

Dynamische Adaption von Störfallprogrammen im S-Bahn-Verkehr

vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation
von Cedric Steinbach

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting, Darmstadt
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Rob Goverde, Delft

Tag der Einreichung: 17.04.2024
Tag der Disputation: 18.06.2024

Darmstadt 2024



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Institut für
Bahnsysteme
und Bahntechnik

GRADUIERTENKOLLEG

KRITIS



Steinbach, Cedric: Dynamische Adaption von Störfallprogrammen im S-Bahn-Verkehr

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung auf TUprints: 2024

Schriftenreihe der Institute für Verkehr
Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik
Heft B17
ISSN 1614-9300

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-287003

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/28700>

Tag der mündlichen Prüfung: 18.06.2024

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses>

Kurzfassung

Durch das komplexe Zusammenspiel der Systemkomponenten Fahrweg, Fahrzeug und Betrieb und einer Vielzahl von externen Einflüssen sind Bahnsysteme anfällig für Störungen. Bei S-Bahn-Systemen, die oftmals durch eine hohe Auslastung geprägt sind, kann eine Störung eine umfassende Anpassung der Fahr- und Ressourcenplanung erforderlich machen.

Eine Möglichkeit zur Unterstützung der Disponenten bei der Bewältigung von Störungen ist der Einsatz sogenannter Störfallprogramme (SFP). SFP sind vorab konzipierte Handlungskonzepte auf Linienebene, die generisch für den Ausfall bestimmter Infrastrukturelemente (z. B. die Sperrung eines Bahnhofs) geplant werden. Die in einem SFP enthaltenen betrieblichen Maßnahmen beziehen sich auf einzelne Linien. Die betrieblichen Maßnahmen legen fest, wie der Betrieb der Linien während einer Störung angepasst werden soll, beispielsweise durch eine vorzeitige Wende oder Umleitung. Diese betrieblichen Maßnahmen bilden das sogenannte Betriebskonzept. Neben dem Betriebskonzept kann ein SFP auch ein Verkehrskonzept umfassen, welches Maßnahmen zur Reisendenlenkung enthält.

Der Einsatz von SFP zur Bewältigung von Störungen bietet den Vorteil, dass die Komplexität der Anpassung des Fahrplans durch die Vorgabe von betrieblichen Maßnahmen reduziert wird. Dies ermöglicht Disponenten eine schnelle und standardisierte Lösungsfindung. Die Lösung ist auch kundenorientiert, da bereits bei der Planung eines SFP der Fokus auf die Anforderungen der Kunden gelegt werden kann.

Sind beim Auftreten einer Störung nicht-verfügbare Infrastrukturelemente vorhanden, die nicht im SFP berücksichtigt wurden (z. B. aufgrund von Baumaßnahmen), stellt sich für die Anwendung eines SFP die Frage,

- ob das SFP zur Bewältigung der Störung einsetzbar ist und wenn nicht,
- welche Adaption des SFP für eine Anwendung erforderlich ist.

Die vorliegende Dissertation soll Disponenten bei der Beantwortung dieser Frage unterstützen und entwickelt dafür einen Ansatz zur dynamischen Adaption von Störfallprogrammen an die aktuelle Infrastruktur- und Betriebssituation.

Als Methode zur Adaption von SFP an die aktuelle Infrastruktur- und Betriebssituation wird ein heuristischer Ansatz verwendet. Dieser sieht vor, dass die Adaption von SFP in Teilprobleme aufgeteilt wird:

- Anpassung des Betriebskonzepts
- Anpassung des Verkehrskonzepts
- Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phasen des Betriebskonzepts
- Sicherstellung der Einschwingfähigkeit des Betriebskonzepts in die stabile Phase
- kundenorientierte Bewertung des SFP

Die Teilprobleme werden sequenziell gelöst, woraus ein iteratives Vorgehen resultiert.

Bei der **Anpassung des Betriebskonzepts** an die aktuelle Infrastruktursituation wird als Methode eine Heuristik angewendet. Die Anpassung des Betriebskonzepts ist weiter aufgeteilt in (1) die Prüfung der Funktionsfähigkeit des Betriebskonzepts in Bezug zur aktuellen Infrastruktursituation, (2) die Erzeugung angepasster Betriebskonzepte und (3) deren

kundenorientierte Bewertung. Die Schritte werden iterativ durchlaufen, bis ein funktionsfähiges Betriebskonzept bestimmt wurde. Um den Anforderungen an eine minimale Anpassung des ausgewählten Betriebskonzepts zu entsprechen, wird mit kleinen, inkrementellen Anpassungen begonnen. Damit der Algorithmus dennoch schnell eine Lösung findet, wird bei der Erzeugung angepasster Betriebskonzepte eine Tabu-Liste verwendet.

Für die Prüfung der Funktionsfähigkeit von Betriebskonzepten (1) wurden auf Grundlage von Literatur und Expertenbeiträgen Anforderungen an funktionale Betriebskonzepte definiert. Die definierten Anforderungen sind in vier Typen unterteilt:

- Verfügbarkeit der Infrastrukturelemente,
- Auslastung der Infrastruktur, sodass ein stabiler Betrieb ermöglicht wird,
- Ausgestaltung von Linien (z. B. die Verzweigung von Linien) und
- resultierender Liniennetzplan, für den auch kundenorientierte Anforderungen berücksichtigt werden.

Bei einem negativen Ergebnis der Prüfung der Funktionsfähigkeit (1) besteht ein Anpassungsbedarf des Betriebskonzepts. Die Anpassung von Betriebskonzepten (2) erfolgt anhand von zwei Strategien:

- die Entfernung und/oder Ergänzung betrieblicher Maßnahmen
- die Verwendung von Teillösungen aus Betriebskonzepten anderer SFP.

Um bei der ersten Strategie eine minimale Anpassung zu erreichen, stellen die verwendeten betrieblichen Maßnahmen die kleinsten möglichen Einheiten zur Anpassung einer Linie dar. Eine solche sogenannte „elementare betriebliche Maßnahme“ ist beispielsweise die Wende in Bahnhof A oder eine Umleitung zwischen Betriebsstelle B und C. Zur Anpassung von Betriebskonzepten werden nur vorab bestimmte und auf Machbarkeit geprüfte betriebliche Maßnahmen verwendet.

Bei der Entfernung und Ergänzung von elementaren betrieblichen Maßnahmen wird zunächst bestimmt, welche Änderungen eine Erfüllung der Anforderungen an die Funktionsfähigkeit des Betriebskonzepts ermöglichen. Ausgangspunkt für die Änderungen sind die Ergebnisse zur Funktionsfähigkeit des Betriebskonzepts (1). Da oftmals diverse Änderungen möglich sind, wird abgeschätzt, welche betrieblichen Änderungen die geringsten negativen Auswirkungen aus Sicht der Kunden erwarten lassen.

Bei der Änderung verschiedener Linien wächst die Anzahl der sich daraus ergebenden angepassten Betriebskonzepte exponentiell, abhängig von den möglichen Anpassungen sowie der Anzahl der Linien. Durch die abgeschätzte Auswirkung der Änderungen auf die Fahrgäste kann die Suche gezielt geleitet werden, indem zunächst die Änderungen mit den geringsten zu erwartenden Auswirkungen verwendet werden. Das Ergebnis von (1) ist eine Menge von angepassten Betriebskonzepten.

Für die **Anpassung des Verkehrskonzepts** auf Basis des angepassten Betriebskonzepts wird zunächst bestimmt, welche Maßnahmen zur Reisendenlenkung durch die Anpassung des Betriebskonzepts nicht mehr angewendet werden können bzw. nicht mehr zielführend sind. Falls erforderlich, werden neue Maßnahmen zur Reisendenlenkung bestimmt. Dabei wird sowohl auf Maßnahmen aus Verkehrskonzepten anderer SFP zurückgegriffen als auch neue Maßnahmen erzeugt. Ansätze für die Erzeugung neuer Maßnahmen sind vorhanden und können genutzt werden.

Zur Sicherstellung der **Umsetzbarkeit des Betriebskonzepts in der stabilen Phase** wird eine KE/KL-Heuristik angewendet. Diese ist hinsichtlich des Nicht-Vorhandenseins einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge von Konflikten in einem periodischen Fahrplan und für das Entfernen obsoleter Konfliktlösungen für KE/KL-Heuristik modifiziert.

Bereits bestehende Ansätze werden für die **Sicherstellung der Einschwingfähigkeit** und die **kundenorientierte Bewertung** angepasst verwendet.

Die entwickelten Algorithmen zur Adaption von SFP ermöglichen eine Prüfung und Anpassung von generischen SFP an die bei einem Störfall vorherrschende Infrastruktur- und Betriebssituation. Die Algorithmen sind allgemeingültig einsetzbar und auf die Erfüllung praxisnaher Anforderungen ausgelegt. Eine Umsetzung in die Praxis wird durch die Modularität und die Kompatibilität mit bestehenden Systemen des Störfallmanagements unterstützt. Durch Automatisierung, schnelle Lösungsfindung und gezielte Unterstützung der Disponenten wird die Grundlage für eine erfolgreiche Bewältigung von Störungen geschaffen. Der kundenorientierte Ansatz sorgt dafür, dass die Mobilität der Fahrgäste auch während einer Störung bestmöglich erhalten bleibt.

Eine detailliertere Version dieser Zusammenfassung wurde durch den Autor als Artikel mit dem Titel „Wenn Plan A nicht aufgeht: Dynamische Adaption von Störfallprogrammen im S-Bahn-Verkehr“ (2024, Eisenbahntechnische Rundschau (*ETR*) 73(10), S. 19–23) veröffentlicht.

Abstract

Due to the complex interaction of system components, tracks, vehicles, operations, and a multitude of external influences, railway systems are susceptible to disruptions. In the case of commuter railway systems, which are often characterized by high capacity utilization, a disruption may require the comprehensive adjustment of the railway timetables and resource planning.

One way of supporting dispatchers in dealing with disruptions is the use of so-called disruption programs (DRPs). DRPs are pre-defined plans at line level, generically planned to allow dispatchers adjusting the timetable in response to failures of specific, pre-selected network elements (e.g. the closure of a station). The operational measures contained in a DRP relate to individual lines and define the way in which operations should be adjusted during a disruption, for example by means of an early turnaround or detour. These operational measures form what is known as the operating concept. In addition to the operating concept, a DRP may also include a transport concept, which contains measures for passenger guidance.

The advantage of DRPs for reacting to a disruption is that the complexity of adjusting the timetable is reduced by specifying operational measures. This enables dispatchers to find and implement quick and standardized rescheduling solutions. Additionally, DRPs are customer-oriented, as their planning can prioritize solutions that address customer needs from the outset.

If during the implementation of a DRP, additional network elements are unavailable (e.g. due to construction works), it may be necessary to verify the following:

- whether the DRP can still be used to cope with the disruption or
- what adaptations of the DRP are required for its implementation.

The aim of this work is to support dispatchers in the implementation process by developing an approach for the dynamic adaptation of DRPs.

A heuristic method is employed to adapt DRPs to the current infrastructure and operational situation. The proposed approach foresees dividing the DRP adaption process into concrete sub-problems:

- Adaptation of the operating concept
- Adaptation of the transport concept
- Ensuring the operational feasibility of the stable phase within the operating concept
- Ensuring the transition capability of the operating concept to the stable phase
- Customer-oriented evaluation of the DRP

The sub-problems are solved sequentially, forming an iterative algorithmic process.

A heuristic method is used to **adapt the operating concept** to the current infrastructure situation. The adaptation of the operating concept is divided into the following steps: (1) assessing the functionality of the current operating concept in relation to the current infrastructure situation, (2) generating adapted operating concepts, and (3) evaluating their impact on the customer satisfaction. The three steps are iterated until a functional operating concept is developed. To address the need for minimal adjustments to the selected operating concept, the adaptation process begins by implementing small, incremental adjustments, focusing on potential solutions that are closely related to the original operating concept. To allow the algorithm to find a quicker solution, a tabu list is employed during the generation of adapted operating concepts.

For assessing the functionality of operating concepts (1), requirements for functional operating concepts were defined based on literature and expert input. The defined requirements are divided into four types:

- availability of network elements,
- utilization of the infrastructure – such that a stable operation is possible,
- resulting operating concepts of specific lines (e.g. the branching of lines) and
- resulting operating concept of all lines in the network, including passenger transport requirements.

If the result of the functionality assessment (1) is negative, there is a need to adapt the operating concept (2). Two strategies are used for adapting operating concepts:

- removal and/or addition of operational measures
- use of partial solutions from operating concepts to be found in other DRPs.

In order to achieve minimal adjustments in the first strategy, the operational measures used represent smallest possible changes to adapt the operating concept of a line. Such a measure, referred to as an “elementary operational measure” could include actions like a turnaround at station A or a detour between stations B and C. Only elementary operational measures that have been previously tested for feasibility are used to adapt lines of the operating concepts.

The first step when removing or adding elementary operational measures to or from the operating concept is to determine which changes can be made to meet the requirements for functional operating concepts. The starting point for developing the changes is the result of the functionality assessment (1). As various changes are often possible, an assessment is made to determine which operational changes are expected to have the least negative impact from a customer's perspective.

When changing the operating concept of different lines, the number of resulting adapted operating concepts grows exponentially, depending on the possible adaptations of the lines and the number of lines. The estimated impact of the changes on the passengers serves as a guide in the search by first using the changes with the least expected impact. The result of (1) is a set of adapted operating concepts.

To **adapt the transport concept** based on the adapted operating concept, the first step is to determine which passenger guidance measures can no longer be used or are no longer effective due to the adaptations in the operating concept. If necessary, new passenger guidance measures must be developed. In this process, measures from the transport concepts of other DRPs are used, along with new measures. Existing approaches for the development of new measures are available and can be applied.

For **ensuring the operational feasibility of the stable phase** within the operating concept, a CD/CR heuristic is applied, with modifications to account for the lack of a clear temporal sequence of conflicts in a periodic schedule and for the removal of obsolete conflict solutions in the CD/CR heuristics.

Already existing approaches are adapted and used to **ensure transition capability** of the operating concept and for the **customer-oriented evaluation** of DRPs.

The developed approach for adapting DRPs enable generic DRPs to be assessed and adapted to the actual infrastructural availability in the event of a disruption. The approach is universally applicable and designed to meet practical requirements. Its implementation in practice is

supported by modularity and compatibility with existing disruption management approaches. Automation, rapid solution finding and targeted support for dispatchers form the basis for successful disruption management. The customer-oriented approach ensures that the mobility of the passenger is maintained in the best possible way, even during a disruption.

Danksagung

Ich möchte diese ersten Worte nutzen, um meinen Dank an all jene zu richten, die mich bei der Erstellung der Arbeit unterstützt haben.

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting für die Möglichkeit der Promotion am Institut für Bahnsystem und Bahntechnik. Er hat mich nicht nur mit konstruktivem fachlichem Feedback, sondern auch darüber hinaus unterstützt. Auch möchte ich Herrn Prof. Dr. Rob Goverde für die Übernahme des Koreferats sowie die Diskussionen und Kommentare zur Arbeit danken.

Ein weiterer Dank gilt der DFG und dem Graduiertenkolleg KRITIS, in dessen Rahmen der größte Teil der Arbeit entstanden ist. Durch die interdisziplinäre Arbeit im Kolleg durfte ich viel verschiedene Arten der Forschung kennenlernen. Diese unterschiedlichen Sichtweisen auf meine Arbeit haben geholfen, meine eigenen Ansätze zu schärfen und gleichzeitig einen Blick für das Gesamtsystem zu bewahren. Ein besonderer Dank gilt meiner Fokusgruppe, die sich intensiv mit meinem Thema auseinandergesetzt und hilfreiches Feedback gegeben hat.

Ich möchte auch den „ISTP-PowerUsern“ und insbesondere Herrn Ralf Schmelcher für die wertvollen Einblicke in die Arbeitsweise der Disponenten und das Teilen ihrer langjährigen Erfahrungen in der Disposition danken.

Ein großes Dankeschön gilt auch allen aktiven und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Institut. Die Arbeit am Institut empfinde ich immer als sehr wertschätzend und herzlich. Besonders danken möchte ich Anna-Katharina Brauner und Arturo Crespo Materna, die mich in das Thema der Störungsdisposition eingeführt haben. Ihre Rückmeldungen und die gemeinsamen Diskussionen haben mir bei der Erstellung der Arbeit sehr geholfen.

Mein Dank geht auch an meine Familie und ihre uneingeschränkte Unterstützung. In den vielen schönen, aber auch sehr traurigen Abschnitten der vergangenen Jahre, war es nicht immer einfach, den Fokus zurück auf die Arbeit zu legen. Durch ihren Rückhalt und ihre Unterstützung haben sie es mir ermöglicht, mein Ziel zu erreichen. Der größte Dank gilt meiner Frau Melanie. Ohne deine bedingungslose Liebe und Geduld für mich und unsere Tochter und deine Bereitschaft, mir viel Zeit freizuschaukeln, wäre der Abschluss dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Dankbar bin ich auch für die Geduld und das Verständnis meiner Tochter für die vielen Stunden, in denen sie auf mich verzichten musste sowie die willkommene Ablenkung in unserer gemeinsamen Zeit.

April 2024
Cedric Steinbach

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Motivation	1
1.2	Ziel der Arbeit.....	3
2	Stand des Wissens	4
2.1	Einleitung	4
2.2	Disposition.....	4
2.2.1	Grundlagen der Disposition.....	4
2.2.2	Regeldisposition.....	9
2.2.3	Störungsdisposition.....	12
2.3	Ad-hoc Störungsdisposition.....	13
2.4	Vorgeplante Störungsdisposition – Einsatz von Störfallprogrammen	18
2.4.1	Grundlagen zum Einsatz von Störfallprogrammen	19
2.4.2	Ansätze zur (Teil-)Automatisierung der Planung von SFP	24
2.4.3	Ansätze zur (Teil-)Automatisierung der Anwendung von SFP.....	29
2.4.4	Zusammenfassung	33
2.5	Fahrplananpassung für geplante Infrastruktureinschränkungen	34
2.5.1	Anpassung von nicht periodischen Fahrplänen	34
2.5.2	Anpassung von periodischen Fahrplänen.....	35
2.5.3	Zusammenfassung	37
2.6	Ausgewählte Methoden der Störungsdisposition	37
2.7	Zusammenfassung von Kapitel 2.....	43
3	Problemstellung	45
3.1	Zielsetzung	45
3.2	Inhaltliche Abgrenzung.....	46
3.3	Anforderungen	50
3.3.1	Anforderungen an ein Störfallprogramm (Output der Adaption)	51
3.3.2	Anforderungen an die Durchführung der Adaption	55
3.4	Systemarchitektur.....	57
3.4.1	Herleitung von Teilproblemen.....	58
3.4.2	Reihenfolge der Lösung der Teilprobleme	60
3.4.3	Module der Systemarchitektur	62
3.4.4	Aufteilung der Anforderungen.....	64
3.4.5	Zusammenfassung	69
3.5	Vorgehensweise	69
3.6	Definition	71
4	Anpassung des Betriebskonzepts	74
4.1	Einleitung.....	74

4.2	Methode zur Anpassung des Betriebskonzepts	75
4.2.1	Problembeschreibung.....	75
4.2.2	Methodendiskussion.....	80
4.2.3	Komponenten und Eigenschaften der Heuristik	81
4.2.4	Vorgehensweise	89
4.3	Entwicklung der Funktionalitäten der Heuristik zur Anpassung des Betriebskonzepts	89
4.3.1	Erforderliche Funktionalitäten der Heuristik	89
4.3.2	Bestimmung der elementaren betrieblichen Maßnahmen	91
4.3.3	Prüfung der Funktionsfähigkeit eines Betriebskonzepts	94
4.3.4	Erzeugung von Betriebskonzepten.....	102
4.3.5	Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte.....	124
4.3.6	Prüfung der Abbruchbedingungen und Auswahl von Betriebskonzept	131
4.3.7	Zusammenfassung.....	134
4.4	Spezifizierung von Modul 1	136
4.4.1	Parameter von Modul 1.....	136
4.4.1	Aufbau von Modul 1.....	138
4.4.2	Modul 1.1: Prüfung der Funktionsfähigkeit	139
4.4.3	Modul 1.2: Erzeugung von Betriebskonzepten.....	141
4.4.4	Modul 1.3: Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte	159
4.4.5	Modul 1.4: Prüfung der Abbruchbedingung und Auswahl der erzeugten Betriebskonzepte.....	160
4.4.6	Zusammenfassung.....	161
4.5	Zusammenfassung von Kapitel 4 und Diskussion.....	162

5 Anpassung des Verkehrskonzepts 164

5.1	Einleitung.....	164
5.2	Methode zur Anpassung des Verkehrskonzepts	164
5.2.1	Problembeschreibung Anpassung des Verkehrskonzepts	165
5.2.2	Methodendiskussion zur Anpassung des Verkehrskonzepts.....	169
5.2.3	Erforderliche Modifikationen der Ansätze.....	172
5.2.4	Vorgehensweise	173
5.3	Modifikationen der Ansätze zur Bestimmung von FGK.....	174
5.3.1	Bestimmung alternativer Korridorendpunkte.....	174
5.3.2	Auswahl der FGK	174
5.3.3	Zusammenfassung.....	175
5.4	Beschreibung von Modul 2.....	175
5.4.1	Aufbau von Modul 2.....	176
5.4.2	Modul 2.1: Prüfung und Bestimmung der Verbindungskonflikte und deren Lösungen	177
5.4.3	Modul 2.2: Bestimmung von FGK.....	181
5.4.4	Modul 2.3: Engpassermittlung und -auflösung	185

5.4.5	Zusammenfassung	186
5.5	Zusammenfassung von Kapitel 5 und Diskussion.....	187
6	Kundenorientierte Bewertung des SFP	188
6.1	Einleitung.....	188
6.2	Methoden zur kundenorientierten Bewertung des SFP	189
6.2.1	Methodendiskussion	189
6.2.2	Vorgehensweise	190
6.3	Entwicklung des Algorithmus für die kundenorientierte Bewertung	190
6.3.1	Aufbau von Modul 5	190
6.3.2	Prüfung der Inputs der verwendeten Module	192
6.3.3	Zusammenfassung	194
6.4	Beschreibung von Modul 5.....	195
6.4.1	Modul 5.1: Kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase	195
6.4.2	Modul 5.2: Kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase und der Einschwingphase.....	196
6.4.3	Rückkopplung von Modul 5	197
6.4.4	Zusammenfassung	200
6.5	Zusammenfassung von Kapitel 6 und Diskussion.....	201
7	Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase	202
7.1	Einleitung.....	202
7.2	Methode zur Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit in der stabilen Phase	203
7.2.1	Problembeschreibung.....	203
7.2.2	Methodendiskussion	205
7.2.3	Erforderliche Modifikation der KE/KL-Heuristik für die Anwendung auf ein periodisches Fahrplankonzept	207
7.2.4	Vorgehensweise	209
7.3	Modifikation der KE/KL-Heuristik.....	209
7.3.1	Herleitung von Alternativen für das Problem des Nicht-Vorhandenseins einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge von Konflikten	210
7.3.2	Diskussion der Alternativen für das Problem des Nicht-Vorhandenseins einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge von Konflikten	212
7.3.3	Auswahl einer Alternative zur Reihung von Konflikten in der Konfliktliste von KE/KL-Heuristiken.....	219
7.3.4	Entfernung obsoleter Konfliktlösungen.....	221
7.3.5	Zusammenfassung	223
7.4	Beschreibung Modul 3	223
7.4.1	Aufbau von Modul 3	224
7.4.2	Modul 3.2: Konflikterkennung	225
7.4.3	Modul 3.3: Konfliktlösung.....	228

7.4.4	Modul 3.4: Bewertung	229
7.4.5	Terminierung	231
7.4.6	Rückkopplung von Modul 3	233
7.4.7	Zusammenfassung	234
7.5	Zusammenfassung von Kapitel 7 und Diskussion	234
8	Sicherstellung der Einschwingfähigkeit	236
8.1	Einleitung	236
8.2	Methode zur Sicherstellung der Einschwingfähigkeit	237
8.2.1	Problembeschreibung	237
8.2.2	Methodendiskussion	239
8.2.3	Vorgehensweise	240
8.3	Modifikation der Methode zur Sicherstellung der Einschwingfähigkeit	241
8.4	Beschreibung von Modul 4	245
8.4.1	Terminierung von Modul 4	245
8.4.2	Rückkopplungen von Modul 4	246
8.5	Zusammenfassung von Kapitel 8 und Diskussion	249
9	Anwendungsbeispiel	250
9.1	Einleitung	250
9.2	Modul 1: Anpassung des Betriebskonzepts	251
9.2.1	Bestimmung der elementaren betrieblichen Maßnahmen	252
9.2.2	Modul 1.1: Prüfung der Funktionsfähigkeit (Modul 1.0 und Modul 1.1)	253
9.2.3	Modul 1.2: Erzeugung von Betriebskonzepten	254
9.2.4	Modul 1.3: Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte (Modul 1.3)	259
9.2.5	Modul 1.4: Prüfung der Abbruchbedingung und Auswahl der erzeugten Betriebskonzepte	260
9.3	Modul 3: Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase	261
9.4	Zusammenfassung	269
10	Zusammenfassung und Ausblick	270
10.1	Ergebnis	270
10.2	Diskussion	272
10.3	Ausblick	280
	Verzeichnisse	283
	Literaturverzeichnis	283
	Abkürzungsverzeichnis	293
	Abbildungsverzeichnis	296
	Tabellenverzeichnis	300

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

S-Bahn-Systeme bieten eine hohe Beförderungskapazität und übernehmen eine tragende Rolle im ÖPNV-Netz von Ballungszentren (Steierwald 2005). Sie verbinden die Außen- mit den Kernbereichen, die sie teilweise auch direkt erschließen. Für die Sicherstellung der Mobilität der Einwohner kommt deshalb dem Schutz vor Funktionskrisen der S-Bahn-Systeme eine besondere Bedeutung zu. Gleichzeitig sind S-Bahn-Systeme, wie alle Eisenbahnsysteme, von (wechselseitigen) Abhängigkeiten seiner Elemente (Fahrzeug, Fahrweg/Infrastruktur, Betrieb) und damit verbundenen komplexen Prozessen geprägt. Zusätzlich besitzen S-Bahn-Systeme eine geringe Netzdichte und oftmals zentrumsnahe Streckenabschnitte, sogenannte Stammstrecken, die von der Mehrzahl der Linien gemeinsam genutzt werden.

Störungen in Eisenbahnsystemen und somit auch in S-Bahn-Systemen treten unregelmäßig und mit unterschiedlichen verkehrlichen und betrieblichen Auswirkungen auf (Dobritz und Weidmann 2012). Mit ihnen einher geht eine Abweichung des Betriebs vom zugrundeliegenden Fahrplan. Können diese Abweichungen durch vorhandene Fahrplanreserven in vertretbarer Zeit nicht ausgeglichen werden oder ist ein Befolgen des Fahrplans auf Grund von Infrastrukturbeeinträchtigungen nicht möglich, sind dispositive Eingriffe für eine Aufrechterhaltung des Betriebs nötig.

Eine einheitliche Definition einer Störung besteht dabei nicht (Schranil und Weidmann 2012, S. 83; Senger 2022, S. 18 f.). Eine gängige Abgrenzung von Störungen zu sonstigen im Betrieb aufkommenden Abweichungen („disturbance“) ist, dass eine Störung („disruption“) vorliegt, wenn betriebliche Planungen (Fahrplan, Fahrzeugumlaufplan, ...) nicht mehr durchführbar sind und umfassend angepasst werden müssen (Groth et al. 2009, S. 402; Nielsen et al. 2012, S. 496).

Tritt eine Störung in einem S-Bahn-System auf einer regulär hochbelasteten Strecke wie der Stammstrecke auf, sind umfassende dispositive Eingriffe notwendig. Die Entwicklung, Festlegung und Kommunikation der Maßnahmen zur Bewältigung einer Störung ist Teil der Störungsdisposition.

Die Störungsdisposition erfordert von den Disponenten in möglichst kurzer Zeit eine Vielzahl von betrieblichen Entscheidungen zu treffen und zu kommunizieren. Dieser Zustand der Prozessbearbeitung ist ein Hinweis auf die Kritikalität, die dieser Situation innewohnt (Fekete 2018). Darüber hinaus sind wichtige Informationen über die Auswirkung und Dauer der Störungen bei der Offenbarung dieser oftmals nicht bekannt und können somit erst verzögert in die Entscheidungsfindung einfließen. Die Konsistenz und Qualität der Gesamtheit aller Entscheidungen der manuellen Störungsdisposition beruht auf den Fähigkeiten und Erfahrungen der jeweiligen Disponenten.

Eine Maßnahme der Störungsdisposition, um auf räumlich begrenzte Störungen mit erheblichen Einschränkungen der Kapazität vorbereitet zu sein, ist der Einsatz von vorgeplanten Handlungskonzepten. Diese sogenannten Störfallprogramme (SFP) dienen der Unterstützung der Disponenten bei einer Störung.

Ein SFP bezieht sich jeweils auf ein Störungsszenario, das eine eingeschränkte Infrastrukturverfügbarkeit vorsieht (z. B. die Sperrung eines Bahnhofs). Ein SFP kann für alle

Störungen, die zu einer Einschränkung der Infrastruktur innerhalb des Rahmens des Störungsszenarios führen, angewendet werden. Die Ursache der Störung tritt in den Hintergrund (Stellwerksausfall, Bombendrohung, Sturmschäden, ...).

Ein SFP definiert i.d.R. betriebliche Maßnahmen für einzelne Linien (z. B. Umleitungen), die einen stabilen Betriebsablauf während einer Störung ermöglichen sollen. Die betrieblichen, linienscharfen Maßnahmen eines SFP bilden das sogenannte Betriebskonzept. Außerdem kann ein SFP auch Maßnahmen für die Information und Lenkung von Fahrgästen enthalten, die in einem Verkehrskonzept zusammengefasst sind.

Der Einsatz von SFP und die damit einhergehende standardisierte Reaktion auf Störungen hat für die Disposition den Vorteil, dass die erforderlichen betrieblichen Maßnahmen für einen stabilen Betriebsablauf während der Störung bereits bekannt sind. Eine aufwendige Planung des Störungsbetriebs entfällt und die Maßnahmen können somit schneller umgesetzt werden.

Außerdem bestehen Vorteile bei der Kommunikation der Maßnahmen, da die SFP allen Beteiligten im Voraus bekanntgegeben werden können. Dadurch müssen zur Reaktion auf eine Störung nicht einzelne Maßnahmen kommuniziert werden, sondern es kann auf das entsprechende SFP verwiesen werden. Durch diesen einheitlichen Informationsstand reduziert sich die erforderliche Kommunikation zwischen den Beteiligten und der Entstehung von Fehlern bei der Informationsweitergabe wird entgegengewirkt. Auch dem Betriebskonzept entsprechende Kundeninformationen können vorbereitet werden und stehen so bei einer Störung schnell und umfassend zur Verfügung.

Ein weiterer Vorteil für den Kunden ist, dass dieser durch die einheitliche Reaktion auf eine Störung Systemkenntnisse ausbilden kann. Damit kennen die Kunden beim Auftreten von Störungen bereits die für sie optimale Reaktion. Der Einsatz von SFP dient somit nicht nur den Disponenten als Instrument, um auf Störungen vorbereitet zu sein, sondern ermöglichen auch dem Nutzer die Ausbildung individueller Strategien.

Da die Erstellung von SFP aufwendig ist, sollten diese möglichst generisch für ein Störungsszenario einsetzbar sein. Bei der Planung eines SFP werden daher, neben den Einschränkungen der Infrastruktur durch die Störung, keine weiteren Infrastruktureinschränkungen angenommen.

Bei der Anwendung von SFP kann aber unabhängig von der Störung weitere Infrastruktur nicht oder nur eingeschränkt verfügbar sein, beispielsweise durch Baumaßnahmen oder weitere Abweichungen. Diese weiteren Einschränkungen können im Regelbetrieb ggf. nur geringe oder keine Auswirkungen haben. Je nach Ausmaß dieser weiteren Infrastruktureinschränkungen ist die Realisierbarkeit des Betriebskonzepts ggf. nicht mehr gegeben. Die kann z. B. der Fall sein, wenn Gleise in einem Wendebahnhof gesperrt sind oder eine Umleitungsstrecke nicht zur Verfügung steht.

Neben der Infrastruktur muss bei der Anwendung eines SFP auch die Betriebssituation berücksichtigt werden. Analog zur Infrastruktursituation wird bei der Planung eines SFP aufgrund der Vielzahl der möglichen Betriebssituationen eine generische Betriebssituation angenommen.

Beim Ausrufen eines SFP sind die betrieblichen Maßnahmen des SFP auf den Fahrplan anzuwenden, um so den Fahrplan anzupassen. Durch die Betriebssituation kann eine Umsetzung des im SFP vorgesehenen Betriebsprogramms nicht möglich sein, wenn z. B. die

Anzahl der Züge auf einer Seite der Störung nicht ausreicht, um die Linien mit dem im SFP vorgesehenen Takt zu bedienen.

Beim Auftreten einer Störung ist daher durch die Disponenten zunächst abzuschätzen, ob das im SFP vorgesehene Betriebsprogramm in der aktuellen Infrastruktur- und Betriebssituation umsetzbar ist. Dazu kommt, dass auch ein Übergang von der aktuellen Betriebssituation zum im SFP vorgesehenen Betriebsprogramm möglich sein muss und nicht zu viel Zeit in Anspruch nehmen sollte. Kommt es bei der Abschätzung der Umsetzbarkeit zu keinem positiven Ergebnis, ist entweder eine Adaption des SFP erforderlich oder die Disposition für die Störung muss ad-hoc erfolgen. Die Vorteile von SFP für die Störungsdisposition können so nicht oder nur teilweise genutzt werden.

Die Abschätzung der Umsetzbarkeit eines SFP und auch eine mögliche Adaption des SFP beruhen bislang auf dem Wissen und der Erfahrung der zuständigen Disponenten. Diese Aufgabe verlangt eine tiefgehende Kenntnis des Gesamtsystems und ist mit einem hohen Aufwand verbunden.

1.2 Ziel der Arbeit

Zur Verbesserung der Vorbereitung auf infrastrukturelle Funktionskrisen soll die Adaption von SFP an die aktuelle Infrastruktur- und Betriebssituation unterstützt werden. Dadurch soll der Aufwand für den Einsatz von SFP gesenkt und SFP unabhängig von der Infrastruktur- und Betriebssituation erfolgreich eingesetzt werden. Dies soll auch dazu führen, dass SFP öfters angewendet werden und die Vorteile der Anwendung von SFP für die Störungsdisposition häufiger wirksam werden.

Zum Erreichen dieser Ziele soll im Rahmen der Arbeit eine (teil)automatisierte Unterstützung für die Anwendung von SFP in S-Bahn-Systeme entwickelt werden. Der Fokus liegt dabei auf der Adaption eines ausgewählten SFP auf die Infrastruktur- und Betriebssituation. Die Adaption eines SFP stellt keine (Neu)Planung eines SFP dar. Vielmehr wurden SFP vorab erstellt und liegen für die Anwendung als bestehende SFP vor. Input der Adaption ist daher ein SFP, das für eine vorliegende Störung ausgewählt wurde.

Ergebnis der Adaption soll ein SFP mit einem validierten Betriebs- und Verkehrskonzept sein. Das angepasste Betriebskonzept soll betriebliche Maßnahmen für einen stabilen Betrieb im eingeschwungenen Zustand enthalten. Die linienscharfen Maßnahmen des Betriebskonzepts geben u. a. vor, wie der Verlauf der Linien während der Störung angepasst wird. Daher kann eine Anpassung des Betriebskonzepts als eine Anpassung eines Liniennetzplans abstrahiert werden.

Das Verkehrskonzept enthält verkehrliche Maßnahmen zur Lenkung und Aufrechterhaltung der Verkehrsströme. Durch eine Anpassung des Betriebskonzepts können die verkehrlichen Maßnahmen nicht mehr umsetzbar sein oder den Bedürfnissen der Fahrgäste nicht mehr entsprechen.

Insgesamt wird durch eine (teil)automatisierte Adaption von SFP in der Störungsdisposition die rasche und wirksame Bewältigung von Störungen in S-Bahn-Systemen unterstützt und somit der Schutz vor Funktionskrisen des S-Bahn-Systems verbessert. Als Ausgangspunkt für die Entwicklung einer (teil)automatisierten Unterstützung zeigt das folgende Kapitel den Stand des Wissens zur Störungsdisposition auf.

2 Stand des Wissens

2.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand des Wissens zur Lösung von Problemen der Störungsdisposition dargelegt. Bei der Störungsdisposition handelt es sich um eine Echtzeit-Fahrplananpassung. Dabei können SFP zum Einsatz kommen. Ein SFP gibt ein Handlungskonzept für den Betrieb während einer Störung (Störungsbetrieb) vor.

Dazu wird bereits bei der Erstellung des SFP geplant, welche Anpassungen des Fahrplans während eines bestimmten Störungsszenarios vorzunehmen sind. Es bestehen somit Gemeinsamkeiten zu Anpassungen des Fahrplans für geplante Abweichungen der Infrastruktur (z. B. Baumaßnahmen). Im Stand des Wissens werden daher auch Ansätze zur Anpassung von Fahrplänen für geplante Infrastruktureinschränkungen dargestellt.

Die Disposition von Zugfahrten kann als ein Optimierungsproblem angesehen werden. In der Literatur besteht eine Vielzahl an Ansätzen zur Lösung von Optimierungsproblemen. Aufbauend auf den Erkenntnissen zur Störungsdisposition soll daher ein Fokus auf ausgewählte Methoden gelegt werden.

Der Aufbau von Kapitel 2 folgt den zuvor genannten Themen. Zunächst wird ein Überblick zur Disposition in Eisenbahnsystemen gegeben (Kapitel 2.2). Anschließend erfolgt eine Beschreibung bestehender Ansätze zur Unterstützung der Disposition während einer Störung ohne (Kapitel 2.3) und mit vorgeplanten Handlungskonzepten (Kapitel 2.4). In Kapitel 2.5 werden bestehende Ansätze für die Fahrplananpassungen für geplante Infrastruktureinschränkungen beschrieben. Kapitel 2.6 legt den Fokus auf ausgewählte Methoden der Störungsdisposition. Abschließend werden die Ergebnisse von Kapitel 2 zusammengefasst (Kapitel 2.7).

