	2
9	07:38	gelb nord	grün nord	grün süd	rot	grün nord	grün nord	rot	gelb nord	grün nord	2	1	6	2
10	07:39	gelb nord	grün nord	grün süd	rot	grün nord	grün nord	rot	rot	grün nord	3	1	5	1
11	07:40	gelb nord	grün nord	grün süd	gelb süd	grün nord	grün nord	rot	rot	grün nord	2	2	5	2
12	07:41	gelb nord	grün nord	grün süd	grün süd	grün nord	grün nord	rot	rot	grün nord	2	2	5	1
13	07:42	gelb nord	grün nord	grün süd	grün süd	grün nord	grün nord	rot	rot	grün nord	2	2	5	1
14	07:43	grün nord	grün nord	grün süd	grün süd	grün nord	grün nord	rot	rot	grün nord	2	2	5	0
15	07:44	grün nord	grün nord	grün süd	grün süd	grün nord	grün nord	rot	rot	grün nord	2	2	5	0
16	07:45	grün nord	grün nord	grün süd	grün süd	grün nord	grün nord	rot	rot	grün nord	2	2	5	0
17	07:46	grün nord	grün nord	grün süd	grün süd	grün nord	grün nord	rot	rot	grün nord	2	2	5	0
18	07:47	grün nord	grün nord	grün süd	grün süd	gelb nord	grün nord	rot	rot	grün nord	2	2	5	1
19	07:48	grün nord	grün nord	rot	grün süd	gelb nord	grün nord	rot	rot	grün nord	3	1	5	1
20	07:49	grün nord	grün nord	rot	grün süd	gelb nord	grün nord	rot	rot	grün nord	3	1	5	1
21	07:50	grün nord	grün nord	rot	grün süd	gelb nord	grün nord	gelb nord	rot	grün nord	2	1	6	2
22	07:51	grün nord	grün nord	rot	grün süd	gelb nord	grün nord	gelb nord	rot	grün nord	2	1	6	2
23	07:52	grün nord	grün nord	rot	grün süd	gelb nord	grün nord	gelb nord	rot	grün nord	2	1	6	2
24	07:53	grün nord	grün nord	rot	grün süd	gelb nord	grün nord	gelb nord	rot	grün nord	2	1	6	2
25	07:54	grün nord	grün nord	rot	grün süd	rot	grün nord	gelb nord	rot	grün nord	3	1	5	1
26	07:55	grün nord	grün nord	rot	grün süd	rot	grün nord	gelb nord	gelb süd	grün nord	2	2	5	2
27	07:56	grün nord	grün nord	rot	grün süd	rot	grün nord	gelb nord	gelb süd	grün nord	2	2	5	2
28	07:57	grün nord	grün nord	rot	grün süd	rot	grün nord	gelb nord	grün süd	grün nord	2	2	5	1
29	07:58	grün nord	grün nord	rot	grün süd	rot	grün nord	grün nord	grün süd	grün nord	2	2	5	0
30	07:59	grün nord	grün nord	rot	grün süd	rot	grün nord	grün nord	grün süd	grün nord	2	2	5	0

Legende:
- Fahrzeugmangel
- Fahrzeugüberschuss
- Rückführung nötig

Tabelle 7-7: Fahrtdauer der Rückführung der gelben Züge nach SFP Ausrufung an die im SFP geplanten Orte (eigene Darstellung)

m	Uhrzeit	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	07:30									
2	07:31								nach Hbf:	
3	07:32								16	
4	07:33								15	
5	07:34	nach Hbf:							14	
6	07:35	8							13	
7	07:36	7							14	
8	07:37	6							17	
9	07:38	5							16	
10	07:39	4			nach Langen:					
11	07:40	3			1					
12	07:41	2								
13	07:42	1								
14	07:43									
15	07:44									
16	07:45									
17	07:46					nach Hbf:				
18	07:47					16				
19	07:48					15				
20	07:49					14		nach Hbf:		
21	07:50					13		8		
22	07:51					14		7		
23	07:52					17		6		
24	07:53					16		5	nach Langen:	
25	07:54							4	2	
26	07:55							3	1	
27	07:56							2		
28	07:57							1		
29	07:58									
30	07:59									

Tabelle 7-9: Teile der mittleren Auslegedauer für den SEB FFM Hauptbahnhof tief (eigene Darstellung)

m	Uhrzeit	Abstellung	Rückführung	maßgebender Wert der Fahrplanminute
1	07:30			0,00
2	07:31			0,00
3	07:32		16	16,00
4	07:33		15	15,00
5	07:34		14	14,00
6	07:35	21	8	21,49
7	07:36	22	7	22,49
8	07:37	25	6	25,49
9	07:38	24	5	24,49
10	07:39		4	4,00
11	07:40		3	3,00
12	07:41		2	2,00
13	07:42		1	1,00
14	07:43			0,00
15	07:44			0,00
16	07:45			0,00
17	07:46			0,00
18	07:47		16	16,00
19	07:48		15	15,00
20	07:49		14	14,00
21	07:50	21	8	21,49
22	07:51	22	7	22,49
23	07:52	25	6	25,49
24	07:53	24	5	24,49
25	07:54		4	4,00
26	07:55		3	3,00
27	07:56		2	2,00
28	07:57		1	1,00
29	07:58			0,00
30	07:59			0,00
	mittlere Auslegedauer			9,93

Tabelle 7-8: mittleren Auslegedauer für den SEB Langen (eigene Darstellung)

m	Uhrzeit	Rückführung	zusätzliche Bereitstellung	maßgebender Wert der Fahrplanminute
1	07:30		15	15
2	07:31		15	15
3	07:32		15	15
4	07:33		15	15
5	07:34		15	15
6	07:35		15	15
7	07:36		15	15
8	07:37		15	15
9	07:38		15	15
10	07:39		15	15
11	07:40	1		1
12	07:41			0
13	07:42			0
14	07:43			0
15	07:44			0
16	07:45			0
17	07:46			0
18	07:47			0
19	07:48			0
20	07:49		15	15
21	07:50		15	15
22	07:51		15	15
23	07:52		15	15
24	07:53		15	15
25	07:54	2	15	15
26	07:55	1		1
27	07:56			0
28	07:57			0
29	07:58			0
30	07:59			0
	mittlere Auslegedauer			8,07

7.2.5 Modul 5: Ermittlung der mittleren Einschwingdauer

Im Anwendungsbeispiel soll nun die mittlere Einschwingdauer im Störungseinflussbereich Langen ermittelt werden. Dazu sind die Verspätungen der Fahrten der S3 zu ermitteln, die entweder durch die Ermittlungs- und Entscheidungsphase oder die Bereitstellung nach SFP-Ausrufung eines fehlenden Fahrzeugs erzeugt werden. Anschließend ist zu berechnen wie lange der Abbau der Verspätung dauert. Um das Beispiel übersichtlich zu halten, wurde ein Bereich gewählt, in dem keine Warteschlange mit weiteren Fahrzeuge entsteht. Für die Ermittlungs- und Entscheidungsphase wird eine Dauer von 25 min angesetzt. Die verwendeten Inputdaten zu Fahr- und Wendezeiten sind in Anlage 4 hinterlegt.

Für die Züge wird eine Verspätung durch die Einschwing- und Ermittlungsphase berechnet, anschließend wird ermittelt, wie lange das Fahrzeug benötigt, diese durch die Wendepuffer an dem SFP-Wendebahnhof in Langen und dem regulären Wendebahnhof in Darmstadt abzubauen.

In den Fahrplanminuten in denen durch den Störungseintritt ein Fahrzeugmangel (siehe Modul 4) vorliegt, wird unter Berücksichtigung der Bereitstellungsdauer eine Verspätung bei Abfahrt in Darmstadt ermittelt, die durch die Wendepuffer an dem SFP-Wendebahnhof in Langen und dem regulären Wendebahnhof in Darmstadt abgebaut wird. Für jede Fahrplanminute wird unter

Berücksichtigung der Auslegedauern, die neben der Bereitstellung auch die Rückführung der gelben Züge umfasst, ein maßgebender Wert bestimmt. Diese werden zur mittleren Einschwingdauer des Störeinflussbereichs Langen gemittelt.

Tabelle 7-10: jeweilige Standorte der Fahrzeuge der Linien 3 und 4 bei Störungseintritt zu den Fahrplanminuten m (eigene Darstellung)

m	Uhrzeit	verbleibende Fahrzeit	Darmstadt	Arheilgen	Wixhausen	Erzhausen	Egelsbach	Langen (Hessen) an
1	07:30	18	Fzg 3 (steht)					
2	07:31	17	Fzg 3 (steht)					
3	07:32	16	Fzg 3 (steht)					
4	07:33	15	Fzg 3 (steht)					
5	07:34	14	Fzg 3 (steht)					
6	07:35	13		Fzg 3				
7	07:36	12		Fzg 3				
8	07:37	11		Fzg 3				
9	07:38	10		Fzg 3				
10	07:39	9			Fzg 3			
11	07:40	8			Fzg 3			
12	07:41	7				Fzg 3		Fzg 4
13	07:42	6				Fzg 3	Fzg 4	
14	07:43	5				Fzg 3	Fzg 4	
15	07:44	4					Fzg 3 /Fzg4	
16	07:45	3				Fzg 4	Fzg 3	
17	07:46	2				Fzg 4		Fzg 3
18	07:47	1			Fzg 4			Fzg 3
19	07:48	0			Fzg 4			Fzg 3 (steht)
20	07:49			Fzg 4				
21	07:50			Fzg 4				
22	07:51			Fzg 4				
23	07:52		Fzg 4					
24	07:53		Fzg 4					
25	07:54		Fzg 4					
26	07:55		Fzg 4					
27	07:56	22	Fzg 4 (steht)					
28	07:57	21	Fzg 4 (steht)					
29	07:58	20	Fzg 4 (steht)					
30	07:59	19	Fzg 4 (steht)					

Tabelle 7-11: Verspätungsentwicklung der Züge mit Verspätung durch die Ermittlungs- und Entscheidungsphase (eigene Darstellung)

	Betrachtung der bereits verkehrenden Züge				
m	$t_{W,EE,1}$	$t_{W,nachSFPWende}$	$t_{W,nachWendeSBhf}$	$t_{W,nachSFPWende}$	planmäßig nach x Minuten
1	7	-8			0
2	8	-7			0
3	9	-6			0
4	10	-5			0
5	11	-4			0
6	12	-3			0
7	13	-2			0
8	14	-1			0
9	15	0			0
10	16	1			23
11	17	2			23
12	18	3			23
13	19	4	1		42
14	20	5	2		42
15	21	6	3		42
16	22	7	4		42
17	23	8	5	-10	42
18	24	9	6	-9	42
19					0
20					0
21					0
22					0
23					0
24					0
25					0
26					0
27	3	-21			0
28	4	-20			0
29	5	-19			0
30	6	-18			0

Tabelle 7-12: Verspätungsentwicklung der Züge mit Verspätung durch die zusätzliche Bereitstellung (eigene Darstellung)

	Betrachtung des nach Modul 4 bereitzustellenden weiteren Zuges			
m	zusätzliche Bereitstellung	$t_{W,nachSFPWende}$	$t_{W,nachWendeSBhf}$	planmäßig nach x Minuten
1	08:10	5		28
2	08:11	6		28
3	08:12	7		28
4	08:13	8	-7	28
5	08:14	9	-6	28
6	08:15	10	-5	28
7	08:16	11	-4	28
8	08:17	12	-3	28
9	08:18	13	-2	28
10	08:19	14	-1	28
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20	08:29	0		0
21	08:30	0		0
22	08:31	0		0
23	08:32	0		0
24	08:33	0		0
25	08:34	0		0
26				
27				
28				
29				
30				

Tabelle 7-13: Ermittlung der mittleren Einschwingdauer für den Störungseinflussbereich Langen (eigene Darstellung)

m	Verspätung durch Einschwingen	Verspätung durch Bereitstellung	maßgebende Auslegedauern aus Modul 4	maßgebender Wert für die Einschwingdauer der Fahrplanminute $t_{ED,m,SEB}$
1	0,00	28,00	15,00	28,00
2	0,00	28,00	15,00	28,00
3	0,00	28,00	15,00	28,00
4	0,00	28,00	15,00	28,00
5	0,00	28,00	15,00	28,00
6	0,00	28,00	15,00	28,00
7	0,00	28,00	15,00	28,00
8	0,00	28,00	15,00	28,00
9	0,00	28,00	15,00	28,00
10	23,00	28,00	15,00	28,00
11	23,00		1,00	23,00
12	23,00		0,00	23,00
13	42,00		0,00	42,00
14	42,00		0,00	42,00
15	42,00		0,00	42,00
16	42,00		0,00	42,00
17	42,00		0,00	42,00
18	42,00		0,00	42,00
19	0,00		0,00	0,00
20	0,00	0,00	15,00	15,00
21	0,00	0,00	15,00	15,00
22	0,00	0,00	15,00	15,00
23	0,00	0,00	15,00	15,00
24	0,00	0,00	15,00	15,00
25	0,00	0,00	15,00	15,00
26	0,00		1,00	1,00
27	0,00		0,00	0,00
28	0,00		0,00	0,00
29	0,00		0,00	0,00
30	0,00		0,00	0,00
	mittlere Einschwingdauer des Störeinflussbereichs		$\overline{t_{ED,SEB}}$	22,30

7.3 Verkehrskonzept

7.3.1 Modul 6: Verbindungskonflikterkennung

Die Verbindungskonflikterkennung wird anhand einer ausgewählten Verbindung, die als konfliktär durch den Algorithmus ermittelt wird, gezeigt.

Im ersten Schritt des Algorithmus werden zunächst alle Verbindungen ermittelt für die dann alle weiteren Schritte durchzuführen sind. Diese werden nun auszugsweise an der Verbindung von Darmstadt Hauptbahnhof nach Neu-Isenburg demonstriert:

1. Abfahrt Darmstadt Luisenplatz 7:53 Uhr Ankunft Neu-Isenburg 8:26 Uhr

2. Ermittlung aller Züge für die Linien:

Tabelle 7-14: Linien des betrachteten S-Bahnnetzes (eigene Darstellung)

S1	Wiesbaden Hbf	Rödermark - Ober-Roden
S2	Niedernhausen	Dietzenbach Bahnhof
S3	Darmstadt Hauptbahnhof	Bad Soden
S4	Darmstadt Hauptbahnhof	Kronberg

S5	Friedrichsdorf	FFM Süd
S6	Friedberg	FFM Süd
S7	Riedstadt-Goddelau	FFM Hauptbahnhof tief
S8	Wiesbaden Hbf	Hanau Hauptbahnhof
S9	Wiesbaden Hbf	Hanau Hauptbahnhof
S1	Rödermark - Ober-Roden	Wiesbaden Hbf
S2	Dietzenbach Bahnhof	Niedernhausen
S3	Bad Soden	Darmstadt Hauptbahnhof
S4	Kronberg	Darmstadt Hauptbahnhof
S5	FFM - Süd	Friedrichsdorf
S6	FFM - Süd	Friedberg
S7	FFM Hauptbahnhof tief	Riedstadt-Goddelau
S8	Hanau Hauptbahnhof	Wiesbaden Hbf
S9	Hanau Hauptbahnhof	Wiesbaden Hbf

Dabei wird u. a. der folgende, relevante Zug 4711 der S3 von Darmstadt Hauptbahnhof 08:05 Uhr nach Bad Soden 09:00 Uhr ermittelt.