2.2 Disposition

Ziel des Kapitels ist es, einen Überblick über die Disposition im System Eisenbahn zu geben. Bei der Disposition kann unterscheiden werden in: (Wolters 2023, S. 78 ff.; DB Ril 420.0201, S. 1):

- Regeldisposition
- Störungsdisposition

Im Weiteren werden beide Arten näher betrachtet.

2.2.1 Grundlagen der Disposition

Aufgabe der Disposition „ist das Erkennen und Lösen von Konfliktfällen im Betriebsablauf [...] auf der Grundlage eingetretener oder zu erwartender Ereignisse unter Einschluß aller einwirkenden Randbedingungen und Einflüsse“ (Jacobs 2003, S. 65). Im Folgenden wird zunächst auf Konflikte selbst näher eingegangen. Anschließend wird das manuelle und automatisierte Erkennung und Lösen von Konflikten behandelt.

Konflikte

„Ein Konflikt ist die Verletzung einer betrieblichen Randbedingung“ (Pferdmenges und Schaefer 1995, S. 175). Etwas ausführlicher definiert Oetting (2023a, S. 237) Konflikte: „ein Konflikt [ist] die Situation, dass eine Bindung [...] zwischen zwei Zugfahrten oder eine Zugfahrt und

der Infrastruktur nicht wie gewünscht (Planung) oder geplant (Betrieb) realisiert werden kann.“. Dabei ist eine Bindung eine „gegenseitige Abhängigkeit zwischen Zügen“ (Oetting 2023b, S. 224) durch die (gemeinsam genutzte) Infrastruktur, die Fahrzeugumlaufplanung, die Personalplanung oder kommunizierte Anschlüsse bzw. eine Reisekette. Ein Zug kann dabei im Sinne eines Fahrzeuges (insbesondere für die Fahrzeugumlaufplanung) als auch einer Zugfahrt (z. B. für die kommunizierten Anschlüsse) betrachtet werden. Die Art der verletzten Bindungen gibt die Konfliktart vor, somit können die folgenden vier Konfliktarten unterschieden werden (Wolters 2023, S. 69):

- Infrastrukturverfügbarkeitskonflikt
- Belegungskonflikt
- Umlaufkonflikt
- Anschlusskonflikt

Durch die Lösung von Konflikten können wiederum Konflikte unterschiedlicher Konfliktart entstehen, die als Folgekonflikte bezeichnet werden (Oetting 2023a, S. 259). Eine Definition von Folgekonflikten, die auch die Verknüpfung zu dem Begriff Erstkonflikte herstellt, findet sich u. a. bei Jacobs (2003, S. 65) „[Denn] nach dem Lösen des Erstkonflikts verbleiben in der Regel noch weitere aus dieser Lösung resultierende Folgekonflikte.“

Neben der Konfliktart kann ein Konflikt zeitlich und räumlich charakterisiert werden. Weitere Eigenschaften eines Konflikts sind die am Konflikt beteiligten Züge sowie die „Schwere“ des Konflikts (Oetting 2023a, S. 241). Die Konfliktschwere ist ein Maß für die Auswirkung von Konflikten relativ zueinander. Einen Ansatz zur Berechnung der Konfliktschwere bietet die Arbeit von Oetting et al. (2013, S. 12 f.), die zur Berechnung der Konfliktschwere die Lösung eines Konflikts anhand der Konfliktart abschätzt. Die Auswirkungen der Konfliktlösungen auf die am Konflikt beteiligten Züge (z. B. zusätzliche Wartezeiten) stellt die Konfliktschwere dar.

Manuelle Disposition

In der Praxis erfolgt die Disposition durch Disponenten in den drei Schritten:

- Produktion beobachten
- Konflikte erkennen
- Konflikte lösen
 - Maßnahme entwickeln
 - Maßnahme festlegen
 - Maßnahme kommunizieren und umsetzen
 - Ursache, Maßnahme und Auswirkung dokumentieren (Wolters 2023, S. 65)

Auch Rodriguez (2007, S. 232) hat diese Schritte (mit einer etwas anderen Aufteilung) identifiziert. Dieser der Disposition zugrundeliegende Prozess wird als Konflikterkennung und -lösung (KE/KL) bezeichnet.

Ein Konflikt kann i. d. R. durch mehrere Maßnahmen gelöst werden (Oetting 2023a, S. 242). Diese Maßnahmen werden als Konfliktlösungsalternativen (KLA) bezeichnet und können aus mehreren elementaren Konfliktlösungen kombiniert werden (Oetting 2023a, S. 242; Heller und Schaer 2004, S. 120). Die Disposition kann somit als kombinatorisches Optimierungsproblem aufgefasst werden (Ping et al. 2001, S. 949).

Eine Auswahl an elementaren Konfliktlösungen gibt folgende Liste (siehe auch Crespo (2020, S. 181 ff.) und Oetting (2023a, S. 242 ff.) für eine detailliertere Beschreibung von elementaren Konfliktlösungen):

- zeitliche Konfliktlösung
 - Verschieben
 - Biegen
 - Reihenfolgenänderung
- zeitliche Konfliktlösung mit Einbeziehung weiterer Ressourcen
 - verkürzte Wende (mit zweitem Triebfahrzeugführer)
 - überschlagende Wende
 - Verknüpfung von Umläufen
- räumliche Konfliktlösung
 - Umleitung
 - alternativer Fahrweg im Knoten
 - Wende über Abstellung/Wendeanlage
 - Umlenkung der Reisenden
- Konfliktlösung durch Entfall oder Ersatz des Angebots
 - Ausfall
 - Teilausfall, vorzeitige Wende (allgemein: alternative Wende)
 - Ausfall Verkehrshalt
 - zusätzlicher Verkehrshalt
 - zusätzliche Zugfahrt (mit Trennen & Vereinen)
 - Freigabe für die Nutzung anderer Fahrten
 - Lösungen außerhalb des Systems Bahn
- Konfliktlösung für Ressourcen
 - zusätzlicher Zug (Trennen, Nutzung der Reserve)
 - Reduzierung Zuganzahl (Vereinen, Abstellung)

Die Disposition für das Gesamtsystem Bahn umfasst neben der Fahrplananpassung die Berücksichtigung weiterer Planung, z. B. für Fahrzeugumlauf, Personal, Zugvorbereitung, Ver- und Entsorgung, ... (Wolters 2023, S. 64). Eine Konfliktlösung kann somit Auswirkungen auf verschiedene Planungen von Eisenbahnverkehrs- (EVU) und Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) haben. Zur Lösung von Konflikten ist daher eine Zusammenarbeit von EVU und EIU erforderlich (Heller und Schaer 2004, S. 102; Wolters 2023, S. 64).

Ziel der Disposition ist es, „die negative Wirkung auf Reisende und Güterverkehrskunden sowie auf die Flüssigkeit und Wirtschaftlichkeit des Betriebs möglichst gering zu halten.“ (Heller und Schaer 2004, S. 102). Konkrete Ziele der Disposition sind nach Oetting:

- geringe Abweichungen von Wunsch (bei der Planung) oder Planung (im Betrieb)
- hohe Kapazität
- geringe Kosten, verbunden mit geringem Fahrzeug- und Personalbedarf
- hohe Attraktivität für die Kunden
- Robustheit der gefundenen Lösung (Oetting 2023a, S. 267)

Die DB Netz AG setzt unterschiedliche Schwerpunkte für die Ziele der Regel- und Störungsdisposition an (DB Ril 420.0201, S. 1). Für die Regeldisposition ist das Ziel die

„Erhaltung bzw. Wiederherstellung der Planmäßigkeit aller Züge“ (DB Ril 420.0201, S. 1). Die Störungsdisposition soll den Zielen folgen:

- Maximale Ausnutzung der Kapazität von Strecken und Knoten,
- Schnellstmögliche Wiederherstellung des Regelzustandes in der Betriebsführung (DB Ril 420.0201, S. 1)

Aus den Zielen der Disposition lässt sich für die Bewertung von Konfliktlösungen ableiten, „dass Auswirkungen auf Betrieb, Verkehr und Wirtschaftlichkeit abzubilden sind“ (Oetting 2023a, S. 267). In der Praxis erfolgt die Disposition i. d. R. manuell durch Disponenten (Groth et al. 2009, S. 416; Bucher und Dietrich 2022, S. 16; Küpper 2023, S. 62). „Bisherige Bestrebungen der Automatisierung in der Disposition konzentrieren sich auf die Unterstützung lokal agierender Disponenten und Fahrdienstleiter und die IT-Abbildung der bestehenden Prozesse“ (Küpper 2023, S. 62). Die Durchführung der KE/KL ist durch die erforderliche Abstimmung zwischen EIU und EVI trotz IT-Unterstützung zeitintensiv (Bucher und Dietrich 2022, S. 16).

Dies ist einer der Gründe für die Probleme manueller Disposition, die Rodriguez (2007, S. 232) beschreibt: „During peak hours, there is a lot of information and little time to carry out all these tasks. Under stress, the operator may choose poor solutions.“ Auch Groth (2009, S. 33) unterstreicht: „As is evident most of the decisions made in dispatching today are ad hoc and to a large extent subjective. This again means that the quality of a recovery depends strongly on the skills, experience and preferences of the individual dispatcher.“

Groth (2009, S. 33) sieht einen weiteren Nachteil in der nicht vollständig integrierten Anpassung von Fahrplan, Fahrzeugumlaufplan und Personalplan, was höchstwahrscheinlich zu suboptimalen Lösungen führt. In der Praxis herrscht die sequentielle Planung (anstelle der integrierten Planung) vor. Der Grund dafür liegt nach Cadarso et al. (2013, S. 17) in den europäischen Regelungen, die besagen, dass das Infrastrukturmanagement (EIU) vom Zugbetrieb (EVU) zu trennen ist.

Um den bestehenden Problemen einer manuellen Disposition zu begegnen, gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze für eine (teil)automatisierte Disposition, wobei keiner diese Ansätze bislang die manuelle Disposition flächendeckend abgelöst hat (siehe Aussage zuvor zur Verbreitung der manuellen Disposition).

(Teil)Automatisierung der Disposition

Eine Herausforderung für Ansätze zur (teil)automatisierten Disposition ist die Komplexität des Problems. Für die Fahrplananpassung im Sinne einer Zuweisung von Routen und Abfahrtszeiten unter Einhaltung zeitlicher Bedingungen konnte gezeigt werden, dass dies ein NP-vollständiges Problem ist (Mascis und Pacciarelli 2002, 504 f.). Aber auch für die Anpassung von Fahrzeugumlaufplänen und die Umverteilung von Fahrzeugen konnte gezeigt werden, dass dies ein NP-schweres Problem ist (Budai et al. 2010, S. 294). Bei einer integrierten Betrachtung mehrerer Planungen ist daher eine gleich hohe oder höhere Komplexität zu erwarten.

Auch Ping et al. (2001) sehen die Disposition als komplexes Problem und fassen zusammen: „So, train dispatching is a large-scale, dynamic, combinatorial and optimal problem with multi-constraint“ (Ping et al. 2001, S. 949). Fay (2000) zieht aus der Komplexität den Schluss, dass „[...] eine vollständige Automatisierung der Disposition wegen der Vielfalt der auftretenden Situationen und Randbedingungen nicht möglich [ist]“ (Fay 2000, S. 741). Dazu kommt, dass für einen praxisrelevanten Ansatz eine schnelle Lösungsbereitstellung entscheidend ist (u. a.

Pferdmenges und Schaefer 1995, S. 175; Chu et al. 2012, S. 45; Rodriguez 2007, S. 232; Rey et al. 2007, S. 696; Bucher und Dietrich 2022, S. 16).

Damit Ansätze zur (teil)automatisierten Disposition trotz der Komplexität des Problems in einer annehmbaren Zeit eine Lösung bereitstellen können, ist (Oetting 2023a, S. 254)

- die Komplexität des betrachteten Problems zu reduzieren und/oder
- keine gesicherte Optimalität der Lösungen anzustreben.

Oftmals wird für Ansätze einer (teil)automatisierten Disposition eine Kombination aus beidem angewendet (Oetting 2023a, S. 254).

Eine Reduktion der Komplexität der Disposition kann durch eine vereinfachte Modellierung des Bahnsystems (mit den Systemkomponenten Fahrweg, Fahrzeug, Betrieb) ermöglicht werden. Eine vereinfachte Modellierung der Disposition wird beispielsweise durch folgende Punkte erreicht:

- eine Reduzierung der durch die Zielfunktion abgebildeten Einflussgrößen (z. B. Beschränkung auf Summe der Verspätungen) (Oetting 2023a, S. 267)
- eine Reduzierung der Komplexität von Zielfunktion und Nebenbedingungen (z. B. keine Berücksichtigung der Bewertung von Verspätungen durch Reisende oder Relaxation/Straffung (je nach Lösungsansatz) von Nebenbedingungen) (Heller und Schaer 2004, S. 105)
- eine Reduktion des Suchraums, z. B. durch
 - Unterstützung nicht aller Konfliktarten (Oetting 2023a, S. 270) (z. B. keine Berücksichtigung von Umlaufkonflikten)
 - Begrenzung von Konfliktarten (z. B. keine Berücksichtigung von Belegungskonflikten in Fahrstraßenknoten; keine Berücksichtigung der Beschränkungen der Belegung von Gleisen bei höhengleichen Bahnsteigübergängen (Toletti et al. 2023, S. 6))
 - Unterstützung nicht aller elementarer Konfliktlösungen (z. B. durch fixe Geschwindigkeiten) (Oetting 2023a, S. 255)
 - Begrenzung von elementaren Konfliktlösungen (z. B. Reihenfolgentausch: Festlegung von Rängen; räumliche Verschiebung: Vorgabe von möglichen Routen oder Begrenzung des Suchraums für alternative Routen) (Heller und Schaer 2004, S. 105 f.; Oetting 2023a, S. 255)
 - zeitlich/räumliche Eingrenzung (Oetting 2023a, S. 255) (z. B. Beschränkung auf einen Prognosezeitraum oder eine räumliche Beschränkung)
- grobe Modellierung der Systemkomponenten (z. B. der Fahrdynamik durch Nutzung von minimalen Fahrzeiten (Toletti et al. 2023, S. 6 f.)) (Eine grobe Modellierung kann mit einer Reduktion des Suchraums einhergehen, z. B. kann eine vereinfachte Modellierung von Fahrstraßenknoten zu einer Begrenzung der Konfliktart „Belegungskonflikt“ führen.)

Praxisnahe Probleme haben oftmals eine Vielzahl von Anforderungen an die Modellierung des Problems. Bei einer Reduktion der Komplexität ist daher darauf zu achten, dass diese nicht mit einem Verlust der Relevanz für die Praxis einhergeht. D. h., dass alle Anforderungen aus der Praxis weiterhin erfüllt werden.

Die zweite Möglichkeit zur Begegnung von komplexen Problemen ist, keine gesicherte Optimalität der Lösungen anzustreben. Keine gesicherte Optimalität der Lösungen ist gegeben, wenn (Oetting 2023a, S. 254 f.).

- keine exakten Verfahren genutzt werden (sondern z. B. Heuristiken oder Verfahren des maschinellen Lernens) oder
- eine rechenzeitliche Beschränkung festgelegt wird.

Bei Bedarf (keine Lösung oder keine zufriedenstellende Lösung vorhanden) können Reduktionen der Komplexität oder rechenzeitliche Beschränkungen gelockert werden (Oetting 2023a, S. 255). Die Lösung von Problemen der Disposition kann außerdem unterstützt werden durch „[...] eine Zerlegung in Teilprobleme [...], verbunden mit einer Adressierung der verschiedenen Teilprobleme mit adäquaten, ggf. unterschiedlichen Methoden“ (Oetting 2023a, S. 255).

Zusammenfassend ergibt sich, aufgrund der Komplexität des Problems und der Anforderung an eine schnelle Lösungsbereitstellung bei der Automatisierung der Disposition, stets ein Zielkonflikt zwischen Komplexität (und damit auch Praxisrelevanz) des betrachteten Problems und gesicherter Optimalität der Lösungen.

Forschung und Entwicklung zur (teil)automatisierten Disposition findet seit einigen Jahren statt, sodass eine Vielzahl an Forschungsansätzen und -ergebnissen bestehen. Übersichten zu Assistenzsystemen in der Disposition (decision support systems) und/oder den verwendeten Methoden bieten u. a.: Vieira et al. 2003; Heller und Schaer 2004; Törnquist 2006; Narayanaswami und Rangaraj 2011; Cacchiani und Toth 2012; Nießen et al. 2016.

Nachdem ein Einblick zur Disposition in Eisenbahnsystemen und deren Automatisierung gegeben wurde, wird im Anschluss näher auf Ansätze der Regeldisposition (Kapitel 2.2.2) und Störungsdisposition (Kapitel 2.2.3) eingegangen.

2.2.2 Regeldisposition

In diesem Kapitel wird eine Übersicht zu bestehenden Ansätzen der Regeldisposition geben, dabei wird angelehnt an Nießen et al. (2016, S. 11), unterschieden zwischen Ansätzen, die

- eine KE/KL verwenden und somit einer lokalen Suche entsprechen und Ansätze, die
- eine globale Suche vornehmen.

Lokale Suche

In dem Ansatz der lokalen Suche werden nacheinander alle bestehenden (2-Zug-)Konflikte durch eine KE/KL (teil)automatisiert gelöst (Nießen et al. 2016, S. 11 f.).

Eine Methode der lokalen Suche sind Ereignisbaumverfahren (z. B. Branch-and-Bound-Verfahren) (Heller und Schaer 2004, S. 104). Die Verfahren erreichen Optimalität. Für einen Einsatz ist aber eine deutlich vereinfachte Modellierung des Bahnsystems erforderlich (Heller und Schaer 2004, S. 105).

Eine weitere Methode, durch die eine lokale Suche umgesetzt werden kann, sind wissensbasierte Systeme (z. B. Fay 2000; Tasler und Wegele 2014). Dafür wird „[...] Wissen im Computer analog zur Denkweise des Disponenten abgebildet (in sogenannten ‚Wenn-Dann-

Regeln') [...]“ (Fay 2000, S. 741). Da die Arbeitsweise der Disponenten übertragen und verwendet wird, ist die Lösungsfindung gut nachvollziehbar (Fay 2000, S. 741).

Wissensbasierte Systeme schränken den Suchraum durch das abgebildete Wissen ein und ermöglichen so eine schnelle Lösungsbereitstellung. Existieren zur Lösung eines Konflikts aber mehrere zulässige KLA, ist entweder eine Bestimmung und Bewertung der Auswirkungen der KLA erforderlich (z. B. durch Ereignisbaumverfahren) oder es sind Regeln zur Abschätzung der Auswirkung notwendig (Heller und Schaer 2004, S. 107 f.).

Eine KE/KL kann auch ohne Dispositionsregeln durch die Erstellung und Bewertung von KLA erfolgen (z. B. Missikoff 1998; Şahin 1999; Jacobs 2003; Oetting et al. 2013). Crespo et al. (2023) haben anhand bestehender KE/KL-Ansätze einen generischen Aufbau einer KE/KL-Heuristik bestimmt (siehe Abbildung 2-1).

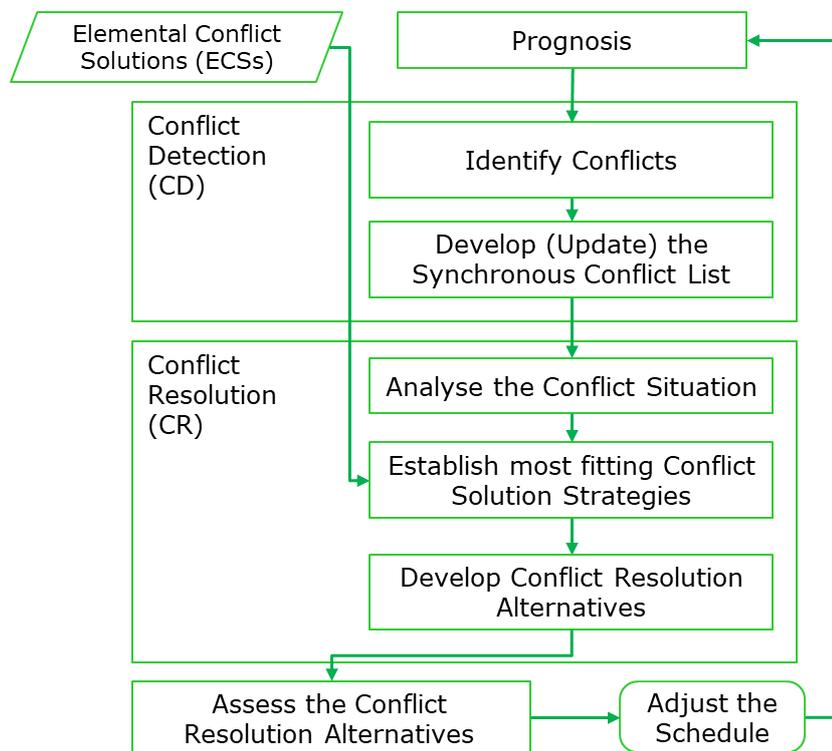


Abbildung 2-1: Ablauf einer generischen KE/KL-Heuristik (Abbildung entspricht Abbildung 2 aus Crespo et al. 2023, S. 9)

KE/KL-Heuristiken lösen Konflikte i. d. R. synchron, d. h. in der zeitlichen Reihenfolge des Auftretens der Konflikte. Darf eine Konfliktlösung außerdem keine Folgekonflikte erzeugen, die zeitlich vor dem Erstkonflikt liegen, ist eine Terminierung der KE/KL gegeben. Aufgrund der Größe des Suchraums werden bei den Ansätzen Heuristiken zur Auswahl der KLA genutzt, beispielsweise durch eine Abschätzung der Auswirkung der lokalen KLA auf die globale Betriebssituation (Missikoff 1998, S. 638 f.). Dies ermöglicht wiederum eine schnelle Lösungsbereitstellung, garantiert aber keine optimale Lösung (Nießen et al. 2016, S. 11 f.).

Ein Vorteil der Nutzung von KE/KL-Ansätzen ist, dass „[...] keine methodisch bedingte Einschränkung hinsichtlich der exakten Nachbildung der Betriebsprozesse besteht“ (Heller und Schaer 2004, S. 106 f.). Die chronologische Bewertung von KLA zur Lösung von Konflikten entspricht der Arbeitsweise von Disponenten und ist daher gut nachvollziehbar (Nießen et al. 2016, S. 12).

Globale Suche

Die globale Suche betrachtet keine einzelnen Konflikte, sondern berechnet unter Berücksichtigung von Randbedingungen eine Lösung, die eine gegebene Zielfunktion möglichst gut erfüllt (Oetting 2023a, S. 255). Die Abkehr von der Betrachtung einzelner Konflikte erfordert eine grundsätzlichere Modellierung des Bahnbetriebs (Heller und Schaer 2004, S. 108). Es ist eine mathematische Beschreibung von Zugfahrten und deren Bindungen erforderlich. In bestehenden Ansätzen werden dafür u. a. folgende Modellierungsansätze verwendet:

- Constraintprogrammierung (z. B. Rodriguez 2007)
- (gemischt-)ganzzahliges lineares Programm (z. B. Caimi et al. 2012; Törnquist und Persson 2005; Pellegrini et al. 2014; Weymann und Nießen 2015)
- Alternative Graph Model (z. B. D'Ariano 2008)

Für die Lösungsbestimmung kommen bei globalen Suchen

- exakte Verfahren (z. B. Rodriguez 2007; Caimi et al. 2012; Pellegrini et al. 2014; Weymann und Nießen 2015; teilweise wird eine rechenzeitliche Beschränkung genutzt) oder
- eine Kombination aus exaktem Verfahren und (Meta)Heuristiken (z. B. Törnquist und Persson 2005; D'Ariano 2008; Samà et al. 2016) zum Einsatz.

Ein Vorteil der Nutzung der globalen Suche ist, dass bei einem Einsatz von exakten Verfahren für das gegebene Problem eine optimale Lösung gefunden wird (Nießen et al. 2016, S. 12). Ein Problem der globalen Suche beschreiben Heller und Schaer (2004, S. 106): „Soll der Bahnbetrieb sehr detailliert nachgebildet werden, steigt die Anzahl der Nebenbedingungen und damit auch die Zahl der zu generierenden Gleichungen an“. Um dennoch eine schnelle Lösungsbereitstellung zu ermöglichen, ist die Komplexität des Problems zu reduzieren (z. B. Beschränkung der Konfliktarten auf Belegungskonflikte in Fahrstraßenknoten in Rodriguez (2007)).

Je nach Modellierung ergeben sich bereits Einschränkungen der Problemkomplexität aus der gewählten Modellierung selbst. Beispielsweise „[...] entstehen [bei einer linearen Optimierung] aus der zwingenden Forderung nach Linearität des Gleichungssystems Restriktionen beim Nachbilden des Bahnbetriebes“ (Heller und Schaer 2004, S. 106). „Ein weiterer Nachteil dieser mathematischen Modelle liegt darin, daß sie zwar eine Konfliktlösung aber keine explizite Konflikterkennung beinhalten“ (Jacobs 2003, S. 94).

Zusammenfassend kann eine Automatisierung der Regeldisposition durch globale oder lokale Optimierungsansätze erfolgen. Für beide Ansätze können unterschiedliche Methoden angewendet werden, wobei für das betrachtete Problem stets eine Lösung für den Zielkonflikt zwischen Komplexität und gesicherter Optimalität gefunden werden muss.

2.2.3 Störungsdisposition

Bei einer Störung wird entweder (Wolters 2023, S. 85)

- das bestehende Betriebsprogramm situativ (bzw. ad-hoc) an die Störung angepasst (ad-hoc Störungsdisposition) oder
- es kommen Planungen (z. B. Störfallprogramme) zum Einsatz, die Leitlinien für die Anpassung des Betriebsprogramms vorgeben (vorgeplante Störungsdisposition).

Ziel der Anpassung ist die maximale Ausnutzung der Kapazität (siehe Kapitel 2.2.1).

Ghaemi und Goverde (2015, S. 2) haben das im Netz bestehende Verkehrsangebot in Funktion zum zeitlichen Verlauf einer Störung gebracht. Ergebnis ist das sogenannte Badewannenmodell („bathtub model“; siehe Abbildung 2-2). Unterschieden werden drei Phasen des Störungsbetriebs. In der ersten Phase reduziert sich das Verkehrsangebot. In Teilen des Netzes kann der Verkehr sogar ganz zum Erliegen kommen. Während der Störung verbleibt das Verkehrsangebot auf einem niedrigen Niveau. Nach Ende der Störung steigt das Verkehrsangebot in der dritten Phase wieder auf sein im Regelbetrieb übliches Niveau an.

Ein Charakteristikum der Störungsdisposition ist die Nutzung von elementaren Konfliktlösungen, die in der Regeldisposition nur vereinzelt eingesetzt werden. Charakteristisch für Störungen sind nach Oetting die elementaren Konfliktlösungen (Oetting 2023a, S. 264):

- Ausfall, Teilausfall, vorzeitige Wende (siehe auch Brauner (2023, S. 45 ff.))
- Lösungen außerhalb des Systems Bahn
- Umleitung einer Zugfahrt
- Umlenkung von Reisenden

Eine Herausforderung bei der Störungsdisposition ist die Anzahl der gleichzeitig von Konflikten betroffenen Züge, da das geplante Betriebskonzept nicht oder nur teilweise umsetzbar ist (DB Ril 420.0201, S. 1). Außerdem sind, im Gegensatz zur Regeldisposition, oftmals die charakteristischen elementaren Konfliktlösungen zu berücksichtigen, um überhaupt eine Lösung zu generieren. Die zu berücksichtigenden elementaren Konfliktlösungen haben z. T. deutliche Auswirkungen auf die Reisendenlenkung, Fahrzeugumlauf- und Personalplanung, was zu einer Zunahme der Komplexität des betrachteten Problems führt.

Wie auch bei der Regeldisposition besteht für die Störungsdisposition die Herausforderung, dass eine kurze Dauer der Lösungsbereitstellung anzustreben ist. Bei einer Untersuchung von Störungen der S-Bahn Stuttgart wurde eine durchschnittliche Dispositionsdauer

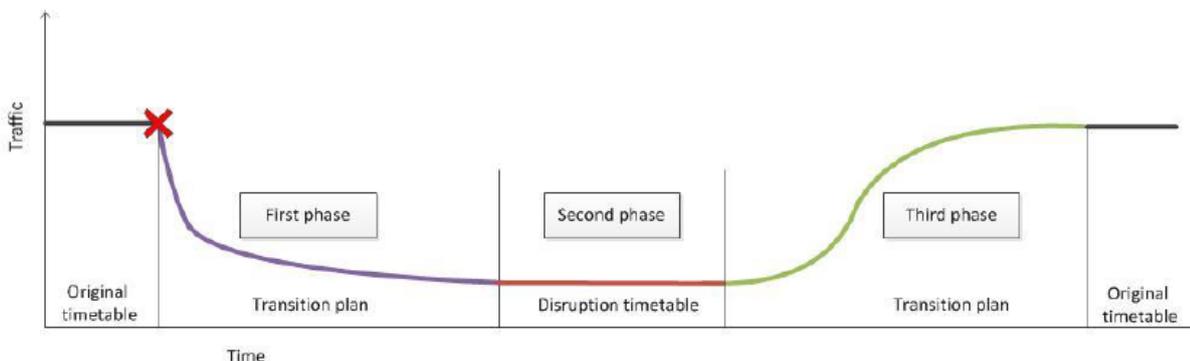


Abbildung 2-2: „Badewannenmodell“ (Abbildung entspricht Abbildung 1 aus Ghaemi und Goverde (2015, S. 2))

(Ereigniseintritt bis finale Abstimmung EIU – EVU) von 10,7 Minuten bestimmt, wobei zwischen Erhalt der Erstinformation und erster Dispositionsentscheidung im Durchschnitt nur 3,4 Minuten vergehen (Bucher und Dietrich 2022, S. 16 f.). Für einen praktikablen Einsatz sollten Ansätze zur Automatisierung der Störungsdisposition daher Lösungen in weniger als 3 Minuten bereitstellen können.

Nachdem Regel- und Störungsdisposition voneinander abgegrenzt und die Herausforderungen der Störungsdisposition aufgezeigt wurden, wird in den nächsten beiden Kapiteln eine Übersicht zu bestehenden Ansätze der Störungsdisposition gegeben. Unterschieden wird zwischen den beiden eingeführten Ansätzen zur

- ad-hoc Störungsdisposition (Kapitel 2.3) und
- vorgeplanten Störungsdisposition (Einsatz von Störfallprogrammen) (Kapitel 2.4).

2.3 Ad-hoc Störungsdisposition

In der ad-hoc Störungsdisposition wird das bestehende Betriebsprogramm situativ (ad-hoc) an aufkommende Störungen angepasst (siehe Kapitel 2.2.2). In diesem Kapitel wird ein Überblick über bestehende Ansätze der ad-hoc Störungsdisposition gegeben. Dabei wird der Fokus auf die gefundenen Lösungen für den Zielkonflikt zwischen Komplexität und gesicherter Optimalität gelegt.

Fekete et al. (2011) kombinieren einen Ansatz zur Anpassung von Fahrplan und Fahrzeugumlaufplan bei Störungen für schienengebundene Verkehrssysteme. Genutzt wird eine ganzzahlige Programmierung, basierend auf einem Event-Activity Network, um einen konfliktfreien angepassten Fahrplan für die geschätzte Dauer der Störung zu erhalten. Die elementaren Konfliktlösungen sind begrenzt auf: zeitliches Verschieben, Ausfall von Zugfahrten, vorzeitige Wende, Änderung von Umläufen und Abstellung oder Einbringen von Fahrzeugen in/aus dem Depot. Umleitungen werden nicht berücksichtigt. Der Fokus der Arbeit liegt auf Szenarien, in denen ein Gleis einer zweigleisigen Strecke nicht verfügbar ist (partielle Streckensperrung). Die Dauer der Lösungsbereitstellung ist bei längeren Stördauern (>45 Minuten) und der Betrachtung einer Linie größer als 9 Minuten.

Cadarso et al. (2013) betrachten Störungen in S-Bahn-Netzen („rapid transit networks“). In der Arbeit sind die S-Bahn-Netze durch eine Lage in einem Ballungsraum, häufige Zugverbindungen und hohe Fahrgastzahlen charakterisiert. Außerdem besteht eine Verknüpfung zu einem U-Bahn-System („Metro network“). Als Störungen werden komplette oder partielle Streckensperrungen berücksichtigt. Präsentiert wird ein Optimierungsmodell, das Fahrplan und Fahrzeugumlaufplan unter Berücksichtigung des Nachfrageverhalten der Fahrgäste anpasst. Der Planungszeitraum beinhaltet sowohl die gegebene Dauer der Störung als auch die Zeit, die benötigt wird, um vollständig zum ursprünglichen Fahrplan zurückzukehren.

Der Ansatz von Cadarso et al. (2013) besteht aus zwei Teilen. In einem ersten Schritt wird die erwartete Nachfrage in dem gestörten Netz mit Hilfe eines Multinomial-Logit-Modells bestimmt. Im zweiten Schritt wird durch eine gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung (Mixed Integer Linear Programming) der Fahr- und Fahrzeugumlaufplan angepasst.

Der Komplexität des behandelten Problems wird u. a. durch eine Aufteilung des Problems in Sub-Probleme, wodurch die Nachfrage vor der Fahrplananpassung berechnet wird, begegnet. Dadurch basiert die Berechnung der Nachfrage nicht auf den genauen Abfahrts- und

Ankunftszeiten, sondern auf für die Störung erwarteten Linientakten. Die berücksichtigten elementaren Konfliktlösungen sind begrenzt, da für die Fahrplananpassung eine fixe Fahrzeit zwischen den Stationen angenommen wird. Umleitungen sind nicht vorgesehen. Geplante Zugfahrten können nicht angepasst werden, sondern es besteht nur die Möglichkeit, diese ausfallen zu lassen. Zusätzlich können aber weitere Zugfahrten („emergency service“) eingeplant werden. Die Dauer zur Lösungsfindung beträgt wenige Minuten („The solution times (STs) range from a few seconds to a few minutes“ Cadarso et al. 2013, S. 27).

Louwerse und Huisman (2014) beschreiben einen Ansatz für die Echtzeit-Fahrplananpassung durch eine ganzzahlige Optimierung (Integer Programming), basierend auf einem Event-Activity Network. Betrachtet werden komplette oder partielle Streckensperrungen unter Einbeziehung der erwarteten Dauer der Störung. Ziel ist die Erstellung eines stabilen Fahrplans während der Störung und kein Übergang zu diesem („static disposition timetable for the second phase of the disruption process“ Louwerse und Huisman 2014, S. 585). Als Bewertungsgrößen dienen die Anzahl der ausfallenden Züge, die Verspätungen und die verbleibenden Bedienintervalle. Als Infrastruktur werden Strecken und Stationen mit maximal zwei Gleisen betrachtet. Eine Umlaufplanung wird nur so weit berücksichtigt, dass die Anzahl der Züge in jede Richtung etwa gleich groß sein soll. Dadurch soll, ohne einen Umlaufplan zu erstellen, die Wahrscheinlichkeit erhöht werden, dass zu dem angepassten Fahrplan ein machbarer Umlaufplan besteht. Die elementaren Konfliktlösungen sind begrenzt auf: Ausfall, zeitliche Verschiebung und vorzeitige Wende in einer vorgegebenen Station. Für kleine Szenarien von 12 Stationen besteht eine Berechnungszeit von unter 14 Sekunden. Louwerse und Huisman (2014, S. 593) merken aber an, dass der Ansatz für komplexere Szenarien oder größere Netzwerke aufgrund einer deutlich steigenden Berechnungszeit nicht anwendbar ist.

Der Ansatz von Veelenturf et al. (2014) baut auf dem zuvor beschriebenen Ansatz von Louwerse und Huisman (2014) auf. Bei Veelenturf et al. (2014) wird der Übergang vom Fahrplan des Regelbetriebs zu Beginn der Störung zu einem angepassten Fahrplan und auch der Übergang nach der Störung zurück zum Fahrplan des Regelbetriebs betrachtet. Im Vergleich zu Louwerse und Huisman (2014) werden außerdem weitere elementare Konfliktlösungen, wie alternative Fahrwege im Knoten, Nutzung vorgegebener Umleitungen, Reihenfolgentausch und das Einbringen weiterer Fahrzeuge, ermöglicht. Weiterhin ist die maximale Verspätung der Züge, die nach Eintreten der Störung beginnen, begrenzt. Die Kapazität in Stationen und Strecken entspricht der Anzahl der verfügbaren Gleise. Fahrstraßenknoten werden vernachlässigt. Für einige der berechneten Szenarien ist die erzielte Lösungsdauer nicht für die Praxis geeignet („However, in case of a single track blockage, allowing delays for trains up to 10 minutes can increase the computation time to values which are not usable in practice.“ Veelenturf et al. 2014, S. 19).

Bešinović et al. (2015) haben einen Ansatz für die Echtzeit-Anpassung von Fahrplan, Umlauf- und Personalplanung entwickelt. Der Ansatz ist in vier Module aufgeteilt. Zunächst erfolgt eine Anpassung des Fahrplans auf einer makroskopischen Ebene, basierend auf dem Ansatz von Veelenturf et al. (2014). Anschließend werden Konflikte auf einem mikroskopischen Level erkannt und gelöst. Jeweils ein weiteres Modul ist für die Anpassung von Fahrzeugumlauf (Ansatz von Nielsen et al. (2012)) und Personalplan (Ansatz von Pothhoff et al. (2010)) zuständig. Die Optimierungsziele sind die Reduzierung der Verspätung und der (Teil-)Ausfälle.

Das Modul für die KE/KL auf mikroskopischem Level basiert bzgl. der Umwandlung der makroskopischen Fahrpläne in mikroskopische Fahrpläne, der Berechnung der Belegungszeiten

und der Konflikterkennung auf Algorithmen aus Bešinović et al. (2014). Zur Konfliktlösung werden durch eine Heuristik alternative Fahrwege im Knoten bestimmt, wenn der geplante Fahrweg z. B. auf Grund einer vorzeitigen Wende nicht umsetzbar ist. Anschließend werden übliche Belegungskonflikte durch eine zeitliche Verschiebung gelöst.

In dem Ansatz erfolgt eine Iteration zwischen makroskopischer und mikroskopischer Ebene sowie zwischen der Fahrplananpassung und der Anpassung des Fahrzeugumlauf- und Personalplans. Die Komplexität des behandelten Problems wird u. a. dadurch reduziert, dass das Problem in Sub-Probleme aufgeteilt wird und dabei Konflikte in mikroskopischer und makroskopischer Ebene mit unterschiedlichen elementaren Konfliktlösungen gelöst werden. Bei der Anpassung von Fahrzeugumlauf- und Personalplan werden nur (Teil-)Ausfälle angewendet. Durch die Nutzung von Heuristiken ist eine optimale Lösung nicht garantiert. Es wird angemerkt, dass sich der Ansatz für die Echtzeit-Anpassung eignet („The resulting solution shows that the iterative approach can be used by railway operators as a decision support tool during disruptions.“ Bešinović et al. 2015, S. 12). Angaben zur Dauer der Lösungsbereitstellung konnten der Veröffentlichung aber nicht entnommen werden.

Ghaemi et al. (2016) haben einen Ansatz zur Fahrplananpassung eines periodischen Fahrplans bei einer Störung basierend auf einer gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung (Mixed Integer Linear Programming) entwickelt. In Ghaemi, Cats und Goverde (2018) wird der Ansatz erweitert, sodass auch der Übergang vom Fahrplan des Regelbetriebs zu Beginn der Störung zum angepassten Fahrplan für den Störungsbetrieb berücksichtigt wird. Auch der Übergang nach Ende der Störung vom angepassten Fahrplan zum Fahrplan des Regelbetriebes wird betrachtet, sodass die drei Phasen des Störungsbetriebs abgedeckt sind.

Als Störungen werden komplette Sperrungen zwischen zwei Stationen mit bekannter Dauer betrachtet. Als elementare Konfliktlösungen angewendet werden zeitliche Verschiebungen mit begrenztem Reihenfolgentausch, vorzeitige Wenden unter Beachtung der erforderlichen Wendezeit, räumliche Verschiebungen von Wenden innerhalb des Wendebahnhofs und der Ausfall von Zugfahrten. Ziel ist die Reduzierung der Verspätungen und der Ausfälle. Die möglichen Wendebahnhöfe werden auf zwei vorgegebene Bahnhöfe begrenzt. Nicht vorgesehen sind alternative Laufwege (Umleitungen) oder Wenden mit Übergang des Fahrzeugs auf eine andere Linie. Auch werden Fahrstraßenknoten nicht berücksichtigt. Die Dauer der Lösungsbereitstellung ist größer als 2 Minuten für Störungen mit einer Dauer von bis zu 5 Stunden. In Ghaemi, Zilko et al. (2018) wird der Ansatz von Ghaemi, Cats und Goverde (2018) verwendet, um die Auswirkungen verschiedener Vorhersagen zur Konfliktlänge auf die Echtzeit-Fahrplananpassung und die Verspätung der Fahrgäste zu untersuchen.

Außerdem haben Ghaemi et al. (2017a), basierend auf der mikroskopischen gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung (Mixed Integer Linear Programming) von Pellegrini et al. (2014) und ergänzt durch den Ansatz für vorzeitige Wenden aus Ghaemi et al. (2016), einen Ansatz für die Optimierung der Wenden bei kompletten Streckensperrungen entwickelt. Im Vergleich zu Ghaemi et al. (2016) werden die Fahrwege in Knoten berücksichtigt und Änderungen der Zugreihenfolge ermöglicht. Die Dauer der Lösungsbereitstellung beträgt weniger als 1,5 Minuten für Störungen mit einer Dauer von bis zu einer Stunde.

Ghaemi (2018, S. 142) fasst bzgl. der beiden entwickelten Ansätze Ghaemi et al. (2017a) und Ghaemi, Cats und Goverde (2018) zusammen, dass diese für Trainingszwecke und die Erstellung bzw. Verbesserung von SFP angewendet werden können. Dafür, dass SFP mit Tools

für die Echtzeit-Fahrplananpassung aufbauend auf den entwickelten Ansätzen ersetzt werden können, ist nach Ghaemi (2018, S. 142) aber noch weitere Forschung erforderlich.

Dekker et al. (2018) stellen einen multidisziplinären Ansatz mit Kombination aus „complexity science“ und Operations Research zum Umgang mit Störungen („out-of-control situations“) in großen Netzwerken vor. Der Ansatz ist in sechs Schritte unterteilt

- 1) Erkennung und Vorhersage von Störungen
- 2) Trennen des von der Störung betroffenen Bereichs vom restlichen, ungestörten Netz
- 3) Anwendung von regulären Ansätzen für eine Echtzeit-Fahrplananpassung für das ungestörte Netz
- 4) Anpassung des Liniennetzplans für den gestörten Bereich
- 5) Anpassung von Fahrzeugumlauf- und Personalplanung z. B. durch den Einsatz selbstorganisierender, dezentraler Planungsprinzipien
- 6) Lenkung der Fahrgastströme

Dekker et al. (2022, S. 20)¹ schlussfolgern, dass die Nutzung von SFP in der Störungsdisposition geeignet ist. SFP können die Problemkomplexität verringern, da diese die von der Störung betroffenen Bereiche im Netz klar definieren und betriebliche Strukturen (Liniennetzplan, Takte, Umlaufplan, ...) vorgeben. Dies unterstützt eine schnelle Entscheidungsfindung.

Van Lieshout et al. (2020) lösen die Teilprobleme der Anpassung des Liniennetzplans innerhalb des von der Störung betroffenen Bereichs (Schritt 4) und der Anpassung der Fahrzeugumlaufplanung (Schritt 5) des von Dekker et al. (2018) vorgestellten Ansatzes. Nach Van Lieshout et al. (2020, S. 741) wird durch die Anpassung des Liniennetzplans der Umfang der Störungsdisposition erweitert („we increase the scope of railway disruption management, which traditionally involves rescheduling the timetable, rolling stock schedule, and crew schedule, by also modifying the line plan“). Van Lieshout et al. (2020, S. 743) geben an, dass sie nach ihrem Kenntnisstand die ersten sind, die sich mit der Anpassung von Liniennetzplänen nach einer Störung beschäftigen.

Da der Liniennetzplan eine realisierbare Fahr- und Umlaufplanung ermöglichen muss, wird die Liniennetzplanung von Van Lieshout et al. (2020) als betriebliches Problem betrachtet und nicht als Planungsproblem. Da die vollständige Integration der Aufgaben der (klassischen) Störungsdisposition nach Van Lieshout et al. (2020, S. 743) rechnerisch nicht machbar ist, erfolgt eine Reduzierung der Komplexität u. a. durch Berücksichtigung nicht aller elementaren Konfliktlösungen (z. B. keine Vereinigung oder Flügelung, Vorgabe der Wendebahnhöfe) und einer vereinfachten Umlaufplanung.

Van Lieshout et al. (2020) unterscheiden zwei Teilprobleme. Das erste Teilproblem ist die Anpassung des Liniennetzplans. Dazu wird zunächst eine Menge aller Linien über die kürzesten Pfade zwischen den Wendestationen bestimmt. Aus der Menge aller Linien werden Linien ausgewählt, die den Liniennetzplan bilden.

Die Auswahl der Linien wird als Problem der linearen Optimierung (Linear Programming) modelliert. Das Optimierungsziel ist die Minimierung der Verringerung der Anzahl der Reisemöglichkeiten je Zeitraum zwischen ursprünglichem und angepasstem Fahrplan. Außerdem sollen möglichst viele Direktverbindungen und insgesamt möglichst wenig Linien

¹ Überarbeitete Version von Dekker et al. 2018.

bestehen. Der Kapazitätsverbrauch in Stationen wird durch eine Mindestwendezeit und einen pauschalen Aufschlag für Synchronisationszeiten abgebildet. Für die Umlaufplanung werden Umläufe aus einer Menge von möglichen Umläufen ausgewählt.

Das zweite Teilproblem ist die Prüfung, ob für die Stationen Fahrpläne erstellt werden können. Dieses Problem wird als ein Capacity Periodic Event Scheduling Problem angelehnt an Peeters (2003) formuliert. Der Fahrplan wird als periodischer Fahrplan betrachtet. Für die Anpassung des Fahrplans werden als elementare Konfliktlösungen eine zeitliche Verschiebung und die Anpassung des Umlaufplans berücksichtigt. Kann für eine Station kein Fahrplan erstellt werden, wird für die Stationen durch Auslegen von Linien die kleinste Menge von Linien bestimmt, für die ein Fahrplan möglich ist. Diese maximale Anzahl an Linien der Station wird als Bedingung für die erneute Lösung des ersten Teilproblems vorgegeben. Der Ansatz von Van Lieshout et al. (2020) hat eine Dauer der Lösungsbereitstellung von unter einer Minute.

Einen weiteren Ansatz für die Echtzeit-Fahrplananpassung bei Störungen haben Zhu und Goverde (2019) entwickelt. Der Ansatz nutzt eine gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung (Mixed Integer Linear Programming) basierend auf einem Event-Activity Network. Betrachtet werden alle drei Phasen des Störungsbetriebs und die Störungsdauer wird als bekannt angesehen. Die Störungen umfassen komplette Streckensperrungen. Bei der Anpassung des Fahrplans werden Fahrzeugumläufe an den Wendestationen berücksichtigt. Als elementare Konfliktlösungen dienen das Hinzufügen und Auslassen von Halten, vorzeitige Wenden ohne Vorgabe von Wendestationen, zeitliche Verschiebungen, Reihenfolgentausche und Ausfälle. Als Optimierungskriterium dient die resultierende Verspätung der Passagiere. Nicht vorgesehen sind Umleitungen oder alternative Fahrwege im Knoten sowie das Ein- oder Ausstellen von Fahrzeugen. Fahrstraßenknoten werden nicht berücksichtigt. Die Dauer der Lösungsbereitstellung liegt unter 1,5 Minuten bei einem Netz von 17 Stationen und 6 Linien.

Von Zhu et al. (2018) wurde der Umgang mit mehreren gleichzeitigen Störungen untersucht. Dabei wurden zwei verschiedene Ansätze untersucht. Zunächst ein sequentielles Vorgehen unter Verwendung des Ansatzes von Zhu und Goverde (2019)². Dabei wird jede Störung für sich betrachtet und eine Fahrplananpassung durchgeführt. Nachdem der Fahrplan auf die erste Störung angepasst wurde, bleiben die dafür getroffenen Entscheidungen bei darauffolgenden Fahrplananpassungen bestehen. Daher wird der Ausfall eines Zuges nicht rückgängig gemacht. Auch zeitliche Verschiebungen von Zugfahrten bleiben bestehen und eine Zugfahrt darf nur zusätzlich verspätet werden. Vorzeitige Wenden von Zügen, die nicht von einer neuen Störung betroffen sind, werden ebenfalls nicht geändert.

Der zweite Ansatz zum Umgang mit mehreren Störungen ist ein kombinierter Ansatz. Anpassung aller bisherigen Entscheidungen, die nicht bereits vollzogen wurden, sind möglich. Dafür wird der Ansatz von Zhu und Goverde (2019) für die Anwendung auf mehrere Störungen erweitert. Bei der Lösung des Optimierungsproblems wird die Dauer der Lösungsbereitstellung im Anwendungsbeispiel auf 3 Minuten begrenzt. Als für die Dauer der Lösungsbereitstellung ausschlaggebend wurde die Modellierung der Kapazität in den Stationen („station capacity constraints“) identifiziert.

Zhu und Goverde (2021) stellen eine Weiterentwicklung des Ansatzes von Zhu et al. (2018) vor. Bei diesem wurde die Möglichkeit des Haltausfalls nicht übernommen. Da in Zhu et al.

² Bei der Veröffentlichung von Zhu et al. 2018 war Zhu und Goverde 2019 in Prüfung („under review“).

(2018) bei langandauernden Störungen (z. B. 6 h) für einige Szenarien keine zufriedenstellende Lösung in einer akzeptablen Zeit gefunden wurde, wurde ein rollierender Zeithorizont eingeführt. Dieser nutzt den zyklischen Charakter des Betriebs während einer Störung zur Reduzierung der Dauer der Lösungsbereitstellung.

Bešinović et al. (2019) haben einen iterativen Ansatz mit Echtzeit-Fahrplananpassung und Fahrgastlenkung entwickelt, der in Bešinović et al. (2022) weiterentwickelt wurde. Die Fahrplananpassung basiert auf einer ganzzahligen Optimierung (Mixed Integer Programming). Die Fahrgastlenkung wurde als nichtlineare Optimierung (Nonlinear Programming) formuliert. Betrachtet wird eine U-Bahn-Linie mit einer kompletten Sperrung zwischen zwei Stationen. Ein Netzwerk wird nicht betrachtet. Die elementaren Konfliktlösungen sind begrenzt, da für jede Zugfahrt eine begrenzte Anzahl an alternativen Laufwegen mit vorgegebenen Fahr- und Haltezeiten bestehen. Für die Fahrzeugumlaufplanung wird sichergestellt, dass die Anzahl der Fahrten je Richtung ausgeglichen ist. Aufgrund der Dauer der Lösungsbereitstellung von bis zu 16 Minuten (Bešinović et al. 2019, S. 3186) bzw. 13 Minuten (Bešinović et al. 2022, S. 10392) kann der Ansatz nach Bešinović et al. (2022, S. 10392 f.) für Planungszwecke verwendet werden (z. B. zur Planung von SFP).

Zusammenfassung

Der Überblick zur Ad-hoc Störungsdisposition macht deutlich, dass eine Vielzahl an Ansätzen besteht, die alle im Kern auf einer globalen Suche basieren. Es bestehen Ansätze sowohl zur Berücksichtigung von kompletten als auch partiellen Streckensperrungen. Von den für die Störungsdisposition typischen betrieblichen Maßnahmen werden Ausfall, Teilausfall und die vorzeitige Wende bei fast allen Ansätzen berücksichtigt. Umleitungen werden nur von wenigen Ansätzen berücksichtigt und wenn diese Maßnahme unterstützt wird, werden alternative Laufwege vorgegeben.

Da bei der Mehrheit der Ansätze mathematische Modelle durch numerische Lösung möglichst optimal gelöst werden, bestehen im Hinblick auf den Zielkonflikt zwischen Komplexität und gesicherter Optimalität der Bedarf an Reduzierungen der Problemkomplexität. Dazu wird z. B. keine oder nur eine vereinfachte Umlaufplanung berücksichtigt. Auch findet eine Reduktion des Suchraums durch die bereits diskutierten Einschränkungen der elementaren Konfliktlösungen und durch die Begrenzung von Konflikten aufgrund einer makroskopischen Infrastrukturmodellierung statt. Bei Ansätzen, die wenige der zuvor beschriebenen Vereinfachungen verwenden, wird eine Dauer der Lösungsbereitstellung erreicht, die für einen Einsatz im Betrieb als nicht praktikabel eingeschätzt wird. Somit wurde bisher noch kein Ansatz entwickelt, der die Anforderungen der Praxis für eine Echtzeit-Störungsdisposition erfüllt.

2.4 Vorgeplante Störungsdisposition – Einsatz von Störfallprogrammen

Neben der ad-hoc Störungsdisposition besteht die vorgeplante Störungsdisposition. In der vorgeplanten Störungsdisposition werden Störfallprogramme eingesetzt, die Vorgaben für die Anpassung des Fahrplans während der Störung enthalten (siehe Kapitel 2.2.2). In diesem Kapitel wird ein Überblick über bestehende Ansätze für eine vorgeplante Störungsdisposition in S-Bahn-Verkehren gegeben. Dazu werden zunächst Grundlagen zum Einsatz von Störfallprogrammen dargelegt. Nach einer Einführung wird näher auf die Planung und Anwendung von SFP sowie Vor- und Nachteile des Einsatzes von SFP eingegangen. Anschließend werden Ansätze zur Unterstützung und (Teil-)Automatisierung des Einsatzes von

SFP – gegliedert nach Planung und Anwendung – beschrieben. Das Kapitel endet mit einer Zusammenfassung der Inhalte.

2.4.1 Grundlagen zum Einsatz von Störfallprogrammen

Einführung

„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). Mit Blick auf die in einem SFP enthaltenen Maßnahmen definiert Brauner (2019b, S. 43): „Störfallprogramme sind vorgeplante Betriebskonzepte, welche aus einem Bündel betrieblicher, meist *linienscharfer* Maßnahmen für ein dezidiertes Störungsszenario bestehen.“ Zusätzlich kann ein Störfallprogramm auch Maßnahmen zur Fahrgastlenkung enthalten, die in einem Verkehrskonzept zusammengefasst sind (Brauner 2019b, S. 43).

Wie in den Definitionen beschrieben, ist ein SFP immer für ein Störungsszenario gültig (siehe auch Ghaemi und Goverde 2015, S. 4). Durch die linienscharfen Maßnahmen eines SFP beschreibt dieses den Zustand während der Störung auf Linienebene (Ghaemi und Goverde 2015, S. 4). Der Übergang vom Fahrplan des Regelbetriebs zu Beginn der Störung zum im SFP vorgesehenen Betrieb wird nicht im SFP hinterlegt, da dieser Übergang abhängig ist von der aktuellen Betriebssituation bei Eintreten der Störung (Ghaemi und Goverde 2015, S. 4).

Neben dem Störungsszenario und der Vorgabe von Maßnahmen sind die Inhalte von SFP nicht einheitlich (Brauner 2016; in Brauner 2023, S. 22). I. d. R. werden in einem SFP Maßnahmen, die Laufweg und Takt der Linie betreffen (z. B. vorzeitige Wende oder Taktausdünnung), angewendet (Brauner 2023, S. 45 ff.). Es können aber auch andere linienscharfe Maßnahmen (z. B. ein alternativer Fahrweg im Knoten) oder zugscharfe Maßnahmen (z. B. der Ausfall eines Zuges) festgelegt werden (DB Ril 615.0601, S. 1).

Zusammengefasst beschreibt ein SFP mindestens Laufweg und Takt der Linien während der Störung. Die in einem SFP enthaltenen Maßnahmen werden daher als ein Fahrplankonzept für ein Störungsszenario aufgefasst. Bei der Anwendung eines SFP ist eine Konkretisierung des Fahrplankonzepts in einen Fahrplan erforderlich. Dies kann auch als Fahrplananpassung und der damit einhergehenden Bestimmung von zugspezifischen Maßnahmen aufgefasst werden. Bei der Konkretisierung ist die verfügbare Infrastruktur und die Betriebssituation („real traffic status“) zum Zeitpunkt der Anpassung zu berücksichtigen (Ghaemi und Goverde 2015, S. 4 f.).

Der Einsatz von SFP lässt sich unterteilen in (Steinbach et al. 2021)

- die Planung eines SFP und
- die Anwendung eines SFP.

Der Prozess zum Einsatz von SFP ist in Abbildung 2-3 dargestellt. Ghaemi und Goverde (2015, S. 37 ff.) und Brauner (2016; zusammengefasst in Brauner 2023, S. 22 ff.) bieten einen vertiefenden Einblick in den Einsatz von SFP in der Praxis.

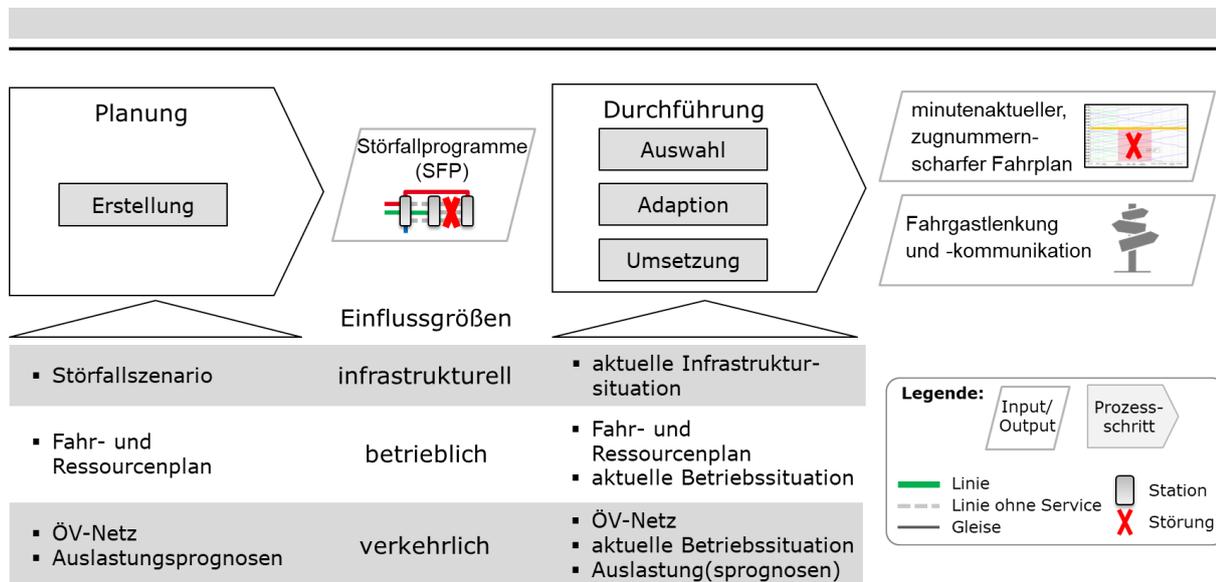


Abbildung 2-3: Prozess zum Einsatz von SFP (angelehnt an Abbildung 1 aus Steinbach et al. 2021, S. 22)

Nach Brauner (2016; in Brauner 2023, S. 23) sind die grundlegenden Einflussgrößen, die bei einem Einsatz von SFP zu berücksichtigen sind „[...] die Verfügbarkeit von Infrastruktur, Personal und Fahrzeugen, sowie deren Verbindung durch Umläufe“ (Brauner 2016; in Brauner 2023, S. 23). Ebenfalls sollte das gesamte ÖV-Angebot sowie dessen Auslastung berücksichtigt werden (Brauner 2016; in Brauner 2023, S. 23 f.). Aber nicht alle dieser Einflussgrößen können in die Erstellung von SFP einfließen, da diese ggf. vorab nicht bekannt sind (Brauner 2016; in Brauner 2023, S. 23). Die Einflussgrößen sind ebenfalls in Abbildung 2-3 dargestellt.

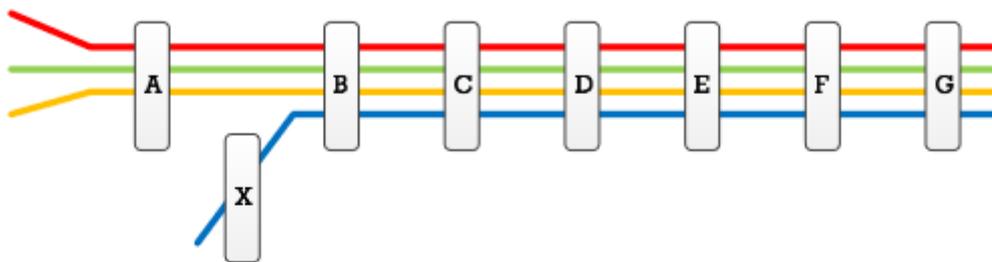
Planung von SFP

SFP werden manuell durch erfahrene Disponenten des EVU, durch ein Team aus EVU und EIU oder durch einen externen Dienstleister erstellt (Brauner 2016; in Brauner 2023, S. 22). Nach Ghaemi und Goverde (2015, S. 3) wird zur Erstellung von SFP, basierend auf der Taktstruktur des Fahrplans und der Gleisbelegung in den Bahnhöfen („basic hour patterns [...] and station track occupations“), die verbleibende Kapazität während der Störung abgeschätzt. Die abgeschätzte Kapazität ist wiederum Grundlage für die Bestimmung von Zügen, die ausfallen oder vorzeitig wenden sollen (Ghaemi und Goverde 2015, S. 3). Anschließend werden die Wendebahnhöfe definiert (Ghaemi und Goverde 2015, S. 3). Züge, die vorzeitig wenden, sollen Leistungen der Gegenrichtung übernehmen (Ghaemi und Goverde 2015, S. 3).

Bei der Bestimmung der Wendebahnhöfe wird ein sogenannter „Störfalltrichter“ (siehe Abbildung 2-4) verwendet (Chu 2012 zitiert nach Chu 2014, S. 143 f.). Ein Störfalltrichter verdeutlicht das Prinzip der Verteilung der Wenden auf mehrere Wendebahnhöfe aus kapazitiven Gründen (Chu 2014, S. 143 f.). Der kapazitiven Restriktionen steht das verkehrliche Interesse gegenüber, möglichst wenige Halte ausfallen zu lassen (Chu 2012 zitiert nach Chu 2014, S. 143 f.).

Da eine Reduzierung des Angebots auch ein schnelleres Einschwingen ermöglicht, beschreibt (Brauner 2023, S. 43) einen Zielkonflikt in der Planung „zwischen dem schnellen Erreichen eines stabilen Betriebs und dem Erhalt eines attraktiven Angebots für den Fahrgast“. Dabei ist zu beachten, dass auch das schnelle Erreichen eines stabilen Betriebs unter ein „attraktives Angebot“ gefasst werden kann.

Linienverlauf regulärer Betrieb



„Störfalltrichter“ im SFP-Fall

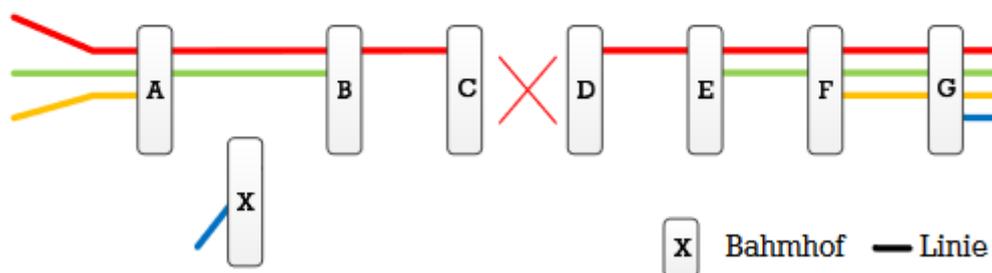


Abbildung 2-4: Störfalltrichter (entspricht Abbildung 10.2 aus Chu 2014, S. 144)

Weitere Grundsätze aus der Praxis für die Planung von Betriebskonzepten beschreiben (Rey et al. 2007, S. 698). Demnach sollten möglichst wenige und gleichbleibende Maßnahmen (z. B. vorzeitiges Wenden oder Umleitung immer der gleichen Linie) eingesetzt werden. Außerdem sollte die Bedienung von Netzästen aufrechterhalten werden und die Stammstrecke nur bedient werden, wenn ein ausreichendes minimales Platzangebot sichergestellt werden kann.

Anwendung von SFP

Abbildung 2-5 zeigt den Ablauf der Anwendung eines SFP während einer Störung. Der Prozess zur Anwendung von SFP – umfassend beschrieben durch Chu (2014, S. 10 f.) und Ghaemi und Goverde (2015, S. 3 ff.) – wird im Weiteren zusammengefasst.

Mit dem Auftreten der Störung beginnt die **Chaosphase**. Diese wird weiter unterteilt in

- die Ermittlungs- und Entscheidungsphase (vor Ausrufen des SFP) und
- die Einschwingphase (nach Ausrufen des SFP).

In der **Ermittlungs- und Entscheidungsphase** muss zunächst das aktuelle Lagebild zur Störungssituation eingeholt werden. Darauf basierend ist die Dauer der Störung abzuschätzen. Nach Ghaemi und Goverde (2015, S. 4) sollte bei einer geschätzten Dauer der Störung von unter 45 Minuten kein SFP ausgerufen werden.

Vor der Konkretisierung des SFP erfolgt außerdem eine enge Abstimmung zwischen EVU und EIU, ob ein SFP eine geeignete Lösung für die Störung darstellt. Ggf. ist eine Anpassung des SFP aufgrund der verfügbaren Infrastruktur und/oder der Betriebssituation erforderlich. Bei unterschiedlichen Ansichten und Interessen zur Anwendung des SFP ist eine Entscheidungsfindung zwischen EIU und EVU erforderlich, wobei im Netz der DB InfraGO die

Entscheidung dem EIU obliegt (DB Ril 420.0207, S. 3). Wenn kein SFP angewendet wird oder kein SFP für die Störung passend ist, erfolgt eine ad-hoc Fahrplananpassung.

Nach dem Ausrufen des SFP wird der Betrieb in die im SFP beschriebene Betriebsituation überführt (**Einschwingphase**). Dafür ist eine Anpassung des Fahrplans durch die Anwendung der betrieblichen Maßnahmen des SFP erforderlich. Dies entspricht der bereits zuvor beschriebenen Konkretisierung des SFP und damit der Bestimmung von zugsspezifischen Maßnahmen.

Die Einschwingdauer entspricht der Zeit zwischen dem Ausrufen des SFP und dem Erreichen der stabilen Phase. Ein „Störfallprogramm ist dann stabil und gilt als eingeschwungen, wenn die Züge auf den im Störfallprogramm vorgesehenen (verkürzten) Laufwegen, im vorgesehenen (verringerten) Takt, zuverlässig und pünktlich fahren“ (Chu 2014, S. 10 f.). Eine ausführliche Betrachtung dieser Definition findet sich bei Brauner (2023, S. 78).

Ähnlich definiert auch Ghaemi (2018, S. 4) die Einschwingphase. Danach ist die stabile Phase erreicht, wenn die Züge entsprechend dem Fahrplankonzept des SFP verkehren („The second phase starts when the disruption timetable begins to be operated“). Einen Bezug zur Pünktlichkeit fehlt in dieser Definition.

Das Verkehrsangebot nimmt in der Einschwingphase ab (siehe Abbildung 2-2). Aus verkehrlicher Sicht stellt Brauner (2023, S. 66) weiterhin fest: „Die Einschwingphase ist [...] von Unzuverlässigkeit geprägt und somit unattraktiv für den Fahrgast“.

Mit dem Ende der Einschwingphase beginnt die **stabile Phase**. Das Verkehrsangebot in dieser Phase entspricht den Vorgaben des Störfallprogramms. Der Betrieb ist ähnlich vorhersehbar und zuverlässig wie der reguläre Betrieb (Brauner 2023, S. 21). Die stabile Phase wird in der Literatur oftmals als periodischer Fahrplan aufgefasst (u. a. in Ghaemi et al. 2016; Van Lieshout et al. 2020; Zhu und Goverde 2021; Brauner 2023).

Bei Veränderungen der verfügbaren Infrastruktur (z. B. eine partielle Sperrung einer Strecke wird zu einer kompletten Sperrung) kann auch ein Wechsel in ein anderes SFP erfolgen (DB Ril 615.0601, S. 6). Während der stabilen Phase ist regelmäßig die verbleibende Störungsdauer abzuschätzen. Je nach verbleibender Störungsdauer können bereits vorbereitende Maßnahmen für die Ausschwingphase stattfinden.

Das Ende der Störung fällt i. d. R. nicht mit Aufhebung des SFP zusammen (siehe Abbildung 2-5). Wenn die Einschränkungen der Störung nicht mehr vorhanden sind, wird das Verkehrsangebot meist schrittweise gesteigert, bis das Angebot des Regelfahrplans erreicht wird (siehe Abbildung 2-2). Diese Phase wird als **Ausschwingphase** bezeichnet. Chu (2014, S. 11) definiert: „Ein Störfallprogramm ist dann beendet und gilt als vollständig ausgeschwungen,

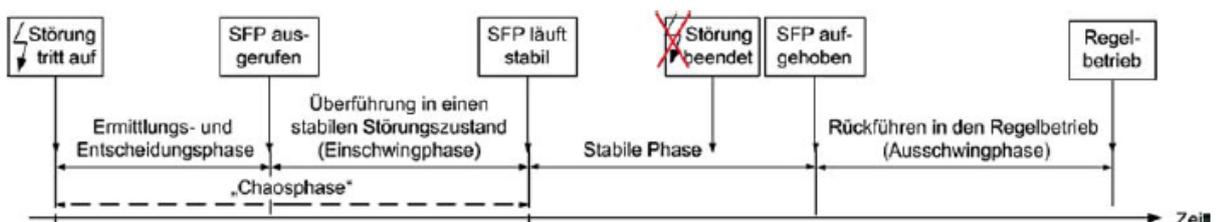


Abbildung 2-5: Phasen der Anwendung eines SFP (Abbildung entspricht Abbildung 5 aus Chu et al. 2012, S. 48)

wenn die Züge auf ihren regulären Laufwegen, im planmäßigen Takt, zuverlässig und pünktlich fahren“.

Zusammenfassend bestehen laut Ghaemi und Goverde (2015, S. 6) die größten Herausforderungen bei der Anwendung von SFP in der Chaosphase, in der die Unsicherheit über die Störung (Art und Dauer) und dessen Bewältigung am höchsten sind. Der Umgang mit Störungen (z. B., ob ein SFP eingesetzt wird) ist abhängig von der Erfahrung und den Fähigkeiten der Disponenten (Chu et al. 2012, S. 45; Ghaemi und Goverde 2015, S. 5). Ein Grund dafür könnte sein, dass die Anwendung von SFP keine Routineaufgabe der Disponenten darstellt (Senger 2022, S. 47). In der Praxis besteht der Wunsch nach einem Tool zur Unterstützung der Disponenten bei der Anwendung von SFP (Brauner 2016 in Brauner 2023, S. 24).

Vor- und Nachteile

Ein Vorteil des Einsatzes von Störfallprogrammen ist, dass für das Störungsszenario bereits Maßnahmen auf Linienebene festgelegt sind (Chu et al. 2012, S. 45). Dadurch wird der Entscheidungsraum zur Anpassung des Fahrplans beim Auftreten einer Störung eingegrenzt (Dekker et al. 2022, S. 20). Im Vergleich zu einer ad-hoc Anpassung reduziert sich dadurch die Komplexität der verbleibenden Fahrplananpassung. Die Anpassung des Fahrplans ist dadurch relativ gesehen schneller durchführbar (Chu 2014, S. 11; Dekker et al. 2022, S. 20) und lässt eine bessere Lösung erwarten. Auch können die vorgesehenen Maßnahmen vorab auf ihre technisch, betrieblich und verkehrlich Umsetzbarkeit geprüft werden (Brauner 2019a).

Durch den Einsatz von vorgeplanten Maßnahmen sind diese bereits allen ausführenden Akteuren bekannt (Chu et al. 2012, S. 45 f.). Dies ermöglicht eine vereinfachte Kommunikation mit den Akteuren. Die Kommunikation mit weiteren Akteuren (z. B. den Fahrgästen) kann bereits vorbereitet werden. Dadurch ist nicht nur eine schnelle (Chu et al. 2012, S. 45 f.), sondern auch eine umfassende und zuverlässige Kommunikation möglich.

Insgesamt kann der Einsatz von SFP laut Chu (2014, S. 11) zu einer Entlastung der Disponenten und einer höheren Lösungsqualität im Vergleich zu einer manuellen ad-hoc Störungsdisposition führen.

Ein Nachteil von SFP ist die aufwendige Erstellung (Chu 2014, S. 12). Außerdem kann bei der Erstellung nicht sichergestellt werden, dass die SFP bei der Anwendung auch umsetzbar sind (Chu 2014, S. 12). Aufgrund der aufwendigen Erstellung können nicht alle möglichen Störungsszenarien abgebildet werden (Ghaemi und Goverde 2015, S. 2). Das kann dazu führen, dass für eine Störungssituation kein passendes SFP vorliegt (Ghaemi und Goverde 2015, S. 2; Zhu et al. 2018, S. 1).

Da SFP linienscharfe betriebliche Maßnahmen enthalten, ist weiterhin eine Konkretisierung des SFP bei der Anwendung erforderlich. Bei der Entscheidung für die Anwendung eines SFP und der Konkretisierung des SFP ist die Betriebssituation zu berücksichtigen, da diese im SFP nicht abgebildet wird (Bešinović et al. 2015, S. 5). Die Güte der Lösung des SFP ist wiederum vom Startzeitpunkt der Störung und der Störungsdauer abhängig (Ghaemi et al. 2017b, S. 362; Beispiel auf den Seiten 357 ff.).

Bei Abweichungen von der Taktstruktur (Ghaemi und Goverde 2015, S. 3) oder bei einer vom Störungsszenario abweichenden Verfügbarkeit der Infrastruktur (DB Ril 420.0207, S. 3) kann eine Konkretisierung des SFP nicht oder nur nach einer Anpassung des SFP möglich sein. Auch

während der Störung sind ggf. Anpassungen des SFP erforderlich (Ghaemi und Goverde 2015, S. 2). Bei einer Änderung des Betriebsprogramms oder der Infrastruktur müssen bestehende SFP angepasst oder neue SFP erstellt werden (Ghaemi et al. 2017b, S. 344).

2.4.2 Ansätze zur (Teil-)Automatisierung der Planung von SFP

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, erfolgt die Planung von SFP bisher manuell. Zur Unterstützung bzw. (Teil-)Automatisierung der Planung von SFP wurden verschiedene Ansätze entwickelt, die in diesem Kapitel dargestellt werden.

Von Chu et al. (2012) wurde ein Leitfaden für die manuelle Erstellung von SFP erarbeitet. Der Leitfaden kann zur Planung von SFP für komplette oder partielle Sperrungen von Strecken oder Knoten angewendet werden. Bei der Erstellung des Leitfadens haben erfahrene Disponenten mitgewirkt, sodass vorhandenes Wissen und Erfahrungen berücksichtigt werden konnten.

Chu und Oetting (2013b) haben zur Unterstützung der Planung von SFP einen Ansatz zur Bestimmung des Kapazitätsverbrauchs von Wendestationen während der Einschwingphase entwickelt. Dieser Ansatz wurde in Chu und Oetting (2013a) und Chu (2014) weiterentwickelt. Für die Leistungsfähigkeit von Knoten wurde die Belegungszeit innerhalb der Gleisgruppen als bestimmender Faktor identifiziert, da Züge bei einem Halt in einem Knoten den Fahrstraßenknoten nicht belegen und auch die Belegungszeiten im Fahrstraßenknoten kleiner als im Bahnsteiggleis sind (Chu 2014, S. 129). Da die Belegungszeiten der Bahnsteiggleise innerhalb einer Gleisgruppe unterschiedlich sein können, werden in dem Ansatz einzelne Bahnsteiggleise untersucht.