3. Unterteilung der Verbindung(en) in Verbindungsabschnitte:

Tabelle 7-15: Unterteilung in Verbindungsabschnitte (eigene Darstellung)

erster Verbindungsabschnitt xa_1	**zweiter Verbindungsabschnitt xa_2**
KnotA1: Abfahrt Darmstadt Luisenplatz 7:53 Uhr (mit dem Bus F = KantA12)	KnotA2: Abfahrt Darmstadt Hauptbahnhof 08:05 (mit der S3 Zug 4711 = KantA23)
KnotA2: Ankunft Darmstadt Hauptbahnhof 08:00	KnotA3: Ankunft Neu-Isenburg 8:26 Uhr

Tabelle 7-16: Untersetzung der Verbindungsabschnitte mit Verkehrsknoten und -kanten (eigene Darstellung)

	KantA12	**an**	**ab**		
KnotV1	Luisenplatz, Darmstadt		07:53	KantV12	
KnotV2	Rhein-/Neckarstraße, Darmstadt	07:55	07:55		KantV23
KnotV3	Berliner Allee, Darmstadt	07:57	07:57	KantV34	
KnotV4	Darmstadt Hauptbahnhof	08:00			

	KantA23				
KnotV4	Darmstadt Hauptbahnhof		08:05	KantV45	
KnotV5	Darmstadt-Arheilgen	08:09	08:09		KantV56
KnotV6	Wixhausen	08:11	08:11	KantV67	
KnotV7	Erzhausen	08:13	08:14		KantV78
KnotV8	Egelsbach	08:16	08:16	KantV89	
KnotV9	Langen	08:18	08:19		KantV910
KnotV10	Langen Flugsicherung	08:20	08:21	KantV1011	
KnotV11	Dreieich-Buchschlag	08:23	08:23		KantV1112
KnotV12	Neu-Isenburg	08:26			

xa_2 ist eine KantA mit dem Verkehrsmittel = Zug, daher wird xa_2 an den Zug 4711 attribuiert. Status von xa_2 ist aktuell $xa_{gestört}$ = n.

Ermittlung konfliktärer Verbindungen je Zug eines Betriebskonzepts

1. Zug 4711 ist ein Zug mit der betrieblichen Maßnahme Teilausfall mit Ersatz; bm = 3. Im Beispiel werden nun für den Zug 4711 die folgenden Schritte durchgeführt.

2. Ermittle für 4711 den Störungsabschnitte zStör anhand der gKantV, gKnotV und vKnotV und attribuiere sie an z.

Tabelle 7-17: Ermittlung von zStör für Zug 4711 der Linie S3 (eigene Darstellung)

zStör			
FFM Hauptbahnhof tief	KnotV0	gKantV01	
FFM Taunusanlage	gKnotV1		gKantV12
FFM Hauptwache	gKnotV2	gKantV23	
FFM Konstablerwache	gKnotV3		gKantV34
FFM Ostendstraße	gKnotV4	gKantV45	
FFM Lokalbahnhof	gKnotV5		gKantV56
FFM Süd	gKnotV6	gKantV67	
FFM Stresemannallee	gKnotV7		gKantV78
FFM Louisa	gKnotV8	gKantV89	
Neu-Isenburg	gKnotV10		gKantV910
Dreieich-Buchschlag	gKnotV10	gKantV1011	
Langen Flugsicherung	gKnotV11		gKantV1112
Langen	KnotV12		

3. Da der Zug 4711 bm = 3 aufweist, wird zStör mit xa_2 abgeglichen:

- KnotA3 = gKnotV1; daher gilt für xa_2 $xa_{gestört}$ = j.
- Eine Demonstration der Überprüfung durch Abgleich der KantV von xa mit den gKantV von zStör ist in Tabelle 7-18 dargestellt. Die rot markierten Stellen zeigen eine Übereinstimmung und somit einen gestörten Verbindungsabschnitt auf.

Tabelle 7-18: Abgleich der Verkehrskanten von zStör und xa (eigene Darstellung)

KantA23 (S3)	**zStör**		**xa_2**	
Darmstadt Hauptbahnhof			KantV45	
Darmstadt-Arheilgen				KantV56
Wixhausen			KantV67	
Erzhausen				KantV78
Egelsbach			KantV89	
Langen		gKantV1112		KantV910
Langen Flugsicherung	gKantV1011		KantV1011	
Dreieich-Buchschlag		gKantV910		KantV1112
Neu-Isenburg				

Somit wird x = Darmstadt Luisenplatz nach Neu-Isenburg (7:53 bis 8:26 Uhr) der Menge KV_x zugeordnet.

7.3.2 Modul 7: Konfliktlösungsalternativensuche

Für den in Modul 6 ermittelten Verbindungskonflikt x = Darmstadt Luisenplatz nach Neu-Isenburg (7:53 bis 8:26 Uhr), siehe Tabelle 7-19, werden nun Konfliktlösungsalternativen gesucht.

Tabelle 7-19: im Regelbetrieb geplante Verbindung (eigene Darstellung)

Einstieg	Abfahrt	Ausstieg	Ankunft	Verkehrsmittel	notwendige Umsteigezeit
Darmstadt Luisenplatz	07:53	Darmstadt Hauptbahnhof	08:00	Bus F	00:05
Darmstadt Hauptbahnhof	08:05	Neu-Isenburg	08:26	S 3	

Die Suche nach Alternativen unter Verwendung der Verkehrsmittel in Hierarchieebene KLA1 ist nicht erfolgreich. Daher wird unter Verwendung in Hierarchieebene 2, mit den Verkehrsmitteln aus KLA1 und KLA2, erneut nach Konfliktlösungsalternativen gesucht. Dabei werden die drei in Tabelle 7-20 dargestellten Alternativen ermittelt.

Tabelle 7-20: ermittelte Konfliktlösungsalternativen für den betrachteten Verbindungskonflikt (eigene Darstellung)

Aktions-knoten	Abfahrt	Aktions-knoten	Ankunft	Verkehrs-mittel der Aktions-kante	not-wendige Umsteige-zeit	verfüg-bare Umsteige-zeit	Mach-bar-keit
Darmstadt Luisenplatz	07:53	Darmstadt Hauptbahnhof	08:00	Bus F	00:05	00:05	
Darmstadt Hauptbahnhof	08:05	Langen	08:18	S 3	00:05	00:07	
Langen	08:25	Isenburg-zentrum Süd	08:55	Bus X83	00:03	00:07	
Isenburg-zentrum Süd	09:02	Neu-Isenburg	09:14	BusOF-51			

Darmstadt Luisenplatz	07:53	Darmstadt Hauptbahnhof	08:00	Bus F	00:05	00:09	
Darmstadt Hauptbahnhof	08:09	Langen	08:16	RB60	00:05	00:09	
Langen	08:25	Isenburg-zentrum Süd	08:55	Bus X83	00:03	00:07	
Isenburg-zentrum Süd	09:02	Neu-Isenburg	09:14	BusOF-51			

Darmstadt Luisenplatz	07:53	Darmstadt Hauptbahnhof	08:00	Bus F			
Darmstadt Hauptbahnhof	08:05	Wixhausen	08:11	S 3			
Wixhausen Bhf	08:30	Wixhausen Sportplatz	08:33	Bus WX			
Wixhausen Sportplatz	09:02	Gräfen-hausen Schneppenhäuser Straße	09:09	Bus WE1			
Gräfenhausen Schneppenhäuser Straße	09:31	Walldorf Waldstraße	09:53	Bus X14			
Walldorf Waldstraße	10:10	Neu-Isenburg	10:39	Bus X18			

Alle drei ermittelten Konfliktlösungsalternativen erzeugen qualitätsbezogene Verbindungskonflikte, da die Anzahl der Umstiege verändert ist. Deswegen ist für jede alternative Verbindung die Machbarkeit der Umstiege zu prüfen.

Die ersten beiden ermittelten Verbindungsalternativen wurden als machbar eingestuft und werden daher nun in Tabelle 7-21 anhand der Widerstandsveränderung bewertet und eine Alternative ausgewählt. Die dritte Alternative wurde als nicht machbar eingestuft, da die maximale Anzahl an Umstiegen überschritten wurde.

Tabelle 7-21: Bewertung der ermittelten Konfliktlösungsalternativen (eigene Darstellung)

	Zeiten		**Widerstände [WE]**		**Widerstands-**
1. Alternative	**alt**	**neu**	**alt**	**neu**	**veränderung [WE]**
veränderte Fahrzeit	00:28	01:02	28,00	62,00	34,00
veränderte Umstiege	00:05	00:05	16,43	16,43	0,00
		00:07	0,00	32,91	32,91
		00:07	0,00	47,91	47,91
				Summe	**114,82**
	Zeiten		**Widerstände [WE]**		**Widerstands-**
2. Alternative	**alt**	**neu**	**alt**	**neu**	**veränderung [WE]**
veränderte Fahrzeit	00:28	00:56	28,00	56,00	28,00
veränderte Umstiege	00:05	00:09	16,43	138,52	122,09
		00:09	0,00	65,49	65,49
		00:07		47,91	47,91
				Summe	**263,49**

Da die 1. Alternative die geringere Widerstandserhöhung aufweist, wird diese ausgewählt und gemeinsam mit dem zugehörigen Verbindungskonflikt x der Menge KVgelöst_x hinzugefügt. Die 2. Alternative wird in der Menge KLA2_y gespeichert.

7.3.3 Modul 8: Verkehrskonzepterstellung

Für die Verkehrskonzepterstellung wird für das Submodul 1 gezeigt, wie ein Fahrgaststrom ermittelt wird. Als einen zulaufenden Netzast wird durch den Ersteller die S3 mit Beginn in Darmstadt Hauptbahnhof und die S4 mit Beginn in Langen zusammengefasst. Für diese wählt er gemäß der Zielsetzung zu den Korridorarten (siehe Unterabschnitt 5.8.3) die Ep_x mit Frankfurt Hauptbahnhof (1.), Ostendstraße (2.) und Frankfurt Süd (3.). Diese und mögliche Startpunkte eines Fahrgaststroms sind in Abbildung 7-2 eingetragen.

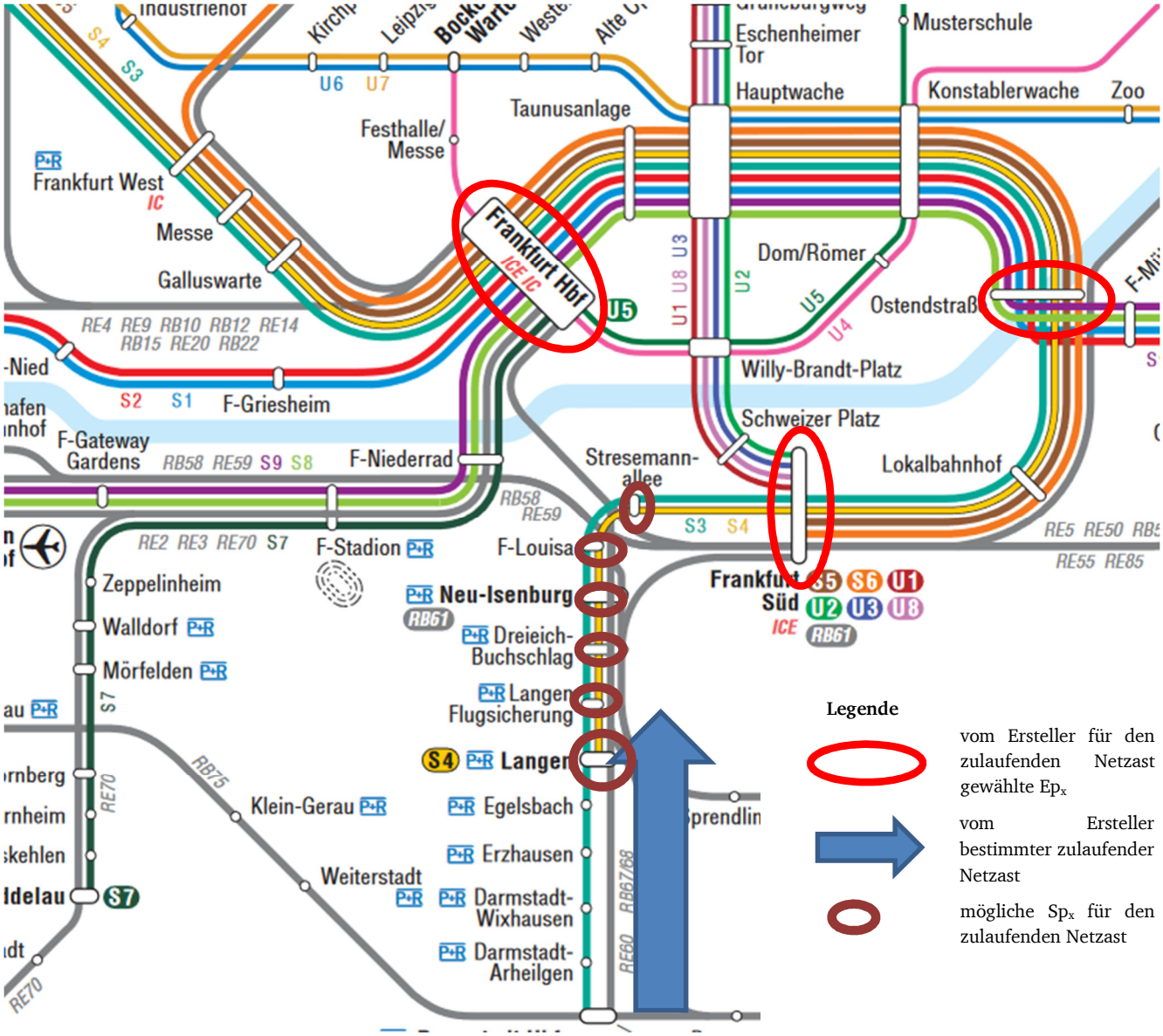


Abbildung 7-2: ergänzter Auszug des Schnellbahnliniennetzes in Frankfurt des RMV (RMV 2022)

Submodul 1: Ermittlung von Fahrgastströmen für jeden zulaufenden Netzast

1. Ermittlung aller möglichen Startpunkte Sp_x
   - KnotV = gKnotV sind bspw. Langen Flugsicherung, Dreieich-Buchschlag und Neu-Isenburg, welche bei allen zulaufenden Netzästen identisch sind, nur die Richtung unterschieden wird.
   - KnotV = KnotV mit einer Richtung anschließender gKantV ist Langen.

- KnotV = KnotV mit anschließender vKantV liegt für den zulaufenden Netzast nicht vor.
- Zudem kann ausgehend von dem KnotV mit anschließender gKantV Langen auf der KantV in Richtung Darmstadt nach weiteren Startpunkten gesucht werden.
    - Dazu ist die KantV der S3 in Langen verfügbar. Es könnten somit Egelsbach, Erzhausen, Darmstadt-Wixhausen, Darmstadt-Arheilgen bis zum Endbahnhof Darmstadt Hauptbahnhof untersucht werden.
    - Im Anwendungsbeispiel würde somit der Darmstädter Hauptbahnhof einen KnotA auf den ermittelten KantV darstellen. Im Beispiel ist dort nur die Verkehrskante RB 67 vorhanden. Diese ist bereits am Startpunkt verfügbar. Daher soll Darmstadt Hauptbahnhof keinen Startpunkt darstellen.

2. Ermittlung der Verkehrsmittel und Linien, die an dem KnotV = Sp_x verkehren
    - Für den Startpunkt Langen kann aus allen y die Verkehrskante RB 67 als verfügbar ermittelt werden.
3. Ermittlung möglicher Anschlusspunkte Ap_x je ermittelter KantV
    - Für jede in 2. ermittelte KantV wird nun nach sinnvollen Anschlusspunkten gesucht, indem die KnotV die auf KantV liegen betrachtet werden.
    - Dies ist für die RB 67 der Frankfurter Hauptbahnhof. Damit ist ein Ep_x erreicht.
4. Speichere den Fahrgaststrom mit der Ep_x = Hauptbahnhof erreicht wird. Anschließend ist die Suche mit dem ermittelten Ep_x als Ap_x fortzusetzen um ggfs. die zwei weiteren Ep_x über diese Route zu erreichen. Zudem ist für den Startpunkt Langen über dort ggfs. weitere verfügbare KantV zu ermitteln, wie die drei Ep_x erreichbar sind.
5. Anschließend ist dann aus allen ermittelten Fahrgastströmen Teilmengen für die gefundenen Routen von Sp_x nach Ep_x entsprechend der durch Ersteller definierten drei Korridorarten für den zulaufenden Netzast zu bilden.