Als Kapazitätskriterium zur Bestimmung des Kapazitätsverbrauchs wurde der Belegungsgrad gewählt (Chu und Oetting 2013b, S. 63). Der Belegungsgrad wird durch eine konstruktive Methode unter Einbeziehung von Prinzipien des UIC CODE 406 bestimmt (Chu und Oetting 2013b, S. 63). Um möglichst realistische Belegungszeiten von Zügen an Bahnsteiggleisen während einer Störung zu erhalten, wurden die Zeitanteile der Wendezeiten ermittelt. Für die Bewertung des Belegungsgrades wird der Grenzwert für den Belegungsgrad aus dem UIC CODE 406 verwendet (Chu und Oetting 2013b, S. 64).

Brauner (2023) konkretisiert den in Brauner und Oetting (2019) vorgestellten Ansatz zur Bewertung eines SFP. Dafür entwickelt sie Algorithmen zur teilautomatisierten betrieblichen und verkehrlichen Bewertung von Störfallprogrammen. Der Bewertung des SFP anhand des Verkehrskonzepts liegt der bereits beschriebene Zielkonflikt (siehe Kapitel 2.4.1) zugrunde, dass eine „zu starke Reduktion des betrieblichen Angebots“ durch die Bewertung der betrieblichen Maßnahmen anhand der „verbleibenden verkehrlichen Möglichkeiten“ des Verkehrskonzepts vermieden wird (Brauner 2023, S. 43).

Der Ansatz besteht aus 10 Modulen. In Modul 1 bis 5 wird die Funktionsfähigkeit und Einschwingqualität des Betriebskonzepts geprüft. Die Module 6 bis 9 dienen der Erstellung und Bewertung eines Verkehrskonzepts. Abschließend erfolgt in Modul 10 eine kundenorientierte Bewertung des SFP.

Modul 1 des Ansatzes von Brauner (2023) prüft die einzelnen betrieblichen Maßnahmen auf Umsetzbarkeit und berechnet die linienspezifischen Veränderungen der Zugfahrten, die sich durch die betrieblichen Maßnahmen ergeben. Für die Bestimmung der Auswirkungen auf die Zugfahrten erfolgt eine Berechnung der Zeitbedarfe (Fahrzeiten, Haltezeiten, Belegungszeiten) der Zugfahrten je Maßnahme. Die Zeitbedarfe werden für eine Berechnung der Umlaufzeiten

verwendet und Änderungen der Ab- und Ankünfte in den Wendebahnhöfen bestimmt. Diese Änderungen werden mit vom Ersteller festgelegten Vorgaben abgeglichen. Außerdem wird geprüft, dass für die Zugfahrten ein gegebener Grenzwert für die maximale Anzahl an entfallender Halte eingehalten und ein Hinweis ausgegeben wird, falls Infrastruktur (z. B. durch eine Umleitung) genutzt wird, die „bisher“ (Brauner 2023, S. 89) nicht verwendet wurde. Ergebnis von Modul 1 ist einerseits die Aussage, ob eine betriebliche Maßnahme umsetzbar ist und andererseits die Auswirkungen der betrieblichen Maßnahmen auf die Zugfahrten.

In Modul 2 und Modul 3 wird das Zusammenwirken der betrieblichen Maßnahmen im Netz für die stabile Phase betrachtet. In **Modul 2** erfolgt eine Prüfung der Auswirkungen der betrieblichen Maßnahmen auf die Kanten. Überprüft werden alle Kanten mit betrieblichen Maßnahmen, die die mittlere Mindestzugfolgezeit steigen lassen oder die Zuganzahl erhöhen. Diese beiden Bedingungen betreffen Kanten, bei denen für einen Zweirichtungsbetrieb nur ein Gleis zur Verfügung steht oder Kanten mit Umleitungen. Zur Validierung des Kapazitätsverbrauchs bei einer Eingleisigkeit wird die Belegungszeit berechnet und durch einen Abgleich mit Vorgaben aus dem UIC CODE 406 geprüft.

Für Kanten mit Umleitungen wird über einen bedienungs-theoretischen Ansatz die planmäßige Wartezeit auf Ein-/Ausfädeln ermittelt. Dadurch können die im Modul ermittelten Zeitbedarfe aktualisiert werden und die Prüfungen in Modul 1 erneut vorgenommen werden. Bei Kanten mit Zweirichtungsbetrieb auf verbleibender Eingleisigkeit erfolgt zusätzlich eine fahrplanabhängige Prüfung auf Belegungskonflikte. Wenn Belegungskonflikte vorhanden sind, dann ist eine Lösung durch den Ersteller erforderlich. Auf die Konfliktlösung wird im Rahmen der Arbeit nicht weiter eingegangen.

Nach den Kanten erfolgt in **Modul 3** eine Prüfung der Auswirkungen der betrieblichen Maßnahmen auf die Knoten. Berücksichtigt werden alle Knoten, bei denen durch betriebliche Maßnahmen die Zuganzahl oder Belegungszeit erhöht ist. Die Vorgehensweise zur Validierung ist angelehnt an Chu und Oetting (2013b). Die Bestimmung der Fahrwege in den Knoten erfolgt durch den Ersteller. Für alle Bahnsteiggleise eines Knotens werden die voraussichtlichen Belegungszeiten und der Belegungsgrad berechnet. Die errechnete Gesamtbelegungszeit soll kleiner als die Gesamtbelegungszeit des Regelbetriebs sein. Bei einer größeren Gesamtbelegungszeit als im Regelbetrieb wird der Belegungsgrad mit den Werten aus dem UIC Kodex 406 verglichen. Ist der berechnete Belegungsgrad eines Gleise größer als der Wert aus dem UIC CODE 406, sind die betrieblichen Maßnahmen für den Knoten nicht funktionsfähig. Ergebnis von Modul 2 und 3 ist die Aussage, ob ein Betriebskonzept in der stabilen Phase funktionsfähig ist.

In **Modul 4** wird die Einschwingfähigkeit eines Betriebskonzepts geprüft. Brauner (2023, S. 112) identifiziert zwei Ausschlusskriterien für das Erreichen der stabilen Phase: „kontinuierliche (oder zu lange andauernde) Überlastung eines Netzelements und [eine] zu lange Dauer des Auslegens durch Abstellung oder Umleitung“ (Brauner 2023, S. 112).

Für die Bestimmung der Dauer der Abstellung ist zunächst eine manuelle Festlegung von Abstellungen und Wendebahnhöfen erforderlich. Darauf aufbauend kann die Dauer der Abstellung für jede Fahrplanminute für jeden Zug ermittelt werden. Über alle Fahrplanminuten eines Zuges wird ein Mittelwert der Einschwingdauer bestimmt. Die Ausstelldauer sollte kleiner sein als die vorgegebene Einschwingdauer.

Um langanhaltende Überlastungen zu bestimmen, wird für Knoten, die von eingeschränkter verfügbarer Infrastruktur betroffen sind oder die zusätzliche Belegungszeiten im Vergleich zum Regelbetrieb aufweisen, ein Belegungsgrad berechnet. Bei der Berechnung des Belegungsgrads werden sowohl die Zugfahrten des Regelbetriebs als auch die zusätzlichen Zugfahrten durch betriebliche Maßnahmen berücksichtigt. Wenn der bestimmte Belegungsgrad größer als 1 ist, wird die Ausstelldauer für die Prüfung bzgl. der vorgegebenen Einschwingdauer mit einem Faktor vergrößert. Pufferzeiten und Zuschläge werden bei der Berechnung der maximalen Ausstelldauer nicht betrachtet. Ergebnis von Modul 4 ist die Aussage, ob ein Ausschlusskriterium für das Erreichen der stabilen Phase besteht.

In **Modul 5** wird die mittlere Einschwingdauer abgeschätzt. Für alle Knoten und Kanten mit erhöhter Belastung während der Einschwingphase und/oder für die eine eingeschränkte Verfügbarkeit der Infrastruktur durch die Störung besteht, wird die Dauer des Einschwingens für jede Fahrplanminute für jeden Zug ermittelt. Je Fahrplanminute wird die Einschwingdauer des maßgebenden Zuges (= Zug mit maximaler Einschwingdauer) bestimmt. Als Konfliktlösung bei der Bestimmung der Einschwingdauer wird nur eine zeitliche Verschiebung verwendet. Die mittlere Einschwingdauer wird für alle betrachteten Knoten und Kanten durch die Bildung eines Mittelwerts über alle Fahrplanminuten bestimmt. Die mittlere Einschwingdauer entspricht der maximalen mittleren Einschwingdauer aller betrachteten Knoten und Kanten.

Für die Erstellung des Verkehrskonzepts erfolgt in **Modul 6** eine Verbindungskonflikt-erkennung. Ein Verbindungskonflikt ist nach Brauner (2023, S. 154) die Veränderung des Verkehrswiderstands einer Verbindung. Ein Verbindungskonflikt besteht, somit, wenn „der Fahrgast negative Veränderungen in seiner geplanten Reisekette hinnehmen muss“ (Brauner 2023, S. 154). Zur Bestimmung der Verbindungskonflikte erfolgt eine Überprüfung der durch das Betriebskonzept geplanten Änderungen des Regelbetriebs (Brauner 2023, S. 161 ff.). Die Prüfung der Verbindungen erfolgt durch ein externes Modul mit „bestehende[r] Software und Algorithmen einer Fahrplanauskunft“ (Brauner 2023, S. 145). Ergebnis des Moduls ist eine Menge von Verbindungskonflikten für ein Betriebskonzept.

In **Modul 7** werden für die identifizierten Verbindungskonflikte KLA bestimmt. Es bestehen vier Ebenen an elementaren Konfliktlösungen. Für die Anwendung der elementaren Konfliktlösungen besteht eine hierarchische Reihenfolge. Die elementaren Konfliktlösungen innerhalb der hierarchischen Reihenfolge sind:

- Ebene 1: Umleitung der Fahrgäste innerhalb des S-Bahn-Systems
- Ebene 2: Umleitung der Fahrgäste im Verbund des ÖPNV
- Ebene 3: Freigabe für Nutzung anderer Züge außerhalb des Verbundes
- Ebene 4: Bestellung alternativer Verkehre (Schienenersatzverkehr) oder Erhöhung der Kapazität eines Zuges

Die elementaren Konfliktlösungen der vierten Ebene werden nur angewendet, wenn die spätere Bewertung des SFP nicht zufriedenstellend ist.

Jede KLA wird auf Machbarkeit sowie Akzeptanz geprüft und eine Widerstandsbewertung durchgeführt. Bei der Berechnung des Widerstands werden die Veränderungen der folgenden Kriterien berücksichtigt:

- Einstiegshaltestelle und dadurch veränderte Zugangszeit
- Wartezeit Einstiegshaltestelle
- Beförderungszeit
- Wartezeit im verspäteten Fahrzeug
- Umstiege (Umsteigezeit + Anzahl)
- Ausstiegshaltestelle und dadurch veränderte Abgangszeit

Eine Besonderheit bei der Bestimmung der KLA stellen „veränderte Verbindungen“ dar. Veränderte Verbindungen sind „Verbindungen, die einen Verbindungskonflikt [aufweisen], aber keine Alternative benötigen“ (Brauner 2023, S. 196). Dies ist z. B. bei einer Erhöhung der Beförderungszeit der Fall: Die Verbindung ist weiterhin vorhanden, aber es besteht eine Erhöhung des Widerstands. Ergebnis des Moduls ist für jeden Verbindungskonflikt ein bis zwei KLA und eine Sammlung an weiteren, nicht gewählten KLA. Außerdem können veränderte Verbindungen sowie ungelöste Verbindungskonflikte bestehen.

Basierend auf den KLA der Verbindungskonflikte wird in **Modul 8** ein Verkehrskonzept erstellt. Für die Erstellung des Verkehrskonzepts werden Fahrgastkorridore (FGK) bestimmt. Ein FGK ist ein Fahrgaststrom, der für das Verkehrskonzept ausgewählt wurde. Ein Fahrgaststrom ist wiederum eine Route, „die (Teil-)Konfliktlösungen für Fahrgäste mit unterschiedlichen Verbindungskonflikten anbietet“ (Brauner, S. 180). Durch die Bündelung von Konfliktlösungen unterschiedlicher Verbindungskonflikte ist ein Fahrgaststrom i. d. R. nicht die beste Konfliktlösung für alle gebündelten Verbindungskonflikte.

Da je Netzast nur eine kleine Anzahl an Korridoren praktikabel kommunizierbar ist, werden je Netzast nur drei FGK bestimmt (Brauner 2023, S. 182). Die „Netzäste werden anhand der Linien des Regelbetriebs durch den Ersteller festgelegt“ (Brauner 2023, S. 182). Jedem FGK eines Netzastes ist eine von drei Erschließungsfunktionen zugeordnet, wobei jede Erschließungsfunktion je Netzast generell nur einmal vergeben wird.

Die Basisfunktion dient der Bedienung aller gestörten Verkehrsknoten (= Verkehrsknoten mit keiner oder eingeschränkter Bedienung). Durch FGK der Qualitätsfunktion sollen gestörte Verkehrsknoten mit weniger Fahrzeitverlängerung und Umstiegen erreicht werden. Die Kapazitätsfunktion dient der Verknüpfung von Störseiten unter Auslassung des gestörten Bereichs. Die Erschließungsfunktion eines FGK richtet sich stets nach dem Endpunkt des FGK.

Für die Bestimmung der FGK sind zunächst die Netzäste und Endpunkte der FGK je Netzast durch den Ersteller vorzugeben. Darauf aufbauend werden die Fahrgastströme ermittelt. Dazu werden mögliche Startpunkte des Fahrgaststroms bestimmt und geprüft, ob eine Route bis zum Endpunkt bei lediglich zwei Umstiegen besteht.

Konnten mehrere Fahrgastströme für einen Endpunkt ermittelt werden, ist aus der Menge der Fahrgastströme ein FGK zu bestimmen. Dazu werden den ermittelten Fahrgastströmen die Verbindungskonflikte zugeordnet, deren KLA Teil des Fahrgaststroms sind. Jeder Verbindungskonflikt wird dabei nur einem Fahrgaststrom zugeordnet. Als FGK ausgewählt wird nun der Fahrgaststrom mit der geringsten Widerstandsveränderung.

Für die Verbindungskonflikte der restlichen, nicht ausgewählten Fahrgastströme wird geprüft, ob diese in den ausgewählten FGK gebündelt werden können. Nicht alle Verbindungskonflikte werden durch die FGK gelöst. Die Konfliktlösungen von Verbindungskonflikten, die nicht in einem FGK gebündelt sind, sind dennoch als individuelle Lösungen Bestandteil des Verkehrskonzepts.

Durch die Lenkung der Fahrgäste anhand der FGK können Engpässe entstehen, da zu der Auslastung im Regelbetrieb zusätzliche Fahrgäste des FGK das Angebot nutzen. Daher sieht Brauner (2023, S. 188 ff.) eine Engpassanalyse und -lösung vor. Die tatsächliche Ermittlung der Engpässe wird in der Arbeit nicht behandelt. Zur Engpasslösung wird ein alternativer Fahrgaststrom aus der Ermittlung der FGK verwendet. Der alternative Fahrgaststrom darf auch unter Berücksichtigung der übrigen FGK keinen Engpass verursachen und muss die gleiche Korridorart aufweisen.

Ergebnis des Moduls ist ein Verkehrskonzept, welches kollektive (Teil eines FGK) und individuelle Konfliktlösungen sowie veränderte Verbindungen und ungelöste Verbindungskonflikte enthält.

In **Modul 9** erfolgt die Verkehrskonzeptbewertung unter Berücksichtigung der stabilen Phase. Für die Bewertung werden die Bewertungskriterien Zielerreichungsgrad und die Widerstandsveränderung in einem Bewertungssystem zusammengeführt. Die Berechnung der Widerstandsveränderung der ungelösten Verbindungskonflikte erfolgt auf der Grundlage von drei verschiedenen Maßnahmen unter Berücksichtigung gegebener Fahrgastgruppen. Als Maßnahme kann

- die Fahrt nicht angetreten,
- das Verkehrsmittel gewechselt oder
- die Störungsdauer abgewartet werden.

Durch die Lösung der Verbindungskonflikte mit den drei Maßnahmen kann eine durchschnittliche Widerstandsveränderung über alle Verbindungskonflikte berechnet werden. Zur Bewertung der durchschnittlichen Widerstandsveränderung wird ein Grenzwert für die maximale durchschnittliche Widerstandsveränderung bei der Erstellung von SFP verwendet.

Wird der Grenzwert nicht eingehalten, können Maßnahmen im Betriebskonzept angepasst oder elementare Konfliktlösungen der Ebene 4 bei der Konfliktlösungsalternativensuche (Modul 7) genutzt werden. Weitere Hinweise, wie z. B. welche Maßnahmen angepasst werden sollten oder in welchen Bereichen eine Anpassung erfolgen sollte, werden nicht bereitgestellt.

Im letzten Modul (**Modul 10**) erfolgt eine kundenorientierte Bewertung des SFP unter Berücksichtigung von Einschwing- und stabiler Phase. Für die Einschwingphase wird dazu eine zugspezifische Ermittlung der Widerstandsveränderung durchgeführt.

Für die Ermittlung der Widerstandsveränderung wird für jeden Zug eine mittlere Verspätung über alle betrachteten Fahrplanminuten in der Einschwingphase bestimmt. Diese mittlere Verspätung in der Einschwingphase fließt als mittlere Verspätung der Züge in eine Verbindungskonflikttermittlung (Modul 6) für die Einschwingphase ein. Zur Lösung der Verbindungskonflikte in der Einschwingphase wird als Konfliktlösung entweder die gleiche Konfliktlösung wie in der stabilen Phase gewählt oder eine zeitliche Verschiebung.

Die Berechnung der durchschnittlichen Widerstandsveränderung aller Verbindungskonflikte erfolgt unter Anwendung einer Gewichtung der Verbindungskonflikte, basierend auf der Anzahl der durch einen Verbindungskonflikt betroffenen Fahrgäste. Die Ergebnisse der Widerstandsveränderung der stabilen Phase und Einschwingphase werden wiederum anhand einer Gewichtung über die betroffenen Fahrgäste zu einem Wert addiert.

Die durchschnittliche Widerstandsveränderung des SFP sollte einen gegebenen Grenzwert für die maximale durchschnittliche Widerstandsveränderung bei der Erstellung von SFP einhalten. Ist dies nicht der Fall, muss das SFP angepasst werden. Nähere Angaben, welche Änderungen durchgeführt werden sollten, werden nicht bereitgestellt.

Durch die beiden Module zur kundenorientierten Bewertung von SFP ist auch ein Vergleich zweier Störfallprogramme (teil-)automatisiert möglich.

Zusammenfassend ermöglichen die Ansätze zur Unterstützung der Erstellung von SFP vor allem eine Prüfung von geplanten betrieblichen Maßnahmen. Eine Automatisierung der Planung der betrieblichen Maßnahmen an sich besteht nicht. Bei der Erstellung des Verkehrskonzepts besteht durch den Ansatz von Brauner (2023) bereits eine automatisierte Erkennung und Lösung von Verbindungskonflikten. Für u. a. die Bestimmung der FGK ist jedoch weiterhin eine manuelle Eingabe erforderlich.

2.4.3 Ansätze zur (Teil-)Automatisierung der Anwendung von SFP

Nachdem in dem vorangegangenen Kapitel auf Ansätze zur Unterstützung und (Teil-)Automatisierung der Planung eingegangen wurden, werden in diesem Kapitel Ansätze zur (Teil-)Automatisierung der Anwendung von Störfallprogrammen aufgezeigt.

Corman et al. (2010) haben einen Ansatz für eine Echtzeit-Fahrplananpassung aufbauend auf SFP entwickelt. Betrachtet werden dabei partielle Sperrungen über einen längeren Zeitraum (wenige Stunden bis einige Tage). Als betriebliche Maßnahmen der betrachteten SFP können Ausfälle, alternative Fahrwege (lokale Umleitung) und Umleitungen (großräumig) zum Einsatz kommen. Für die Anpassung des Fahrplans erfolgt eine Aufteilung des Netzes in mehrere Bereiche. In den Bereichen wird jeweils ein Fahrplan aufbauend auf dem SFP unter Nutzung des Ansatzes von D'Ariano et al. (2007) erstellt. Bei der Fahrplananpassung findet keine Berücksichtigung von Fahrzeug- und Personalumlaufplanung statt. Die Dauer der Lösungsbereitstellung beläuft sich für die verwendeten Szenarien auf unter 10 Minuten.

Ein weiterer Ansatz zur Fahrplananpassung basierend auf SFP liefert Nakamura et al. (2011). Das angewendete SFP besteht aus

- Zuggruppen (= Züge mit gleichem Rollmaterial),
- Zugausfallbereichen (= Bereich einer Linie, der bei einer Störung entfällt) und
- Wendemustern (= Vorgabe von zugscharfen Wenden).

Umleitungen werden nicht berücksichtigt. Die Anpassung des Fahrplans auf Basis des SFP wird durch eine regelbasierte Heuristik unterstützt. Bei der Anwendung auf eine Strecke (bisher keine Anwendung auf ein Netz) beträgt die Dauer der Lösungsbereitstellung 5 Minuten.

Oetting und Chu (2013) haben einen Ansatz zur Unterstützung der Anwendung von SFP entwickelt, bei denen die im Netz verkehrenden Züge in Kategorien eingeteilt werden. Die Einteilung erfolgt entsprechend der Erfordernis der Vorgabe zugspezifischer Maßnahmen. Die

Kategorisierung der Züge erfolgt anhand des Standortes und der Fahrtrichtung zum Zeitpunkt der Ausrufung des SFP unter Berücksichtigung des durch den SFP vorgesehenen Betriebs in der stabilen Phase. Die Kategorie gibt an, ob weitere dispositive Maßnahmen erforderlich sind, damit der Zug in dem im SFP vorgesehenen Fahrplankonzept der stabilen Phase verkehren kann. Die Kategorie ermöglicht gleichzeitig abzuschätzen, ob der Zug durch die Störung verspätet sein wird.

Für die Konkretisierung des Betriebskonzepts unter Beachtung der tatsächlichen Betriebssituation hat Crespo (2020) einen Ansatz entwickelt. Output des Ansatzes ist ein Fahrplan der Einschwingphase. Der Ansatz besteht aus 9 Modulen (siehe Abbildung 2-6). **Modul 1 und 2** beschreiben den Input. Neben dem Betriebskonzept des ausgewählten SFP ist dies das Infrastrukturmodell, die aktuelle Betriebssituation sowie der reguläre Fahr- und Umlaufplan. Außerdem beschreibt Crespo (2020, S. 181 ff.) 14 elementare Konfliktlösungen, darunter u. a. (Teil-)Ausfall, Umleitung, Flügeln und Vereinen.

Für die Konkretisierung des SFP erfolgt in **Modul 3** zunächst eine Identifizierung der Infrastrukturelemente, die von den betrieblichen Maßnahmen verwendet werden. Der Einfluss der Störung und des gewählten Betriebskonzepts auf die im Netz verkehrenden Züge erfolgt anhand Ansatz von Oetting und Chu (2013).

In **Modul 4** werden linienspezifische Konflikte identifiziert und klassifiziert. Linienspezifische Konflikte nach Crespo (2020, S. 120) haben die Eigenschaft, dass diese nur erkannt werden können, wenn die gesamte Linie betrachtet wird. Ein linienspezifischer Konflikt kann somit nicht auf einen Zug heruntergebrochen werden. Linienspezifische Konflikte sind direkt mit dem Betriebskonzept und der aktuellen Betriebssituation verknüpft.

Crespo (2020, S. 181) unterscheidet zwei Arten von linienspezifischen Konflikten: Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte („vehicle availability conflict“) und Erreichbarkeitskonflikte („reachability conflict“). Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte sind eine Art von Umlaufkonflikten und bedeuten einen Überschuss oder Mangel hinsichtlich des Bedarfs an Zügen für den Betrieb einer Linie. Bei einem Erreichbarkeitskonflikt können die Zugfahrten einer Linie geplante Halte nicht erreichen. Eine Klassifizierung der linienspezifischen Konflikte erfolgt anhand der anwendbaren elementaren Konfliktlösungen.

Aufbauend auf den identifizierten linienspezifischen Konflikten werden in **Modul 5** zugspezifische Konfliktlösungsalternativen (PVSCS) in einem leeren Netzwerk generiert. Die Generierung von zugspezifischen Konfliktlösungsalternativen entspricht einer Kombination von

- einer potentiellen Konfliktlösung, die in Modul 4 für einen linienspezifischen Konflikt ermittelt wurde,
- einer Route durch das Netzwerk und
- einer Leistung des Umlaufplans.

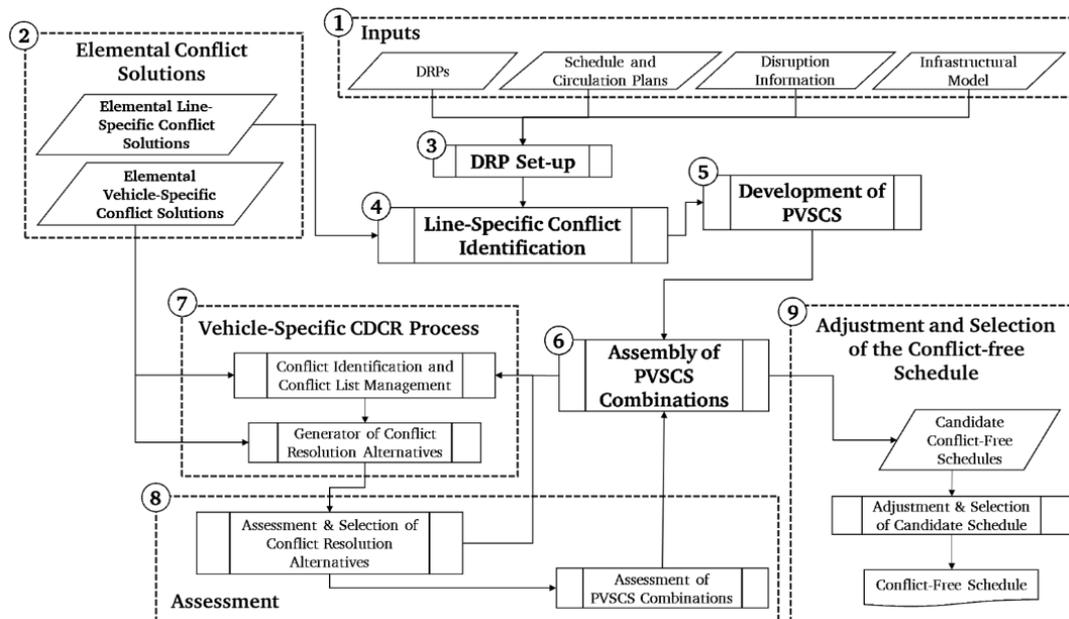


Abbildung 2-6: Systemarchitektur des Ansatzes von Crespo (2020)
(Abbildung entspricht Abbildung 3.1 aus Crespo2020, S. 92)

Die Komplexität der Erstellung von PVSCS wird begrenzt; „to ensure the effectiveness and efficiency of the system as discussed in the requirements“ (Crespo 2020, S. 88). Dazu werden nur technisch und betrieblich machbare PVSCS als mögliche PVSCS akzeptiert. Zur Verifizierung der Machbarkeit wird u. a. auf die Vorgaben von Brauner (2019a) zurückgegriffen.

In **Modul 6** erfolgt die Auswahl eines PVSCS für jeden Zug und die Kombination der ausgewählten PVSCS. Für die Kombination von PVSCS bestehen drei Teilprobleme, die mit unterschiedlichen Methoden gelöst werden:

- Die Kombination der PVSCS erfolgt durch einen genetischen Algorithmus.
- Die Identifizierung der Reihenfolge der wartenden Züge vor der letztmöglichen Wendestation erfolgt durch eine Heuristik.
- Zur Festlegung der Reihenfolge, in der die wartenden Züge in die letztmögliche Wendestation einfahren, wird eine Tabu-Suche genutzt.

Es bestehen zwei Abbruchkriterien für den die drei Teilprobleme steuernden genetischen Algorithmus. Berücksichtigt wird dabei die Anzahl der untersuchten PVSCS-Kombinationen und die kontinuierliche Verbesserung der Lösung. Ergebnis von Modul 6 sind konfliktfreie PVSCS-Kombinationen. Eine PVSCS-Kombination bildet jeweils einen Fahrplan der Einschwingphase.

Eine KE/KL-Heuristik für Belegungs-, Infrastruktur-, Umlauf- und Servicekonflikte (**Modul 7**) prüft die Kombination der PVSCS auf Konflikte und löst diese. Zum Einsatz kommt ein KE/KL-Heuristik, die auf den KE/KL-Heuristiken von Oetting et al. (2011) und Oetting et al. (2013) aufbauen. Die KE/KL-Heuristik wurde zur Erkennung und Lösung von Infrastruktur-, Umlauf- und Servicekonflikten erweitert. Ein Servicekonflikte tritt auf, wenn die Bedienung eines Bahnhofs ein vorgegebenes Intervall überschreitet (Crespo 2020, S. 141).

Modul 8 dient der Bewertungen der in Modul 7 generierten KLA sowie der Bewertung des Fahrplans, der durch die gewählten PVSCS besteht. Für die Bewertung werden sechs Kriterien

berücksichtigt (nicht alle Kriterien werden für beide Bewertungen genutzt) (Crespo 2020, S. 404 f.):

- 1. Verspätungen (“Expected Relative-Time Changes”)
- 2. Erwartete Auswirkungen auf die Betriebssituation („Changes in the Projected Operating Situation“)
- 3. Änderung der Bahnsteiggleise („Changes of Platform Tracks“)
- 4. Ausfälle („Cancelled Train Services“)
- 5. Änderung der Wendebahnhöfe (Veränderung des Kapazitätsverbrauchs in den betroffenen Wendebahnhöfen) („Changes of Turning Stations“)
- 6. Abweichung der Fahrzeugstandorte am Ende des Betriebstages („End-of-Day Imbalances“)

Modul 9 dient dem Entfernen nicht erforderlicher Maßnahmen aus den konfliktfreien Fahrplänen (PVSCS-Kombinationen) und der Auswahl eines Fahrplans, wenn mehrere konfliktfreie Fahrpläne bestehen. Das Entfernen von obsoleten Maßnahmen erfolgt durch die KE/KL-Heuristik aus Modul 7, die für die Erkennung von obsoleten Konfliktlösungen der elementaren Konfliktlösungen „zeitliche Verschiebung“ und „alternativer Fahrweg“ erweitert wurde. Ergebnis von Modul 9 und auch des gesamten Ansatzes ist ein konfliktfreier Fahrplan für die Einschwingphase.

Exkurs: Problem obsoleter Konfliktlösungen

Wie im Modul 9 von Crespo (2020) aufgezeigt, können nach Anwendung einer KE/KL-Heuristik im konfliktfreien Fahrplan betrieblich nicht mehr erforderliche Konfliktlösungen verbleiben. In einem Fahrplan vorhandene, nicht mehr erforderliche Konfliktlösungen werden im Weiteren als obsoleter³ Konfliktlösungen bezeichnet. Eine implementierte Konfliktlösung ist obsolet, wenn der ursprünglich zu lösende Konflikt nicht (mehr) auftritt, auch wenn die Konfliktlösung nicht oder nicht im ursprünglichen Umfang implementiert wird (Definition aufbauend auf Chiang et al. 1998 und Crespo 2020). Auch kann für einen Konflikt eine KLA bestehen, die eine bessere Bewertung als die ursprünglich implementierte Konfliktlösung aufweist. Eine solche Konfliktlösung wird als „nicht optimale“ Konfliktlösung bezeichnet. Obsolete oder nicht optimale Konfliktlösungen entstehen durch die schrittweise Implementierung von Konfliktlösungen im Ablauf der KE/KL-Heuristik.

Folgendes Beispiel verdeutlicht das Auftreten von obsoleten Konfliktlösungen: Es besteht ein Belegungskonflikt (Konflikt 1) zwischen Zug 1 und Zug 2. Zur Lösung des Konflikts erhält Zug 1 eine Wartezeit. Im weiteren Verlauf der KE/KL-Heuristik wird ein Konflikt zwischen Zug 2 und Zug 3 gelöst, wobei zur Lösung Zug 2 räumlich verschoben wird. Diese räumliche Verschiebung betrifft auch den Konfliktort von Konflikt 1. Die Konfliktlösung von Konflikt 1 ist nun obsolet, da der Konflikt zwischen Zug 1 und Zug 2 nicht mehr auftritt, auch wenn Zug 1 nicht wartet.

Obsolete Konfliktlösungen haben i. d. R. einen negativen Einfluss auf die Qualität des Fahrplans, da Maßnahmen zur Konfliktlösung meistens mit einer Beförderungszeitverlängerung, einer Reduzierung des Angebots oder einem erhöhten

³ In Chiang et al. 1998 werden diese Konfliktlösungen als „redundant“ und in Crespo 2020 als „unnecessary“ bezeichnet. Nach einem fachlichen Austausch mit Herrn Tibor Weidner wird in dieser Arbeit der Begriff der obsoleten Konfliktlösung verwendet. Der Begriff „redundante Konfliktlösung“ sollte verwendet werden, wenn für einen Konflikt zwei gleiche KLA bestehen.

Ressourceneinsatz einhergehen. In einem Fahrplan sollten obsoleete Konfliktlösungen daher möglichst nicht vorkommen.

In der Echtzeit-Fahrplananpassung tritt dieses Problem etwas in den Hintergrund, da die Fahrplananpassung i. d. R. auf einen Zeithorizont beschränkt ist und bereits durchgeführte Entscheidungen nicht verändert werden können. Bei der Erstellung eines Fahrplans können obsoleete Konfliktlösungen umfassender adressiert werden. Das Entfernen obsoleter Konfliktlösungen und die Änderung von betrieblich nicht optimalen Konfliktlösungen stellt eine Optimierung der durch die KE/KL-Heuristik erzeugten Lösung dar.

Chiang et al. (1998) haben einen Backtracking-Ansatz zur Erkennung und Entfernen obsoleter Konfliktlösungen beschrieben. Für die Lösung jedes Konflikts wird in einer Liste („History Liste“) festgehalten, welche Konflikte zur implementierten Konfliktlösung geführt haben und ob der Konflikt ein Folgekonflikt eines vorherigen Konflikts ist. Dadurch werden die Abhängigkeiten zwischen einem Konflikt, dessen Konfliktlösungen und den Folgekonflikten dokumentiert. Die Abhängigkeiten sind für den Ansatz von Chiang et al. (1998) immer gültig, da die Konfliktlösungen unabhängig von der Betriebsituation ausgewählt werden.

Zur Erkennung von obsoleten Konfliktlösungen sieht der Ansatz von Chiang et al. (1998) vor, dass, wenn eine implementierte Maßnahme entfernt werden soll, geprüft wird, ob der die Konfliktlösung hervorrufende Erstkonflikt nicht wieder auftritt. Außerdem wird geprüft, dass keine Konflikte auftreten, die den Erstkonflikt als Folgekonflikt erzeugen. Erfolgt eine Auswahl der Konfliktlösungen abhängig von der Betriebsituation, sind die in der History Liste festgehaltenen Abhängigkeiten ggf. nicht mehr zutreffend, wenn sich die Betriebsituation durch die Implementierung weiterer Konfliktlösungen geändert hat. Obsoleete Konfliktlösungen werden so ggf. nicht erkannt.

Crespo (2020) nutzt zum Entfernen obsoleter Konfliktlösungen die in der gleichen Arbeit entwickelte KE/KL-Heuristik. Dafür werden obsoleete Maßnahmen identifiziert und KLA für diese generiert. Eine KLA ist stets das Entfernen der obsoleten Maßnahmen. Analog zur Lösung von Konflikten werden die KLA und deren Folgekonflikte bewertet. Die bestbewertete KLA wird anschließend ausgewählt. Da die KE/KL-Heuristik wiederum den Fahrplan synchron durchläuft, können erneut obsoleete Konfliktlösungen erzeugt werden.

2.4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Ansätze zur Planung und Anwendung von SFP dargestellt.

Für die Planung von SFP besteht Unterstützung in Form eines Leitfadens zur Erstellung von SFP. Außerdem wurde eine teilautomatisierte betriebliche und kundenorientierte Bewertung von Störfallprogrammen entwickelt. Die Ansätze zur Unterstützung der Planung von SFP basieren überwiegend auf Heuristiken und erfordern manuelle Eingaben.

Bei der Forschung zur Anwendung von SFP kommen – außer bei Corman et al. (2010) – ebenfalls Heuristiken zum Einsatz. Mit Blick auf den Prozess zum Einsatz von SFP (siehe Abbildung 2-3) wird deutlich, dass nicht für alle Prozessschritte Ansätze zur Unterstützung in der Literatur bestehen. Bisher nicht betrachtet wurde (siehe Tabelle 2-1)

- die Auswahl und Adaption von SFP sowohl mit Fokus auf betriebliche als auch auf verkehrliche Einflussgrößen und
- die Konkretisierung von SFP mit Fokus auf verkehrliche Einflussgrößen.

Tabelle 2-1: Forschung zu Störfallprogrammen (angelehnt an Crespo 2020)

Prozess zum Einsatz von SFP		... mit Fokus auf betriebliche Einflussgrößen	... mit Fokus auf verkehrliche Einflussgrößen
Planung	Erstellung von SFP ...	Chu et al. 2012 Chu und Oetting 2013b Brauner 2023	Brauner und Oetting 2019 Brauner 2023
SFP		Betriebskonzept	Verkehrskonzept
Anwendung	Auswahl von SFP ...		
	Adaption von SFP ...		
	Konkretisierung von SFP ...	Corman et al. 2010 Nakamura et al. 2011 Oetting und Chu 2013 Crespo 2020	

2.5 Fahrplananpassung für geplante Infrastruktureinschränkungen

Ein SFP gibt das Fahrplankonzept der stabilen Phase während einer Störung vor (siehe Kapitel 2.4.1). Auch für geplante Infrastruktureinschränkungen (z. B. unterjährige Baumaßnahmen) ist eine Anpassung des Fahrplans für ein bestimmtes Szenario erforderlich. Daher werden in diesem Kapitel Ansätze zur Fahrplananpassung für geplante Infrastruktureinschränkungen behandelt.

Da für S-Bahn-Systeme die stabile Phase in der bestehenden Literatur oftmals als periodischer Fahrplan aufgefasst wird (siehe Kapitel 2.4.1), liegt ein Fokus des Kapitels auf Ansätzen zur Anpassung von periodischen Fahrplänen.

2.5.1 Anpassung von nicht periodischen Fahrplänen

Brucker et al. (2002) haben einen Ansatz für die Fahrplananpassung für eine partielle Sperrung von Strecken entwickelt. Der Fahrplan besteht aus: einer vorgegebenen Reihenfolge der Züge je Seite, Prioritäten der Züge und Konstruktionsspielräume für die Züge. Für die Optimierung werden Methoden der lokalen Suche angewendet.

Im Ansatz von Vansteenwegen et al. (2016) werden Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte für einen vorhandenen Fahrplan gelöst. Der Ansatz konzentriert sich auf größere Knoten. Die geplanten Infrastrukturmaßnahmen werden als fix und vorab bekannt angenommen. Die Fahrplananpassung erfolgt über einen iterativen Ansatz mit einer hierarchischen Anwendung bzw. Kombination der drei elementaren Konfliktlösungen: alternativer Fahrweg ohne zeitliche Verschiebung, alternativer Fahrweg mit zeitlicher Verschiebung und möglichem Reihenfolgentausch sowie Ausfall von Zugfahrten. Folgekonflikte außerhalb des Knotens werden nicht berücksichtigt. Bei der Anpassung des Fahrplans wird angenommen, dass keine Restriktionen für die Dauer der Lösungsbereitstellung bestehen.

Trepát Borecka und Bešinović (2021) haben einen Ansatz zur Anpassung des Fahrplans und Erzeugung von alternativen Verkehren für geplante Infrastruktureinschränkungen entwickelt. Das Problem wird als gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung (Mixed Integer Linear Programming) formuliert und mit einer Heuristik gelöst. Bei der Anpassung des Fahrplans werden die elementaren Konfliktlösungen Umleitung, alternative Wende, Ausfall und zeitliche Verschiebung genutzt. Dabei wird vorgegeben, welche Züge umgeleitet werden und welche vorzeitig wenden können. Auch die Bahnhöfe der vorzeitigen Wenden sind bekannt. Als verkehrliche Maßnahme dient der Einsatz zusätzlicher Züge und Busse. Berücksichtigt wird auch die Kapazität des verbleibenden Angebots. Ein Übergang zum angepassten Fahrplan wird, wie auch eine partielle Sperrung von Strecken, die Kapazitäten der Knoten oder mögliche Konflikte im Fahrplan, nicht berücksichtigt. Die Dauer der Lösungsbereitstellung beträgt ungefähr 30 Minuten.

2.5.2 Anpassung von periodischen Fahrplänen

Mit der Anpassung von periodischen Fahrplänen für geplante Infrastrukturabweichungen beschäftigen sich Van Aken et al. (2017b). Der vorgestellte Ansatz stellt eine Erweiterung von Van Aken et al. (2017a) dar. Die Fahrplananpassung wird als ein erweitertes Periodic Event Scheduling Problem (PESP) aufgefasst und als gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung (Mixed Integer Linear Programming) formuliert. PESP ist eine Problemformulierung für die Planung von periodischen Fahrplänen, vorgestellt von Serafini und Ukovich (1989). Auf dieser Formulierung wurden u. a. auch Programme für die Fahrplanerstellung entwickelt (siehe z. B. Peeters und Kroon 2001; Opitz 2009).

In dem Ansatz von Van Aken et al. (2017a) werden die elementaren Konfliktlösungen zeitliche Verschiebung, Reihenfolgentausch, vorzeitige Wende und Ausfall berücksichtigt. Umleitungen oder das Biegen von Zügen werden nicht berücksichtigt. Das Optimierungsziel ist, dass die Abweichung vom bestehenden Fahrplan möglichst klein ist, sodass das Angebot für den Fahrgast möglichst nicht verändert wird.

Da für die Formulierung der Fahrplananpassung als PESP die Linienplanung abgeschlossen sein muss, besteht ein vorgeschaltetes Modul für die Bestimmung von vorzeitigen Wenden. Vorzeitige Wenden werden bei der Sperrung von Strecken implementiert. Dafür wird der nächstmögliche Wendebahnhof gesucht. Wenn kein Wendebahnhof gefunden wird, fällt der Teil der Linie aus. Durch Van Aken et al. (2017b) wird der Ansatz erweitert, sodass eine Menge von möglichen Wendebahnhöfen berücksichtigt wird.

Um die Kapazitätsauslastung in einer Station nach der Bestimmung der Wendebahnhöfe zu reduzieren, ist nur ein Ausfall der Linie bzw. des Linienteils möglich. Nicht berücksichtigt ist der Übergang in den angepassten Fahrplan oder eine partielle Streckensperrung. Auch Umlaufkonflikte oder Mindestzugfolgezeiten in Knoten (z. B. für Züge, die das gleiche Bahnsteiggleis nutzen) werden ausgeklammert. Die Dauer der Lösungsbereitstellung beträgt je nach Konfiguration zwischen wenigen Minuten und einer halben Stunde. Nach (Van Aken et al. 2017a, S. 237) ist der Ansatz generell für die Störungsdisposition anwendbar.

Looij (2017) hat einen Ansatz zur Anpassung von Routen in Knoten bei geplanten Infrastruktureinschränkungen entwickelt. Die Routen werden angepasst, indem für jeden Konflikt eine konfliktfreie Route gewählt wird. Besteht keine konfliktfreie Route, fällt die Zugfahrt aus. Um den Ausfall von Zugfahrten zu vermeiden, wird auch eine begrenzte zeitliche Verschiebung sowie die Nutzung kürzerer Züge, die es ermöglichen, andere Bahnsteige zu

nutzen, geprüft. Formuliert wird das Problem als eine gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung (Mixed Integer Linear Programming). Durch den Ansatz berücksichtigt werden die Umläufe bei Wenden und erforderliche Rangierfahrten.

Außerdem wird eine iterative Heuristik zur Erhöhung der Robustheit der gefundenen Lösung vorgestellt. Dafür wird die kleinste Pufferzeit der gefundenen Lösung jeweils erhöht und das Optimierungsproblem erneut gelöst.

Da der Ansatz als ein Modul für eine netzweite Fahrplananpassung dienen soll, wurde von Looij (2017) auch eine Rückmeldung an die netzweite Fahrplananpassung bestimmt. Rückgemeldet werden Änderungen der Mindestzugfolgezeiten, ausgefallene Züge, kürzere Züge für Linien(abschnitte) und Vorschläge für alternative Fahrgastwechselzeiten. Die Dauer der Lösungsbereitstellung für einen Knoten beträgt etwa 3 Minuten.

Der Ansatz von Masing et al. (2022) ermöglicht eine Erstellung und Optimierung von periodischen Fahrplänen für die Fahrplananpassung bei Baumaßnahmen. Das behandelte Problem wurde in Form eines PESP als eine gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung (Mixed Integer Linear Programming) formuliert. Der Ansatz von Masing et al. (2022) erstellt und optimiert einen periodischen Fahrplan für die unmittelbare Umgebung (angrenzende Stationen) von vollständig gesperrten Strecken (siehe Abbildung 2-7). Im übrigen Netz werden die Linienführung sowie der Fahrplan als fix angesehen.

Als Optimierungsziel werden die betrieblichen Kosten in Form der Umlaufzeit je Linie minimiert sowie ein gleichmäßiges Bedienungsintervall der Stationen angestrebt. Als elementare Konfliktlösungen werden zeitliche Verschiebungen und alternative Fahrwege berücksichtigt. Für die Bestimmung der Fahrwege in den Bereichen, die an die Baumaßnahme angrenzen und daher besonders kapazitätskritisch sind, bestehen keine weiteren Einschränkungen. So sind innerhalb der betrachteten Bereiche vorzeitige Wenden oder die Nutzung des Gegengleises möglich. Anpassungen des Liniennetzplans über die betrachteten Bereiche hinaus (z. B. Umleitungen) erfolgen nicht.

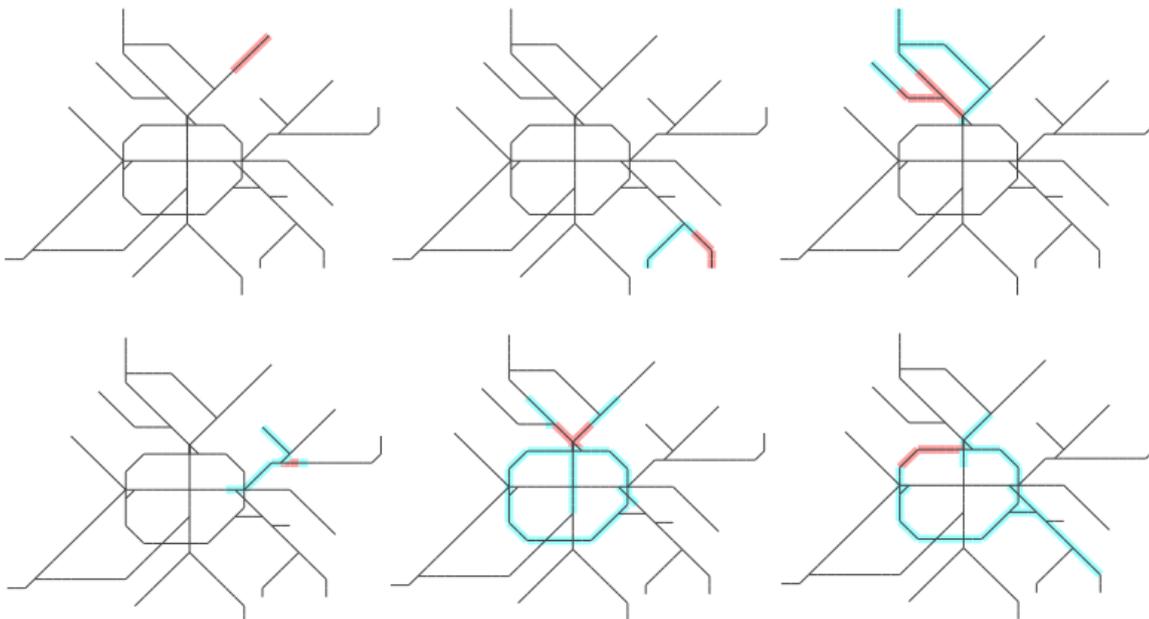


Abbildung 2-7: In Masing et al. 2022 betrachtete Szenarien, mit nicht verfügbarer Infrastruktur (rot) und den Bereichen der Anpassung (cyan) (vergrößerte Abbildung 10 aus Masing et al. 2022, S. 17)

Der Ansatz wurde auf das Berliner S-Bahn-Netz angewendet (siehe Abbildung 2-7) und für die gewählten Szenarien konnte ein möglicher Fahrplan innerhalb von 30 Sekunden gefunden werden. Für komplexere Szenarien konnte teilweise auch innerhalb von 90 Minuten keine optimale Lösung gefunden werden. Aus der Anwendung schlussfolgern Masing et al. (2022), dass viele alternative Routen und ein dichter Takt zu einer deutlichen Ausweitung der Dauer der Lösungsbereitstellung führen.

2.5.3 Zusammenfassung

Ziel des Kapitels war die Darstellung der Ansätze zur Fahrplananpassung für geplante Infrastruktureinschränkungen. Optimierungsziel der Ansätze ist es, den vorgegebenen Fahrplan möglichst beizubehalten. Wenn Änderungen des Liniennetzplans in den Ansätzen erlaubt sind, dann sind diese begrenzt (z. B. anhand der Auswahl des Wendebahnhofs, siehe Masing et al. 2022; Van Aken et al. 2017b oder zusätzlich von Umleitungen, Trepát Borecka und Bešinović 2021).

Die Ansätze haben die Lösung von Belegungskonflikten im Fokus. Wenn Umläufe berücksichtigt werden, dann dadurch, dass Ankünfte und Abfahrten von Zügen einer Linie verknüpft sind (z. B. Van Aken et al. 2017b) oder Umlaufkonflikte sollen implizit durch Begrenzung der zeitlichen Verschiebung vermieden werden (z. B. Brucker et al. 2002). Eine umfassendere Berücksichtigung von Umlaufkonflikten, z. B. bezüglich der erforderlichen Anzahl der Züge, findet nicht statt. Der Grund dafür dürfte sein, dass sich die Ansätze mit der Planung befassen und die Umlaufplanung in einem weiteren Schritt angepasst werden kann. Die Verortung der Probleme in der Planung führt ebenfalls dazu, dass der Fokus nicht auf einer möglichst geringen Dauer der Lösungsbereitstellung liegt.

2.6 Ausgewählte Methoden der Störungsdisposition

In Kapitel 2.2 wurde deutlich, dass die (Störungs)Disposition ein komplexes Problem ist. Bei der Entwicklung von Ansätzen für die Störungsdisposition besteht stets ein Zielkonflikt zwischen der Komplexität (und damit auch Praxisrelevanz) des betrachteten Problems und der gesicherteren Optimalität der Lösungen (siehe Kapitel 2.2.1). Bei den bestehenden Ansätzen wurde deutlich, dass die Dauer der Lösungsbereitstellung von Ansätzen, die für die Praxis relevante Probleme lösen und eine Optimalität der Lösungen anstreben, nicht den Anforderungen der Disposition genügen. Eine Möglichkeit ist daher, durch die Nutzung von Heuristiken den Fokus von der Optimalität der Lösung hin zu einer kürzeren Problemlösung zu verschieben. Für eine mögliche Nutzung von Heuristiken in der Störungsdisposition wird daher in diesem Kapitel eine Übersicht zur Lösung von kombinatorischem Optimierungsproblem mit Heuristiken gegeben.

Nach dem No-free-Lunch-Theorem der Optimierung sind alle Optimierungsalgorithmen über alle möglichen Optimierungsprobleme gleich gut (Wolpert und Macready 1997) Daraus kann nach Weise et al. (2009, S. 34) geschlossen werden, dass je mehr problemspezifisches Wissen in einem Algorithmus verwendet wird und somit je problemspezifischer ein Algorithmus ist, desto besser ist die Performance des Algorithmus.

Um einen problemspezifischen Algorithmus zu entwickeln, werden daher zunächst die Eigenschaften und Komponenten von Heuristiken dargelegt. Diese können dann auf die Eignung zur Lösung des Problems geprüft werden.

„[Heuristiken] lassen sich grob in Konstruktionsheuristiken zur Ermittlung einer ersten Ausgangslösung und Verbesserungsheuristiken zur Suche nach Lösungen mit höherem bzw. niedrigerem Zielfunktionswert untergliedern“ (Hüftle 2007, S. 3). Eine Heuristik bedarf außerdem einer Abstimmung zwischen Diversifikation (Exploration) und Intensivierung (Exploitation) (Birattari et al. 2003).

Als Diversifikation wird die Erkundung und Identifizierung von Teilen des Suchraums⁴ mit potenziell guten Zuständen bezeichnet. Dies kann als eine „grobe“ Suche verstanden werden. Die Intensivierung dagegen ist eine Verfeinerung der Suche in den Teilbereichen des Suchraums mit potenziell guten Zuständen. Um möglichst schnell einen möglichst guten Zustand zu finden, ist daher eine Kombination von Diversifikation und Intensivierung erforderlich (Blum und Roli 2003, S. 292 ff.). Die Komponenten der Heuristiken (z. B. die Nutzung einer Tabu-Liste) bestimmen die Diversifizierung und Intensivierung der Heuristik (Blum und Roli 2003, S. 294 f.).

Die Eigenschaften und Komponenten einer Heuristik stellen eine Abstraktion dar und sind somit problemunabhängig. Auch Metaheuristiken stellen problemunabhängige Lösungsstrategien dar (“In short, we could say that metaheuristics are high level strategies for exploring search spaces by using different methods.” Blum und Roli 2003, S. 271). Daher wird angenommen, dass die von Heuristiken stammenden Eigenschaften und Komponenten, die auf andere Probleme übertragbar sind, mit den Eigenschaften und Komponenten von Metaheuristiken übereinstimmen.

Es besteht eine Vielzahl von Metaheuristiken (Stegherr et al. 2022) und für diese bestehen unterschiedliche Klassifikationen, die auf den Eigenschaften und Komponenten der Metaheuristiken beruhen. Im weiteren Kapitel werden die Klassifikationen von Metaheuristiken genutzt, um die möglichen Eigenschaften und Komponenten von Heuristiken zu bestimmen. Eine Übersicht zu Metaheuristiken bietet Talbi (2009). Dort werden auch die im Weiteren als Beispiele genannten Metaheuristiken ausführlich dargestellt.

Birattari et al. (2003) beschreiben sechs Eigenschaften von Metaheuristiken. Zunächst wird zwischen Metaheuristiken mit Trajektorie und diskontinuierlichen Metaheuristiken unterschieden. Eine Trajektorie (Bahn oder Bewegungspfad) ist ein zusammenhängender Verlauf der in einer Suche erzeugten Zustände. Für eine Trajektorie ist ein festes System von Nachbarschaften erforderlich (Sergienko et al. 2009, S. 736). Eine Nachbarschaft sind Zustände, die durch die Änderung eines Zustands in einem Schritt der Metaheuristik erreicht werden können. Beispiele für Metaheuristiken mit Trajektorie sind Simulated Annealing oder Tabu-Suche. Besteht keine Trajektorie im Suchraum, handelt es sich um diskontinuierliche Metaheuristiken, wie z. B. ein genetischer Algorithmus.

Weiterhin wird unterschieden, ob die Metaheuristiken einzellösungsbasiert oder populationsbasiert arbeiten. Bei einer einzellösungsbasierten Metaheuristik wird zu jedem Zeitpunkt nur ein Zustand betrachtet. Dagegen besteht bei populationsbasierten Metaheuristiken eine Menge von Zuständen. Eine weitere Eigenschaft ist, ob eine Metaheuristik ein „Gedächtnis“ hat und so z. B. bereits erzeugte Zustände gespeichert werden können. Auch kann eine Metaheuristik eine oder mehrere Nachbarschaften verwenden. Eine lokale Suche

⁴ Der Suchraum ist die Menge aller Zustände. Ein Zustand kann dabei nach Russell und Norvig 2012, S. 252 als ein „Satz von Variablen, die jeweils einen Wert besitzen“ aufgefasst werden. Statt Zustand ist auch „Lösung“ ein gängiger Begriff.

sucht typischerweise in einer Nachbarschaft. Algorithmen mit mehreren Nachbarschaften ermöglichen unterschiedliche Veränderungen der Zustände. Die Zielfunktion einer Metaheuristik kann dynamisch oder statisch sein. Ist die Zielfunktion dynamisch, kann diese während der Suche verändert werden. Ein Beispiel dafür ist die Breakout Methode, die während der Suche zum Entkommen von lokalen Maxima bestimmte Bestandteile des Zustands schlechter bewertet. Als letzte Eigenschaft beschreiben Birattari et al. (2003), ob eine Metaheuristik von der Natur inspiriert ist.

Sergienko et al. (2009) beschreiben acht Eigenschaften für Metaheuristiken (siehe Abbildung 2-8). Die erste Eigenschaft ist die Entscheidungsfindung. Entscheidungen können rein deterministisch oder auch (teilweise) stochastisch getroffen werden. Als zweite Eigenschaft wird die Strukturkomplexität angegeben. Die Einteilung von Metaheuristiken bzgl. der Strukturkomplexität ist dabei nicht eindeutig bzw. einheitlich. Unterschieden werden Heuristiken („simple Algorithms“), Metaheuristiken, Kombinationen, die unterschiedliche Ansätze nutzen bzw. mehrere Algorithmen vereinen („hybrid algorithms“, „hybrid metaheuristics“) und Ansätze, die Heuristiken zur Lösung eines Problems auswählen bzw. erstellen („Hyperheuristics“).

Weiterhin unterschieden wird die Art der Trajektorie. Die „Bewegung“ durch den Suchraum kann kontinuierlich oder diskontinuierlich sein. Bei der Erzeugung von Zuständen kann zwischen der Bestimmung eines Zustands durch die Bestimmung der einzelnen Variablen des Zustands (Zuweisung von Werten zu den Variablen; entspricht einer Konstruktionsheuristik) und der Verbesserung von bereits vorhandenen Zuständen (entspricht einer Verbesserungsheuristik) unterschieden werden. Bei der Verbesserungsheuristik unterscheiden Sergienko et al. (2009) weiter zwischen einzellösungsbasierten und populationsbasierten Verfahren.

Eine Metaheuristik kann auch Veränderungen vornehmen, die nicht direkt einen Zustand betreffen. Der Suchraum (z. B. Ausschließen von Zuständen durch Tabu-Suche), die der Suche zugrundeliegende Zielfunktion, aber auch die Nachbarschaft (z. B. Änderung der Definition der Nachbarschaft während der Suche, z. B. Repeated Local Search) können verändert werden.

Eine weitere Eigenschaft ist die Speichernutzung. Ein Speicher kann genutzt werden, um Informationen über die bisherige Suche zu speichern (z. B. bisher beste Zustand), um die Suche zu steuern (z. B. letzte Zustände für Tabu-Search; oder Änderung der Zielfunktion) oder für Adaptionen während der Suche.

Eine Metaheuristik kann problemorientiert oder modelorientiert sein. Bei problemorientierten Metaheuristiken werden neue Zustände anhand des aktuellen Zustands bzw. der aktuellen Zustände generiert (z. B. Simulated Annealing). Modelorientierte Metaheuristiken erzeugen Zustände anhand eines parametrisierten probabilistischen Modells („parameterized probabilistic model“ Sergienko et al. 2009, S. 739). Dieses Modell kann während der Suche angepasst werden (z. B. beim Ameisenalgorithmus).

Eine Adaptation während der Suche kann der Anpassung von Parametern (z. B. Verweildauer in Tabu-Liste), der Auswahl von Komponenten oder Strategien sowie der Modellbildung dienen. Keine essentielle Eigenschaft („essential characteristics“ Sergienko et al. 2009, S. 738) ist nach Sergienko et al. (2009), ob eine Metaheuristik von der Natur inspiriert ist oder nicht.

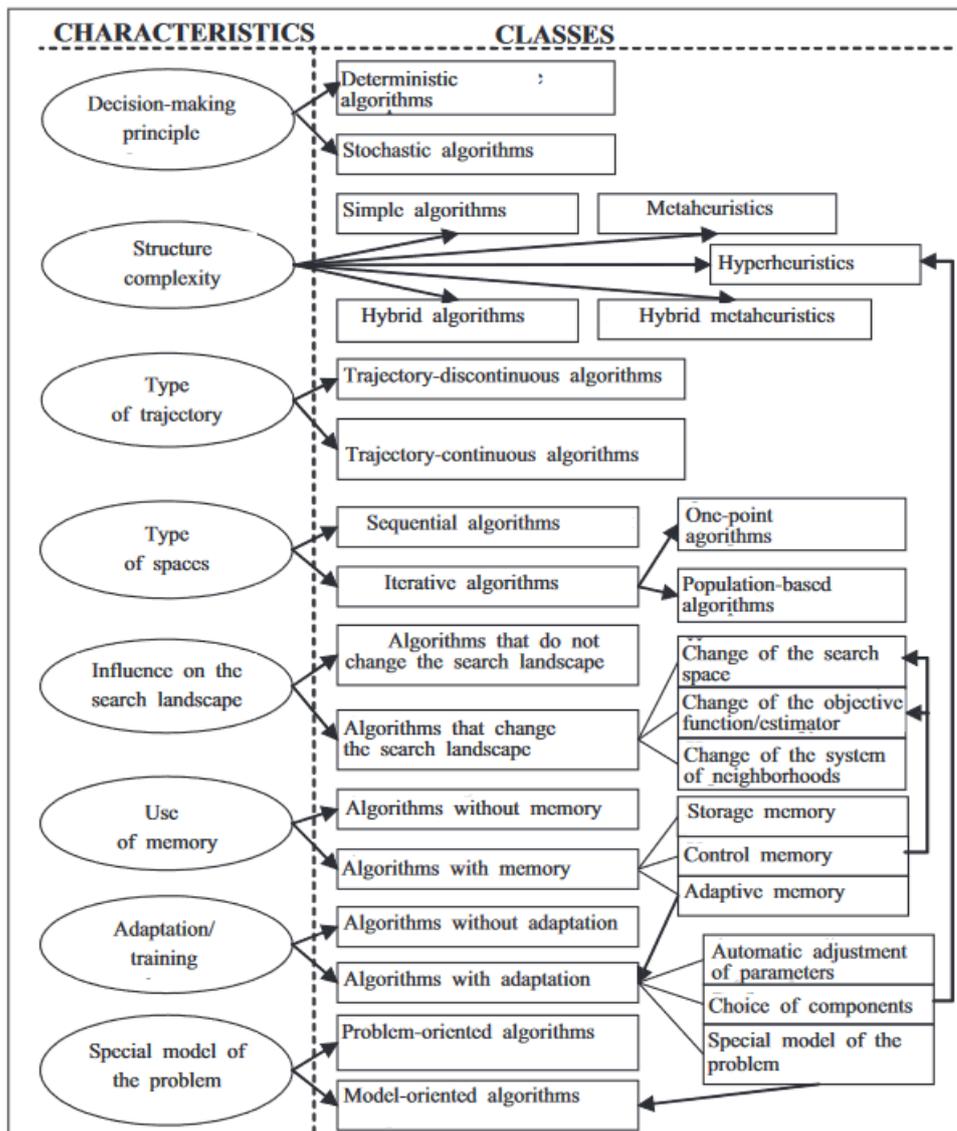


Abbildung 2-8: Klassifikation von Metaheuristiken durch Sergienko et al. 2009 (entspricht Abbildung 2 aus Sergienko et al. 2009, S. 738)

Molina et al. (2020) schlagen zwei verschiedene Klassifikationen von Metaheuristiken vor: nach der Quelle der Inspiration und dem Verhalten. Da das Verhalten maßgebend für die Bestimmung der Komponenten und Eigenschaften einer Heuristik ist, wird im Weiteren nur die Taxonomie aufbauend auf dem Verhalten betrachtet (siehe Abbildung 2-9).

Zunächst wird unterschieden, ob neue Zustände generiert oder bestehende Zustände verändert werden. Eine Generierung neuer Zustände kann entweder durch

- eine Kombination von Zuständen oder
- Stigmergie (= "indirect communication and coordination between [...] different solutions or agents used to create new solutions", Molina et al. 2020, S. 912) erfolgen.

Bei der Änderung bestehender Zustände wird unterschieden, welche Zustände für die Veränderung berücksichtigt werden. Es können

- alle bestehenden Zustände
- Teil der bestehenden Zustände oder
- repräsentative Zustände (z. B. bisher beste gefundene Zustände) verwendet werden.

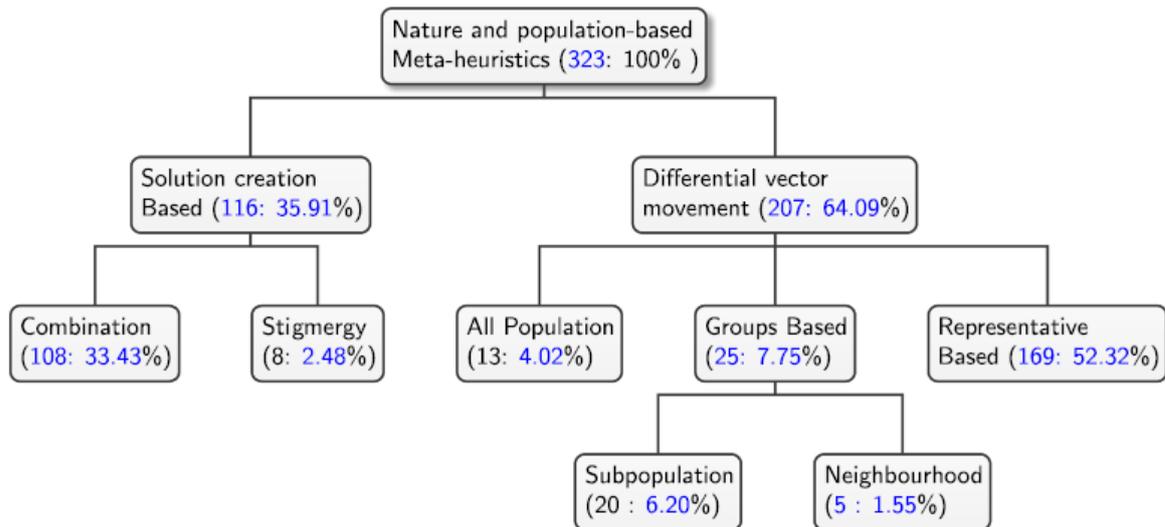


Abbildung 2-9: Klassifikation aus Molina et al. 2020 für Metaheuristiken, aufbauend auf deren Verhalten (entspricht Abbildung 5 aus Molina et al. 2020, S. 914)

Bei bestehenden Zuständen unterteilen Molina et al. (2020) weiterhin, ob eine Teilpopulation oder eine oder mehrere Nachbarschaften verwendet werden. Bei Teilpopulationen wird die Population unterteilt und Änderungen werden nur von den Zuständen derselben Teilpopulation beeinflusst.

Nach Stegherr et al. (2022) besteht bisher noch keine einheitliche Klassifikation von Metaheuristiken. Daher beschreiben sie ein sieben-stufiges Klassifikationssystem, das teilweise auf bestehende Ansätze zur Klassifikation von Metaheuristiken zurückgreift. Eigenschaften und Komponenten finden sich in den Kriterien von Stufe 1 & 2. Da die übrigen Stufen weitere Standardisierung bedürfen und teilweise redundant oder von der Implementierung der Metaheuristik abhängig sind, werden diese nicht weiter betrachtet.

Stufe 1 der Klassifikation legt den Fokus auf die Gesamtstruktur und allgemeine Merkmale der Metaheuristik. Unterschieden wird zwischen

- Trajektoriemethoden und diskontinuierlichen Methoden
- einzellösungsbasierten und populationsbasierten Methoden
- einer lokalen Suche und einer Lösungskonstruktion sowie
- Methoden mit oder ohne Nutzung eines Speichers (Gedächtnis)

Die zweite Stufe der Klassifikation betrachtet das Verhalten der Metaheuristik. Unterschieden wird, ob neue Zustände

- durch Kombination oder Stigmergie bestehender Zustände oder
- durch Veränderung bestehender Zustände erzeugt werden.

Für die Veränderung bestehender Zustände können alle bestehenden Zustände, eine Auswahl der bestehenden Zustände (Nachbarschaft oder Teilpopulation) oder repräsentative Zustände herangezogen werden.

Zusammenfassung

Ziel des Kapitels war es, eine Übersicht zur Lösung von kombinatorischen Optimierungsproblemen mittels Heuristiken zu geben. Dafür wurden Klassifikationen von Metaheuristiken dargestellt, um so mögliche Eigenschaften und Komponenten von Heuristiken zu bestimmen.

Die Eigenschaften einer Heuristik sind abhängig von den gewählten Komponenten. Dennoch bestehen drei zentrale Eigenschaften, die vom zu lösenden Problem abhängig sind und somit maßgeblich die Wahl der Komponenten beeinflussen. Die weiteren Eigenschaften können nach der Festlegung dieser drei Eigenschaften bestimmt werden. Die drei Eigenschaften sind:

- Verbesserungs- oder Konstruktionsheuristik
- Diversifizierung und Intensivierung
- deterministische oder stochastische Entscheidungsfindung

Konstruktionsheuristiken werden angewendet, wenn ein Zustand bestimmt werden soll und dazu schrittweise den Variablen des Zustands Werte zugewiesen werden. Eine Verbesserungsheuristik startet bereits mit einem Zustand und versucht davon ausgehend einen Zustand mit einer besseren Bewertung zu bestimmen.

Eine weitere Eigenschaft ist die Diversifizierung und Intensivierung der Heuristik. Diversifizierung ist erforderlich, um erfolgversprechende Bereiche des Suchraums zu entdecken und um aus lokalen Optima zu entkommen. Eine Diversifizierung erfordert „große Schritte“ im Suchraum. Eine Intensivierung ist erforderlich, um in erfolgversprechenden Bereichen des Suchraums die Zustände weiter zu verbessern und so Optima zu erreichen. Dies ist mit „kleinen Schritten“ im Suchraum möglich. Die meisten Komponenten einer Heuristik dienen sowohl der Diversifizierung als auch der Intensivierung, nur der jeweilige Anteil ist (auch je nach Ausgestaltung der Komponente) unterschiedlich.

Die dritte Eigenschaft ist die Entscheidungsfindung (z. B. bei der Annahme eines neuen Zustands). Die in einer Heuristik vorkommenden Entscheidungsfindungen können deterministisch oder stochastisch sein.

Als Komponenten einer Heuristik bestehen

- die Operatoren, mit denen neue Zustände (Verbesserungsheuristik) bzw. Variablen der Zustände (Konstruktionsheuristik) bestimmt werden und
- Veränderungen der Heuristik während dessen Anwendung.

Operatoren können nach den drei folgenden Prinzipien unterteilt werden:

- Kombination
- Stigmergie
- Veränderung

Es ist auch eine Kombination verschiedener Operatoren möglich und ein Operator kann auch Eigenschaften der drei Prinzipien ineinander vereinen (z. B. Vektor bei Partikelschwarmoptimierung: einerseits wird jeder Zustand anhand eines Vektors modifiziert (Veränderung), andererseits werden alle Zustände gleichzeitig modifiziert und in die Berechnung des Vektors fließen Informationen der übrigen Zustände ein (Stigmergie)).

Veränderungen der Heuristik während der Durchführung können sich beziehen auf

- den Suchraum,
- die Zielfunktion,
- die Suchparameter oder
- die Operatoren.

Der Suchraum kann während der Suche z. B. durch eine Einschränkung der Wertebereiche der Variablen des Zustands oder ein (vorübergehendes) Ausschließen von bestimmten Zuständen erfolgen (z. B. Ausschließen von Zuständen durch Tabu-Suche). Auch die Bewertungsfunktion, mit der über eine Annahme der Zustände entschieden werden kann, kann während der Suche verändert werden.

Außerdem können Parameter der Suche (z. B. die Verweildauer in der Tabu-Liste oder die Änderung der Wahrscheinlichkeit, dass bei Simulated Annealing ein schlechter bewerteter Zustand angenommen wird) verändert werden. Ebenso kann der Einsatz der Operatoren während der Suche verändert werden. So erfolgt z. B. eine Änderung der Definition der Nachbarschaft während einer Iterated Local Search oder eine Änderung der Operatoren bei „Hybriden Algorithmen“.

Weitere Eigenschaften, die im Vergleich zu den drei weiter oben genannten Eigenschaften die Funktionsweise der Komponenten beschreiben, sind:

- problem- oder modell-orientiert
- Nutzung eines Speichers
- Trajektoriemethoden oder diskontinuierliche Methoden
- einzellösungsbasiert oder populationsbasiert

Aufbauend auf den bestimmten Eigenschaften und Komponenten kann eine Heuristik entwickelt werden.

2.7 Zusammenfassung von Kapitel 2

In Kapitel 2 ist der aktuelle Stand der Forschung zur Echtzeit-Fahrplananpassung mit Fokus auf Störungsdisposition dargestellt. Ein Ansatz der Störungsdisposition ist der Einsatz von SFP.

Der betriebliche Prozess zur Anwendung von SFP wird ausführlich von Ghaemi und Goverde (2015) beschrieben (siehe Kapitel 2.4.1). Ergänzt um die verkehrliche Komponente durch Brauner und Oetting (2019), ergibt sich der in Abbildung 2-3 zusammengefasste Prozess zum Einsatz von SFP (siehe Kapitel 2.4.1). Die in Kapitel 2.4 analysierte Forschung zu einzelnen Komponenten des Prozesses zum Einsatz von SFP ist in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Tabelle 2-1 verdeutlicht, dass bereits intensive Forschung zum Einsatz von SFP sowohl für die Planung als auch für die Anwendung stattgefunden hat. Dennoch bestehen gerade bei der Anwendung von SFP die in Kapitel 2.4 erkannten Forschungslücken (leere Zellen in Tabelle 2-1).

Die bestehenden Veröffentlichungen zur Störungsdisposition nutzen entweder zur Echtzeit-Fahrplananpassung bei Störungen keine SFP als Grundlage der Anpassungen (siehe Kapitel 2.3), sondern erzeugen individuelle Lösungen für Störungen oder die Veröffentlichungen zur Anwendung von SFP befassen sich mit der Konkretisierung von SFP mit Fokus auf betriebliche Einflussgrößen (siehe Tabelle 2-1). Für die Anpassung des

Liniennetzplans in die Störungsdisposition besteht bisher nur der Ansatz von Van Lieshout et al. (2020, S. 741), bei dem aber keine SFP verwendet werden. Auch die bestehenden Ansätze der Fahrplananpassung für geplante Infrastrukturabweichungen scheinen nicht die Forschungslücken der Störungsdisposition mit Einsatz von SFP zu schließen (siehe Kapitel 2.5).

Kapitel 2.6 gibt einen Überblick über die Komponenten und Eigenschaften von Heuristiken. Heuristiken sind eine mögliche Methode der Störungsdisposition, die bisher vor allem für die vorgeplante Störungsdisposition zum Einsatz gekommen ist.

Zusammenfassend bestehen Forschungslücken bei der Anwendung von SFP und gleichzeitig besteht in der Praxis der Wunsch nach einem Tool zur Unterstützung der Disponenten bei der Anwendung von SFP (Brauner 2016 in Brauner 2023, S. 24). In der weiteren Arbeit ist eine Forschungslücke auszuwählen und eine Lösung für diese zu entwickeln.

3 Problemstellung

Aufbauend auf dem Stand des Wissens (Kapitel 2) werden in diesem Kapitel die Problemstellung spezifiziert und ein Ansatz zur Lösung des Problems entwickelt.

Dazu wird zunächst das Ziel der Arbeit anhand der identifizierten Forschungslücken festgelegt (Kapitel 3.1). Darauf aufbauend erfolgen eine inhaltliche Abgrenzung (Kapitel 3.2) und die Sammlung und Zusammenstellung der Anforderungen (Kapitel 3.3). In Kapitel 3.4 wird eine Systemarchitektur hergeleitet, die zum Erfüllen des gesetzten Ziels geeignet ist. Abschließend wird die Vorgehensweise für die nachfolgenden Kapitel festgelegt (Kapitel 3.5) und die verwendeten Begriffe definiert (Kapitel 3.6).