Dann ist eine Auswahl zu Korridoren durch Bewertung, eine Engpassanalyse und -lösung und die abschließende Konzepterstellung notwendig. Dabei wären die Verbindungen, die während der Einschwingphase konfliktär werden zu entfernen.

Aufgrund der notwendigen Datenmenge und des manuell nicht handhabbaren Aufwands der Ermittlung von Fahrgastströmen, wird dies hier nicht weiter ausgeführt. Da die Bewertung über Verkehrswiderstände in der gesamten Arbeit als konsistentes Bewertungssystem entwickelt wurde, wurde eine Anwendung bereits in Modul 7 demonstriert. Die Erkennung von Engpässen erfolgt anhand eines externen Moduls und die Lösung entspricht einer erneuten Suche in den erkannten Fahrgastströmen um neue Korridore zu wählen, sodass dies aufgrund der notwendigen Datenmenge nicht darstellbar ist.

Zugleich wird dadurch deutlich, dass zur Berücksichtigung der verkehrlichen Auswirkungen bei der Planung eines Störfallprogramms eine (teil-)automatisiertes Unterstützungssoftware notwendig ist.

7.3.4 Modul 9: Verkehrskonzeptbewertung

In dem angewendeten Beispiel konnten bei manueller Suche keine unlösbaren Konflikte gefunden werden, da aufgrund der Lage des gestörten Bereichs viele Bus- und Straßenbahnlinien diesen erschließen.

Daher wird anhand eines fiktiven Beispiels die Bewertung der ungelösten Konflikte in Tabelle 7-22 demonstriert. Das Verrechnen der unterschiedlichen Mengen, gewichtet anhand der Anzahl an Fahrgästen zur Konzeptbewertung, wird nicht demonstriert, da es sich um eine simple Rechnung zur Zusammenführung von Ergebnissen handelt.

Tabelle 7-22: Bewertung ungelöster Konflikte (eigene Darstellung)

Fahrgäste mit Entscheidungsmöglichkeit	**Fahrgäste ohne Entscheidungsmöglichkeit**	
Widerstandsveränderung je Fahrgast [WE] $\Delta W_{ugK,mE}$	verbleibende Störfallprogrammdauer = t_W [min]	Widerstandsveränderung je Fahrgast [WE] $\Delta W_{ugK,oE}$
35	30	4738,54321
	90	323668060

Die Bewertung der Fahrgäste mit Entscheidungsmöglichkeit wurde universell einsetzbar für alle ungelösten Verbindungkonflikte dieser Fahrgastgruppe in Abschnitt 5.9 erarbeitet.

Für die Fahrgastgruppe ohne Entscheidungsmöglichkeit zeigt sich wie stark die Widerstandsbewertung über die Dauer der Wartezeit steigt. Wenn dies offenkundig das Ergebnis beeinflusst, ist dies ein Indikator für den Ersteller zusätzliche verkehrliche Maßnahmen der KLA 4, wie bspw. den Einsatz von Busnotverkehr (siehe auch Abschnitt 5.7), für nicht mehr verfügbare Relationen mit vielen betroffenen Fahrgästen in die Planung einzubauen.

7.4 Kundenorientierte Bewertung eines Störfallprogramms

Für die kundenorientierte Bewertung eines Störfallprogramms ist eine verkehrliche Bewertung der Einschwingphase nötig. Grundsätzlich treten die Verbindungskonflikte, die unter stabilen Bedingungen auftreten, auch in der Einschwingphase auf. Zudem können durch die verspäteten Züge aber auch zusätzliche oder veränderte Verbindungskonflikte im Zeitraum der Einschwingphase entstehen.

Hierzu wird nun angenommen, dass die Verbindung Darmstadt nach Egelsbach Bürgerhaus in Tabelle 7-23 durch die verspätete Bereitstellung des benötigten Fahrzeugs aus Tabelle 7-12 verspätet abfährt.

Tabelle 7-23:Verbindung im Regelbetrieb und der stabilen Phase (eigene Darstellung)

Einstieg	**Abfahrt**	**Ausstieg**	**Ankunft**	**Verkehrsmittel**	**notwendige Umsteigezeit**
Darmstadt Hauptbahnhof	08:05	Egelsbach Bahnhof	08:16	S 3	00:03
Egelsbach Bahnhof	08:20	Egelsbach Bürgerhaus	08:27	OF 73	

Die mittlere Verspätung ergibt sich aus den Einzelwerten in Tabelle 7-12 auf die 30 betrachteten Fahrplanminuten der Berechnung der mittleren Einschwingdauer ein Wert von 3,16 Minuten bei Abfahrt in Darmstadt.

Tabelle 7-24: zusätzlicher Verbindungskonflikt in der Einschwingphase (eigene Darstellung)

Einstieg	Abfahrt	Ausstieg	Ankunft	Verkehrsmittel	verfügbare Umsteigezeit
Darmstadt Hauptbahnhof	08:08	Egelsbach Bahnhof	08:19	S 3	00:01
Egelsbach Bahnhof	08:20	Egelsbach Bürgerhaus	08:27	OF 73	

Wie in Tabelle 7-24 dargestellt, kommt der Zug durch die verspätete Abfahrt in Darmstadt entsprechend verspätet in Egelsbach Bahnhof an. Dadurch ist der Umstieg nicht mehr machbar und es ergibt sich ein zusätzlicher Verbindungskonflikt in der Einschwingphase. Gemäß der vereinfachten Konfliktlösung wird als Alternative das Warten auf den folgenden Bus, der den geplanten Aktionsknoten erreicht, in Tabelle 7-25 angesetzt und anschließend bewertet.

Tabelle 7-25: vereinfachte Konfliktlösung in der Einschwingphase (eigene Darstellung)

Einstieg	Abfahrt	Ausstieg	Ankunft	Verkehrsmittel	verfügbare Umsteigezeit
Darmstadt Hauptbahnhof	08:08	Egelsbach Bahnhof	08:19	S 3	00:31
Egelsbach Bahnhof	08:50	Egelsbach Bürgerhaus	08:57	OF 73	

Daher ergibt sich unter Verwendung der Bewertungsfunktion aus Abschnitt 5.5, anhand der in diesem Fall relevanten Segmente zur außerplanmäßigen Fahrzeitverlängerung und der Veränderung der Umsteigezeit, die Bewertung in Tabelle 7-26. Für jeden von diesem zusätzlichen Verbindungskonflikt betroffenen Fahrgast, ergibt sich eine sehr hohe Widerstandsveränderung, da durch die Verspätung der Anschluss an den Bus verpasst wird und somit eine sehr lange Umsteigezeit entsteht. Hierbei wird deutlich, dass die fehlende Kalibrierung der Zeitbewertungsfunktionen für hohe Werte ggfs. weiterführend benötigt wird, was aber gemäß Abschnitt 3.1.2 nicht der Aufgabenstellung dieser Arbeit entspricht.

Tabelle 7-26: Bewertung des zusätzlichen Verbindungskonflikts in der Einschwingphase (eigene Darstellung)

	Zeiten		Widerstände [WE]		Widerstands-veränderung [WE]
	alt	neu	alt	neu	
außerplanmäßig veränderte Fahrzeit		00:03		7,50	7,50
veränderte Umstiege	00:04	00:31	9,93	31689,34	31679,41
				Summe	**31686,91**

Nach einer vollständigen verkehrlichen Bewertung der Einschwingphase gemäß Unterabschnitt 6.4 kann dann abschließend die Bewertung des Störfallprogramms unter Berücksichtigung der Widerstandsveränderungen in der stabilen und der Einschwingphase ermittelt und anhand einer vom Ersteller vorzugebenden Zielfunktion final bewertet werden.

7.5 Zusammenfassung

Im Anwendungsbeispiel konnte ein kleiner Überblick über die Möglichkeiten der Algorithmen zur (teil-)automatisierten betrieblichen Bewertung sowie verkehrlichen Erstellung und Bewertung gegeben werden.

Es wurden jeweils nur relativ simple und übersichtliche Beispiele gewählt, sodass die Anwendung klar wird. Jedoch ist die Komplexität in der Realität um ein Vielfaches höher. Das Anwendungsbeispiel zeigt daher, neben der überblickhaften Demonstration der Funktionsweisen, vor allem auch wie groß der Nutzen der entwickelten Systemarchitektur für die Planung von kundenorientieren Störfallprogrammen ist, da sich die Komplexität und die Menge an zu berücksichtigen Einflüssen, sowohl betrieblich als auch verkehrlich, nicht manuell bewältigen lässt.

Weitere Nutzen dieser Arbeit werden anhand einer Zusammenfassung der Ergebnisse im Folgenden Kapitel 8 dargestellt, eingeordnet und mit einem Ausblick weiterer Forschungsmöglichkeiten im Themenbereich ergänzt.

8 Abschluss der Arbeit

8.1 Wesentliche Ergebnisse

Das Ziel der Arbeit bestand in der Konzeption einer zur (teil-) automatisierten betrieblichen Bewertung und verkehrlichen Erstellung sowie Bewertung entwickelt zur Unterstützung der integrierten Planung von Störfallprogrammen.

Diese integrierte Planung besteht aus zwei Systembereichen: Das Betriebskonzept, das aktuell gemeinhin als Störfallprogramm bezeichnet wird, beinhaltet die zugbezogenen Maßnahmen und das Verkehrskonzept alle fahrgastbezogenen Maßnahmen. Dabei stellt ein funktionierendes Betriebskonzept die Basis dar, auf der ein für den Fahrgast zuverlässig funktionierendes Verkehrskonzept erstellt und bewertetet werden kann.

Bei der Planung eines Störfallprogramms liegt ein Zielkonflikt zwischen dem schnellen Erreichen eines stabilen Betriebs durch das Ausstellen möglichst vieler Fahrzeuge und dem Erhalt eines möglichst umfangreichen und damit attraktiven Verkehrsangebots für den Fahrgast vor. Dieser wurde im Rahmen der Arbeit adressiert und durch ein kundenorientiertes Bewertungssystem gelöst.

Das modulare System ermöglicht somit die Planung eines kundenorientierten und gleichzeitig betrieblich durchführbaren Störfallprogramm und erweitert damit das bestehende Konzept der betrieblichen Störfallprogramme um die verkehrlichen Wirkungen. Der Aufbau des modularen Systems zur Planung von kundenorientierten Störfallprogrammen ist in Abbildung 8-1 dargestellt und wird im Weiteren kurz erläutert. Alle Module wurden basierend auf den Anforderungen problemadäquat spezifiziert, sodass alle primären Anforderungen eingehalten werden. Dadurch entstand ein Unterstützungssystem für den Ersteller, das jedoch zudem einen Nutzen sowohl für Anwender als auch Fahrgäste erzeugt.

Ein vom Ersteller konzipiertes Betriebskonzept wird anhand der einzelnen geplanten betrieblichen Maßnahmen und deren Wechselwirkungen auf die Funktionsfähigkeit der stabilen Phase und der Einschwingqualität geprüft und bewertet. Dabei werden einzelne Maßnahmen auf ihre Machbarkeit und anschließend in einer gesamthaften Prüfung auf die Auswirkungen an Infrastrukturkanten und -knoten untersucht. Unter Berücksichtigung der Fahrzeugstandorte bei Störungseintritt und des Erreichens von geplanten Standorten und Zugzahlen wird die Einschwingphase auf Ausschlusskriterien untersucht. Anschließend erfolgt eine deterministische Modellierung der mittleren Einschwingdauer, die vergleichend und anhand einer Zielfunktion bewertet werden kann.

Basierend auf einem als ausreichend bewerteten Betriebskonzept wird (teil-)automatisiert ein Verkehrskonzept erstellt und bewertet. Dieser Systembereich des Modulsystems orientiert sich an dem betrieblichen KE/KL-Ansatz und ermittelt und bewertet verkehrliche Maßnahmen. Dabei gilt, dass die Kundenorientierung im Sinne der Fahrgastbedürfnisse maßgebend ist. Als Bewertungsmaßstäbe wurden dafür zunächst der Zielerreichungsgrad und die Widerstandsveränderung ermittelt. Die Planung orientiert sich somit daran, trotz Störfall so viele Fahrgäste wie möglich an ihr Ziel zu bringen und deren individuelle Wahrnehmung der Angebotsveränderung bei den Maßnahmen zu berücksichtigen. Diese Bewertung wird einheitlich über alle folgenden Modulen konsistent verwendet.

In der Verbindungskonflikterkennung werden Verbindungskonflikte, die durch das SFP entstehen und ein abweichendes widerstandserhöhtes Mobilitätsverhalten erzeugen, ermittelt. Für diese werden anschließend verbindungsspezifische Alternativen ermittelt, bewertet und als individuelle, beste Lösung ausgewählt. Da über Lautsprecher und ähnliche Kommunikationskanäle, die sich an eine Vielzahl von

Fahrgästen wenden, nur wenige Informationen übertragen werden können, wurden im nächsten Schritt die verbindungskonfliktspezifischen Lösungen gezielt für kollektiven Lösungen ermittelt.

Das aus den kollektiven und den verbliebenen individuellen Lösungen entstehende Verkehrskonzept ist abschließend zu bewerten. Anhand des initial zum Verkehrskonzept entwickelten einheitlichen Bewertungssystems lässt sich diese kundenorientierte Bewertung der stabilen Phase konsistent zu den Bewertungen während der Maßnahmenauswahl der vorherigen Erstellung des Verkehrskonzeptes durchführen.

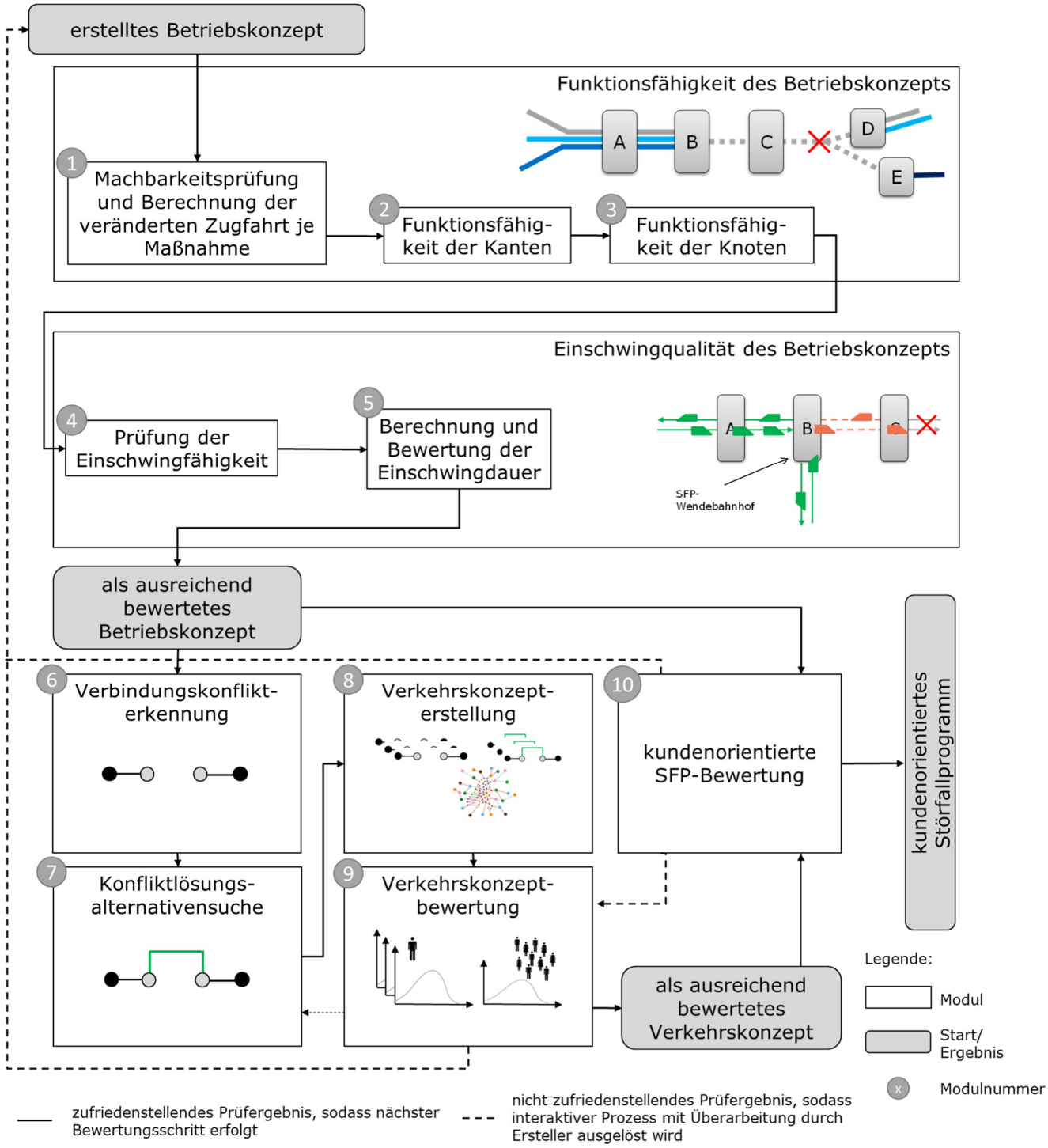


Abbildung 8-1: Modulsystem zur Planung von kundenorientierten Störfallprogrammen (eigene Darstellung)

Zusätzlich zur Bewertung der stabilen Phase eines Störfallprogramms ist auch eine kundenorientierte Bewertung der Einschwingphase entwickelt worden. Die kundenorientierte Bewertung eines Störfallprogramms, die sowohl die stabile als auch die Einschwingphase für Betrieb und Verkehr umfasst, wurde entwickelt. Dabei ist es gelungen, einen einheitlichen Maßstab über diese Phasen zu schaffen sowie über die Einschwingphase auch die Wirkungen der Ermittlungs- und Entscheidungsphase vollständig abzubilden.