3.1 Zielsetzung

Eine in Kapitel 2 identifizierte Forschungslücke ist die Adaption von SFP anhand betrieblicher und infrastruktureller Einflussgrößen, wie z. B. der vorherrschenden Infrastruktursituation zum Zeitpunkt der Störung. Die Verfügbarkeit der Infrastruktur ist nicht nur durch die Störung, die das Ausrufen eines SFP notwendig macht, sondern oftmals zusätzlich durch weitere Abweichungen (bspw. durch Baumaßnahmen), die jeweils unterschiedlich starke Auswirkungen auf den Betrieb haben, eingeschränkt. Je nach Ausmaß dieser Einschränkungen kann die Realisierbarkeit des Betriebskonzepts nicht mehr gegeben sein.

Die Abschätzung der Realisierbarkeit des Betriebskonzepts und die ggf. notwendige Anpassung von Betriebs- und Verkehrskonzept beruhen bislang auf dem Wissen und der Erfahrung der zuständigen Disponenten (siehe Kapitel 2.4.1). Zusammen mit weiteren Aufgaben, wie der Abstimmung mit beteiligten Akteuren und der Kommunikation der getroffenen Entscheidungen, besteht eine Vielzahl an Aufgaben, die in einer möglichst kurzen Zeit zu erledigen sind.

Die Entscheidung über die Adaption des SFP sowie die Adaption selbst erfolgen bislang ohne automatisierte Unterstützung zur Planung oder Validierung der Anpassungen (siehe Kapitel 2.4.1). Die Stabilität des (angepassten) Betriebsprogramms, ein Erreichen dieses Zustands und eine optimale Nutzung der Ressourcen ist somit bisher von den Disponenten in einer Phase hoher Belastungen manuell sicherzustellen. Deshalb können die mit dem Aufstellen von statischen SFP getroffenen Vorbereitungen nicht immer ihr eigentliches Potenzial zur Bewältigung von Störungen entfalten.

Ziel der Arbeit ist daher die Schließung eines Teils dieser Forschungslücke durch die Entwicklung von Algorithmen zur Adaption von SFP anhand infrastruktureller und betrieblicher Einflussgrößen zum Zeitpunkt der Störung. Die Algorithmen sollen für eine Verwendung in einem Tool zur (teil)automatisierten Unterstützung von Disponenten bei der Adaption von SFP geeignet sein.

Ausgangslage und damit auch Input der Algorithmen sind das für eine Störung ausgewählte SFP sowie die aktuelle Infrastruktur- und Betriebssituation. Ergebnis des Tools und somit Output der Algorithmen ist ein SFP mit (angepasstem) Betriebs- und (angepasstem) Verkehrskonzept.

Zur Unterstützung der Disponenten soll das Tool aufzeigen, wenn für das gewählte SFP die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase oder das Erreichen der stabilen Phase (Einschwingfähigkeit) nicht möglich ist. Ist dies der Fall, soll eine Adaption des ausgewählten

SFP bestimmt, anhand von betrieblichen und verkehrlichen Kriterien validiert und ausgegeben werden.

Kern eines SFP ist das Betriebskonzept, welches linienscharfe Maßnahmen festlegt, die bei einer Störung umgesetzt werden sollen (siehe Kapitel 2.4.1). Die Adaption eines SFP erfordert somit u. a. eine Änderung der linienscharfen Maßnahmen des Betriebskonzepts. Die linienscharfen Maßnahmen eines Betriebskonzepts definieren vorrangig Laufweg und Takt von Linien (siehe Kapitel 2.4.1). Daher kann die Anpassung eines Betriebskonzepts als Anpassung des für die Störung vorgesehenen Liniennetzplans und der Takte der Linien abstrahiert werden.

Neben linienscharfen Maßnahmen, die Laufweg und Takt betreffen, können auch weitere linienscharfe Maßnahmen (z. B. ein alternativer Fahrweg im Knoten) oder zugscharfe Maßnahmen (z. B. die Abstellung eines Zuges) durch die Disponenten festgelegt werden, um die betriebliche Umsetzbarkeit des SFP zu schaffen (siehe Kapitel 2.4.1). Die Vorgaben des Betriebskonzepts zusammen mit den vom Disponenten festgelegten Maßnahmen stellen die Anpassung des Fahrplans über alle drei Phasen des Störungsbetriebs dar. Die Anpassung des Fahrplans bedingt wiederum eine Anpassung von Umlauf- und Personalplanung.

Durch eine Anpassung des Betriebskonzepts und einer damit einhergehenden Änderung des Fahrplankonzepts der stabilen Phase sind die Maßnahmen des Verkehrskonzepts ggf. nicht mehr gültig oder umsetzbar. Die Adaption von SFP kann somit vier betriebliche Planungen (Liniennetzplan, Fahrplan, Umlauf- und Personalplanung) sowie die verkehrliche Planung des Verkehrskonzepts betreffen.

Nach der Bestimmung und Beschreibung des Ziels der Arbeit erfolgen darauf aufbauend die inhaltlichen Abgrenzungen (Kapitel 3.2) sowie die Sammlung und Zusammenstellung der Anforderungen (Kapitel 3.3). Anschließend kann die Systemarchitektur entwickelt (Kapitel 3.4) werden.

3.2 Inhaltliche Abgrenzung

Ziel dieses Kapitels ist die inhaltliche Abgrenzung der vorliegenden Arbeit.

Das Ziel der Arbeit wurde in Kapitel 3.1 anhand des Prozesses zum Einsatz von SFP und der berücksichtigten Einflussgrößen festgelegt. Daher erfolgt auch die weitere inhaltliche Abgrenzung anhand des Prozesses zum Einsatz von SFP und den berücksichtigten Einflussgrößen. Außerdem soll die Entwicklung der Algorithmen für die Verwendung in einem Tool erfolgen. Die inhaltliche Abgrenzung erfolgt somit gegliedert nach:

- dem Prozess zum Einsatz von SFP,
- den infrastrukturellen und betrieblichen Einflussgrößen und
- der Toolentwicklung.

Prozess zum Einsatz von SFP

Der Fokus des Einsatzes von SFP in Deutschland liegt auf S-Bahn-Systemen oder S-Bahn ähnlichen Verkehren (Brauner 2016; in Brauner 2023, S. 23). S-Bahn-Systeme werden charakterisiert durch Taktverkehre mit relativ kleiner Taktzeit und regionale Laufwege. Die Verkehre sind weitgehend auf ein Zentrum ausgerichtet und haben eine hohe verkehrliche Bedeutung in der Region. Die in Deutschland im S-Bahn-Netz eingesetzten Züge haben eine ähnliche Zugcharakteristik .

Gerade im Kernbereich des S-Bahn-Netzes gibt es zudem oftmals zentrumsnahe Streckenabschnitte, sogenannte Stammstrecken, die von der Mehrzahl der Linien gemeinsam genutzt werden. Für diese Strecken mit einer hohen Auslastung und geringer Zugfolgezeit bietet sich ein Einsatz von SFP an. Neben den genannten Charakteristiken wird für die S-Bahn-Netze, für die die entwickelten Algorithmen gelten sollen, angenommen, dass der Kernbereich ein reines S-Bahn-Netz, ohne Verkehre anderer EVU, ist.

Entsprechend des Prozesses zum Einsatz von SFP (siehe Abbildung 2-3) liegt für die Adaption eines SFP eine Störung vor, und die Disponenten haben für die vorliegende Störung ein SFP ausgewählt. Für das ausgewählte SFP und alle weiteren bestehenden SFP des S-Bahn-Netzes wird entsprechend der bestehenden Ansätze zur Unterstützung der Erstellung von SFP (siehe Kapitel 2.4.2) angenommen, dass die Erstellung kundenorientiert erfolgt ist.

Angenommen wird ebenfalls, dass eine Abschätzung der Dauer der Störung vorliegt. Hierfür bestehen bereits Ansätze z. B. von Zilko et al. (2016). Auch nicht Bestandteil der Adaption von SFP ist die Entscheidung, ob für die vorliegende Störung überhaupt ein SFP angewendet werden soll. Dies ist bereits Inhalt der Auswahl eines SFP (siehe Abbildung 2-3).

Anders als die Einschwingphase und die stabile Phase wird die Ausschwingphase nicht für die Adaption des SFP berücksichtigt. Die Ausschwingphase folgt i. d. R. einer schrittweisen Steigerung des Angebots und kann während der stabilen Phase vorbereitet werden (siehe Kapitel 2.4.1). Daher wird der Einfluss auf die Adaption des SFP als gering angenommen.

Beim Einsatz von SFP zeitlich nach der Adaption von SFP und somit nicht Teil der Arbeit ist die Konkretisierung des SFP zu einem Fahrplan, d. h. die Bestimmung von zugspezifischen Maßnahmen für die aktuelle Betriebssituation. Für die Konkretisierung des SFP ist bereits ein (adaptiertes) SFP als Input erforderlich. Auch nicht Inhalt dieser Arbeit ist ein weiteres Anpassen des Fahrplans gegenüber dem Zeitpunkt der Konkretisierung des SFP während der Einschwingphase oder der stabilen Phase (z. B. bei neuen Informationen zur Störung).

Berücksichtigte Einflussgrößen

Anders als der Prozess zum Einsatz von SFP besteht keine einheitliche Beschreibung der Einflussgrößen anhand derer eine inhaltliche Abgrenzung vorgenommen werden kann. Für die inhaltliche Abgrenzung der Einflussgrößen erfolgt daher sowohl eine Beschreibung der Einflussgrößen als auch deren inhaltliche Abgrenzung.

Als **infrastrukturelle Einflussgröße** besteht die aktuelle Infrastruktursituation, die im Wesentlichen dem Störungsszenario des ausgewählten SFP entspricht. Zusätzlich können weitere störungsunabhängige Einflüsse (z. B. Baumaßnahmen) bestehen.

Betriebliche Einflussgrößen umfassen die Fahr- und Ressourcenplanungen sowie die aktuelle Betriebssituation. Die Fahr- und Ressourcenplanung sind nicht nur Einflussgrößen, sondern werden auch durch die Anwendung des adaptierten SFP beeinflusst (siehe Kapitel 3.1). Insgesamt kann die Adaption von SFP vier verschiedene betriebliche Planungen betreffen (siehe Kapitel 3.1):

- Liniennetzplan
- Fahrplan
- Fahrzeugumlaufplan
- Personalplan

Im Weiteren erfolgt nach einer inhaltlichen Abgrenzung der vier betrieblichen Planungen die Abgrenzung der Betriebssituation.

Für den **Liniennetzplan** des Regelbetriebs wird angenommen, dass Linien im Kernbereich nur einen Laufweg haben und somit keine Verzweigungen der Linien oder parallele Laufwege im Kernbereich bestehen. Damit hat jede Linie höchstens zwei Einbruchsknoten, die den Übergang vom Kernbereich zu den Netzästen darstellen. Im Kernbereich haben die Zugfahrten beider Richtungen einer Linie die gleichen Verkehrshalte. An jedem Einbruchsknoten geht eine Linie in einen Netzast über. Somit bedient jede Linie maximal zwei Netzäste.

Die Zugfahrten einer Linie können außerhalb des Kernbereichs unterschiedliche Laufwege haben. Im Regelbetrieb bilden alle Zugfahrten einer Linie eine Menge von zusammenhängenden Knoten und Kanten. Die Schnittmenge der Laufwege zweier Zugfahrten einer Linie wird als eine zusammenhängende Abfolge von Knoten und Kanten angenommen. Somit bestehen keine Verzweigungen und anschließende Wiedervereinigung von Laufwegen einer Linie. Eine Menge von Knoten und Kanten einer Linie weist deshalb keine Zyklen auf.

Für die SFP wird angenommen, dass die Netzäste durch diejenigen Linien bedient werden, die diese auch im regulären Betrieb bedienen. Betrieblich machbare Umleitungen und Wendebahnhöfe, die für eine Adaption genutzt werden können, sind je Linie bekannt. Einschränkungen der Machbarkeit können nur durch aktuelle Infrastruktursituationen bestehen.

Auch können sogenannte korrespondierende Linien (Stemer 2018, 68 f.) bestehen, die einen verzahnten Takt aufweisen und/oder für die linienübergreifende Wenden erlaubt sind. Angenommen wird, dass Informationen zu korrespondierenden Linien eines S-Bahn-Netzes vorab bekannt sind.

Zu dem Liniennetzplan eines S-Bahn-Systems existiert außerdem der **Fahrplan** des Regelbetriebs. Dieser kann über verschiedene Verkehrszeiten variieren. Für die Adaption des SFP werden der Fahrplan des Regelbetriebs und die stabile Phase als periodische Fahrpläne angenommen, da S-Bahn-Systemen durch Taktverkehre charakterisiert sind.

Fahrzeugumlauf- und Personalplan weisen in der Regel eine geringere Kontinuität als der Fahrplan des Regelbetriebs auf und sind einer Vielzahl von gesetzlichen, betrieblichen und individuellen Vorgaben unterworfen. Die bestehenden Ansätze zur Unterstützung der Erstellung von SFP prüfen daher bisher nur, ob die Maßnahmen zu keinem Fahrzeugmehrbedarf führen (siehe Kapitel 2.4.2).

Da im S-Bahn-Netz eingesetzte Züge i. d. R. eine ähnliche Zugcharakteristik aufweisen, wird die Fahrzeugflotte des S-Bahn-Systems als homogen angenommen, d. h. alle Fahrzeuge haben die gleichen fahrcharakteristischen und kapazitiven Eigenschaften. Darauf aufbauend werden fixe Fahrzeit für alle Fahrzeuge zwischen den Verkehrshalten angenommen. Außerdem wird für den **Fahrzeugumlaufplan** angenommen, dass die Fahrzeugeigenschaften aller Zugfahrten einer Linie gleich sind und die Fahrzeuge für alle Zugfahrten aller Linien eingesetzt werden können.

In der Disposition erfolgt meist eine sequentielle Planung mit Trennung von Fahrplananpassung und Anpassung von **Fahrzeug- und Personalumlaufplan**. Da Fahrzeug- und Personalumlaufplan im Gegensatz zum durch Taktverkehre charakterisierten Fahrplan eine geringe Regelmäßigkeit aufweisen, sind für diese Planungen keine Maßnahmen in SFP enthalten. Daher erfolgt bei der Adaption von SFP keine Berücksichtigung von Fahrzeug- und

Personalumlaufplan auch, wenn dies im Sinne einer integrierten Planung wünschenswert wäre. Zur Unterstützung der Anpassung der Fahrzeugumlaufplanungen sollen aber Umlaufkonflikte erkannt und gelöst werden.

Die aktuelle **Betriebssituation** umfasst die aktuellen Abweichungen zum Fahrplan des Regelbetriebs und die Zuordnung der Fahrzeuge zu den aktuellen Zugfahrten. Als bekannt vorausgesetzt werden deshalb auch die Verfügbarkeit und der Standort der eingesetzten Fahrzeuge. Bestandteil der aktuellen Betriebssituation ist auch die Verfügbarkeit von Fahrzeugen, die zum Zeitpunkt des Auftretens der Störung nicht eingesetzt werden. Dazu wird angenommen, dass Anzahl und Standort der verfügbaren Fahrzeuge bekannt sind. Fahrzeuge, die sich im Störbereich befinden und spezielle Dispositionsmaßnahmen erfordern und deshalb auf absehbare Zeit nicht verfügbar sind, können für die Adaption nicht berücksichtigt werden.

Nicht für die Adaption von SFP berücksichtigt werden die Abweichungen der Personal- und Umlaufplanung, da diese Pläne im Rahmen dieser Arbeit wie zuvor festgelegt nicht (vollständig) in die Entwicklung der Algorithmen zur Adaption von SFP einbezogen werden.

Es wird angenommen, dass die Daten zur aktuellen Infrastruktursituation vorhanden und für die Algorithmen nutzbar sind. Außerdem sind die Daten zu den betrieblichen Planungen und der Betriebssituation des das S-Bahn-Netz betreibenden EVU nutzbar. Von anderen EVU stehen die betrieblichen Daten nicht zur Verfügung. Außerdem werden alle Einflussgrößen als zeitlich fix angenommen und keine Veränderung dieser (z. B. der Infrastruktursituation) berücksichtigt.

Wie mit dem Ziel in Kapitel 3.1 festgelegt, erfolgt keine Adaption des SFP aufgrund von **verkehrlichen Einflussgrößen**. Somit erfolgt keine Berücksichtigung von Quelle-Ziel-Daten zur (aktuellen) Nachfrage oder Informationen zum Zustand (z. B. Infrastruktursituation oder Betriebssituation) von öffentlichen Verkehrssystemen neben dem S-Bahn-System. Da durch die Störung betroffene Verbindungen der Fahrgäste im Verkehrskonzept adressiert werden (Brauner 2023, S. 44), werden keine Anschlusskonflikte berücksichtigt.

Weiterhin erfolgt keine Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Angebot und Nachfrage. Auch wird die Planung der verkehrlichen Maßnahmen, die beispielsweise für Fahrgastkorridore erforderlich sind (z. B. Reisendenlenkung, Absprache mit anderen Verkehrsunternehmen), nicht betrachtet.

Toolentwicklung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von Algorithmen für die Verwendung in einem Tool. Das Tool selbst und damit verbundene Komponenten, wie z. B. Datenbanken oder Benutzeroberflächen, werden nicht entwickelt. Da kein Tool entwickelt wird, findet auch kein Testen des Tools in einer realen Umgebung statt.

Die vom Algorithmus genutzten Daten unterliegen zwar den in diesem Kapitel beschriebenen Vorgaben und den im nächsten Kapitel gesammelten Anforderungen, aber eine Beschaffung und Aufbereitung der erforderlichen Daten erfolgt nicht.

3.3 Anforderungen

Nachdem das Ziel der Arbeit festgelegt (Kapitel 3.1) und inhaltlich abgegrenzt (Kapitel 3.2) wurde, werden in diesem Kapitel die Anforderungen an die Adaption von SFP hergeleitet. Die Anforderungen sind die Grundlage für die Bestimmung der Systemarchitektur, die Auswahl der Methoden und die Entwicklung der Algorithmen.

Ziel des Kapitels ist die möglichst umfassende Beschreibung, Detaillierung und Strukturierung der Anforderungen an die Adaption von SFP. Für die Herleitung der Anforderungen wird zunächst diskutiert, wie die Vollständigkeit der Anforderungen angestrebt wird. Abschließend werden die Anforderungen spezifiziert und tabellarisch dargestellt.

Herleitung und Vollständigkeit der Anforderungen

Die Anforderungen an die Adaption von SFP konkretisieren das Ziel der Arbeit. Das Ziel der Arbeit konzentriert sich nicht allein auf das Ergebnis der Adaption, ein SFP, sondern legt fest, dass die entwickelten Algorithmen dazu dienen sollen, in einem Tool Disponenten bei der Durchführung der Adaption von SFP zu unterstützen. Somit sind zur Konkretisierung des Ziels der Arbeit nicht nur Anforderungen an das Output der Adaption, sondern auch an Input und Durchführung der Adaption zu bestimmen. Die Anforderungen werden daher gegliedert nach:

- Anforderungen an das Ergebnis der Adaption, ein SFP (Output) sowie
- Anforderungen an die Durchführung der Adaption (Input und Durchführung)

Da ein SFP das Ergebnis der Adaption ist und das gewünschte Ergebnis Auswirkung auf Input und Durchführung der Adaption haben, bestehen Anforderungen an die Adaption sowohl anhand der Ziele der Durchführung als auch anhand der Ziele eines SFP. Die Gliederung von Ziel und Anforderungen sowie die Abhängigkeiten sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

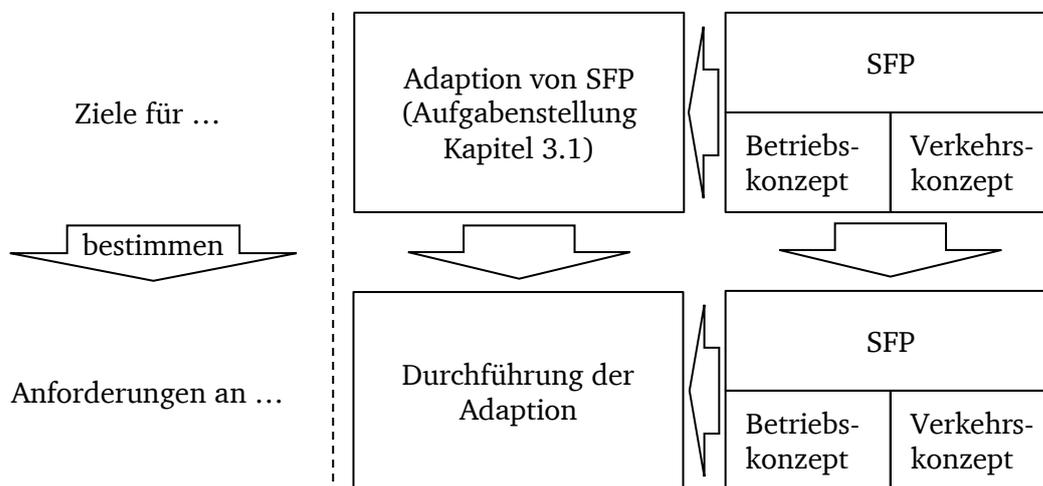


Abbildung 3-1: Zusammenhang zwischen Zielen der Arbeit und den Anforderungen

Die Vollständigkeit der Anforderungen wird durch vier Herangehensweisen zur Bestimmung von Anforderungen angestrebt. Erstens wurde die Literatur auf Anforderungen geprüft. Dabei wurde Literatur zur Störungsdisposition (siehe Kapitel 2.4.4) auf Anforderungen hin analysiert.

Weiterhin wurden in Workshops und Experteninterviews Anforderungen aus der Praxis abgefragt. Drittens werden aus der Literatur Ziele des Einsatzes von SFP bestimmt und Anforderungen daraus hergeleitet. Viertens erfolgt zur Prüfung der Vollständigkeit eine Strukturierung der Anforderungen anhand der zuvor eingeführten Gliederung (siehe

Abbildung 3-1). Dadurch kann geprüft werden, ob für jede Kategorie der Gliederung und deren Bestandteile (z. B. Input und Durchführung) Anforderungen vorhanden sind.

Die Ziele für die Adaption von SFP wurde bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, daher wird im Weiteren auf die Ziele des Einsatzes von SFP eingegangen.

Ziele des Einsatzes von SFP

Für die Herleitung von Anforderungen an ein SFP aus den Zielen des Einsatzes von SFP werden diese zunächst zusammengefasst. Für den Einsatz von Störfallprogrammen gilt „[d]as **Aufrechterhalten der Transportketten** für möglichst viele Fahrgäste als oberstes Ziel“ (Rey et al. 2007, 702 f.; Hervorhebungen durch den Autor).

Daneben bestehen folgende Ziele des Einsatzes von SFP:

1. **Verkürzung** der **Reaktionszeit** in der Disposition [...]
2. **Vereinfachung** und **Festigung** des Kommunikationsflusses zwischen den an der Disposition und Umsetzung beteiligten Stellen [...]
3. **Standardisierung** der Störungsdisposition ggü. Fahrgästen und Beteiligten (wiederkehrende Reaktion bei gleichem Störungsbild)
4. **Stabilisierung des Betriebes** auf den nicht von der Störung betroffenen bzw. angrenzenden Strecken (DB Ril 615.0601, S. 2; Hervorhebungen durch den Autor)

Im Weiteren erfolgt die Auflistung der Anforderungen entsprechend der eingeführten Gliederung (siehe Abbildung 3-1), aufgeteilt in Anforderungen an ein SFP (Kapitel 3.3.1) und Anforderungen an die Durchführung der Adaption (Kapitel 3.3.2).

Für jede Anforderung wird die Quelle (Literatur, Workshop, Ziel des Einsatzes von SFP, Ziele der Adaption (Kapitel 3.1)) angegeben. Außerdem werden bzgl. der Priorität der Anforderung drei Typen unterschieden. Anforderungen, die

- zwingend erfüllt werden müssen (Typ: „harte“ Anforderungen),
- möglichst erfüllt werden sollen (Typ: „weiche“ Anforderungen) und
- entsprechend Kapitel 3.2 nicht berücksichtigt werden (Typ: „ohne“).

3.3.1 Anforderungen an ein Störfallprogramm (Output der Adaption)

Die Anforderungen sind in Tabelle 3-1 dargestellt und unterteilt in Anforderungen an das Betriebskonzept und das Verkehrskonzept (siehe Abbildung 3-1). Anforderungen, die sowohl für das Betriebskonzept als auch das Verkehrskonzept gelten, werden unter „SFP“ zusammengefasst.

Eine ausführliche Aufstellung von Anforderungen an SFP besteht in der Arbeit von Brauner (2023). Die 12 durch einen Stern (*) markierten Anforderungen in Tabelle 3-1 entsprechen 15 Anforderungen, die auch in Brauner (2023) enthalten sind. Die Differenz kommt durch eine Zusammenfassung von Anforderungen auf Grund einer anderen Struktur der Aufbereitung der Anforderungen zustande. Auf Grund der abweichenden Problemstellung zwischen Brauner (2023) und der vorliegenden Arbeit wurden 14 weitere Anforderungen bestimmt.

Tabelle 3-1: Anforderungen an ein SFP

Anforderung	Beschreibung der Anforderung	Typ	Quelle
1.A. SFP			
aufeinander abgestimmt*	Betriebs- und Verkehrskonzept müssen aufeinander abgestimmt sein, sodass die verkehrlichen Maßnahmen des Verkehrskonzepts bei Anwendung der betrieblichen Maßnahmen des Betriebskonzept umsetzbar sind.	hart	Brauner und Oetting 2019, S. 5; ähnlich zu Brauner 2023, S. 62 (Anforderung „Zuverlässigkeit“)
wenige Maßnahmen	Die Anzahl der Maßnahmen eines SFP sowie über alle SFP eines S-Bahn-Netzes soll möglichst gering sein.	weich	Rey et al. 2007, S. 698
Umsetzbarkeit (technisch und rechtlich)*	Die Maßnahmen des SFP müssen einzeln und in Kombination technisch und rechtlich umsetzbar sein.	hart	Brauner 2023, S. 53 f. (Anforderungen betriebliche und verkehrliche Funktionsfähigkeit)
„logische Konsistenz“**	„[Die betrieblichen und verkehrlichen] Maßnahmenbündel soll[en] keine inneren Widersprüche enthalten“	hart	Brauner 2023, S. 57 u. S. 67
1.B. Betriebskonzept			
Phasen der Anwendung eines SFP			
Einschwingfähigkeit/ Konkretisierbarkeit*	Das Betriebskonzept muss ggf. unter Anwendung von fahrzeugbezogenen Maßnahmen in der aktuellen Betriebs- und Infrastruktursituation zu einem umsetzbaren, konfliktfreien Fahrplan der Einschwingphase führen.	hart	Chu 2014, S. 31; Crespo 2020, S. 83; Brauner 2023, S. 56 (konkretisierte Anforderung „Einschwingfähigkeit“)
betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase*	Das Betriebskonzept ermöglicht in der aktuellen Infrastruktursituation ein umsetzbares, konfliktfreies Fahrplankonzept der stabilen Phase.	hart	Brauner 2023, S. 44 u. S. 56 (konkretisierte Anforderung „Ermöglichen einer betrieblichen Stabilität/Funktionsfähigkeit“)

stabiler Betrieb in der Einschwingphase	Der Fahrplan der Einschwingphase sollte möglichst stabil sein.	weich	Ziel SFP: Stabilisierung des Betriebes
stabiler Betrieb in der stabilen Phase	Das Fahrplankonzept der stabilen Phase sollte möglichst stabil sein.	weich	Ziel SFP: Stabilisierung des Betriebes
„Rückführbarkeit“*	„Das Betriebskonzept kann ohne betriebliche Störungen aufgehoben werden und der Betrieb kann nach Störungsende schrittweise wieder in den Normalzustand überführt werden.“	ohne	Brauner 2023, S. 56
kurze Ausschwingphase	Die Dauer der Ausschwingphase sollte möglichst kurz sein.	ohne	Struktur: Analog zur Einschwingphase
geringe Auswirkungen auf weiteres Netz	In Mischverkehrsstrecken sind zeitliche und räumliche Verschiebungen im Vergleich zum Regelbetrieb zu vermeiden.	weich	Ziel SFP: Stabilisierung des Betriebes
angemessene Dauer der Einschwingphase	Der Fahrplan der Einschwingphase soll in einer angemessenen Zeit in die stabile Phase überführen.	hart	Chu 2014, S. 31
kurze Einschwingphase*	Die Dauer der Einschwingphase sollte möglichst kurz sein.	weich	Chu 2014, S. 46; Brauner 2023, S. 57 (Anforderung „schnelle Stabilität“)
Liniennetz und Takte der Linien			
kein Pendelverkehr	Es sollen keine Pendelfahrten im Kernbereich stattfinden.	hart	Workshops; DB Regio AG 2013, S. 39
gültige Linienplanung	Die betrieblichen Maßnahmen führen zu einer Linienplanung, die die in Kapitel 3.2 beschriebenen Anforderungen erfüllt.	hart	Kapitel 3.2
Bedienung Netzäste	Die Bedienung der Netzäste soll bei einer Störung im Kernbereich weiterhin gewährleistet werden	weich	Rey et al. 2007, S. 698
Bedienung Stammstrecke	Die Bedienung der Stammstrecke soll nur bei Gewährleistung einer bestimmten Beförderungskapazität erfolgen.	hart	Rey et al. 2007, S. 698

Vorgaben max. Zuganzahl	Vorgabe zur maximalen Zuganzahl je Zeiteinheit für Strecken sind im Betriebskonzept einzuhalten.	hart	Workshops; DB Regio AG 2013, S. 48 u. S. 51
1.C. Verkehrskonzept			
Zielerreichung*	Die im regulären Fahrplan angebotenen Verbindungen sollen weiterhin angeboten werden.	weich	Rey et al. 2007, S. 698; Brauner 2023, S. 54 (ähnlich zu Anforderung „Mobilitäts-erhaltung“)
Beförderungskapazität*	Die Beförderungskapazität der Verbindungen soll ausreichend sein.	hart	Crespo 2020, S. 68 f. Brauner 2023, S. 62 (Anforderung „Engpass-vermeidung“)
Grenzwert Widerstandsveränderung	Die durchschnittliche Widerstandsveränderung soll einen vorgegebenen Grenzwert, der die verkehrliche Mindestqualität vorgibt, nicht überschreiten.	hart	Brauner 2023, S. 149
geringe Widerstandsveränderung	Negative Veränderung der Widerstände der im regulären Fahrplan angebotenen Verbindungen sollen möglichst gering sein.	weich	Ziel SFP: Aufrechterhalten der Transportketten
Gewohnheit*	„Der Fahrgast sollte so wenige Veränderungen wie möglich an seinem gewohnten Mobilitätsverhalten vornehmen müssen.“	weich	Brauner 2023, S. 54 (Anforderung „Zuverlässigkeit“)
Nachvollziehbarkeit Fahrgast	Die verkehrlichen Maßnahmen müssen die Erwartungen der Fahrgäste erfüllen.	weich	Workshop
„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.“	hart	Brauner 2023, S. 62
„Vollständigkeit“*	„Die Maßnahmen sollen jeden betroffenen Fahrgast adressieren.“	hart	Brauner 2023, S. 61 f. (Anforderung „Individualisierung“)

3.3.2 Anforderungen an die Durchführung der Adaption

Die Anforderungen an die Durchführung der Adaption sind in Tabelle 3-2 dargestellt und unterteilt in Anforderungen an den Input und an die Durchführung selbst. Anforderungen sowohl an den Input als auch an die Durchführung werden unter „2.A Übergeordnet“ zusammengefasst. Der erste Eintrag der Anforderungen an die Durchführung stellt die zuvor beschriebene Verknüpfung des Outputs (d. h. des SFP) mit der Durchführung der Adaption dar (siehe Abbildung 3-1).

Tabelle 3-2: Anforderungen an die Durchführung der Adaption

Anforderung	Beschreibung der Anforderung	Typ	Quelle
2.A Übergeordnet			
allgemeingültig	Die Adaption muss für verschiedenste S-Bahn-Systeme anwendbar sein.	hart	Brauner 2023, S. 53
Berücksichtigung von aktueller Infrastruktur-situation	Die Verfügbarkeit der Infrastrukturelemente zum Zeitpunkt der Adaption ist zu berücksichtigen.	hart	Ziel der Arbeit (Kapitel 3.1)
Berücksichtigung der aktuellen Betriebssituation	Die zum Zeitpunkt der Adaption vorherrschende Betriebssituation (siehe Kapitel 3.2) ist zu berücksichtigen.	hart	Ziel der Arbeit (Kapitel 3.1)
Terminiertheit	Die Algorithmen der Adaption müssen sicher terminieren.	hart	ISO/IEC 25010:2023, S. 2
schnelle Lösungs-bereitstellung	Die Adaption findet im Betrieb statt. Um eine schnelle Reaktion auf eine Störung zu ermöglichen, muss die Lösung der Adaption schnell bereitstehen.	hart	ISO/IEC 25010:2023, S. 2 Kapitel 2.2.1
„kunden-orientierte Bewertung“	„Die Qualität eines SFP sollte anhand seiner Kundenorientierung bestimmt werden.“	hart	Brauner 2023, S. 54
„Qualitäts-einordnung“	Die Bewertung des SFP soll so aufbereitet werden, dass diese den Disponenten bei der Entscheidung unterstützt, ob ein SFP angepasst werden sollte.	weich	angelehnt an Brauner 2023, S. 59
2.B. Input			
Vermeidung von manuellem Input	Der erforderliche manuelle Input durch den Disponenten soll möglichst gering sein.	weich	Ziel SFP: Verkürzung Reaktionszeit
Verfügbarkeit Input	Erforderlicher Input soll aus technisch und rechtlich verfügbaren Daten bestehen (z. B. keine Nutzung von Fahrplänen anderer EVU; siehe Kapitel 3.2).	hart	Workshop

2.C. Durchführung			
<i>Einhaltung der Anforderungen an ein SFP (Tabelle 3-1).</i>			
Bezug zur Disposition			
Nachvollziehbarkeit der Adaption	Bereitstellung einzelner Berechnungsschritte und kausaler Zusammenhänge (Vermeidung einer Blackbox).	hart	Nakamura et al. 2011, S. 2
Kompatibilität mit Arbeitsabläufen	Die Adaptionen sollen sich an die Arbeitsabläufe und Entscheidungsprozesse von Disponenten anlehnen.	hart	Workshop
Kontinuität	Die Adaption soll auf bestehende Ansätze in der SFP-basierten Störungsdisposition aufbauen und diese weiterentwickeln.	weich	Steinbach und Crespo 2021, S. 7
Automatisierung	Während der Adaption sollen wenige Rückmeldungen durch den Disponenten nötig sein.	weich	Ziel der Arbeit (Kapitel 3.1)
Anpassbarkeit	Bestehende Vorgaben z. B. durch vorhandene Dispositionsgrundsätze sollen berücksichtigt und gewünschte Rückmeldungen eingeholt werden können.	weich	Workshop
integrierte Berücksichtigung von Fahrplan und Fahrzeugumlaufplan	Bei „schweren Störungen“ sollte die Anpassung des Fahrplans und des Fahrzeugumlaufplans gleichzeitig durchgeführt werden.	weich	Fekete et al. 2011, S. 3
Bezug zu Betriebs- und Verkehrskonzept			
Erforderlichkeit	Eine Adaption soll nur erfolgen, wenn diese aufgrund der aktuellen Infrastruktur- oder Betriebssituation erforderlich ist. Ansonsten soll das ausgewählte SFP ohne Änderung angewendet werden (siehe auch Kapitel 3.2).	hart	Ziel SFP: Standardisierung
Nutzung bestehender Verkehrskonzepte	Da Verkehrskonzepte oftmals unter Einbindung anderer EVU und Verkehrsbetreiber erstellt wurden, sollten diese komplexen Planungen möglichst aufrechterhalten werden.	weich	Ziel SFP: Verkürzung Reaktionszeit / Standardisierung

Berücksichtigung von Einschwingphase und stabiler Phase	Bei der Adaption wird die Einschwingphase und die stabile Phase berücksichtigt.	hart	Kapitel 3.2
Zuverlässigkeit	Durch das adaptierte SFP sollten für die Fahrgäste (Disponenten) möglichst wenige Änderungen an dem gewohnten Mobilitätsverhalten (Planungen) erforderlich sein.	weich	Ziele SFP: Standardisierung
Bezug zu Maßnahmen			
einheitliche Reaktion	Bei Störungen, die sich auf das gleiche Störungsszenario zurückführen lassen, sollten möglichst die gleichen Maßnahmen angewendet werden.	weich	Ziel SFP: Standardisierung
Nutzung gleicher Maßnahmen	Bei Änderungen des SFP sollten möglichst Maßnahmen verwendet werden, die in anderen SFP enthalten sind.	weich	Rey et al. 2007, S. 698

In diesem Kapitel wurden mit den Tabellen Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 die Anforderungen an das SFP und die Durchführung der Adaption und somit an das Ziel der Arbeit beschrieben. Die Anforderungen sind in der weiteren Arbeit zu berücksichtigen, beispielsweise bei der Herleitung von Methoden und Algorithmen. Auch die Herleitung der Systemarchitektur im nächsten Kapitel erfolgt unter Berücksichtigung der gesammelten Anforderungen.

3.4 Systemarchitektur

Das Ziel der Arbeit, die Entwicklung von Algorithmen für die Adaption von SFP (siehe Kapitel 3.1), wurde inhaltlich abgegrenzt (Kapitel 3.2) und Anforderungen an das Ziel wurden bestimmt (Kapitel 3.3). Ziel dieses Kapitels ist es, die fachliche Systemarchitektur festzulegen, die den Rahmen der in der Arbeit zu entwickelnden Algorithmen darstellt. Die Systemarchitektur muss sicherstellen, dass die enthaltenen Module die bestehenden Anforderungen aus Kapitel 3.3 erfüllen können.

Zur Bestimmung der Systemarchitektur werden zunächst Teilprobleme des in Kapitel 3.1 festgelegten Problems (Kapitel 3.4.1) sowie die erforderliche Reihenfolge deren Lösung bei der Adaption von SFP bestimmt (Kapitel 3.4.2). Neben der Lösung der Teilprobleme ist den Anforderungen folgend (siehe Kapitel 3.3) auch eine kundenorientierte Bewertung des SFP vorzunehmen.