Die so entstandene Bewertung ermöglicht eine Einordnung eines einzelnen Störfallprogramms gegen eine Zielfunktion für eine gesamthafte Einschätzung über die Qualität des Störfallprogramms und macht zudem Störfallprogramme untereinander vergleichbar. Sofern die Bewertung eines Störfallprogramms nicht zufriedenstellend ausfällt, kann der Ersteller insbesondere betriebliche Maßnahmen anpassen, aber auch zusätzliche verkehrliche Maßnahmen einplanen.

8.2 Methode und Anforderungen

Beide Systembereiche – Betrieb und Verkehr – haben eine modulare Systemarchitektur, die z. T. die Module weiter in Submodule untergliedert. Dies ermöglicht bei zukünftig bestehendem Weiterentwicklungsbedarf, bspw. aufgrund veränderter Prozesse oder neuerer Algorithmenentwicklung, diese ohne Veränderungsbedarf am gesamten System partiell zu innovieren.

Bei der Entwicklung von Systemarchitektur und Algorithmen wurde ein besonderes Augenmerk auf eine strukturierte Herleitung der Lösung gelegt. Basis dafür war eine weitreichende Anforderungserhebung.

Die Anforderungen wurden durch die Aufteilung in Teilprobleme und Teilziele sehr umfassend und strukturiert erarbeitet. Durch ein top-down Vorgehen wurden Anforderungen vom jeweiligen Ziel der Stakeholder abgeleitet. Zudem wurde bottom-up mit Experteninterviews, Workshops und Literatur vorgegangen. Um die Vollständigkeit weiter zu fördern, wurden die Anforderungen nach Stakeholder-Anforderungen (Ersteller, Anwender und Fahrgast) und Systemanforderungen (funktional und nicht funktional) strukturiert und in drei Kategorien geclustert. Jede dieser Kategorien wurde dann erneut einzeln bzgl. Vollständigkeit geprüft. In Tabelle 8-1 erfolgt eine Zusammenstellung der Erfüllung der Anforderungen des primären Clusters.

Tabelle 8-1: Erfüllung der primär geclusterten Anforderungen (eigene Darstellung)

Teil	Anforderungen des primären Clusters	Erfüllt durch:
a2	*Allgemeingültigkeit*	Die Bewertung der Maßnahmen ist, nicht nur in Sparten des SPNV oder lediglich für eingeschränkte Situationen, sondern grundsätzlich anwendbar.
	(Teil-)Automatisierung	Systemarchitektur zur Bewertung von betrieblichen Maßnahmen sowie der Erstellung und Bewertung von verkehrlichen Maßnahmen.
	betriebliche Funktionsfähigkeit	Modul 1-3.
	Informationen	Kommunikationsmaßnahmen können basierend auf dem bewerteten Verkehrskonzept erstellt werden.
	Mobilitätserhaltung	Entwicklung eines konsistenten Bewertungssystems zur Wahrnehmung des Angebots durch den Fahrgast.

	kundenorientierte Bewertung	Entwicklung eines konsistenten Bewertungssystems zur Wahrnehmung des Angebots durch den Fahrgast.
	integriertes SFP für Betrieb und Verkehr	Die integrierte Planung berücksichtigt sowohl Betrieb als auch Verkehr im Störfallprogramm. Die jeweilige Bewertung anhand der Zielfunktion kann eine Überarbeitung durch den Ersteller auslösen.
	räumliche und zeitliche Flexibilität	Die Algorithmen können mit unterschiedlichen Untersuchungsräumen und -zeiträumen agieren.
	Vollständigkeit	Die Bewertung des Betriebskonzepts erfolgt anhand der Einschwingdauer. Die Bewertungen des Verkehrskonzepts und des Störfallprogramms erfolgt anhand des entwickelten Bewertungssystems.
	Operationalität/geringe Rechenzeit	Die betrieblichen Module fokussieren sich auf die bekannten Verspätungsursachen im Störfall. Verkehrliche Module begrenzen nach Möglichkeit den Suchraum, oder arbeiten hierarchisch und verwenden zudem bereits ermittelte Ergebnisse weiter um Wiederholungen zu vermeiden.
b2	*Einschwingfähigkeit*	Modul 4 & 5.
	Ermöglichung einer betrieblichen Stabilität/ Funktionsfähigkeit	Modul 1 - 3.
	schnelle Stabilität	Modul 5.
	logische Konsistenz	Ein Zug kann nur eine (angepasste) Maßnahme erhalten, sodass keine widersprüchliche Planung entsteht.
c2	*Anleitung*	Die Prüf- und Bewertungsergebnisse werden so erzeugt, dass sie bei Implementierung in beliebiger Form abgebildet und dargestellt werden können.
	Einlegen von Einzelmaßnahmen	Die Aufgabe der Konzeption der einzelnen betrieblichen Maßnahmen verbleibt beim Ersteller. Die Algorithmen führen diese dann in Modul 2 und 3 an Knoten und Kanten für die Überprüfung der Funktionsfähigkeit zusammen.

d2	*automatisiert*	Der Ersteller muss keine Berechnungen eigenständig vornehmen. Alle Eingaben die nötig sind, können bei der Planung der Maßnahme abgefragt werden. In Einzelfällen werden dem Ersteller Entscheidungen überlassen, da sie sich aufgrund ggfs. unterschiedlicher Zielsetzungen nicht verallgemeinern lassen. Dabei kann er mit Informationen bei seiner Entscheidung unterstützt werden.
	Objektivität	Die Bewertung erfolgt anhand einer Zielfunktion.
	Auswahlmerkmale	Modul 5 ermittelt eine mittlere Einschwingdauer anhand derer abgeschätzt werden kann, ob es sinnvoll ist das SFP auszurufen.
	abweichende Betriebseigenschaften	Modul 1 - 5.
	Allgemeingültigkeit des Ansatzes	Die Bewertung der betrieblichen Maßnahmen ist, nicht nur in Sparten des SPNV oder lediglich für eingeschränkte Situationen, sondern grundsätzlich anwendbar.
	Auslösung einer interaktiven Rückkopplung	Die integrierte Planung berücksichtigt sowohl Betrieb als auch Verkehr im SFP. Die jeweilige Bewertung anhand der Zielfunktion kann eine Überarbeitung durch Ersteller auslösen.
	Reproduzierbarkeit	Bewertung anhand von Zielfunktionen.
	Quantifizierbarkeit	Bewertung anhand von Zielfunktionen.
	situationsabhängige Modellierung	Unterscheidung der Verbindungskonflikte in stabiler und Einschwingphase.
e2	*automatisiert*	Module 6 - 9.
	Realisierbarkeit	Module 7 und8.
	Eignung	Entwicklung eines konsistenten Bewertungssystem zur Wahrnehmung des Angebots durch den Fahrgast
	Individualisierung	Die Alternativensuche in Modul 7 arbeitet konflikt- und somit fahrgastspezifisch basierend auf den Verbindungskonflikten aus Modul 6.
	kostenneutral	Modul 7 schließt verkehrliche Maßnahmen mit zusätzlichen Kosten für den Fahrgast aus.
	Nachvollziehbarkeit	Individuelle Konfliktlösungen aus Modul 7.
	praktische Relevanz	Machbarkeitsprüfung in Modul 7.

	Vollständigkeit	Fahrgäste mit einem Verbindungskonflikt, sowohl gelöst als auch ungelöst, sind Bestandteil in der Bewertung die sowohl für die stabile als und Einschwingphase durchgeführt wird.
	Engpassvermeidung	Modul 8 Submodul 3.
	Lenkungsmöglichkeit	Basierend auf dem Verkehrskonzept können Kommunikationsmaßnahmen erstellt werden.
	logische Konsistenz	Ein Fahrgast und sein Verbindungskonflikt werden entweder einer kollektiven oder einer individuellen Lösung zugeordnet.
f1	*Anleitung – zusätzliche Maßnahmen*	Der Ersteller muss keine Berechnungen eigenständig vornehmen. Alle Eingaben die nötig sind, können bei der Planung der Maßnahme abgefragt werden. In Einzelfällen werden dem Ersteller Entscheidungen überlassen, da sie sich aufgrund ggfs. unterschiedlicher Zielsetzungen nicht verallgemeinern lassen. Dabei kann er mit Informationen bei seiner Entscheidung unterstützt werden.
g2	*Objektivität*	Die Bewertung erfolgt anhand einer Zielfunktion.
	Kundenorientierung/Akzeptanz	Entwicklung eines konsistenten Bewertungssystems zur Wahrnehmung des Angebots durch den Fahrgast.
	Auslösung einer interaktiven Rückkopplung zum Betriebskonzept	Die integrierte Planung berücksichtigt sowohl Betrieb als auch Verkehr im SFP. Die jeweilige Bewertung anhand einer Zielfunktion kann eine Überarbeitung durch den Ersteller auslösen.

Aus den Anforderungen konnten alle wesentlichen Design-Entscheidungen hergeleitet werden. Da die einzelnen Anforderungen i. d. R. mehrere Module der Systemarchitektur betreffen, wurde auf diese Weise zudem die Konsistenz der Herangehensweise und der Algorithmen über die verschiedenen Module hinweg erzielt. Die gezielte mehrmalige Verwendung der gleichen Algorithmen – insbesondere für die Bewertung von Alternativen – fördert die zielkonforme einheitliche kundenorientierte Bewertung eines Störfallprogramms in Modul 10.

8.3 Erkenntnisse und Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten

Das Anwendungsbeispiel macht deutlich, dass die verwendeten Grenzwerte für den Belegungsgrad zu streng sind. Dies kann dazu führen, dass typischerweise genutzte und erfahrungserprobte Maßnahmen durch das System abgelehnt werden. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass dies die Nutzerakzeptanz stark einschränken würde. Aktuell wird daher eine Überbietung der (teil-) automatisierten Bewertung durch den Ersteller vorgesehen. Besser im Sinne der Unterstützung des Erstellers wäre es, wenn angepasste Grenzwerte in den Algorithmen zur (Teil-)Automatisierung Berücksichtigung finden könnten.

Hierzu mögliche weitere Arbeiten im Forschungsbereich wären bspw. die Kalibrierung der Grenzwerte für Störfalle in Nahverkehrssystemen, bspw. anhand von Datenanalysen zu bisherigen Störfallen, verwendeten dispositiven Vorgehensweisen, Belegungsgraden und Verspätungen. Zudem könnte eine Übertragung und Anpassung von Kriterien bestehender Robustheitsbewertungen im Fahrplan für Strecken, die aktuell bereits oberhalb der Grenzwerte betrieben werden, wie bspw. S-Bahn-Stammstrecken, geprüft werden.

Weiterhin kann die Verwendung von pauschalen Werten für im Störbetrieb spezifische Variablen, wie bspw. den Wendezuschlag, verfeinert werden. Eine Abkehr vom Maximalansatz würde auch auf eine Verbesserung der Nutzerakzeptanz hinwirken. Hierbei ist eine Verfeinerung und Unterscheidung, bspw. durch Staffelung von Werten anhand von Sensitivitätsanalysen, vorstellbar.

Die Vorgabe von Zielfunktionen für die Widerstandsbewertung kann für den Ersteller sehr herausfordernd sein, da dies im Gegensatz zur Einschwingdauer nicht zum alltäglichen Dispositionsgeschehen gehört. Hierbei können weitere Arbeiten zur Beschreibung der Widerstandserhöhung und deren Bemessung zur Aufrechterhaltung einer attraktiven Wahrnehmung hilfreich sein. Benötigt wird dabei ein klarer Bezug zu einem Störfall. Hierzu könnten bspw. in der Vergangenheit angewendete Störfallprogramme auf ihre Widerstandserhöhung im Abgleich mit Fahrgastreaktionen untersucht werden.

Die Arbeit unterscheidet sich von bisherigen Ansätzen durch:

- eine (teil-)automatisierte Bewertung für die betriebliche Planung einer Störung,
- eine (teil-)automatisierte Erstellung und Bewertung für die verkehrliche Planung einer Störung,
- die integrierte Planung eines kundenorientierten Störfallprogramms aus Betriebskonzept und Verkehrskonzept und
- das Auflösen des Zielkonflikts durch diese Bewertung eines kundenorientierten Störfallprogramms unter Berücksichtigung von Betrieb und Verkehr in geplanter stabiler und Einschwingphase.

Dabei ist es gelungen, einen Bewertungsmaßstab zu entwickeln, der die Angebotsveränderungen sowie deren Wahrnehmung durch die Fahrgäste sehr umfassend beschreibt.

8.4 Ausblick

Trotz der unter Abschnitt 7.3 genannten Möglichkeiten für weitere Forschungsarbeiten zur Verbesserung der Planung von Störfallprogrammen ist nach Schaffung einer Datenbasis zur Infrastruktur und den Fahrgastströmen eine Implementierung möglich, um den hohen Nutzen der aus den praktischen Anforderungen entwickelten Forschungsergebnisse für die Praxis zu heben. Perspektivisch besteht darüber hinaus die Möglichkeit, die Algorithmen zu erweitern, um die Maßnahmen ähnlicher Störfallprogramme zu harmonisieren und somit in der Wahrnehmung der Reisenden die Zuverlässigkeit zu verbessern und ein gleichbleibendes Mobilitätsverhalten für den Fahrgast auch bei verschiedenen Störfällen zu ermöglichen.

Die Arbeit kann einen direkten Beitrag zur Erleichterung der Planung von kundenorientierten Störfallprogrammen leisten, wodurch perspektivisch ein verbessertes Störfallmanagement ermöglicht werden kann, um so Attraktivität und Zuverlässigkeit in der ÖPNV-Angebotswahrnehmung in Gänze zu verbessern.

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Komponenten des Systems Bahn (eigene Darstellung) 1
Abbildung 2-1: Überblick über die Zeitverbräuche innerhalb des Planungs- und Betriebsdurchführungsprozesses nach DB Netz AG (2008b, S. 4) 8
Abbildung 2-2: Sperrzeitanteile eines durchfahrenden Zuges nach DB Netz AG (2008b, S. 12) 9
Abbildung 2-3: Gliederung der Forschungsbereiche im Störfallmanagement (eigene Darstellung)..... 19
Abbildung 2-4: Phasen einer Betriebsstörung mit Störfallprogramm nach Chu et al. (2012, S. 48) 20
Abbildung 2-5: Überblick der zusätzlichen Belegungszeiten im Störungsfall (Chu 2014, S. 67) 25
Abbildung 2-6: Übersicht der zu ermittelnden Zeiten für eine positive SFP-Wende (eigene Darstellung) 26
Abbildung 2-7: Prozess zum Entwurf funktionsfähiger Störfallprogramme (Chu 2014, S. 143) 30
Abbildung 2-8: Übersicht des Verkehrsangebots nach Schiefelbusch (2018) 32
Abbildung 2-9: Strategien des Verkehrsmanagements nach Boltze und Vu (2016, S. 207) 33
Abbildung 3-1: Systembild der Arbeit (eigene Darstellung) 45
Abbildung 3-2: übergeordnete Systemarchitektur der Arbeit (eigene Darstellung) 50
Abbildung 3-3: Interaktiver Prozess der Störfallprogrammplanung (eigene Darstellung) 50
Abbildung 3-4: Aufbau und Vorgehen zur Ermittlung der Anforderungen (eigene Darstellung)..... 52
Abbildung 3-5: Vorgehensweise im inhaltlichen Kern der Arbeit (eigene Darstellung)..... 67
Abbildung 3-6: Infrastrukturknoten und -kanten (eigene Darstellung) 69
Abbildung 3-7: Verkehrsknoten und -kanten (eigene Darstellung) 70
Abbildung 3-8: Aktionsknoten und -kanten (eigene Darstellung) 70
Abbildung 3-9: Planungsreferenzen und wichtige Begriffe für Regelbetrieb, stabile und Einschwingphase (eigene Darstellung) 71
Abbildung 3-10: Eigenschaften einer Reisekette (eigene Darstellung) 73
Abbildung 4-1: Module zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der stabilen Phase (eigene Darstellung) 80
Abbildung 4-2: Module zur Überprüfung der Qualität der Einschwingphase (eigene Darstellung) 83
Abbildung 4-3: Übersicht der zu ermittelnden Zeiten für eine Umleitung (eigene Darstellung) 87
Abbildung 4-4: Vorgehensweise von Modul 1 (eigene Darstellung) 91
Abbildung 4-5: mögliche Abläufe der Vorbereitungsarbeiten vor einer Abstellung (1 Tf, 1 Fahrzeugebene) (eigene Darstellung) 93
Abbildung 4-6: Algorithmus für die Prüfung der verkehrlichen Machbarkeit von Maßnahmen (eigene Darstellung) 98
Abbildung 4-7: Darstellung der zur Berechnung anzunehmenden Einfädelsituation (eigene Darstellung) 105
Abbildung 4-8: Berechnung für planmäßige Wartezeiten durch Ein- und Ausfädeln sowie der Belegungszeiten von Umleitungen (eigene Darstellung) 106
Abbildung 4-9: Beispiel zur Bestimmung der möglichen Fahrttypen (eigene Darstellung) 109
Abbildung 4-10: Vorgehensweise zur Feststellung von Ausschlusskriterien für das Einschwingen (eigene Darstellung) 113

Abbildung 4-11: Beispiel für Eingaben bei Anwendung der Maßnahme Ausfall für die linke Seite der Störung (eigene Darstellung) 115
Abbildung 4-12: Übersicht der Schritte zur Ermittlung der mittleren Auslegedauern zum Erreichen der geplanten Zugzahl (eigene Darstellung) 119
Abbildung 4-13: Modulsystem für die Bewertung der Einschwingqualität (eigene Darstellung) 134
Abbildung 4-14: Modulsystem zur Bewertung des Betriebskonzepts (eigene Darstellung) 141
Abbildung 5-1: Baumstruktur der Ermittlung einer Verbindung einer Relation (eigene Darstellung) 144
Abbildung 5-2: Module zur Erstellung und Bewertung eines Verkehrskonzepts (eigene Darstellung) 148
Abbildung 5-3: Auswirkungen einer Störung im betrachteten System (eigene Darstellung) 157
Abbildung 5-4: Übersicht der Verbindungskonflikterkennung (eigene Darstellung) 162
Abbildung 5-5: Vorgehen zur Bestimmung von Konfliktlösungsalternativen (eigene Darstellung) 172
Abbildung 5-6: Algorithmus zur Konfliktlösungsalternativensuche (eigene Darstellung) 175
Abbildung 5-7: Vorgehensweise zur Verkehrskonzepterstellung (eigene Darstellung) 182
Abbildung 5-8: Erschließungsfunktionen (eigene Darstellung) 185
Abbildung 5-9: Beispiel der möglichen Schleifen einer Fahrgaststromermittlung (eigene Darstellung) 188
Abbildung 5-10: Bewertungsbestandteile der Verkehrskonzeptbewertung (eigene Darstellung) 192
Abbildung 5-11: Input und Vorgehen der Verkehrskonzeptbewertung (eigene Darstellung) 201
Abbildung 5-12: zu berücksichtigende Widerstandsveränderungen aller Verbindungskonflikte in der stabilen Phase (eigene Darstellung) 202
Abbildung 5-13: Arbeitsschritte zur Verkehrskonzeptbewertung (eigene Darstellung) 203
Abbildung 6-1: zu berücksichtigende Widerstandsveränderungen aller Verbindungskonflikte in der Einschwingphase (eigene Darstellung) 212
Abbildung 6-2: kundenorientierte Bewertung eines Störfallprogramms (eigene Darstellung basierend auf Chu et al. (2012, S. 48)) 212
Abbildung 7-1: Darstellung des für das Anwendungsbeispiel angenommenen Störfallprogramms (eigene Darstellung und inhaltliche Adaption basierend auf Angaben von DB Regio AG) 217
Abbildung 7-2: ergänzter Auszug des Schnellbahnliniennetzes in Frankfurt des RMV (RMV 2022) .. 233
Abbildung 8-1: Modulsystem zur Planung von kundenorientierten Störfallprogrammen (eigene Darstellung) 239

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: vorgeschlagene Grenzwerte nach International Union of Railways (2013, S. 29 f.) 11
Tabelle 2-2: betriebliche Maßnahmen nach DB Regio AG (2013b, S. 38) 17
Tabelle 2-3: verkehrliche Maßnahmen nach DB Regio AG (2013b, S. 38) 40
Tabelle 4-1: relevanter veränderter Zeitbedarf differenziert nach Fahr-, Halte- und Belegungszeiten (eigene Darstellung) 86
Tabelle 4-2: in Modul 1 bestimmbare Veränderungen der Determinanten der Mobilität nach Birn und Schäfer (2016, S.75) durch eine betriebliche Maßnahme (eigene Darstellung) 90
Tabelle 4-3: Überprüfung von Zügen mit Maßnahmen mit negativer Wende (eigene Darstellung) 97
Tabelle 4-4: Prüfkriterien für die von Maßnahmen betroffenen Netzelemente (Zusammenfassung aus Abschnitt 2.4 entsprechend notierter Quellen) 103
Tabelle 4-5: zusätzliche Belegungen und Belegungszeiten durch die Maßnahmenarten (eigene Darstellung) 108
Tabelle 4-6: Berechnung der Belegungszeiten einer Zugfahrt entsprechend dem Fahrttyp (eigene Darstellung) 110
Tabelle 4-7: Beispielangaben bei einer Betriebsstelle zur Abstellung (eigene Darstellung) 115
Tabelle 4-8: Beispielangaben bei zwei Betriebsstellen zur Abstellung (eigene Darstellung) 115
Tabelle 4-9: Beispielangaben bei zwei Betriebsstellen zur Abstellung mit abweichendem Wendebahnhof (eigene Darstellung) 115
Tabelle 5-1: Eigenschaften der Reise für die Widerstandsbewertung (eigene Darstellung) 150
Tabelle 5-2: Kategorisierung der Verbindungskonflikte (eigene Darstellung) 168
Tabelle 6-1: Vorgehen für die gesamthafte Bewertung eines Störfallprogramms (eigene Darstellung) 211
Tabelle 7-1: betriebliche Maßnahmen der Linien im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung) 216
Tabelle 7-2: Ermittlung der Wenden und der zugehörigen Zeiten für die Linien S3 und S4 (eigene Darstellung) 218
Tabelle 7-3: Ermittlung der mittleren Wartezeit auf Einfädeln und finale Überprüfung der Umleitung (eigene Darstellung) 219
Tabelle 7-4: Überprüfung der Belegung in Frankfurt Hauptbahnhof tief (eigene Darstellung) 220
Tabelle 7-5: mögliche Abstell- und Wendebahnhöfe für die S 4 (eigene Darstellung) 220
Tabelle 7-6: Standorte der den Umläufen zugeordneten Züge bei Störungseintritt zur jeweiligen Fahrplanminute m (eigene Darstellung) 222
Tabelle 7-7: Fahrtdauer der Rückführung der gelben Züge nach SFP Ausrufung an die im SFP geplanten Orte (eigene Darstellung) 223
Tabelle 7-8: mittleren Auslegedauer für den SEB Langen (eigene Darstellung) 224
Tabelle 7-9: Teile der mittleren Auslegedauer für den SEB FFM Hauptbahnhof tief (eigene Darstellung) 224
Tabelle 7-10: jeweilige Standorte der Fahrzeuge der Linien 3 und 4 bei Störungseintritt zu den Fahrplanminuten m (eigene Darstellung) 225
Tabelle 7-11: Verspätungsentwicklung der Züge mit Verspätung durch die Ermittlungs- und Entscheidungsphase (eigene Darstellung) 226

Tabelle 7-12: Verspätungsentwicklung der Züge mit Verspätung durch die zusätzliche Bereitstellung (eigene Darstellung) 227
Tabelle 7-13: Ermittlung der mittleren Einschwingdauer für den Störungseinflussbereich Langen (eigene Darstellung) 228
Tabelle 7-14: Linien des betrachteten S-Bahnnetzes (eigene Darstellung) 228
Tabelle 7-15: Unterteilung in Verbindungsabschnitte (eigene Darstellung) 229
Tabelle 7-16: Untersetzung der Verbindungsabschnitte mit Verkehrsknoten und -kanten (eigene Darstellung) 229
Tabelle 7-17: Ermittlung von zStör für Zug 4711 der Linie S3 (eigene Darstellung) 230
Tabelle 7-18: Abgleich der Verkehrskanten von zStör und xa (eigene Darstellung) 230
Tabelle 7-19: im Regelbetrieb geplante Verbindung (eigene Darstellung) 231
Tabelle 7-20: ermittelte Konfliktlösungsalternativen für den betrachteten Verbindungskonflikt (eigene Darstellung) 231
Tabelle 7-21: Bewertung der ermittelten Konfliktlösungsalternativen (eigene Darstellung) 232
Tabelle 7-22: Bewertung ungelöster Konflikte (eigene Darstellung) 235
Tabelle 7-23:Verbindung im Regelbetrieb und der stabilen Phase (eigene Darstellung) 235
Tabelle 7-24: zusätzlicher Verbindungskonflikt in der Einschwingphase (eigene Darstellung) 236
Tabelle 7-25: vereinfachte Konfliktlösung in der Einschwingphase (eigene Darstellung) 236
Tabelle 7-26: Bewertung des zusätzlichen Verbindungskonflikts in der Einschwingphase (eigene Darstellung) 236
Tabelle 8-1: Erfüllung der primär geclusterten Anforderungen (eigene Darstellung) 240

Abkürzungsverzeichnis

⌀ ΔW	durchschnittliche Widerstandsveränderung
⌀ $\Delta w_{einschwing}$	durchschnittliche Widerstandsveränderung in der Einschwingphase
⌀ Δw_{stabil}	durchschnittliche Widerstandsveränderung in der stabilen Phase
Δ_{Umlauf}	Verspätungsabbau pro Umlauf
ΔW_x	Widerstandsveränderung für einen Verbindungskonflikt x
λ	Ankunftsrate
μ	Bedienungsrate
ρ	Belegungsgrad
ρ_{UIC}	Belegungsgrad nach UIC-Kodex 406
$\rho_{Bel,s,i}$	Belegungsgrad eines Gleises i im Szenario s
a	Parameter zur verstärkten Gewichtung des zweiten Umstieges
Alt_y	Menge der alternativen Verbindungen y für einen Konflikt x
Ap_x	Anschlusspunkt
b	Parameter zur verstärkten Gewichtung ab dem dritten Umstieg
bm	betriebliche Maßnahme
e	Parameter für den Anteil der Ausstelldauer an der vorgegebenen Einschwingdauer
e^t	subjektive Empfindung des Indikators t
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EP_x	Korridorendpunkt
ESTW	Elektronisches Stellwerk
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FFM	Frankfurt am Main
$Fg_{einschwing}$	Fahrgäste mit Verbindungskonflikt in der Einschwingphase
Fg_{stabil}	Fahrgäste mit Verbindungskonflikt in der stabilen Phase
Fg_x	Fahrgäste des Verbindungskonflikts x
f_{ungl}	Faktor für ungleiche Verteilung der Fahrgäste auf die Türen
gKantA	gestörte Aktionskante
gKantV	gestörte Verkehrskante
gKnotA	gestörter Aktionsknoten
gKnotV	gestörter Verkehrsknoten
Hbf	Hauptbahnhof
i	Index für das untersuchte Gleis
j	Fahrttyp
$j_{Weiterfahrt}$	Fahrttyp j bei Weiterfahrt
j_{Wende}	Fahrttyp j bei Wende

KantA	Aktionskante
KantV	Verkehrskante
KLA n	Konfliktlösungsalternative einer Hierarchieebene
KLAn_y	Menge akzeptabler Alternativen
k_{Fg}	Sitz und Stehplatzkapazität einer Einheit (Wagen oder Zug)
KnotA	Aktionsknoten
KnotV	Verkehrsknoten
KVgelöst_x	Menge der gelösten Verbindungskonflikte
KV_ungelöstx	Menge der ungelösten Verbindungskonflikte
KVunverändert_x	Menge der Verbindungskonflikte mit unveränderter Verbindung
KV_x	Menge der gestörten Verbindungskonflikte
l_{Zug}	Länge des Zuges
m	Fahrplanminute zu der die Störung eintritt
M_m	maßgebender Wert zur Fahrplanminute m
MIV	motorisierter Individualverkehr
n	Zuganzahl auf der betrachteten Kante
n	Anzahl der vorhandenen Folgefälle F
n	Anzahl der verkehrenden Linien L
N	Anzahl der verfügbaren Wendegleise i und
n_H	Anzahl der Halte
$n_{Tür}$	Anzahl der Türen einer Einheit (Wagen oder Zug)
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
ÖPFV	öffentlicher Personenfernverkehr
p_{ij}	relative Häufigkeit des Zugfolgefalls Zug i vor Zug j
$q_{Besetzung}$	Besetzungsgrad der Sitz- und Stehplätze
r	Anzahl der Ebenen des Zugs
s	Index für die Anzahl an Szenarien
SEB	Störungseinflussbereich
SFP	Störfallprogramm
$T_{Abfahrt,min}$	frühestmöglicher Abfahrtszeitpunkt
$T_{ab,kVx}$	geplanter Abfahrtszeitpunkt der konfliktären Verbindung
$T_{Abfahrt,plan,n,vH}$	geplante Abfahrtszeit des folgenden Fahrzeugs am vorherigen Haltepunkt
$T_{Abfahrt,plan,SFP}$	im Störfallfahrplan geplante Abfahrtszeit
$T_{Abfahrt,SFP}$	Abfahrtszeitpunkt nach Wende im Störfallfahrplan
$T_{Abfahrt,Wende}$	Abfahrtszeitpunkt am Wendebahnhof im Fahrplan des Regelbetriebs
$T_{Ankunft}$	Ankunftszeit am Endbahnhof
$T_{Ankunft,SFP}$	Ankunftszeit am (SFP-)Wendebahnhof im Störfallfahrplan