Aufbauend auf der bestimmten Reihenfolge der Teilprobleme wird die Systemarchitektur mit den darin enthaltenen Modulen und deren Zusammenwirken festgelegt (Kapitel 3.4.3). Danach werden die in Kapitel 3.3 bestimmten Anforderungen den Modulen zugeordnet (Kapitel 3.4.4). Abschließend werden die Ergebnisse des Kapitels zusammengefasst (Kapitel 3.4.5)

Die Bestimmung der Systemarchitektur orientiert sich an der Richtlinie ISO/IEC 25010:2023 zur System- und Softwareentwicklung. Unabhängig von der Implementierung sind die Anforderungen nach Modularität („modularity“), Wiederverwendbarkeit („reusability“) und

Kompatibilität (“compatibility“) (siehe Tabelle 3-3). Diese Anforderungen werden der Bestimmung der Systemarchitektur zugrunde gelegt. Bei einer späteren Implementierung der Algorithmen in ein Tool sind alle Anforderungen der Richtlinie zu prüfen.

Tabelle 3-3: Anforderungen an die Systemarchitektur aus ISO/IEC 25010:2023

Modularität („modularity“)	Das System soll aus einzelnen Modulen mit zusammenhängendem Inhalt bestehen, sodass eine Entkoppelung der Funktionen besteht. Die Module sollten eine minimale Kopplung untereinander aufweisen.
Kompatibilität („compatibility“)	Das System soll die Fähigkeit besitzen Informationen mit anderen relevanten Systemen auszutauschen.
Wiederverwendbarkeit („reusability“)	Es soll möglich sein, Module innerhalb des Systems für ähnliche Funktionalitäten und auch in anderen Systemen verwenden zu können.

3.4.1 Herleitung von Teilproblemen

Betriebs- und Verkehrskonzept enthalten unterschiedliche Maßnahmen (betriebliche bzw. verkehrliche Maßnahmen siehe Kapitel 2.4.2) und haben unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen (siehe Kapitel 3.3 Anforderungen 1.B und 1.C). Bestehende Ansätze in der Störungsdisposition sind i. d. R. getrennt nach Betriebs- und Verkehrskonzept, bzw. es werden nur Betriebs- oder Verkehrskonzept berücksichtigt (z. B. Corman et al. 2010, Nakamura et al. 2011, Crespo 2020, Brauner 2023).

Aufgrund der unterschiedlichen Maßnahmen und Anforderungen sowie der gängigen Aufteilung der bestehenden Ansätze wird, den Anforderungen nach Modularität, Kompatibilität und Wiederverwendbarkeit folgend, die Adaption in die Teilprobleme „Anpassung des Betriebskonzepts“ und „Anpassung des Verkehrskonzepts“ unterteilt. Die Anpassung des Betriebskonzepts wird als Teilproblem I und die Anpassung des Verkehrskonzepts als Teilproblem II bezeichnet.

Im Weiteren wird diskutiert, ob die Teilprobleme weiter untergliedert werden. Die Diskussion erfolgt getrennt nach Teilproblem I und Teilproblem II.

Untergliederung der Anpassung des Betriebskonzepts (Teilproblem I)

Anforderungen an ein angepasstes Betriebskonzept sind u. a. die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase und die Einschwingfähigkeit (siehe Kapitel 3.3). Die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der beiden Phasen kann als Nebenbedingung von Teilproblem I oder als eigenständiges Teilproblem (bzw. als mehrere Teilprobleme) berücksichtigt werden. Im Weiteren werden diese beiden Alternativen einzeln auf ihre Eignung geprüft.

Bei der Berücksichtigung der Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der beiden Phasen als **Nebenbedingung von Teilproblem I** erfolgt die Sicherstellung der Umsetzbarkeit begleitend zur Anpassung des Betriebskonzepts. Bei dieser Vorgehensweise stellt Teilproblem I die einzige Möglichkeit der Anwendung betrieblicher Maßnahmen dar. Alle Arten von betrieblichen Maßnahmen, die eingesetzt werden sollen, sind somit in Teilproblem I anzuwenden.

Eine Berücksichtigung aller betrieblichen Anforderungen und Maßnahmen in einem Teilproblem unterstützt eine praxisnahe Modellierung und Lösung des Teilproblems. Gleichzeitig ist besonders auf die Komplexität des Teilproblems zu achten.

Die zweite Möglichkeit ist die Berücksichtigung der Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der beiden Phasen als **eigenständiges Teilproblem**. Sind mehrere Teilprobleme vorhanden, können die Arten von betrieblichen Maßnahmen auf die Teilprobleme aufgeteilt werden (z. B. keine Berücksichtigung von zugscharfen Maßnahmen bei der Anpassung des Betriebskonzepts), wodurch eine handhabbare Problemkomplexität der einzelnen Teilprobleme unterstützt werden kann. Außerdem wird durch eigenständige Teilproblem die Anforderung nach Modularität unterstützt.

Die Berücksichtigung der Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der beiden Phasen als eigenständiges Teilproblem lässt eine handhabbare Problemkomplexität sowie eine bessere Erfüllung der Anforderungen erwarten und wird daher weiterverfolgt.

Im Anschluss ist zu bestimmen, ob die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der beiden Phasen in ein eigenständiges Teilproblem zusammengefasst wird oder ob die Sicherstellung in mehrere Teilprobleme aufgeteilt wird.

Untergliederung der Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit des Betriebskonzepts

Voraussetzung für die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der Einschwingphase ist eine betrieblich umsetzbare stabile Phase. Daher sollte zunächst die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase sichergestellt werden. Diese Vorgehensweise erfolgt auch in den bestehen Ansätzen zur Unterstützung der Erstellung von Betriebskonzepten (z. B. Chu 2014; Brauner 2023) und entspricht somit den Anforderungen nach Modularität, Kompatibilität und Wiederverwendbarkeit.

Für die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit von Einschwingphase und stabiler Phase stehen unterschiedliche Arten betrieblicher Maßnahmen zur Verfügung (siehe Kapitel 2.4.1). Da für die stabile Phase zum Zeitpunkt der Anpassung des Betriebskonzepts nur ein Fahrplankonzept eines periodischen Fahrplans erstellt werden kann, kann die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase nur mit linienscharfen Maßnahmen unterstützt werden. Durch die Verwendung von linienscharfen Maßnahmen, die nicht Laufweg oder Takt ändern (z. B. ein alternativer Fahrweg im Knoten), kann die betriebliche Umsetzbarkeit auch ohne eine Änderung des Liniennetzplans oder der Takte der Linien erreicht werden. Für die Sicherstellung der Einschwingfähigkeit können zusätzlich auch zugscharfe Maßnahmen (z. B. die zeitliche Verschiebung eines Zuges) angewendet werden.

Für eine handhabbare Problemkomplexität und der Anforderung nach schneller Lösungsbereitstellung folgend, werden die betrieblichen Maßnahmen auf die Teilprobleme aufgeteilt.

Die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase entspricht der Anpassung des Fahrplankonzepts, das aus den betrieblichen Maßnahmen des Betriebskonzepts resultiert. Für die Anpassung des Fahrplankonzepts der stabilen Phase werden linienscharfe Maßnahmen, die nicht Laufweg oder Takt verändern, verwendet (Teilproblem III).

Die Sicherstellung der Einschwingfähigkeit (Teilproblem IV) entspricht der Erstellung eines Fahrplans, der ausgehend von der aktuellen Betriebsituation zu einem Betrieb führt, wie er im

Fahrplankonzept der stabilen Phase vorgesehen ist. Entsprechend der Anforderung nach integrierter Berücksichtigung von Fahrplan und Fahrzeugumlaufplan erfolgt für Teilproblem III und Teilproblem IV keine weitere Unterteilung zwischen der Anpassung des Fahrplans und des Fahrzeugumlaufplans.

Untergliederung der Anpassung des Verkehrskonzepts (Teilproblem II)

Für das Verkehrskonzept bestehen, anders als bei dem Betriebskonzept, keine Anforderungen, die sich auf die Phasen der Anwendung eines SFP beziehen. Ebenso wurden in der analysierten Literatur zu Verkehrskonzepten keine weiteren Teilprobleme identifiziert oder Teilprobleme verwendet. Die Anpassung des Verkehrskonzepts wird daher zunächst als ein Teilproblem aufgefasst.

Zusammenfassend lässt sich die Adaption eines SFP in vier Teilprobleme gliedern, denen unterschiedliche betriebliche bzw. verkehrliche Maßnahmen zugeordnet sind (siehe Tabelle 3-4).

Der Anforderung nach Modularität folgend bilden die vier Teilprobleme jeweils ein Modul der Systemarchitektur. Die Modulnummer (arabische Zahlen) sind so gewählt, dass diese mit den Teilproblemnummern (römische Zahlen; siehe Tabelle 3-4) übereinstimmen. Außerdem besteht ein Modul zur kundenorientierten Bewertung (Modul 5). Insgesamt enthält die Systemarchitektur somit fünf Module. Die Module bilden das Gerüst der Systemarchitektur und sind mit den in Kapitel 3.1 festgelegten In- und Outputs in Abbildung 3-2 dargestellt.

3.4.2 Reihenfolge der Lösung der Teilprobleme

Nachdem die Teilprobleme festgelegt sind (siehe Tabelle 3-4), folgt als nächster Schritt der Herleitung der Systemarchitektur die Bestimmung der Reihenfolge der Lösung der Teilprobleme und die Eingliederung der kundenorientierten Bewertung des SFP.

Teilprobleme II, III und IV erfordern als Input den Liniennetzplan des (angepassten) Betriebskonzepts und bauen somit auf dem Ergebnis von Teilproblem I auf. Teilprobleme II, III und IV sind deshalb nach Teilproblem I zu lösen.

Tabelle 3-4: Teilprobleme und darin verwendete Maßnahmen

Teilproblem	Maßnahmen
Teilproblem I: Anpassung des Betriebskonzepts	linienscharfe betriebliche Maßnahmen, die Laufweg und Takt betreffen
Teilproblem II: Anpassung des Verkehrskonzepts	verkehrliche Maßnahmen
Teilproblem III: Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase	linienscharfe betriebliche Maßnahmen, die nicht Laufweg und Takt betreffen
Teilproblem IV: Sicherstellung der Einschwingfähigkeit	zugscharfe betriebliche Maßnahmen

Da die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase (Teilproblem III) eine notwendige Bedingung für die Einschwingfähigkeit ist, ist Teilproblem III vor Teilproblem IV zu lösen.

Das Verkehrskonzept basiert maßgebend auf dem betrieblichen Angebot, das durch den Liniennetzplan und die Takte der Linien bestimmt wird (siehe Kapitel 2.4.1). Eine ggf. erforderliche Anpassung des Verkehrskonzepts (Teilproblem II) kann somit direkt nach Teilproblem I erfolgen.

Aufgrund des veränderten betrieblichen Angebots durch Anpassungen des Betriebskonzepts in den Teilproblemen I, III oder IV kann das Verkehrskonzept nicht mehr funktionsfähig oder die kundenorientierte Bewertung des SFP nicht mehr zufriedenstellend sein. In diesem Fall ist eine alternative Lösung in den Teilproblemen zu wählen.

Brauner (2023, S. 49) hat gezeigt, dass die Erstellung von Betriebs- und Verkehrskonzept aufgrund der Abhängigkeiten zwischen beiden Konzepten eng miteinander verbunden sind. Brauner (2023, S. 49) argumentiert weiterhin, dass das Verkehrskonzept jeweils aufbauend auf dem Betriebskonzept in einem iterativen Prozess zu entwickeln ist, da ein funktionsfähiges Betriebskonzept die Grundlage für ein funktionsfähiges Verkehrskonzept bildet. Diese Abhängigkeit gilt auch bei der Adaption von SFP, sodass auch für die Adaption von SFP ein iterativer Prozess erforderlich ist.

Ein iteratives Vorgehen ergibt sich auch bei der Lösung der Teilprobleme. Wenn die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase in Teilproblem III nicht sichergestellt werden kann, dann ist eine andere Lösung in Teilproblem I zu wählen und die übrigen Teilprobleme sind erneut zu lösen. Analog dazu ist eine andere Lösung in Teilproblem III oder in Teilproblem I zu wählen, wenn die Einschwingfähigkeit nicht sichergestellt werden kann (Teilproblem IV).

Kundenorientierte Bewertung

Bei der Planung von SFP müssen zunächst Betriebs- und Verkehrskonzept erstellt werden, um eine kundenorientierte Bewertung anhand des Verkehrskonzepts durchführen zu können (siehe Kapitel 2.4.2). Anders als bei der Planung von SFP liegt bei der Adaption von SFP bereits ein Verkehrskonzept vor, das möglichst beibehalten werden soll (siehe Kapitel 3.3) und für die kundenorientierte Bewertung verwendet werden kann. Eine kundenorientierte Bewertung ist deshalb nach jedem Teilproblem möglich.

Nach Teilproblem I besteht ein angepasstes Betriebskonzept, aber noch kein angepasstes Verkehrskonzept. Eine kundenorientierte Bewertung des SFP nach Teilproblem I muss deshalb mit dem Verkehrskonzept des ausgewählten SPF erfolgen. Durch die fehlende Abstimmung von Betriebs- und Verkehrskonzept nach Teilproblem I hat eine kundenorientierte Bewertung des SFP nach Teilproblem I eine geringe Aussagekraft und wird deshalb nicht weiterverfolgt.

Eine kundenorientierte Bewertung nach der Anpassung des Verkehrskonzepts (nach Teilproblem II) und vor der Lösung von Teilproblem III und IV hat den Vorteil, dass frühzeitig geprüft wird, ob für die Teilprobleme I und II überhaupt eine (zufriedenstellende) Lösung möglich ist. Ist dies nicht der Fall, wird die Lösung der Teilprobleme III und IV gar nicht erst angestoßen. Daher erfolgt die Lösung von Teilproblem II nach Teilproblem I und anschließend eine kundenorientierte Bewertung.

Eine kundenorientierte Bewertung des SFP inklusive Einschwingphase und stabiler Phase ist erst nach Lösung von Teilproblem IV möglich. Um eine vollständige, kundenorientierte

Bewertung des SFP zu erhalten, findet daher zudem eine kundenorientierte Bewertung nach der Lösung von Teilproblem IV statt.

Somit bleibt noch zu prüfen, ob eine weitere kundenorientierte Bewertung nach Teilproblem III stattfinden soll. Als Unterschied zu einer kundenorientierten Bewertung nach Teilproblem II liegt nach Teilproblem III zusätzlich ein umsetzbares Fahrplankonzept der stabilen Phase vor. Das Verkehrskonzept ist im Vergleich zu einer Bewertung nach Teilproblem II nicht verändert. Durch die Beschränkung der betrieblichen Maßnahmen bei der Lösung von Teilproblem III bestehen auch keine neuen Verbindungskonflikte, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Bewertung haben können.

Demgegenüber erhöht eine weitere kundenorientierte Bewertung die Dauer der Lösungsbereitstellung (Anforderung aus Kapitel 3.3). Aufgrund des erwarteten geringen Unterschieds zu der kundenorientierten Bewertung nach Teilproblem II und der mit der Bewertung einhergehenden Verlängerung der Dauer der Lösungsbereitstellung, erfolgt keine kundenorientierte Bewertung nach Teilproblem III.

Zusammenfassend findet eine kundenorientierte Bewertung nach Teilproblem II und nach Teilproblem IV statt. Die Reihenfolge der Lösung der Teilprobleme und die Integration der kundenorientierten Bewertung ist in Abbildung 3-2 dargestellt (Pfeile mit Volllinien). Die zwei Bewertungen nach Teilproblem II und nach Teilproblem IV sind in Abbildung 3-2 durch eine Zweiteilung von Modul 5 verdeutlicht.

3.4.3 Module der Systemarchitektur

Nachdem die Teilprobleme und die Reihenfolge deren Lösung sowie die Einbindung der kundenorientierten Bewertung des SFP bestimmt sind, wird darauf aufbauend die Systemarchitektur festgelegt. Dafür wird auch der für die Adaption von SFP erforderliche iterative Prozess (siehe Kapitel 3.4.2) weiter spezifiziert.

Werden die Anforderungen der kundenorientierten Bewertung nicht eingehalten, ist entsprechend dem zuvor eingeführten iterativen Prozess eine Rückkopplung zur Anpassung des Betriebskonzepts bzw. des Verkehrskonzepts vorzunehmen. Die Rückkopplung kann als Optimierungsverfahren angesehen werden, für das eine Vielzahl von Ansätzen bestehen (siehe Kapitel 2.6).

Da davon auszugehen ist, dass die Optimierung zur Lösung der Teilprobleme innerhalb der Module bereits wesentliche Zeit der Lösungsbereitstellung in Anspruch nimmt (siehe Kapitel 2), sollte aufgrund der Anforderungen nach schneller Lösungsbereitstellung der iterative Prozess möglichst wenig Zeit in Anspruch nehmen. Da ein Greedy-Algorithmus eine schnelle Lösungsfindung ermöglicht (Hüftle 2007, S. 8), wird dieser Ansatz für den iterativen Prozess übernommen. Somit findet keine modulübergreifende Optimierung statt, sondern bei der Durchführung eines Moduls wird die jeweils beste Lösung als Output des Moduls ausgewählt. Bei einer Nicht-Einhaltung der Anforderungen in einem Modul durch den iterativen Prozess eine Rückkopplung vorzunehmen.

Weiterhin ist für den iterativen Prozess festzulegen, zwischen welchen Modulen Rückkopplungen bestehen. Entsprechend der Ausführungen im Abschnitt „Reihenfolge der Lösung der Teilprobleme“ kann der iterative Prozess sowohl durch die Module zur Lösung der Teilprobleme II, III und IV (Module 2, 3 und 4) als auch durch die kundenorientierte Bewertung (Modul 5) nach Modul 2 und nach Modul 4 ausgelöst werden.

Für Modul 2 kann nur eine Rückkopplung zu Modul 1 erfolgen (gestrichelte Pfeile in Abbildung 3-2 ausgehend von Modul 2 zu Modul 1). Für die Module 3 und 4 wurde bereits im Abschnitt „Reihenfolge der Lösung der Teilprobleme“ bestimmt, dass Rückkopplungen zu den vorangegangenen betrieblichen Modulen ausgelöst werden können (gestrichelte Pfeile in Abbildung 3-2 zwischen den Modulen 4 und 3, 4 und 1 sowie 3 und 1).

Maßgebend für die kundenorientierte Bewertung ist, ob eine Verbindung weiterhin verfügbar ist und wenn nicht, welche Alternativen bestehen und kommuniziert werden. Die Verbindungen werden durch den Liniennetzplan des Betriebskonzepts und die kommunizierten Verbindungen durch das Verkehrskonzept vorgegeben. Daher erfolgt bei einer nicht zufriedenstellenden kundenorientierten Bewertung nach Modul 5 eine Rückkopplung zu Modul 1 und Modul 2 (gestrichelte Pfeile in Abbildung 3-2 ausgehend von Modul 5 zu Modul 1 und 2).

Mit einer Anpassung des Liniennetzplans und anschließenden Prüfung der betrieblichen Umsetzbarkeit weist die Systemarchitektur (siehe Abbildung 3-2) Parallelen zum von Dekker et al. (2022) vorgestellten Ansatz der Störungsdisposition auf. Der Ansatz von Dekker et al. (2022) beschreibt aber eine übergeordnete Strategie der Störungsdisposition, sodass die in dieser Arbeit vorgestellte Systemarchitektur u. a. mit der Fokussierung auf den Einsatz von SFP spezifischer ist.

Nachdem die Module der Systemarchitektur und der iterative Prozess mit Rückkopplungen festgelegt wurden, werden die Schnittstellen zwischen den Modulen und deren Verwendung beschrieben. Die Schnittstellen zwischen den Modulen umfassen die (angepassten) Betriebs- und Verkehrskonzepte und sind in Abbildung 3-3 in einem UML-Zustandsdiagramm dargestellt.

Output von Modul 1 ist ein Betriebskonzept, dessen linienscharfe betriebliche Maßnahmen, die Laufweg und Takt betreffen, ggf. angepasst sind. Anhand dieses Betriebskonzepts wird in Modul 2, falls erforderlich, ein angepasstes Verkehrskonzept bestimmt. Die beiden angepassten Konzepte bilden das adaptierte SFP, das in Modul 5 einer kundenorientierten Bewertung unterzogen wird. Da entsprechend Kapitel 3.1 das SFP nur aufgrund von infrastrukturellen und betrieblichen Einflussgrößen des S-Bahn-Netzes angepasst werden soll, ist ein Anwenden von Modul 2 nur erforderlich, wenn in Modul 1 eine Anpassung des Betriebskonzepts erfolgt ist.

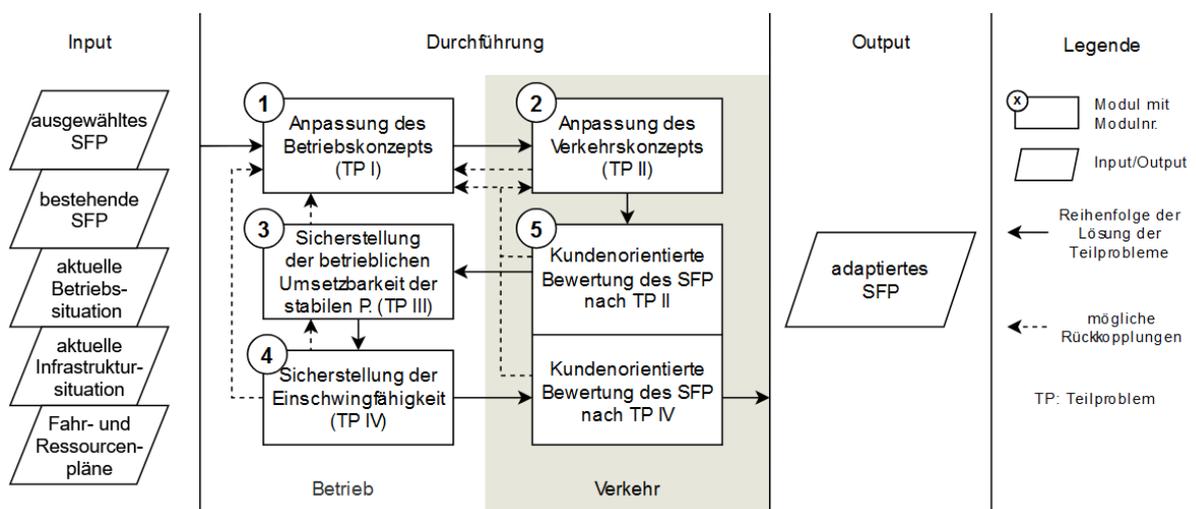


Abbildung 3-2: Fachliche Systemarchitektur der Adaption von SFP

Bei einer positiven kundenorientierten Bewertung des adaptierte SFP wird in Modul 3 ein umsetzbares Fahrplankonzept der stabilen Phase erstellt und, falls erforderlich, die linienscharfen betrieblichen Maßnahmen des Betriebskonzepts, die nicht Laufweg und Takt betreffen, angepasst. Konnte ein solches Fahrplankonzept erstellt werden, erfolgt aufbauend auf dem adaptierten SFP in Modul 4 die Bestimmung eines Fahrplans der Einschwingphase. Dabei werden zugsspezifische Maßnahmen für die Einschwingphase bestimmt. Ist auch dies erfolgreich, erfolgt eine weitere kundenorientierte Prüfung des adaptierten SFP in Modul 5.

Wenn es in den Modulen vor einer kundenorientierten Bewertung keine Anpassungen von Betriebs- oder Verkehrskonzept gab, ist die kundenorientierte Bewertung nicht erforderlich, da bereits die Erstellung des SFP kundenorientiert erfolgt ist (siehe Kapitel 3.2). Wenn das ausgewählte SFP die Module 1, 3 und 4 durchläuft, ohne Anforderungen zu verletzen, erfolgt keine Änderung des SFP, sondern das SFP kann ohne Änderungen angewendet werden. Die Adaption kann in diesem Fall bereits nach Modul 4 beendet werden.

3.4.4 Aufteilung der Anforderungen

Nachdem die Systemarchitektur bestimmt wurde, kann die Aufteilung der Anforderungen aus Kapitel 3.3 auf die Module erfolgen.

Die Anforderungen 1.A und 2.A bis 2.C gelten für das gesamte SFP (1.A) bzw. für die Durchführung der Adaption (2.A bis 2.C) und sind somit in allen Modulen zu berücksichtigen. Die Erfüllung der verkehrlichen Anforderungen (1.C) kann sowohl durch betriebliche Maßnahmen als auch verkehrliche Maßnahmen beeinflusst werden (siehe Kapitel 2.4.1; z. B. kann die kundenorientierte Bewertung verbessert werden, wenn durch eine betriebliche Maßnahme ein zuvor nicht bedienter Halt bedient wird). Die Anforderungen 1.B und 1.C sind betriebliche (1.B) bzw. verkehrliche (1.C) Anforderungen, weshalb eine Aufteilung auf die betrieblichen und verkehrlichen Module geprüft wird.

Verkehrliche Anforderungen

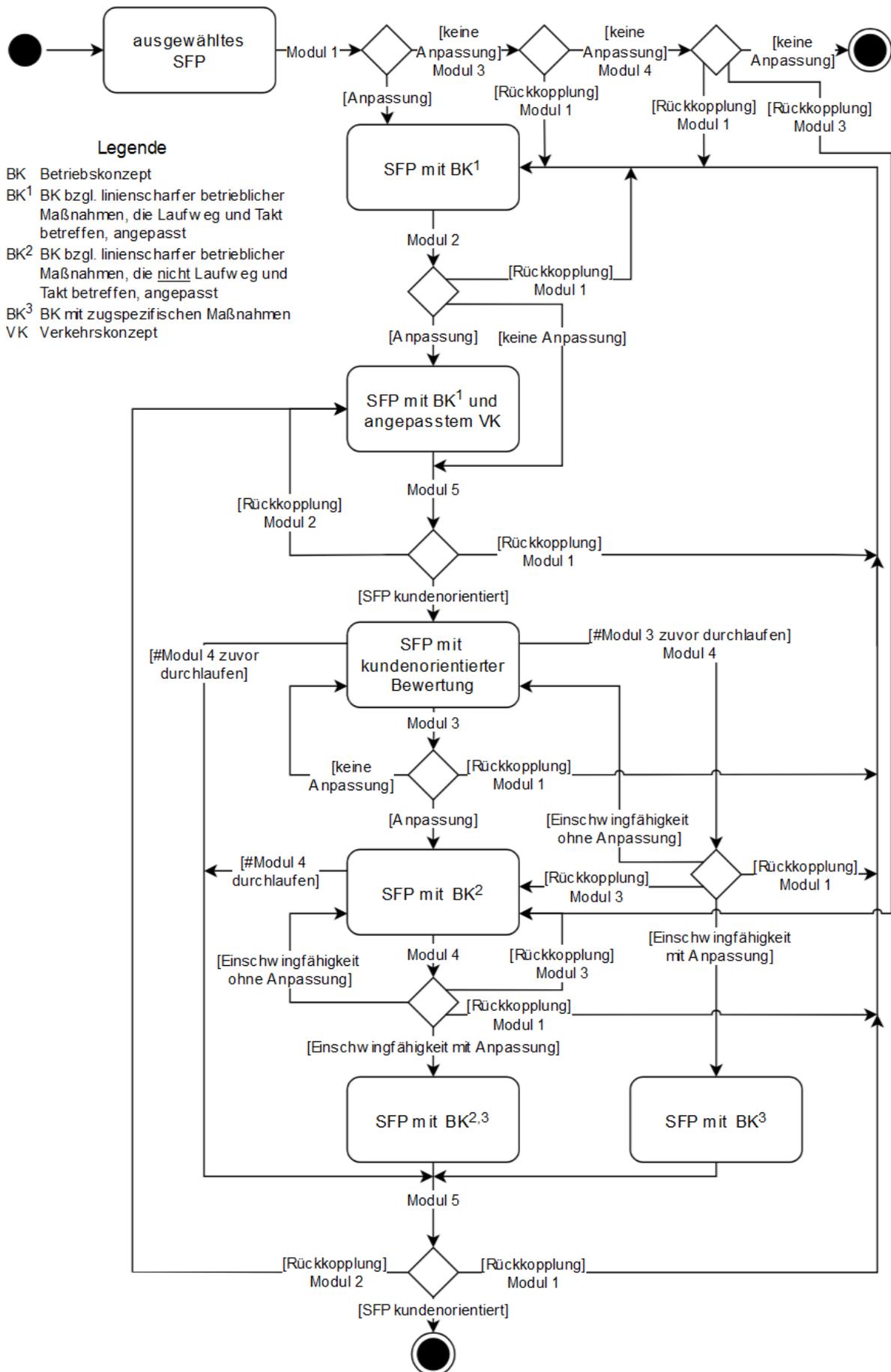
Die verkehrlichen Anforderungen sind in den verkehrlichen Modulen (Module 2 und 5) zu berücksichtigen. Da die Erfüllung verkehrlicher Anforderungen auch durch betriebliche Maßnahmen erfolgen kann, sollte bei der Lösung der Teilprobleme I, III und IV in den Modulen 1, 3 und 4 bereits die Auswirkung auf die verkehrlichen Anforderungen und damit insbesondere auf die kundenorientierte Bewertung des SFP in die Lösungsermittlung einfließen.

Betriebliche Anforderungen

Die betrieblichen Anforderungen können den beiden Phasen, für die die betriebliche Umsetzbarkeit sicherzustellen ist (Einschwingphase und stabile Phase) oder dem aus dem Betriebskonzept resultierenden Liniennetzplan mit Takten der Linien, zugeordnet werden.

Entsprechend der Zuordnung sind die Anforderungen für die Module relevant, die sich mit den Phasen oder dem Liniennetzplan und Takten der Linien befassen. Daher sind die Anforderungen, die

- den Liniennetzplan oder die Takte der Linien betreffen in Modul 1,
- die stabile Phase betreffen in Modul 3
- die Einschwingphase betreffen in Modul 4 zu berücksichtigen.



- Legende**
- BK Betriebskonzept
 - BK¹ BK bzgl. linienscharfer betrieblicher Maßnahmen, die Laufweg und Takt betreffen, angepasst
 - BK² BK bzgl. linienscharfer betrieblicher Maßnahmen, die nicht Laufweg und Takt betreffen, angepasst
 - BK³ BK mit zugspezifischen Maßnahmen
 - VK Verkehrskonzept

Abbildung 3-3: UML-Zustandsdiagramm von Betriebs- und Verkehrskonzept während der Adaption eines SFP

Anforderungen, die mehr als eine Phase betreffen, sind analog allen entsprechenden Modulen zuzuordnen.

In Tabelle 3-5 sind für die Anforderungen 1.B der Bezug (Liniennetzplan oder Takt der Linie, stabile Phase, Einschwingphase) und das Modul, in dem die Anforderungen zu berücksichtigen sind, dargestellt. Da Anforderungen vom Typ „hart“ zwingend erfüllt werden müssen (siehe Kapitel 3.3), kommt es, wenn diese in dem zugeordneten Modul nicht erfüllt werden können, in dem iterativen Prozess entsprechend zu Rückkopplungen.

Bei Rückkopplungen werden weitere Nebenbedingungen in Teilprobleme vorheriger Module eingeführt. Ziel dieser Nebenbedingungen ist es, eine Lösung des durch die Rückkopplung erneut angestoßenen Teilproblems zu erhalten, sodass die Anforderungen in den nachgelagerten Modulen nicht mehr verletzt werden bzw. erfüllbar sind. Module, bei denen es durch die Anforderung zur Einführung weiterer Nebenbedingungen kommen kann, sind in Tabelle 3-5 in der letzten Spalte in Klammern angegeben.

Eine detailliertere Analyse erfordern die Anforderungen an die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase und der Einschwingfähigkeit, da für diese Anforderungen u. a. die Konfliktfreiheit zu berücksichtigen ist (siehe Kapitel 3.3). Für die genaue Aufteilung der Anforderungen ist zu bestimmen, welche Konfliktarten in welchem Modul berücksichtigt werden.

Konfliktfreiheit

Die drei zu berücksichtigenden Konfliktarten sind Infrastrukturverfügbarkeits-, Belegungs- und Umlaufkonflikte. Anschlusskonflikte als vierte Konfliktart (siehe Kapitel 2.2.1) und Umlaufkonflikte, die sich auf das Personal beziehen, fallen nicht in den Umfang dieser Arbeit (siehe Kapitel 3.2).

Die Identifizierung von Konflikten ist prinzipiell unabhängig von den in den Modulen angewendeten betrieblichen Maßnahmen möglich. Bei der Lösung der Konflikte wird angenommen, dass die verkehrlichen Auswirkungen der betrieblichen Maßnahmen in der Reihenfolge der Teilprobleme (I, III und IV) sinkt, da

1. die Anzahl der von der Maßnahme betroffenen Züge kleiner wird (linienscharfe betriebliche Maßnahmen in den Teilproblemen I und III betreffen im Gegensatz zu den zugscharfen betrieblichen Maßnahmen aus Teilproblem IV alle Züge einer Linie mindestens für die gesamte Dauer der stabilen Phase).
2. betriebliche Maßnahmen, die den Laufweg betreffen, (Teilproblem I) im Gegensatz zu betrieblichen Maßnahmen, die nicht den Laufweg betreffen, (Teilproblem III) Auswirkungen auf die angebotenen Verbindungen und damit auf die Zielerreichung haben.

Um die verkehrlichen Auswirkungen möglichst gering zu halten (Anforderung aus Kapitel 3.3), sollten daher in einem Modul nur jeweils die Konflikte gelöst werden, die eine Anwendung der im Modul zulässigen betrieblichen Maßnahmen (siehe Tabelle 3-4) erfordern. Sind die betrieblichen Maßnahmen des Moduls nicht erforderlich, wird der Konflikt erst in einem der nachfolgenden Module gelöst.

Ein Belegungskonflikt sollte z. B. in einem Fahrstraßenknoten möglichst ohne eine Anpassung des Laufwegs gelöst werden und somit nicht in Modul 1. Besteht der Konflikt in der stabilen

Phase, sind dafür linienspezifische Maßnahmen erforderlich und der Konflikt wird in Modul 3 gelöst.

Ist eine Lösung des Konflikts in dem jeweiligen Modul nicht möglich oder nur mit einer deutlichen Verschlechterung der kundenorientierten Bewertung (z. B., wenn die Lösung eines Belegungskonflikts in Modul 3 nur durch eine große zeitliche Verschiebung, die zu vielen Folgekonflikten führt, möglich ist), sind alternative Lösungen in den vorangegangenen Modulen zu prüfen (in dem eben genannten Beispiel in Modul 1). Dieses Vorgehen folgt dem zuvor festgelegten iterativen Prozess.

Die Aufteilung von Identifizierung und Lösung der drei Konfliktarten in den jeweiligen Modulen erfolgt daher anhand der betrieblichen Maßnahmen, die zur Lösung des jeweiligen Teilproblems angewendet werden sollten (Tabelle 3-4 zeigt die Aufteilung der betrieblichen Maßnahmen auf die Teilprobleme, die entsprechend für die Module gilt).

Tabelle 3-5: Aufteilung der Anforderungen 1.B

Anforderung	Typ	Bezug auf	Zu berücksichtigen in Modul
Einschwingfähigkeit/ Konkretisierbarkeit	hart	Einschwingphase	4 (1, 3)
betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase	hart	stabile Phase	3 (1)
stabiler Betrieb in der Einschwing- phase	weich	Einschwingphase	4
stabiler Betrieb in der stabilen Phase	weich	stabile Phase	3
geringe Auswirkungen auf weiteres Netz	weich	stabile Phase; Einschwingphase	3, 4
angemessene Dauer der Einschwing- phase	hart	Einschwingphase	4 (1, 3)
kurze Einschwingphase	weich	Einschwingphase	4
kein Pendelverkehr	hart	Liniennetzplan oder Takt der Linie	1
gültige Liniensplanung	hart	Liniennetzplan oder Takt der Linie	1
Bedienung Netzäste	weich	Liniennetzplan oder Takt der Linie	1
Bedienung Stammstrecke	hart	Liniennetzplan oder Takt der Linie	1
Vorgaben max. Zuganzahl	hart	Liniennetzplan oder Takt der Linie;	1

Die Aufteilung der Konfliktarten auf die drei Module wird im Weiteren getrennt nach den drei Konfliktarten vorgenommen.

Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte auf Laufwegebene (z. B. Nicht-Verfügbarkeit einer Betriebsstelle) erfordern zwingend eine Änderung des Laufwegs und sind daher in Modul 1 zu lösen. Für andere Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte (z. B. das planmäßige Bahnsteiggleis ist nicht verfügbar, aber es bestehen weitere passende Bahnsteiggleise im gleichen Knoten) wird zunächst eine Lösung unter Beibehaltung des Laufwegs geprüft (z. B. ein alternativer Fahrweg im Knoten). Diese Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte werden daher in Modul 3 für die stabile Phase bzw. in Modul 4 für die Einschwingphase gelöst.

Belegungskonflikte erfordern nicht zwingend die betrieblichen Maßnahmen aus Modul 1, die Laufweg oder Takt ändern. Diese Maßnahmen sind aber erforderlich, wenn die Kapazitätsauslastung von Knoten oder Kanten so groß ist, dass kein stabiler Betrieb durchführbar ist (bspw. in Wendebahnhöfen bei Störungen (Chu und Oetting 2013a, S. 64)). Linienscharfe Maßnahmen aus Modul 1 werden deshalb angewendet, wenn eine Überschreitung der Kapazität zu erwarten ist. Zur Bestimmung der Kapazitätsauslastung ist ein Kapazitätskriterium zu verwenden (dieses dient im übertragenen Sinne der Konflikterkennung). Verbleibende „klassische“ Belegungskonflikte werden für die stabile Phase in Modul 3 und für die Einschwingphase in Modul 4 gelöst.

Umlaufkonflikte erfordern nicht zwingend Maßnahmen, die den Laufweg oder den Takt ändern, daher werden diese nicht primär in Modul 1 gelöst. Somit werden Umlaufkonflikte für die stabile Phase im Modul 3 und für die Einschwingphase in Modul 4 gelöst.

Eine Besonderheit stellen Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte als eine Art von Umlaufkonflikten dar (siehe Kapitel 2.4.3). Wie bei Crespo (2020) gezeigt, müssen Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte auf Linienebene identifiziert werden, erfordern aber zur Lösung zugscharfe Maßnahmen in der Einschwingphase. Deshalb werden Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte in Modul 3 identifiziert, die fahrzeugbezogenen Maßnahmen zur Lösung werden aber nur auf Machbarkeit geprüft und als Randbedingung der Einschwingphase für Modul 4 formuliert.