$T_{Ankunft,Ende}$	tatsächliche Ankunftszeit am Wendebahnhof nach neg. Wende
$T_{Ankunft,Wende}$	Ankunftszeitpunkt am Wendebahnhof im Fahrplan des Regelbetriebs
$T_{an,lBST,Regel}$	Ankunftszeit an dem letzten Bahnhof vor Verlassen des Regelwegs
$T_{ab,lBST,Regel}$	Abfahrtszeit an dem letzten Bahnhof vor Verlassen des Regelwegs
$T_{Ankunft,ausleg}$	Ankunftszeitpunkt am Auslegeort im Fahrplan des Regelbetriebs
$T_{Ankunft,n}$	Ankunftszeitpunkt des folgenden Fahrzeugs am SFP-Wendebahnhof
$T_{Ankunft,plan,n}$	Ankunftszeit nach Fahrplan des Regelbetriebs durch den folgenden Zug
$T_{Ankunft,plan,SFP}$	Ankunftszeit im SFP-Wendebahnhof nach Fahrplan des Regelbetriebs
$T_{gewAbfahrt}$	vom Ersteller gewählte Abfahrtszeit
$T_{gewAbfahrt,n-1}$	gewählte Abfahrtszeit des vorderen/ersten Zuges
$T_{frühmöglAbfahrt}$	frühestmögliche Abfahrtszeit nach Wende
$T_{SFP,Anwend}$	vom Ersteller anzugebende typische Anwendungsdauer des SFP
$T_{SFP,Beginn}$	Zeitpunkt der SFP-Ausrufung
$T_{SFP,Ende}$	Ende der Anwendung des Störfallprogramms (Beginn der Rückführung)
$T_{Stör}$	Uhrzeit des Störungseintritts
t	Widerstandsindikator bzw. reale Größe der Reisezeitkomponente
$t_{abrü}$	Zeitbedarf für das Abrüsten
$t_{AD,m,f}$	Ausstelldauer der Fahrt f zu Fahrplanminute m
t_{ADSEB}	mittlere Ausstelldauer für einen Störungseinflussbereich
t_{ai}	Annäherungsfahrzeit
t_{Am}	mittlerer Ankunftsabstand
$t_{Am,Fn}$	Ankunftsabstand des Folgefalls F_n
$t_{Ausstieg}$	Dauer für den Ausstieg pro Person
t_B	Belegungszeit
$t_{B,i}$	Gesamtbelegungszeit des Gleises i im betrachteten Knoten nach Chu (2014)
$t_{B,f}$	Belegungszeit einer Fahrt
t_{Bm}	mittlere Bediendauer
$t_{Bm,L}$	Bediendauer der Linie L
t_{DG}	Zeitbedarf für den Durchgang des Tf
t_{ED}	mittlere Einschwingdauer
$t_{ED,m,SEB}$	Einschwingdauer zur Fahrplanminute im betrachteten Störungseinflussbereich
t_{EE}	Dauer der Ermittlungs- und Entscheidungsphase
t_f	Fahrzeit im Blockabschnitt
t_F	Fußwegezeiten des Zu- oder Abgangs
t_{fa}	Fahrstraßenauflösezeit
t_{Fahrt}	Fahrzeiten
$t_{Fahr,ausleg}$	Fahrzeit zum Auslegeort

$t_{Fahr,Rest1}$	verbleibende Fahrzeit zum SFP-Wendebahnhof
$t_{Fahr,Rest2}$	Fahrzeit vom SFP-Wendebahnhof zum Auslegeort
$t_{Fahr,Ul}$	Fahrzeit der Umleitung
$t_{Fahr,UlEnde}$	Fahrzeit vom Ende der Umleitung bis zum Wendebahnhof auf dem Regellaufweg
$t_{Fahr,SFP}$	Fahrzeit zwischen den Wendebahnhöfen im Störfallfahrplan
$t_{FaRiWe,ges}$	Fahrtrichtungwechsel
t_{fb}	Fahrstraßenbildezeit
$t_{FgAusstieg}$	Zeitbedarf für Ausstieg aller Fahrgäste
$t_{FplMitteilung}$	Zeitbedarf für die Fahrplanmitteilung
t_{ges}	durch Störungseintritt und anschließend entstehende Ur- oder Zusatzverspätung
$t_{Halt,ges}$	Gesamthaltedauer
$t_{Halt,i}$	Haltezeit an dem Halt i auf der Umleitung
$t_{Halt,lBst,Regel}$	Haltezeit an dem letzten Bahnhof vor Verlassen des Regelwegs
$t_{minWende,Ril}$	Mindestwendedauer nach DB Regio AG (2010b); zu unterscheiden nach Zuglänge und Anzahl der beteiligten Triebfahrzeugführer
$t_{minWende,SFP}$	Mindestwendedauer am gewählten (SFP-)Wendebahnhof
$t_{puenktl}$	Pünktlichkeitsgrenze
t_r	Räumfahrzeit
$t_{reineFahrzeit,ges}$	reine Fahrzeit
$t_{reinWeg}$	reine Wegezeit des Tf auf dem Bahnsteig
t_s	Sichtzeit
$t_{SFPUmleitung}$	Fahrtdauer für eine Umleitungsnutzung
$t_{SonderZN}$	Zeitbedarf für Vergabe der Sonderzugnummer
t_{Sp}	Sperrzeit
$t_{Sp,Ausfahrt,n-1}$	Sperrzeit für die Ausfahrt durch den vorderen/ersten Zug
$t_{Sp,Einfahrt,n-1}$	Sperrzeit für die Einfahrt durch folgenden Zug
t_U	Untersuchungszeitraum
t_{Un}	Umsteigezeit je Umstieg n
t_v	vor der Störung bestehende Verspätung
$t_{vorgebED}$	vorgegebene Einschwingdauer
$t_{vZ,1,m}$	verbleibende Fahrzeit des ersten Zuges bei Störungseintritt zu Fahrplanminute m
$t_{VB,Wende}$	Vorbereitungszeit für Abstellung bei Wende
$t_{vZ,n,m}$	verbleibende Fahrzeit des folgenden Zuges n bei Störungseintritt zu Fahrplanminute m
$t_{W,Bstg}$	Wartezeiten, die am Bahnsteig der Einstiegshaltestelle geduldet werden müssen
$t_{W,Fzg}$	Wartezeiten, die in einem verspäteten Fahrzeug geduldet werden müssen
$t_{W,EE,1}$	Verspätung des ersten Zuges nach der Ermittlungs- und Entscheidungsphase

$t_{W,EE,n}$	Verspätung des folgenden Zuges n nach der Ermittlungs- und Entscheidungsphase
$t_{Warten,ges}$	Warten aus Ein- und Ausfädeln bzw. auf dem Kreuzen von durchgehenden Hauptgleisen
$t_{w,Einfahrt,n}$	Wartezeit auf Einfahrt des folgenden Fahrzeugs
$t_{w,nachSFPWende}$	Verspätung nach der Wende am SFP-Bahnhof
t_{Wm}	mittlere Wartezeit
$t_{Wm,Ausfädeln}$	mittlere Wartezeit auf Ausfädeln
$t_{Wm,Einfädeln}$	mittlere Wartezeit auf Einfädeln
$t_{w,planr,SFP}$	planmäßige Wartezeit im Störfall
$t_{w,plan,SFP1}$	planmäßige Wartezeit bei der ersten Wende am SFP-Bahnhof
$t_{w,plan,SFP2}$	planmäßige Wartezeit bei der zweiten Wende am SFP-Bahnhof
$t_{Wendepuffer}$	Wendepuffer
$t_{Wendezuschlag,SFP}$	empirisch ermittelter Wendezeitzuschlag nach Chu (2014); nur bei Wenden an SFP-Bahnhöfen anzusetzen
$t_{w,vH}$	Verspätung bei Abfahrt am vorherigen Haltepunkt
$t_{Zu,i}$	einmaliger Störungszuschlag im Szenario s zur Belegungszeit des Gleises i
V_B	Variationskoeffizient
v_{geh}	Gehgeschwindigkeit
vKantA	veränderte Aktionskante
vKantV	veränderte Verkehrskante
vKnotA	veränderter Aktionsknoten
vKnotV	veränderter Verkehrsknoten
WE	Widerstandseinheiten
w_t	Widerstand je Reisezeitkomponente
w_U	Widerstand der Umstiege
xa	Verbindungsabschnitt
$xa_{gestört}$	Verbindungabschnitt
x_L	Anzahl des Auftretens der Bedienung der Linie L im Zeitraum t_U
$x_{t_U,F}$	Anzahl des Auftretens der Ankunft des Folgefalls F im Zeitraum t_U
y	Verbindungsalternative
z	Zug
$z_{s,j}$	Anzahl der Zugfahrten eines Fahrttyps j innerhalb des Szenarios s
zStör	Störbereich eines Zuges
$\overline{z}$	mittlere Mindestzugfolgezeit auf der betrachteten Kante
z_{ij}	Mindestzugfolgezeit vorausfahrender Zug i und nachfolgender Zug j
ZB	Zeitbewertungsfaktor
ZB_t	Zeitbewertungsfaktor der Reisezeitkomponente

z_{UIC}	Zusatzzeitrate

Literaturverzeichnis

Albrecht, A. R./Panton, D. M./Lee, D. H. (2013). Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using Problem Space Search. Computers & Operations Research (3), 703–712.

Ansorge, Ulrich/Leder, Helmut (2017). Wahrnehmung und Aufmerksamkeit. 2. Aufl. Wiesbaden, Springer.

Ben-Akiva, Moshe/Bierlaire, Michel (1999). Discrete Choice Methods and their Applications to Short Term Travel Decisions. In: R. W. Hall (Hg.). Handbook of Transportation Science. International Series in Operations Research & Management Science. 23. Aufl. Boston, Springer, 5–33.

Birn, Kristina/Schäfer, Frank (2016). Verkehrsmärkte. In: Dietmar Lübke (Hg.). Das System Bahn, 73–108.

Boltze, Manfred/Gillich, Kim (2017). Reisendenstromlenkung Teil 2017: Grundlagen Maßnahmenakzeptanz. Abschlussbericht, unveröffentlicht. Technische Universität Darmstadt.

Boltze, Manfred/Mörner, Moritz von/Wilke, Kim/Jung, Christof (2020). Lenkung von Reiseströmen im ÖPNV. Grundlagen zur Nachfragebeeinflussung. Der Nahverkehr (9), 53–59.

Boltze, Manfred/Vu, Anh Tuan (2016). Approaches to Achieve Sustainability in Traffic Management. Sustainable Development of Civil, Urban and Transportation Engineering Conference. Procedia Engineering (142), 205–212.

Brauner, Anna-Katharina (2016). Zusammenfassung der Expertengespräche zu kundenorientierten Störfallprogrammen bei DB Regio. Unveröffentlicht.

Cacchiani, Valentina/Huisman, Dennis/Kidd, Martin/Kroon, Leo/Toth, Paolo/Veelenturf, Lucas/Wagenaar, Joris (2014). An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling. Transportation Research Part B: Methodological 63, 15–37. https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.01.009.

Chu, Friederike (2014). Beurteilung von Störfallprogrammen anhand ihres Einschwingverhalten. am Beispiel des Schienenpersonennahverkehrs. Dissertation. Darmstadt, TU Darmstadt.

Chu, Friederike/Fornauf, Leif (2011). Vom Katastrophen- und vom dynamischen Straßenverkehrsmanagement lernen – Störfallprogramme bei Betriebsstörungen im Schienenverkehr. In: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Verband deutscher Verkehrsunternehmen (Hg.). HEUREKA '11. Optimierung in Verkehr und Transport, HEUREKA '11, 16./17. 03. 2011.

Chu, Friederike/Fornauf, Leif/Wolters, Achim/Böhme, Aline (2012). Methode zur Erarbeitung von Störfallprogrammen. Deine Bahn (7), 44–48.

Chu, Friederike/Oetting, Andreas (2013a). Quantifying Infrastructure Capacity Consumption while Transitioning to Steady Operations during Disruptions in Passenger Rail Transport. In: IAROR - International Association of Railway Operations Research (Hg.). 5th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen2013), Kopenhagen, 13. - 15. Mai 2013.

Chu, Friederike/Oetting, Andreas (2013b). Towards Steady Operations during Disrupted Situations in Passenger Rail Transport 2013.

Corman, Francesco/D'Ariano, Andrea/Pranzo, Marco/Hansen, Ingo A. (2011). Effectiveness of dynamic reordering and rerouting of trains in a complicated and densely occupied station area. Transportation Planning and Technology (4), 341–362.

Crespo Materna, Arturo (2020). Dynamic and Intermodal Disruption-Management for Commuter Railway Networks. Dissertation. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt.

D'Ariano, Andrea (2008). Improving Real-Time Train Dispatching: Models, Algorithms and Applications. Delft, TU Delft.

Davies, Hilary/Walters, Megan (1998). Do all crises have to become disasters? Risk and risk mitigation. Property Management 16 (1), 5–9.

DB Fernverkehr AG (2010a). Richtlinie 615.0103. Transportleitung Personenverkehr Umgang mit Großstörungen.

DB Fernverkehr AG (2010b). Richtlinie 615.0301. Transportleitung Personenverkehr Verkehrsdisposition.

DB Netz AG (2008a). Richtlinie 405.0102. Bahnbetrieb Fahrwegkapazität Grundlagen Begriffe und Formelzeichen 2008.

DB Netz AG (2008b). Richtlinie 405.0103. Bahnbetrieb Fahrwegkapazität Grundlagen Zeitverbrauch bei Nutzung der Fahrwegkapazität 2008.

DB Netz AG (2008c). Richtlinie 405.0104. Bahnbetrieb Fahrwegkapazität Grundlagen Kenngrößen und Qualitätsmaßstäbe 2008.

DB Netz AG (2008d). Richtlinie 405.0202. Bahnbetrieb Fahrwegkapazität Grundsätze der Verfahrensweise und Methode Methoden und Tools 2008.

DB Netz AG (2008e). Richtlinie 405.0204. Bahnbetrieb Fahrwegkapazität Grundsätze der Verfahrensweise und Methode Betriebsprogramm 2008.

DB Netz AG (2009). Richtlinie 420.0212 Bahnbetrieb Betriebsleitstellen. Zusammenarbeit mit Eisenbahnverkehrsunternehmen Ausfall/Teilausfall von Zügen 2009.

DB Netz AG (2011). Richtlinie 408.1431 Abschnitt 2 Absatz 2 und 408.1432 Abschnitt 2 Absatz 2. Züge fahren Umleiten unter erleichterten Bedingungen 2011.

DB Netz AG (Hrsg.) (2008f). Richtlinie 405.0103A03. Bahnbetrieb Fahrwegkapazität Zeitverbräuche im Betriebsablauf 2008.

DB Regio AG (2010a). Richtlinie 498.2010 Bahnbetrieb Zugpersonal planen und disponieren Grundsatz 2010.

DB Regio AG (2010b). Richtlinie 49820 Bahnbetrieb Zugpersonal planen und disponieren 2010.

DB Regio AG (2013a). Richtlinie 615.0104. Transportleitung Personenverkehr Störfallprogramme anwenden.

DB Regio AG (Hrsg.) (2013b). Leitfaden zur Erstellung von Störfallprogrammen. 2. Aufl. 2013.

Defense Acquisition University Press (2001). Systems Engineering Fundamentals. Fort Belvoir Virginia.

Deroussi, Laurent (2016). Metaheuristics for Logistics. ISTE Ltd.

Dorigo, Marco/Stützl, Thomas (2004). Ant Colony Optimization. Cambridge, MIT Press.

Fahnenschreiber, Sebastian/Gündling, Felix/Keyhani, Mohammad/Schnee, Mathias (2016). A Multi-Modal Routing Approach Combining Dynamic Ride-Sharing and Public Transport. Transportation Research Procedia (13), 176–183.

Fahnenschreiber, Sebastian/Gündling, Felix/Weihe, Karsten (2019). Projekt Per Pedes Routing. Sachbereicht Teilprojekt Darmstadt.

Ferchland, Christian/Körner, Tobias (2004). Analytische Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft. ETR Eisenbahntechnische Rundschau (7/8), 499–505.

Forschungzentrum Jülich GmbH (2018-2022). CroMa - Crowd Management in Verkehrsinfrastrukturen. Online verfügbar unter http://croma-projekt.de/croma-projekt/DE/Veroeffentlichungen/veroeffentlichungen_node.html;jsessionid=39285F8F4F3AAB9084472850676DF083 (abgerufen am 10.06.2022).

Ghaemi, Nadjla (2018). Short-turning Trains during Full Blockages in Railway Disruption Management. Dissertation. TU Delft.

Ghaemi, Nadjla/Cats, Oded/Goverde, Rob M. P. (2017). Railway disruption management challenges and possible solution directions. Public Transport 9 (1), 343–364. https://doi.org/10.1007/s12469-017-0157-z.

HaCon Ingenieurgesellschaft mbH (2009). HAFAS - Der Algorithmus bei dem ganz Europa mit muss. Online verfügbar unter https://www.openpr.de/news/297486/HAFAS-Der-Algorithmus-bei-dem-ganz-Europa-mit-muss.html (abgerufen am 15.04.2022).

Hansen, Ingor Arne/Pachl, Jörn (Hg.) (2014). Railway Timetabling & Operations. Analysis · Modelling · Optimisation Simulation · Performance Evaluation. 2. Aufl. Hamburg, DVV Media Group.

Heister, Gert/Kuhnke, Jörg/Lindstedt, Carsten/Pomp, Roswitha/Schaer, Thorsten/Schill, Thomas/Schmidt, Stephan/Wagner, Norbert/Weber, Wolfgang (2006). Eisenbahnbetriebstechnologie. Bahn Fachverlag GmbH.

Hillier, Frederick/Lieberman, Gerald (2001). Introduction to Operations Research. 10. Aufl. New York, Mc Graw Hill Education.

International Union of Railways (Hrsg.) (2013). UIC Kodex 406. Kapazität. 2. Aufl. Paris 2013.

Jamshidi, Mo (Hg.) (2009). System of Systems Engineering. Innovations for the 21th Century. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.

Janecek, David/Kuckelberg, Alexander/Nießen, Nils (2012). Kapazitätsermittlung von Eisenbahnknoten und -strecken. ETR Eisenbahntechnische Rundschau (10), 30–36.

Jespersen-Groth, Julie/Potthoff, Daniel/Clausen, Jens/Huisman, Dennis/Kroon, Leo/Maróti, Gábor/Nielsen, Morten Nyhave (2009). Disruption Management in Passenger Railway Transportation. In: Ravindra K. Ahuja/Rolf H. Möhring/Zaroliagis (Hg.). Robust and Online Large-Scale Optimization. Models and Techniques for Transportation Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 399-421.

Keck, Anna-Katharina (2012). Einschwingstrategien für Störfälle in Einschwingstrategien für Störfälle in S-Bahnsystemen mit geringem Takt auf stark befahrenen Mischverkehrsstrecken. Masterthesis. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt.

Kroon, Leo/Romeijn, Edwin/Zwaneveld, Peter (1997). Routing trains through railway stations: complexity issues. European Journal of Operational Research (98), 485–498.

Kümmling, Michael (2014). Erkennung und Auswertung von signifikanten Konflikten in der Taktfahrplanung. Diplomarbeit. Dresden.

Lohse, Dieter (2011). Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 2: Verkehrsplanung. 3. Aufl. Beuth Verlag.

Louen, Conny (2013). Wirkungsabschätzung von Mobilitätsmanagement. Ansatzpunkte zur Modellierung & Ableitung von Potentialen und Wirkungen am Beispiel des betrieblichen Mobilitätsmanagements. Dissertation. Aachen, Rhein. -Westf. Tech. Hochschule Aachen.

Lukas, Katharina (2012). Optimierung der Instandsetzungszeitpläne städtischer Infrastrukturbauwerke auf Basis von Metaheuristiken. Dissertation. München, TU München.

Mazza, Riccardo (2009). Introduction to Information Visualization. London, Springer.

Monzert, Tobias (2020). Situationsbezogene kollektive Fahrgastinformation im Schienenverkehr. Dissertation. Darmstadt, TU Darmstadt.

Monzert, Tobias/Fornauf, Leif/Boltze Manfred (2021). Was Fahrgäste wissen wollen. Erkenntnisse aus zwei Kundenberfragungen zur kollektiven Fahrgastinformation im regionalen Schienenverkehr. Der Nahverkehr (7+8), 6–12.

Nakamura, Tatsuya/Hirai, Chikara/Nishioka, Yasuki (2011). A Practical Train Rescheduling Algorithm Using Three Predetermined Factors. In: IAROR - International Association of Railway Operations Research (Hg.). 4th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailRome2011), Rom, 16. -18. Februar 2011.

Narayanaswamia, Sundaravalli/Rangaraj, Narayan (2013). Modelling disruptions and resolving conflicts optimally in a railway schedule. Computers & Industrial Engineering (1), 469–481.

Nielsen, Lars Kjær/Kroon, Leo/Maróti, Gábor (2012). A rolling horizon approach for disruption management of railway rolling stock. European Journal of Operational Research (220), 496–509.

Nießen, Nils (2008). Leistungskenngrößen für Gesamtfahrstraßenknoten. Dissertation. Aachen, Rhein. -Westf. Tech. Hochschule Aachen.

Nießen, Nils/Schaer, Thorsten (2012). Betriebswissenschaftliches Know-how für den Bahnbetrieb. Deine Bahn vom 2012, 42–45.

Norta, Manuel (2012). Ein Verkehrsmittelwahlmodell für den Personenfernverkehr auf der Basis von Verkehrswiderständen. Aachen, RWTH Aachen.

Oetting, Andreas/Griese, Sören (2016). Entwicklung von Algorithmen für die Fahr- und Mindestzugfolgezeitenrechnung für Strecken. In: TU Dresden (Hg.). 25. Verkehrswissenschaftliche Tage, Dresden.

Oetting, Andreas/Griese, Sören/Fidansoy, Yigit (2017). Konsistente Infrastruktur- und Zugmodellierung für makroskopische Untersuchungen. Deine Bahn (5), 18–23.

Pachl, Jörn (2013). Systemtechnik des Schienenverkehrs. 7. Aufl. Wiesbaden, Springer.

Pferdmenges, S./Schaefer, K (1995). Automatische Konflikterkennung und wissensbasierte Konfliktlösung in der Streckendisposition. SIGNAL + DRAHT (5).

Pfister, Ulrich (2011). Fahrgast 2.0 - Sein Bedürfnis nach Information. Der Nahverkehr (4), 6.

Pilot, Matthias (2012). Identifikation und Quantifizierung der wesentlichen Einflüsse auf das Ausschwingverhalten von Störfallprogrammen (SFP) im SPNV. Masterthesis. Darmstadt, TU Darmstadt.

Renzel, Christian/Brüning, Lars (2021). Verbesserung der Reisendenlenkung an Bahnsteigen. ETR Eisenbahntechnische Rundschau (4), 20–23.

RMV (2022). Regeln der RMV-10-Minuten-Garantie. Online verfügbar unter https://www.rmv.de/c/de/service/garantien-fahrgastrechte/rmv-10-minuten-garantie#c152198 (abgerufen am 17.06.2022).

Schiefelbusch, Martin (2018). Öffentlicher Personenverkehr. In: ARL - Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hg.). Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. Hannover, 1631–1637.

Scholz, Sven (2006). Erhöhung des Wirkungsgrades von Stadtschnellbahnen durch Automatisierung und nachfrageabhängige Steuerung des Beförderungsangebotes. at - Automatisierungstechnik (54), 323–333.

Schranil, Steffen (2013). Prognose der Dauer von Störungen im Bahnbetrieb. Dissertation. Zürich, ETH Zürich.

Schranil, Steffen/Weidmann, Ulrich (2012). Betrieblicher Umgang mit Störereignissen in der Bahnproduktion. Systematische Analysen betrieblicher Störungen ermöglichen die Definition von Verfahren und Prozessen zur Begrenzung betrieblicher und endkundenseitiger Auswirkungen. Der Eisenbahningenieur (07), 44–48.

Schwanhäußer, Wulf (1974). Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn. Aachen, Rhein. -Westf. Tech. Hochschule Aachen.

Sommer, Carsten/Saighani, Assadollah/Leonhäuser, Daniel (2021). Ökonomische Bewertung städtischer Verkehrssysteme. Kosten des Stadtverkehrs - Welche Kosten versursachen verschiedene Verkehrsmittel wirklich? Springer Vieweg.

Space & Missile Systems Center U.S. Air Force (2005). SMC Systems Engineering. Concepts, Processes, and Techniques. 3. Aufl.

Steinbach, Cedric/Crespo Materna, Arturo (2021). Integrated Approach for the Adjustment of Disruption Programs to the Actual Infrastructural Availability. In: IAROR - International Association of Railway Operations Research (Hg.). 9th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailBeijing2021), Peking, 3. - 7. November 2021.

Temme, Jarg (2009). Discrete-Choice-Modelle. In: S. Albers (Hg.). Methodik der empirischen Forschung. Springer Fachmedien, 299–314.

Twele, Heike (2020). RadAR+ - Reiseassistenzsystem für dynamische Umgebungen auf Basis von Augmented Reality. Abschlussbericht der HaCon Ingenieurgesellschaft mbH.

Vakhtel, Sergey (2002). Rechnerunterstützte analytische Ermittlung der Kapazität von Eisenbahnnetzen. Dissertation. Aachen, Rhein. -Westf. Tech. Hochschule Aachen.

Veelenturf, Lucas/Kidd, Martin/Cacchiani, Valentina/Kroon, Leo/Toth, Paolo (2015). A Railway Timetable Rescheduling Approach for Handling Large-Scale Disruptions. Transportation Science, 1–22.

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2001). Verkehrserschließung und Verkehrsangebot im ÖPNV 2001.

Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe (1981). VÖV-Schriftenreihe Technik Nr. 1.41.1: Empfehlungen für einen Bedienungsstandard im ÖPNV 1981.

Walther, Klaus (1973). Nachfrageorientierte Bewertung der Streckenführung im öffentlichen Personenverkehr. Aachen, Rhein. -Westf. Tech. Hochschule Aachen.

Walther, Klaus (1975). Die fahrzeitäquivalente Reisezeit im öffentlichen Personennahverkehr. Reisezeit-Komponenten und fahrzeitäquivalente Reisezeit - Größe der Zeitbewertungsfaktoren im ÖPNV : Fußwegzeit, Wartezeit, Umsteigezeit - Beispiel zur Auswirkung der fahrzeitäquivalenten Zeitbewertung : Fußwegzeit, Wartezeit, Bedienhäufigkeit, Umsteigezeit. Verkehr und Technik (7), 271–275.

Walther, Klaus (1991). Maßnahmenreagibler modal-split. Modellierung von angebotsabhängigem Verkehrsmittelwahlverhalten / Verkehrsverlagerung und induzierter Verkehr / Zeitlich verzögerte Marktreaktion. Der Nahverkehr (3), 60–64.

Walther, Klaus (1992). Ein neues Verständnis des Begriffs "Wiederstand" in Personenverkehrsmodelle. Internationales Verkehrswesen 44 (9), 332–336.

Walther, Klaus (1996). Die Marktwirksamkeit von ÖPNV - Qualität. Ihre Berechnung - Lösungsansatz mit Anwendungsbeispiel. Der Nahverkehr (12), 22–25.

Walther, Klaus/Oetting, Andreas/Vallée, Dirk (1997). Simultane Modellstruktur für die Personenverkehrsplanung. auf Basis eines neuen Verkehrswiderstands. Aachen, RWTH Aachen.

Weigand, Werner/Mittmann, Walter/Fengler, Wolfgang (2016). Die Infrastruktur. In: Dietmar Lübke (Hg.). Das System Bahn, 295–424.

Wendler, Ekkehard/Nießen, Nils (2005). Modellierung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnknoten in einem strategischen Infrastrukturmodell. Methodenbuch VIA. Aachen, RWTH Aachen.

Winkler, Christian (2012). Ein integriertes Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell – Ansatz einer Synthese von Mikroökonomie und Verkehrsplanung. Heft 13/2012 der Schriftenreihe. Dresden, TU Dresden.

Wolpert, David/Macready, William (1997). No Free Lunch Theorems for Optimization. IEEE Transactions on evolutionary Computation 1 (1), 67–82.

Anlagen

Anlage 1: Interviewleitfaden für die Gespräche mit den Erstellern von Störfallprogrammen

Betriebskonzepte im Störfall

Seit wann werden bei Ihnen Störfallprogramme erstellt und genutzt?

Bitte beschreiben wie Sie ihr Vorgehen bei der Erstellung eines Störfallprogramms.

Anhand welcher Kriterien erstellen Sie das neue Betriebskonzept?

Welche Bedeutung und Wichtigkeit lassen Sie den einzelnen Kriterien hierbei zukommen?

Bei welchen Kriterien ist ihre Erfahrung und Kenntnis der Zusammenhänge besonders wichtig?

Welche Anforderungen haben Sie an ein Betriebskonzept für den Störfall?

Verkehrskonzepte im Störfall

Wie berücksichtigen Sie die Reisenden bei der Erstellung eines SFP?

Welche Kriterien und Einflüsse sind Ihrer Erfahrung nach bei der Steuerung von Reisendenströmen wichtig?

Welche Maßnahmen planen Sie bisher in den SFP ein die konkret die Reisendensteuerung betreffen?

Welche Anforderungen haben Sie an ein Verkehrskonzept für den Störfall?

Rahmenbedingungen der Erstellung

Welche Daten nutzen Sie bei der Erstellung eines SFP?

Wie dokumentieren Sie ihre Ergebnisse?

Zusammenfassung des Gesprächs

Was muss ein Tool zu Erstellung alles können, damit es ihre Arbeit deutlich erleichtern würde? → Was sind ihre Anforderungen an das Tool?

Haben Sie noch weiter Anmerkungen und Ideen die bei der Erstellung eines Unterstützungstools berücksichtigt werden sollten?

Können wir das bisher Besprochene an einem von Ihnen bereits erstellten und verwendeten Störfallprogramm durchgehen?

Anlage 2: Umleitungsnutzung nach Keck (2012, S. 99)

Schema zur Planung der Umleitungsnutzung			
Schritte		**Fragestellung**	**Inhalte**
1	Anfrage bei EIU	Welche verfügbaren Umleitungen gibt es für den gewählten Störbereich?	Umleitungslänge
			mögliche Geschwindigkeit
			zusätzliche Halte notwendig/möglich
			Überholungen/Wartezeiten einzuplanen?
			Geschwindigkeit
2	Zwischenprüfung	Ergibt der verfügbare Umleitungsverlauf Sinn für den Kunden?	Betrachtung der Fahrgastströme (möglicherweise tageszeitabhängige Betrachtung notwendig)
			Auswahl der wichtigen Zielbahnhöfe für die Passagiere
			Vergleich der Fahrgastströme, welche die Umleitung nutzen würden vs. Fahrgäste die den nicht angefahrenen Bereich als Ziel haben
3	EVU interne Berechnungen	Welcher zusätzliche Zeitaufwand entsteht durch die Umleitungsnutzung?	zusätzliche Fahrtdauer im Vergleich zum Regellaufweg
			plus Verzögerungen, welche aufgrund der Umleitungsnutzung entstehen (aus Info von EIU)
			plus Verzögerungen durch zusätzliches Wenden und/oder Kreuzen
4	Abschließende Bewertung	Ergibt die Umleitungsnutzung betrieblich Sinn?	Messung an der Möglichkeit, ob zusätzlicher Zeitaufwand durch planmäßige Wenden ausgeglichen werden kann
			Ziel: pünktliche Folgefahrt

Anlage 3: Details zu Berechnung der Vorbereitungszeiten einer Abstellung

Folgende Anpassungen sind nötig bei zwei Treibfahrzeugführern bzw. bei zwei Ebenen.

- ein Tf mit Wende im Doppelstockfahrzeug
  - Kontrolldurchgang erst auf der einen dann auf der anderen Ebene nötig
  - reine Wegezeit zum neuen Führerstand
- ein Tf ohne Wende im Doppelstockfahrzeug
  - Kontrolldurchgang erst auf der einen dann auf der anderen Ebene nötig
- zwei Tf mit Wende
  - zweiter Tf kann nach Abschluss des Abrüstens bereits Aufrüsten begleitend zum Kontrolldurchgang durch den ersten Tf
- zwei Tf ohne Wende
  - Rückweg des ersten Tf entfällt
  - zweiter Tf kann sich während des Kontrolldurchgangs des ersten Tf das Fahrzeug übernehmen und sich auf die Weiterfahrt vorbereiten
- zwei Tf mit Wende im Doppelstockfahrzeug
  - Kontrolldurchgang erst auf der einen dann auf der anderen Ebene nötig durch ersten Tf
  - Rückweg des ersten Tf entfällt
  - zweiter Tf kann sich während des Kontrolldurchgangs des ersten Tf das Fahrzeug übernehmen und sich auf die Weiterfahrt vorbereiten
- zwei Tf ohne Wende im Doppelstockfahrzeug
  - Kontrolldurchgang erst auf der einen dann auf der anderen Ebene nötig durch ersten Tf
  - zweiter Tf kann sich während des Kontrolldurchgangs des ersten Tf das Fahrzeug übernehmen und sich auf die Weiterfahrt vorbereiten

Bei den Fahrten mit Wende ist es nötig anschließend den anderen Führerstand aufzurüsten $t_{aufrü}$. Bei Zugfahrten in die Abstellung ist ein Fahrplan nötig. Das Laden des Fahrplans ist Bestandteil des Aufrüstens. Bei Rangierfahrten entfällt diese Aufgabe.

Zusammengefasst werden die Berechnungsbestandteile der Vorbereitungszeit für eine Abstellung dargestellt, wobei sich diese aus den Möglichkeiten zur Anzahl der Ebenen im Zug, der Art der Weiterfahrt und der Anzahl der für die Abstellung eingeplanten Triebfahrzeugführer ergeben.

Ermittlung der möglichen Vorbereitungszeiten für die Weiterfahrt mit einem Tf

	Weiterfahrt	
Anzahl der Ebenen des Zuges	**ohne Wende**	**mit Wende**
eine Ebene	Tf befindet sich nicht im richtigen Führerstand → zusätzlicher Rückweg nötig mit dem Zeitbedarf $t_{reinWeg}$	Tf befindet sich im richtigen Führerstand → keine weiteren Wege notwendig
zwei Ebenen	Tf befindet sich im richtigen Führerstand → keine weiteren Wege notwendig	Tf befindet sich nicht im richtigen Führerstand → zusätzlicher Rückweg nötig mit dem Zeitbedarf $t_{reinWeg}$

Schema zur Bedarfsermittlung eines Rückwegs nach dem Kontrolldurchgang

	Vorbereitung der Weiterfahrt mit einem Tf	
Anzahl der Ebenen im Zug	**ohne Wende**	**mit Wende**
eine Ebene	$t_{Vb,ohneWende,1E} = t_{FgAusstieg} + t_{DG} + t_{reinWeg}$	$t_{Vb,mitWende,1E} = t_{FgAusstieg} + t_{abrü,rel} + t_{DG} + t_{aufrü}$
zwei Ebenen	$t_{Vb,ohneWende,2E} = t_{FgAusstieg} + t_{DG}$	$t_{Vb,mitWende,2E} = t_{FgAusstieg} + t_{abrü,rel} + t_{DG} + t_{reinWeg} + t_{aufrü}$

Ermittlung der möglichen Vorbereitungszeiten für die Weiterfahrt mit zwei Tf

	Vorbereitung der Weiterfahrt bei zwei Tf		
Anzahl der Ebenen im Zug	**ohne Wende**	**mit Wende**	
eine Ebene	$t_{Vb,ohneWende,1E} = t_{FgAusstieg} + t_{DG}$	Tf 1: $t_{Vb,mitWende,1E} = t_{FgAusstieg} + t_{abrü,rel} + t_{DG}$	wähle Maximalwert aus Tf 1 und Tf 2 für die Ermittlung von t_{Vb}
		Tf 2:$t_{abrü} + t_{aufrü}$	
zwei Ebenen	$t_{Vb,ohneWende,2E} = t_{FgAusstieg} + t_{DG}$	Tf 1: $t_{Vb,mitWende,2E} = t_{FgAusstieg} + t_{abrü,rel} + t_{DG}$	wähle Maximalwert aus Tf 1 und Tf 2 für die Ermittlung von t_{Vb}
		Tf 2: $t_{abrü} + t_{aufrü}$	

Anlage 4: Anwendungsbeispiel - Input und Ergänzungen

Inputwerte für das Betriebskonzept

Zeitangaben	[min]	[s]	Anmerkungen
Betrachtungszeitraum t_U	240	14400	
$t_{Wendezuschlag, SFP}$ [min]	3	180	fester Wert nach Chu (2014)
$t_{min,Wende, Ril, 1 TF}$ [min]	6	360	nach Chu (2014)
$t_{min,Wende, Ril, 2 TF}$ [min]	2	120	nach Chu (2014)
Fahrstraßenbildezeit t'_{sig}	0,2	12	Elektronische und Relaisstellwerke
	0,8	48	Elektromechanisches Stellwerk
	1,2	72	Mechanisches Stellwerk
Vorsignalsichtzeit t_i	0,2	12	
Fahrzeit Vorsignalabstand t_A	0,4	23	
Fahrzeit Blockabschnitt t_{Bl}	0,6	33	theoretisch, mit $V_{max,HB}$
Räumfahrzeit t_R	0,2	13	
Fahrstraßenauflösezeit t''_{sig}	0,1	6	Elektronische und Relaisstellwerke
	0,3	18	(Elektro-)Mechanisches Stellwerk
Sperrzeit t_{Sp}	1,7		
Sperrzeit bei Wende $t_{Sp,Wende}$	2,4		
Haltezeit t_H	0,7	42	Regelhaltezeit SPNV-V nach Heister et al. (2006)
Vergabe der Sonderzugnummer	0	0	
Abrüstzeit $t_{Abrü}$	1,7	102	Schätzwert
Aufrüstzeit $t_{Aufrü}$	1	60	Schätzwert
$t_{Ausstieg}$	0,05	3	

Inputwerte für einen Block

Längenangaben	[m]	Anmerkungen
Vorsignalabstand l_A	700,0	Default
Blocklänge l_{Bl}	1000,0	Default
$l_{Esig-BSM}$	900,0	Default
Gefahrpunktabstand	200,0	Default
Abstand Einfahrsignal - Betriebsstellenmitte	900,0	Default

Inputwerte für den Modellzug

Modellzug SPNV-V		
Baureihe	423	
V_{max}	38,89	m/s
Zugkraft	435	kN
Beschleunigung	0,8	m/s²
Kapazität pro Einheit	550	Personen
Anzahl Türen pro Einheit	12	-
Besetzungsgrad HVZ	0,65	-
Masse	370	t
$t_{FgAusstieg}$	1,5	min
t_{DG}	2,7	min
$t_{VB,ohneWende}$	6,8	min
$t_{VB,Wende}$	5,4	min
$t_{B,Ausfall,ohneWende}$	8,3	min
$t_{B,Ausfall,Wende}$	7,8	min
Bremsverzögerung [m/s²]	0,8	

verwendete Geschwindigkeiten

Geschwindigkeiten	[m/s]	[m/min]	[km/h]
Laufgeschwindigkeit TF	1,25	75,00	4,50
Strecke	33,33	2000,00	120,00
Weiche	16,67	1000,00	60,00

verwendete Anzahl an Zügen

Zugart	n/tu pro Richtung	P_{ij}
SPFV	5	0,20
SPNV-S	9	0,36
SPNV-V	4	0,16
SPNV-L	5	0,20
SGV	2	0,08
gesamt	25	1,00

Mögliche Fahrttypen und Anzahl Fahrten im Beispiel zu Modul 3

Ausfahrt	Gleis i:	Richtungswechsel?	Anzahl Fahrten f pro Stunde:	Fahrten f in t_U	$t_{B,i,f}$ [s]	$t_{B,i,f}$ [min]
1A	101	Wende	0	0	0	0
1B	101	Wende	0	0	0	0
1C	101	Weiterfahrt	0	0	0	0
2A	102	Wende	0	0	0	0
2B	102	Wende	0	0	0	0
2C	102	Weiterfahrt	12	48	5300	88
3A	103	Wende	0	0	0	0
3B	103	Wende	0	0	0	0
3C	103	Weiterfahrt	0	0	0	0
4A	104	Wende	0	0	0	0
4B	104	Wende	0	0	0	0
4C	104	Weiterfahrt	0	0	0	0
1A	101	Wende	0	0	0	0
1B	101	Wende	0	0	0	0
1C	101	Weiterfahrt	0	0	0	0
2A	102	Wende	0	0	0	0
2B	102	Wende	0	0	0	0
2C	102	Weiterfahrt	0	0	0	0
3A	103	Wende	0	0	0	0
3B	103	Wende	4	16	13287	221
3C	103	Weiterfahrt	0	0	0	0
4A	104	Wende	0	0	0	0
4B	104	Wende	0	0	0	0
4C	104	Weiterfahrt	0	0	0	0
1A	101	Weiterfahrt	0	0	0	0
1B	101	Weiterfahrt	0	0	0	0
1C	101	Wende	0	0	0	0
2A	102	Weiterfahrt	0	0	0	0
2B	102	Weiterfahrt	0	0	0	0
2C	102	Wende	0	0	0	0
3A	103	Weiterfahrt	0	0	0	0
3B	103	Weiterfahrt	0	0	0	0
3C	103	Wende	0	0	0	0
4A	104	Weiterfahrt	12	48	5300	88
4B	104	Weiterfahrt	0	0	0	0
4C	104	Wende	0	0	0	0

Berechnung der Fahrzeit für Beispiel zu Modul 3

Berechnung der Fahrzeit Blockabschnitt t_{Bl} nach Fall c	
Bremszeitzuschlag t'_{Br} [s]	5,2
Anfahrzeitzuschlag t'_{An} [s]	5,2
t_{Bl} [s]	33,3
t_{Sp} [s]	66,7
$t_{B,f,Weiterfahrt}$ [s]	110,4
$t_{B,f,Wende}$ [s]	830,4

Umläufe für Modul 4 und Modul 5

Umlauf S3	Bereichskategorie (nach Abfahrt)	1	2	3	4	5
Bad Soden	grün nord		07:50:00			
Sulzbach (Ts) Nord	grün nord		07:52:00			
Schwalbach a Ts (Limes)	grün nord		07:55:00			
- Nord	grün nord		07:56:00			
Niederhöchstadt	grün nord		07:59:00			
Eschborn	grün nord					07:31:00
- Süd	grün nord					07:33:00
FFM Rödelheim	grün nord					07:37:00
- West	grün nord					07:40:00
- Messe	grün nord					07:42:00
- Galluswarte	grün nord					07:44:00
- Hauptbahnhof Gl. 101 an	grün nord					07:46:00
- Hauptbahnhof Gl. 101 ab	gelb					07:47:00
- Taunusanlage	gelb					07:49:00
- Hauptwache	gelb					07:51:00
- Konstablerwache	gelb					07:52:00
- Ostendstraße	rot					07:54:00
- Lokalbahnhof	rot					07:56:00
Frankfurt Süd	rot					07:58:00
- Stresemannallee	rot				07:30:00	
- Louisa	rot				07:32:00	
Neu-Isenburg	rot				07:35:00	
Dreieich-Buchschlag	rot				07:38:00	
Langen Flugsicherung	gelb				07:40:00	
Langen (Hessen) an	grün süd				07:41:00	
Langen (Hessen) ab	grün süd				07:42:00	
Egelsbach	grün süd				07:45:00	
Erzhausen	grün süd				07:47:00	
Darmstadt Wixhausen	grün süd				07:49:00	
- Arheilgen	grün süd				07:52:00	
- Hauptbahnhof	grün süd				07:56:00	

Darmstadt Hauptbahnhof	grün süd			07:35:00
- Arheilgen	grün süd			07:39:00
- Wixhausen	grün süd			07:41:00
Erzhausen	grün süd			07:44:00
Egelsbach	grün süd			07:46:00
Langen (Hessen) an	grün süd			07:47:00
Langen (Hessen) ab	rot			07:48:00
- Flugsicherung	rot			07:51:00
Dreieich-Buchschlag	rot			07:53:00
Neu-Isenburg	rot			07:56:00
FFM-Louisa	rot			07:59:00
- Stresemannallee	rot	07:31:00		
Frankfurt Süd	rot	07:33:00		
- Lokalbahnhof	gelb	07:35:00		
- Ostendstraße	gelb	07:37:00		
- Konstablerwache	gelb	07:39:00		
- Hauptwache	gelb	07:40:00		
- Taunusanlage	gelb	07:42:00		
- Hauptbahnhof Gl. 104 an	grün nord	0,321528		
- Hauptbahnhof Gl. 104 ab	grün nord	07:44:00		
- Galluswarte	grün nord	07:47:00		
- Messe	grün nord	07:48:00		
- West	grün nord	07:50:00		
- Rödelheim	grün nord	07:53:00		
Eschborn Süd	grün nord	07:56:00		
- Eschborn	grün nord	07:58:00		
Niederhöchstadt	grün nord			
Schwalbach Nord	grün nord		07:31:00	
- Schwalbach a. Ts. (Limes)	grün nord		07:33:00	
Sulzbach (Ts) Nord	grün nord		07:35:00	
Bad Soden	grün nord		07:37:00	

Umlauf S4	Bereichskategorie (nach Abfahrt)	6	7	8	9
Kronberg	grün nord				07:38:00
- Süd	grün nord				07:40:00
Niederhöchstadt	grün nord				07:44:00
Eschborn	grün nord				07:46:00
- Süd	grün nord				07:48:00
F-Rödelheim	grün nord				07:52:00
- West	grün nord				07:55:00
- Messe	grün nord				07:57:00
- Galluswarte	grün nord				07:59:00
- Hauptbahnhof Gl. 101 an	grün nord			07:31:00	
- Hauptbahnhof Gl. 101 ab	gelb			07:32:00	
- Taunusanlage	gelb			07:34:00	
- Hauptwache	gelb			07:36:00	
- Konstablerwache	gelb			07:37:00	
- Ostendstraße	rot			07:39:00	
- Lokalbahnhof	rot			07:41:00	
Frankfurt Süd	rot			07:43:00	
- Stresemannallee	rot			07:45:00	
- Louisa	rot			07:47:00	
Neu-Isenburg	rot			07:50:00	
Dreieich-Buchschlag	rot			07:53:00	
Langen Flugsicherung	gelb			07:55:00	
Langen (Hessen)	grün süd			07:57:00	

Langen (Hessen)	rot		07:34:00
- Flugsicherung	rot		07:36:00
Dreieich-Buchschlag	rot		07:38:00
Neu-Isenburg	rot		07:41:00
FFM-Louisa	rot		07:44:00
- Stresemannallee	rot		07:46:00
Frankfurt Süd	rot		07:48:00
- Lokalbahnhof	gelb		07:50:00
- Ostendstraße	gelb		07:52:00
- Konstablerwache	gelb		07:54:00
- Hauptwache	gelb		07:55:00
- Taunusanlage	gelb		07:57:00
- Hauptbahnhof Gl. 104 an	grün nord		07:58:00
- Hauptbahnhof Gl. 104 ab	grün nord		07:59:00
- Galluswarte	grün nord	07:32:00	
- Messe	grün nord	07:33:00	
- West	grün nord	07:35:00	
F-Rödelheim	grün nord	07:38:00	
Eschborn Süd	grün nord	07:41:00	
- Eschborn	grün nord	07:43:00	
Niederhöchstadt	grün nord	07:46:00	
Kronberg Süd	grün nord	07:49:00	
Kronberg	grün nord	07:51:00	