Entsprechend den Anforderungen nach einem stabilen Betrieb in der Einschwingphase und der stabilen Phase sollten Zuschläge nicht für die Konfliktlösung genutzt und Pufferzeiten berücksichtigt werden. Die Höhe der Pufferzeiten kann netzspezifisch und ggf. unter Berücksichtigung von Arten (z. B. Wende, Zugfolge, ...) sowie weiteren Besonderheiten (z. B. Puffer bei Einfahrt in die Stammstrecke) vorgegeben werden.

Das Ergebnis der Aufteilung der Konfliktarten auf die drei Module anhand der betrieblichen Maßnahmen der Module ist in Tabelle 3-6 zusammengefasst.

Tabelle 3-6: Behandlung der Konfliktarten, differenziert nach den betrieblichen Modulen

Modul	Maßnahmen des Moduls wirken auf	Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte	Belegungskonflikte	Umlaufkonflikte
1	Liniennetzplan und Takte der Linien	X (nur auf Laufwegebene)	X (bezüglich Kapazitätskriterium)	
3	Fahrplankonzept stabile Phase	X	X	X (für Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte nur Machbarkeitsprüfung der Lösung)
4	Fahrplan der Einschwingphase	X	X	X

3.4.5 Zusammenfassung

Mit der Aufteilung der Anforderungen ist die Systemarchitektur festgelegt. Die Systemarchitektur besteht aus fünf Modulen zur Lösung von vier Teilproblemen und einem Modul zur kundenorientierten Bewertung. Bei der Durchführung der Adaption kann es zu Iterationen kommen, wenn z. B. Konflikte in einem Modul nicht oder nicht zufriedenstellend gelöst werden.

Nachdem in diesem Kapitel die Systemarchitektur bestimmt wurde, erfolgt im nächsten Kapitel die Festlegung der Vorgehensweise der Arbeit.

3.5 Vorgehensweise

Für das Ziel der Arbeit (Kapitel 3.1) wurden die inhaltliche Abgrenzung festgelegt (Kapitel 3.2), die Anforderungen bestimmt (Kapitel 3.3) und die Systemarchitektur hergeleitet (Kapitel 3.4). Bevor darauf aufbauend die Entwicklung der Algorithmen erfolgt, wird in diesem Kapitel die Vorgehensweise der weiteren Arbeit festgelegt. Die in den weiteren Kapiteln erfolgende Entwicklung der Algorithmen folgt den Vorgaben des Kapitels 3.4, insbesondere der Systemarchitektur.

Das erste Modul der Systemarchitektur ist die Anpassung des Betriebskonzepts (siehe Abbildung 3-2). In **Kapitel 4** erfolgt daher die Lösung von Teilproblem I durch die Entwicklung von Algorithmen zur Anpassung des Betriebskonzepts. Die entwickelten Algorithmen werden in Modul 1 überführt.

Das angepasste Betriebskonzept ist Ausgangspunkt der Anpassung des Verkehrskonzepts. Algorithmen zur Anpassung des Verkehrskonzepts und damit zur Lösung von Teilproblem II werden in **Kapitel 5** entwickelt und in Modul 2 überführt.

In **Kapitel 6** erfolgt daher die Bestimmung der Algorithmen der kundenorientierten Bewertung des SFP, die Modul 5 bilden.

In **Kapitel 7** erfolgt die Lösung von Teilproblem III durch die Entwicklung von Algorithmen zur Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase des angepassten Betriebskonzepts. Ergebnis von Kapitel 7 ist Modul 3.

Zur Komplementierung der Systemarchitektur erfolgt in **Kapitel 8** die Lösung des Teilproblems IV durch die Entwicklung von Algorithmen zur Sicherstellung der Einschwingphase des angepassten Betriebskonzepts. Die Ergebnisse werden in Modul 4 überführt.

Die Vorgehensweise ist in Abbildung 3-4 zusammengefasst.

Die fünf Kapitel zur Entwicklung der Module folgen jeweils dem gleichen Aufbau. Als Erstes wird eine Problembeschreibung des in diesem Kapitel zu lösenden Teilproblems durchgeführt. Darauf aufbauend werden mögliche Methoden diskutiert und eine Methode ausgewählt. Da in Kapitel 6 kein Teilproblem zu lösen ist, entfällt die Problembeschreibung in diesem Kapitel.

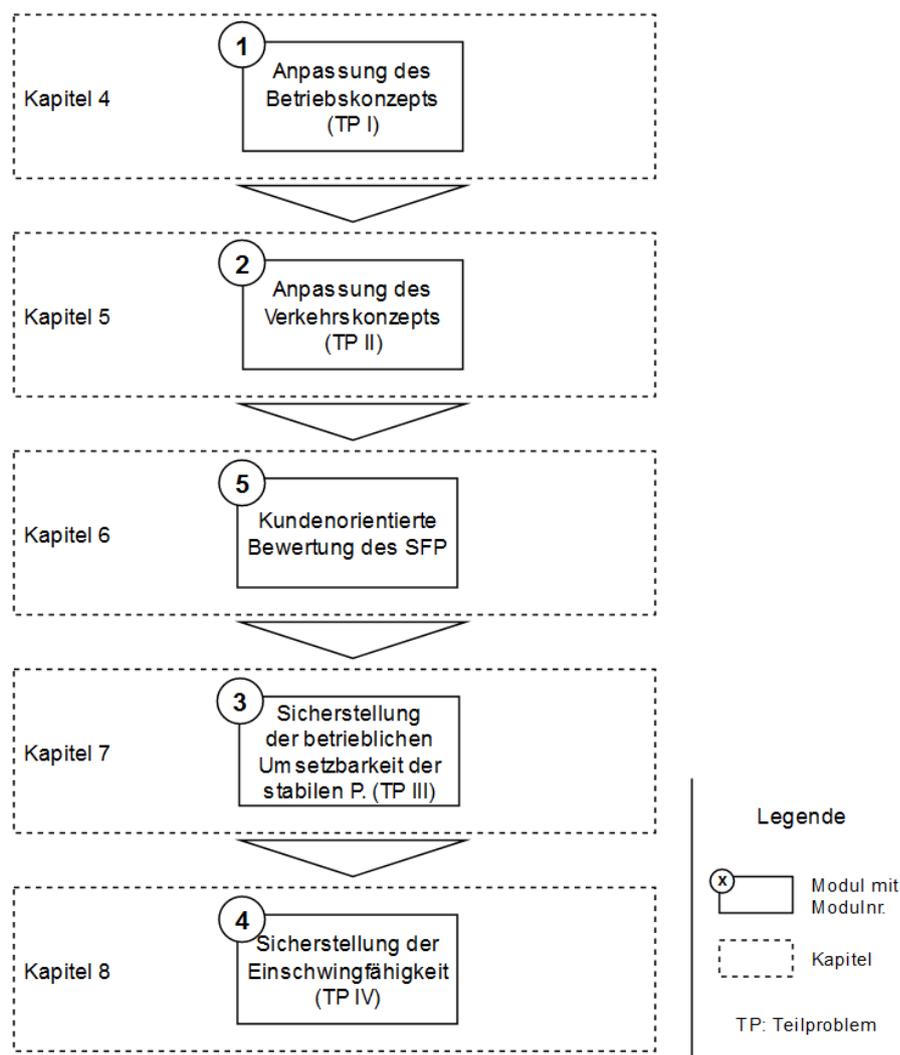


Abbildung 3-4: Vorgehensweise zur Entwicklung der Algorithmen

Nachdem die Methode des Moduls ausgewählt ist, wird die Vorgehensweise des weiteren Kapitels festgelegt. Als Vorgabe für das Vorgehen gilt, dass als erster Schritt Modifikationen der vorher ausgewählten Methode bestimmt und Funktionalitäten des Moduls entwickelt werden. Anschließend wird das jeweilige Modul detailliert beschrieben. Die Abstraktionsebene der Beschreibung der Algorithmen der einzelnen Module ist davon abhängig, ob bereits Ansätze zur Lösung des Teilproblems bestehen, die (modifiziert) verwendet werden können.

Anschließend an die Kapitel zur Entwicklung der Systemarchitektur wird die Funktionsweise der entwickelten Algorithmen anhand eines Anwendungsbeispiels demonstriert (**Kapitel 8**). Abschließend erfolgen in **Kapitel 9** eine Zusammenfassung der Ergebnisse und eine Diskussion der Ergebnisse anhand der in Kapitel 3.3 festgelegten Anforderungen. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf sowie auf die Anwendung der Ergebnisse der Arbeit in einem Tool.

3.6 Definition

Für einige in der Arbeit verwendete Begriffe besteht keine einheitliche Definition. Ziel des Kapitels ist es, diese Begriffe für die weitere Arbeit zu definieren. Außerdem werden die Definitionen von Begriffen mit besonderer Relevanz für die Arbeit aufgelistet.

Betriebskonzept

Ein Betriebskonzept ist Teil eines SFP und besteht aus „einem Bündel betrieblicher, meist *linienscharfer* Maßnahmen für ein dezidiertes Störungsszenario“ (Brauner 2019b, S. 43). Durch die linienscharfen Maßnahmen beschreibt ein Betriebskonzept die Linienrouten aller Linien während der Störung.

elementare betriebliche Maßnahmen (ebM)

Eine ebM ist eine betriebliche Maßnahme eines SFP oder ein Teil einer betrieblichen Maßnahme eines SFP, die bzw. das genau auf einer elementaren Konfliktlösung beruht. Mit anderen Worten ist eine ebM die Anwendung einer elementaren Konfliktlösung und damit eine Instanz einer elementaren Konfliktlösung (siehe Abbildung 4-8).

Fahrgastkorridor (FGK)

„Ein [für das Verkehrskonzept] ausgewählter Fahrgaststrom wird, im Weiteren zur klaren Unterscheidung [von einem Fahrgaststrom], Fahrgastkorridor genannt“ (Brauner 2023, S. 180).

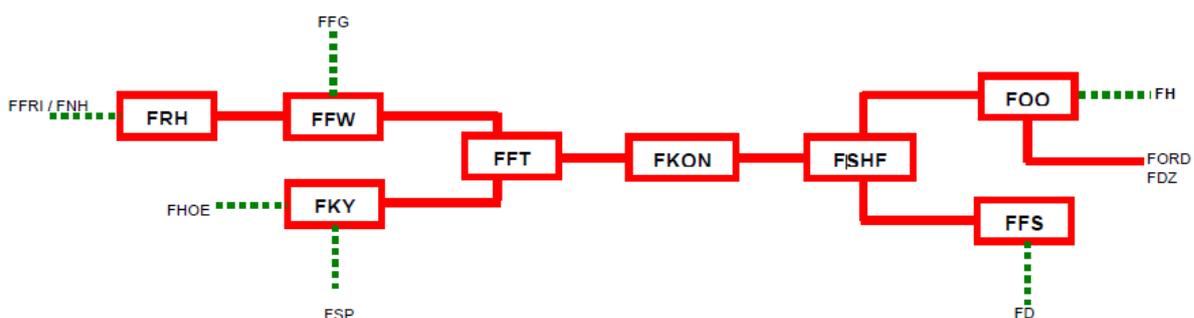


Abbildung 3-5: Beispiel des Kernbereichs eines S-Bahn-Netzes (Abbildung aus Kronsbein und Hinke 2007, S. 5)

Fahrgaststrom

„[...] ein Fahrgaststrom [ist] eine mit Fahrgastzahlen versehene Route [...], die (Teil-)Konfliktlösungen für Fahrgäste mit unterschiedlichen Verbindungskonflikten anbietet. [...] 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)“ (Brauner 2023, S. 180).

Fahrweg

„Als Fahrweg wird die Menge/Folge der Weichen bzw. Teilfahrstraßenknoten und Gleise verstanden, über die ein Zug im Betrachtungsraum vom Einbruchspunkt A bis zum Ausbruchspunkt B verkehrt. Sinngemäß gilt das Gleiche für beginnende und endende Züge.“ (DB Ril 405.0102, S. 6).

Kernbereich („Core Area“)

“The core area of the network is the portion of the commuter railway network that concentrates the significant share of the operations detailed in its operating program. The core area includes the network’s trunk line and, in some cases, other essential sections. [Abbildung 3-5] provides an actual example, depicting the core area of the S-Bahn network of the city of Frankfurt am Main” (Crespo 2020, S. 98) .

Korrespondierende Linien

Zwei Linien sind korrespondierende Linien, wenn diese einen verzahnten Takt aufweisen und/oder, wenn für diese linienübergreifende Wenden im Regelbetrieb vorgesehen sind (Stemer 2018, 68 f.). Korrespondierende Linien bedienen die gleichen Netzäste.

Laufweg

„Unter Laufweg wird die Menge der Fahrwege verstanden, auf denen Züge, die von ihrem Einbruchspunkt A zu ihrem Ausbruchspunkt B im Betrachtungsraum über die gleiche Folge von Fahrstraßenknoten verkehren. Sinngemäß gilt das Gleiche für beginnende und endende Züge“ (DB Ril 405.0102, S. 10).

Linienroute

Eine Linienroute ist einer Linie zugeordnet und besteht aus

- einer Abfolge von miteinander verknüpften Knoten und Kanten zwischen zwei Wendebahnhöfen (und repräsentiert somit zwei Laufwege mit inversen Start- und Zielknoten) und
- einer Taktzeit.

Überschneidungen bestehen mit dem Begriff des Linienfahrwegs: „Ein Linienfahrweg ist einer der möglichen Wege auf einer spezifischen Linie^[5] und Richtung^[6]“ (VDV-Schrift 462, S. 15). Eine Linienroute geht über den Begriff des Linienfahrwegs hinaus, da eine Linienroute zwei inverse Linienfahrwege vereint und die Taktzeit der Fahrten des Linienfahrwegs angibt.

⁵ „Eine Linie ist die regelmäßige Bedienung eines oder mehrerer Linienfahrwege mit öffentlichen Verkehrsmitteln. Eine Linie kann in maximal zwei Richtungen unterteilt sein“ VDV-Schrift 462, S. 15

⁶ Richtung: „planerische Gruppierung von Linienfahrwegen“ VDV-Schrift 462, S. 15.

Netzast

Ein Netzast ist ein vom Kernbereich abgehender Bereiche eines S-Bahn-Netzes. In dem Beispiel aus Abbildung 3-5 bestehen sechs Netzäste (grün gestrichelte Linien). Bei der Erstellung von SFP werden „Netzäste [...] anhand der Linien des Regelbetriebs durch den Ersteller festgelegt“ (Brauner 2023, S. 182).

Relation

„Eine Relation verbindet die Einstiegshaltestelle (A) mit der Ausstiegshaltestelle (Z) und erfüllt somit den Bedarf des Fahrgasts, von A nach Z zu kommen“ (Brauner 2023, S. 74).

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“ (Brauner 2023, S. 74).

Seite der Störung

„Depending on the magnitude and location of the disruption, a commuter railway network may be divided into two different sides. [...]

In complete blockages [...] the network may be assumed to be “partially” isolated, as it is likely that there are potential deviation paths available to link both sides of the disrupted network. [...]

In a partial blockage, it is still possible to connect both sides of the network through the infrastructural elements that have not been directly affected by the disruption [...]. However, in a partial blockage, due to the nature of the measures foreseen in the DRP^[7] operating concepts [...], it is possible that some lines still need to be considered as being divided into two different sides” (Crespo 2020, S. 115 f.).

Die Definition von Crespo (2020, S. 155 f.) wird dahingehend erweitert, dass eine Störung das Netz auch in mehr als zwei Seiten aufteilen kann.

Verbindung

„Eine Verbindung konkretisiert die Route mit Uhrzeiten und der Zuordnung der Verkehrsmittel zu einzelnen Fahrten bzw. Abschnitten des Weges “ (Brauner 2023, S. 74).

Verbindungskonflikt

Ein Verbindungskonflikt besteht, wenn durch ein Betriebskonzept der Verkehrswiderstand einer Verbindung verändert ist (Brauner 2023, S. 154).

Verkehrskonzept

Ein Verkehrskonzept ist Teil eines SFP und stellt eine „Planung von Verbindungskonflikten und dazu passenden Lösungen [dar]. Es beinhaltet alle Lösungsalternativen, die bei Auftreten des Störfalls an die Fahrgäste zu kommunizieren sind“ (Brauner 2023, S. 68).

⁷ DRP: Disruption Program; Englischer Begriff für ein Störfallprogramm.

4 Anpassung des Betriebskonzepts

4.1 Einleitung

Die Adaption von SFP lässt sich in vier Teilprobleme und eine kundenorientierte Bewertung untergliedern (siehe Kapitel 3.4). In diesem Kapitel wird Teilproblem I, die Anpassung des Betriebskonzepts, behandelt.

Bei Auftreten einer Störung kann die Infrastruktursituation nicht nur durch die Störung selbst, sondern zusätzlich durch eine Vielzahl weiterer Abweichungen eingeschränkt sein. Diese Abweichungen der Infrastruktursituation, die zusätzlich zu der Störung bestehen, können dazu führen, dass das Betriebskonzept des ausgewählten SFP nicht umsetzbar ist. In Modul 1 erfolgt deshalb eine erste Prüfung der Umsetzbarkeit sowie, wenn erforderlich, die Anpassung des Betriebskonzeptes. Die Umsetzbarkeit bezieht sich nach Kapitel 3.4 auf Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte, die eine Anpassung von Laufwegen erfordern, und auf die Einhaltung eines Kapazitätskriteriums.

In die Lösung von Teilproblem I ist die Auswirkung auf die kundenorientierte Bewertung des SFP zu berücksichtigen (siehe Kapitel 3.4). Die Anpassung des Betriebskonzepts ist die Grundlage und Ausgangspunkt für eine eventuell erforderliche Anpassung des Verkehrskonzepts, für das Fahrplankonzept der stabilen Phase und für die Bestimmung eines Fahrplans der Einschwingphase. Die Anpassung des Betriebskonzepts ist somit das zentrale Modul der Adaption von SFP.

Ziel des Kapitels ist die Lösung von Teilproblem I durch die Entwicklung von Algorithmen zur Anpassung eines Betriebskonzepts. Gemäß Kapitel 3.4 entspricht dies der Entwicklung von Modul 1 der Systemarchitektur.

Der Input von Modul 1 besteht aus dem von Disponenten ausgewählten SFP (siehe Kapitel 3.2), das auf die aktuelle Infrastruktursituation angewendet werden soll. Weitere Inputs sind der Fahrplan des Regelbetriebs und alle für das S-Bahn-Netz bestehende SFP. Außerdem können Linienrouten und/oder Mengen von Linienrouten, die im angepassten Betriebskonzept nicht enthalten sein sollen, von den Disponenten festgelegt werden. Auch können Vorgaben zu minimalen Beförderungskapazitäten in der Stammstrecke oder zu maximalen Zugzahlen je Zeiteinheit für Strecken gemacht werden.

In Modul 1 erfolgt die Anpassung des Betriebskonzepts, bei der die Umsetzbarkeit des Betriebskonzepts geprüft wird. Ggf. werden Anpassungen der linienscharfen betrieblichen Maßnahmen vorgenommen, die Laufweg und Takt betreffen. Modul 1 kann zu zwei möglichen Ergebnissen führen:

- In Modul 1 konnte ein angepasstes Betriebskonzept bestimmt werden.
- In Modul 1 konnte kein angepasstes Betriebskonzept bestimmt werden.

Der Aufbau von Kapitel 4 folgt dem grundsätzlichen Aufbau der Hauptkapitel gemäß Kapitel 3.5. Zunächst wird in Kapitel 4.2 die Methode zur Anpassung des Betriebskonzepts ausgewählt. Dafür erfolgt zunächst eine Problembeschreibung von Teilproblem I. Aufbauend auf dieser werden verschiedene Methoden zur Lösung des Teilproblems diskutiert und eine Methode ausgewählt. Die ausgewählte Methode bildet die Grundlage für Modul 1.

Aufbauend auf der gewählten Methode und den Anforderungen zur Lösung von Teilproblem I werden die Funktionalitäten des Moduls in Kapitel 4.3 entwickelt. In Kapitel 4.4 erfolgt die Spezifizierung von Modul 1, basierend auf den entwickelten Funktionalitäten. In Kapitel 4.5 werden die Ergebnisse von Kapitel 4 zusammengefasst und diskutiert.

4.2 Methode zur Anpassung des Betriebskonzepts

Ziel dieses Kapitels ist es, die Methode zur Lösung von Teilproblem I auszuwählen. Grundlage für die Auswahl der Methode bilden die Anforderungen aus Kapitel 3.3. Anhand der ausgewählten Methode ergeben sich die erforderlichen Funktionalitäten des Moduls (Kapitel 4.3).

Zur Auswahl einer Methode wird zunächst Teilproblem I beschrieben (Kapitel 4.2.1). Darauf aufbauend werden mögliche Methoden anhand der relevanten Anforderungen aus Kapitel 3.3 diskutiert und eine Methode ausgewählt (Kapitel 4.2.2). Anschließend werden Komponenten und Eigenschaften des Moduls für die Anpassung des Betriebskonzepts bestimmt (Kapitel 4.2.3). Abschließend kann aufbauend auf der Methode, den Komponenten und Eigenschaften des Moduls die Vorgehensweise zur Entwicklung des Algorithmus zur Anpassung des Betriebskonzepts festgelegt werden (Kapitel 4.2.4).

4.2.1 Problembeschreibung

Für die Auswahl der Methode erfolgt eine Problembeschreibung von Teilproblem I. Dafür wird das Problem zunächst formuliert. Anschließend werden die Bedingungen an die Problemlösung sowie Problemkomplexität und Problemgröße beschrieben.

Problemformulierung

Ausgangspunkt von Teilproblem I ist das ausgewählte SFP $p' \in P$ mit der Menge von betrieblichen Maßnahmen des Betriebskonzepts $BK_{p'}$, die für jede Linie $l \in L$ eine Menge von Linienrouten $LR_{p',l}$ bestimmt (siehe Abbildung 4-1). $LR_{p'}$ ist die Menge aller Linienrouten von p' und somit die Vereinigung aller $LR_{p',l}$.

$$LR_{p'} = \bigcup_{l \in L} LR_{p',l}$$

Eine Linienroute repräsentiert per Definition zwei Laufwege mit inversen Start- und Zielknoten sowie die Taktzeit, in der die Laufwege von Zügen der Linie bedient werden. Dadurch werden die Auswirkungen der Anpassung der linienscharfen betrieblichen Maßnahmen, die Laufweg und Takt betreffen, abgebildet. Die Endpunkte einer Linienroute sind immer Wendebahnhöfe der Linie. Bei Betriebskonzepten eines SFP (z. B. bei einer Linienroute aus $LR_{p',l}$) können die Wendebahnhöfe auch SPF-Wendebahnhöfe sein.

In $LR_{p',l}$ ist mindestens ein Element enthalten: entweder eine Linienroute oder ein Element, welches den Ausfall der Linie anzeigt. Eine Linie kann auch mehr als eine Linienroute umfassen (und $LR_{p',l}$ damit mehr als ein Element beinhalten). Besteht beispielsweise im Linienverlauf eine Verzweigung, dann bestehen mindestens zwei Linienrouten, da jeweils eine Linienroute zwischen einem Wendebahnhof im Linienast und dem verbleibenden dritten Wendebahnhof besteht (zur Veranschaulichung einer Verzweigung siehe die Linienrouten A – E und X – E der roten Linie in Abbildung 4-1).

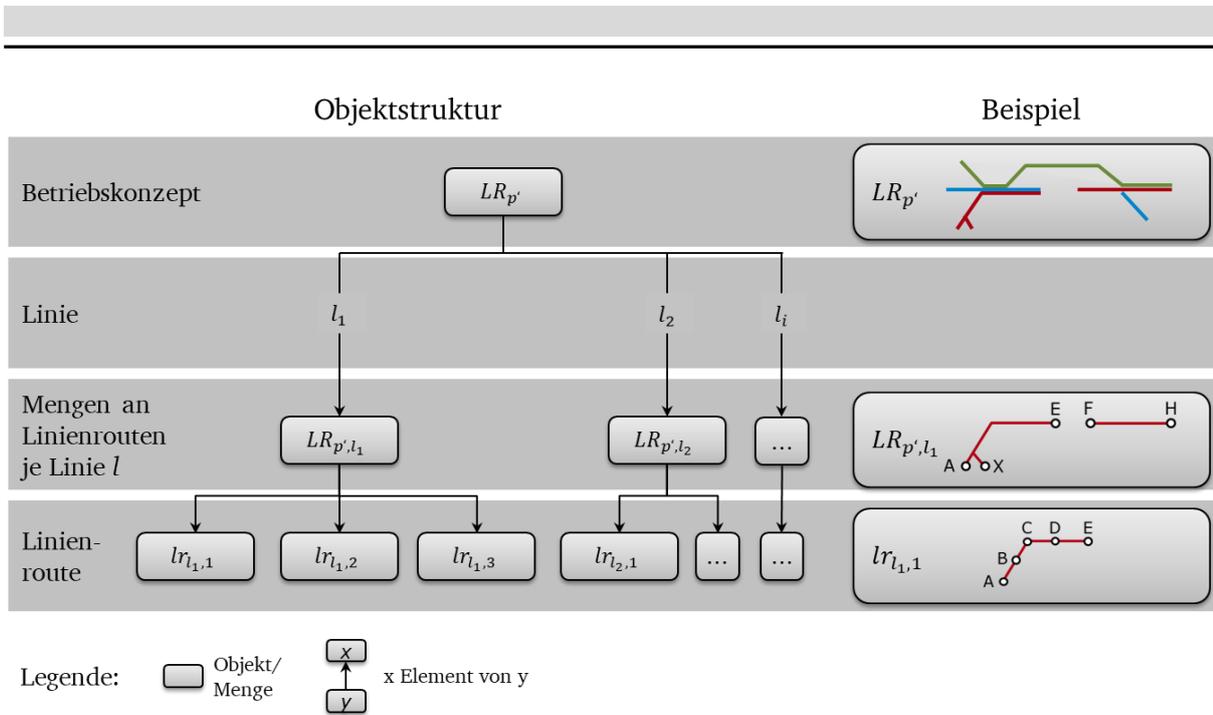


Abbildung 4-1: Gewählte Objektstruktur von Modul 1

Allgemein besteht für jede Verknüpfung von zwei Wendebahnhöfen, die für eine Linie vorgesehen ist, eine Linienroute. Für die rote Linie im Beispiel der Abbildung 4-1 bestehen drei Verknüpfungen von Wendebahnhöfen, sodass die rote Linie aus drei Linienrouten besteht (Linienrouten A – E, X – E und F – H). Laufwege mit nur wenigen Fahrten und einer geringen verkehrlichen Bedeutung (z. B. für Fahrten vom/zum Depot am Anfang/Ende des Tages) sind für die Anpassung des Betriebskonzepts nicht relevant und werden daher nicht berücksichtigt.

Zur Lösung von Teilproblem I ist zu prüfen, ob alle $LR_{p'}$ in der aktuellen Infrastruktursituation G' umsetzbar sind. Ist dies nicht der Fall, sind die betrieblichen Maßnahmen aus $BK_{p'}$ anzupassen, sodass ein angepasste Betriebskonzept entsteht ($BK_{p'}^*$), bei dem alle Linienrouten ($LR_{p'}^*$) in G' umsetzbar sind. Wie in Kapitel 3.4 vorgegeben, werden in Teilproblem I nur linienscharfe betriebliche Maßnahmen, die Laufweg und Takt betreffen, angewendet.

Die Anpassung kann auch als Anpassung des Liniennetzplans aufgefasst werden (siehe Kapitel 3.4), indem Linienrouten ausgewählt und daraus die erforderlichen betrieblichen Maßnahmen von $BK_{p'}^*$ bestimmt werden. Umformuliert lautet das Teilproblem somit: für die Anpassung des Liniennetzplans bzw. die Bestimmung von $LR_{p'}^*$ sind alle $LR_{p',l}^*$ aus den jeweiligen Mengen aller Linienrouten von l ($LR_{G,l}$) auszuwählen, sodass alle $LR_{p',l}^*$ in G' umsetzbar sind.

$LR_{G,l}$ stellt dabei den Suchraum dar und umfasst alle Linienrouten von l , die im ungestörten S-Bahn-Netz betrieblich und technisch umsetzbar sowie verkehrlich gewünscht sind. Sowohl die Linienrouten von l , die in allen $LR_{p'}$ enthalten sind, als auch die Linienrouten des regulären Betriebs sind in $LR_{G,l}$ enthalten. In $LR_{G,l}$ ist auch ein Element enthalten, das den Ausfall der Linie anzeigt.

Für die Lösung des Teilproblems müssen die möglichen betrieblichen Maßnahmen bzw. die umsetzbaren Linienrouten (und somit $LR_{G,l}$) für jede Linie bekannt sein oder diese sind z. B. durch eine Routensuche zu bestimmen. Kern von Teilproblem I ist somit ein Problem der kombinatorischen Optimierung: Bestimmung aller $LR_{p',l}^*$ durch Auswahl von Linienrouten aus den $LR_{G,l}$.

Für die Bestimmung von $LR_{G,l}$ z. B. über eine Routensuche sind sowohl technische und betriebliche (z. B., ob ein Bahnhof für eine Wende geeignet ist) als auch verkehrliche (z. B. Abweichungen einer Linie von der regulären Linienroute) Vorgaben zu prüfen und die dafür erforderlichen Daten müssen vorliegen (z. B. Daten zur Signalisierung) (Brauner 2023, S. 83 ff.). Entsprechend Kapitel 3.2 liegen diese Daten und somit $LR_{G,l}$ im Rahmen dieser Arbeit nicht vor. Die betrieblichen Maßnahmen aus $BK_{p'}$ bzw. die Linienrouten $LR_{p'}$ werden daher situativ angepasst.

Bedingungen an die Problemlösung

Bei der Anpassung von $BK_{p'}$ sind die Anforderungen 1.A und 2.A bis 2.C aus Kapitel 3.3 sowie die in Tabelle 3-5 festgelegten Anforderungen aus 1.B zu berücksichtigen. Eine gültige Lösung von Teilproblem I muss die Anforderungen vom Typ „hart“ zwingend erfüllen.

Für die Anforderung eines stabilen Betriebs in der stabilen Phase ist nach Kapitel 3.4 Konfliktfreiheit herzustellen bzgl. Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten, wobei nur die Laufwegebene zu berücksichtigen ist. Außerdem ist, um einen zu hohen Kapazitätsverbrauch an einem Knoten und/oder einer Kante zu identifizieren, ein Kapazitätskriterium anzuwenden und einzuhalten. Beide Bedingungen beziehen sich auf Anforderungen vom Typ „hart“ und sind deshalb zwingend einzuhalten.

Außerdem bestehen Vorgaben für die Konsistenz einer Linie (Anforderung „gültige Linienplanung“ siehe Kapitel 3.3). Diese Vorgaben richten sich nach den in Kapitel 3.2 getroffenen Annahmen und den in Kapitel 3.3 bestehenden Anforderungen vom Typ „hart“:

- Eine Linie bedient max. zwei Netzäste.
- Innerhalb des Kernbereichs besteht keine Verzweigung der Linie.
- Die Schnittmenge zweier Linienrouten einer Linie ist leer oder genau eine zusammenhängende Abfolge von Knoten und Kanten (keine Verzweigung und Wiedervereinigung von Laufwegen).
- Netzäste werden nur durch die Linien bedient, die diese auch im regulären Betrieb bedienen.
- Im Kernbereich ist kein Pendelverkehr vorgesehen.

Bezüglich des Liniennetzplans bestehen darüber hinaus die Anforderungen, dass die Bedienung der Netzäste auch während einer Störung gewährleistet werden sollen (Anforderungen vom Typ „weich“). Außerdem soll die Bedienung der Stammstrecke nur bei Gewährleistung einer vorgegebenen Beförderungskapazität erfolgen (Anforderungen vom Typ „hart“). Weiterhin sind ggf. vorhandene Vorgaben zur maximalen Anzahl von Zügen je Zeiteinheit für Strecken (z. B. für Umleitungsstrecken) einzuhalten (Anforderungen vom Typ „hart“).

Bei der Anpassung des Betriebskonzepts ist die Auswirkung auf die Bewertung des Verkehrskonzepts zu berücksichtigen (siehe Kapitel 3.4). Aus der kundenorientierten Bewertung des Verkehrskonzepts ergibt sich sowohl eine Nebenbedingung, da das Verkehrskonzept eine verkehrliche Mindestqualität sicherstellen muss (Anforderungen vom Typ „hart“), als auch ein Optimierungsziel, da die kundenorientierte Bewertung des SFP maximiert werden soll (Anforderungen vom Typ „weich“).

Weitere Bedingungen können sich aus den Rückkopplungen von Modul 3, 4 und 5 ergeben (siehe Kapitel 3.4). Die Festlegung und Beschreibung der Rückkopplung von Modul 3, 4 und 5

erfolgt in Kapiteln 6, 7 und 8, sodass in diesen Kapiteln jeweils auch die Auswirkung auf Modul 1 zu diskutieren ist.

Problemkomplexität

Der Suchraum (S_I) für die Anpassung des Betriebskonzepts und somit für Teilproblem I umfasst alle möglichen Betriebskonzepte. Ein Betriebskonzept kann als eine Menge von Linienrouten aus allen Linien des S-Bahn-Netzes aufgefasst werden.

Wie zuvor beschrieben, kann Teilproblem I als Bestimmung von $LR_{p',l}^*$ durch die Auswahl von Linienrouten aus den jeweiligen $LR_{G,l}$ verstanden werden. $LR_{p',l}^*$ muss nicht nur ein Element enthalten, sondern kann auch mehrere Elemente aus $LR_{G,l}$ umfassen. Die $LR_{G,l}$ können bei entsprechender Datenverfügbarkeit bestimmt werden und sind somit endlich.

Es sei $n_{LR,l,kom}$ die Anzahl der möglichen Kombinationen für $LR_{p',l}^*$ mit

$$n_{LR,l,kom} = \sum_{k=0}^{|LR_{G,l}|} \binom{|LR_{G,l}|}{k}$$

Der Suchraum für $LR_{p'}^*$ umfasst die Kombinationen aller $LR_{p',l}^*$, über alle Linien l des S-Bahn-Netzes. Damit ergibt sich die Anzahl der unterscheidbaren Betriebskonzepte in Suchraum S_I ($n_{S,I}$) als Produkt von $n_{LR,l,kom}$ über alle l . Es gilt

$$n_{S,I} = \prod_{l \in L} (n_{LR,l,kom})$$

mit $n_{LR,l,kom} = \sum_{k=0}^{|LR_{G,l}|} \binom{|LR_{G,l}|}{k}$ zu

$$n_{S,I} = \prod_{l \in L} \left(\sum_{k=0}^{|LR_{G,l}|} \binom{|LR_{G,l}|}{k} \right)$$

mit $\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} = 2^n$ zu

$$n_{S,I} = \prod_{l \in L} (2^{|LR_{G,l}|})$$

mit $\forall l$ gilt $|LR_{G,l}| \approx n_{LR,m}$ zu

$$n_{S,I} = (2^{n_{LR,m}})^{|L|} = 2^{n_{LR,m} \cdot |L|}$$

mit

$n_{S,I}$	Anzahl der Elemente in Suchraum von Teilproblem I
$n_{LR,l,kom}$	Anzahl der möglichen Kombinationen für $LR_{p',l}^*$
$LR_{p',l}^*$	Menge von Linienrouten von Linie l , die sich aus der Anwendung der betrieblichen Maßnahmen aus dem angepassten Betriebskonzept, welches p' als Ausgangszustand hat, ergeben
$LR_{G,l}$	Menge aller umsetzbarer Linienrouten von l in G
$n_{LR,m}$	mittlere Anzahl der Linienrouten in $LR_{G,l}$ über alle $l \in L$

Somit sind Größen, die maßgeblich die Berechnungsdauer des Optimierungsproblems beeinflussen:

- Anzahl der Linien ($|L|$)
- Anzahl der Linienrouten je Linie ($|LR_{G,l}|$)

Dominierend ist das exponentielle Wachstum durch die Anzahl der Linien, wobei dieses in der Praxis maximal einen niedrigen zweistelligen Wert einnehmen wird. Die Anzahl der Linienrouten nimmt gerade bei einem dichten Netz höhere Werte an, da eine Vielzahl an Umleitungsmöglichkeiten und Möglichkeiten für alternative Wendungen bestehen. Durch die Vereinfachung ($\forall l \text{ gilt } |LR_{G,l}| \approx n_{LR,m}$) wird die Größe des Suchraums bei $|L| \ll n_{LR,m}$ überschätzt.

Um eine Einordnung des Suchraums zu bekommen, wird die S-Bahn Rhein-Main als S-Bahn-Netz einer Metropolregion in Deutschland näher betrachtet und eine der Linien näher untersucht.

Nach dem normierten Dispositionsmanagement (Transportleitung Regio Hessen 2016) bestehen für die Linie ($l = I$) 2 Linienrouten im regulären Betrieb sowie 6 betriebliche Maßnahmen, die in den 19 SFP angewendet werden. Die 6 betrieblichen Maßnahmen können zu 14 verschiedenen Mengen von betrieblichen Maßnahmen kombiniert werden. 6 der 14 Mengen von betrieblichen Maßnahmen von Linie I werden in den 19 SFP genutzt. Mit den 6 Mengen von betrieblichen Maßnahmen und 2 Linienrouten des regulären Betriebs bestehen insgesamt 14 Linienrouten.

Die beiden Linienrouten haben im regulären Betrieb eine Taktzeit von 30 Minuten. Wird eine Taktzeit von 60 Minuten (für Abschnitte) in der Störung akzeptiert, bestehen 28 Linienrouten ($|LR_{G,I}| = 28$).

Aus den 28 Linienrouten können $2^{|LR_{G,I}|} = 2^{28} \approx 2,6 \cdot 10^8$ Kombinationen und somit $2,6 \cdot 10^8 LR_{p,l}^*$ gebildet werden. Unter der Annahme $|LR_{G,l}| \approx n_{LR,m}$ ergeben sich für 9 Linien $2^{(n_{LR,m} \cdot |L|)} = 2^{28 \cdot 9} \approx 7 \cdot 10^{75}$ möglich $LR_{p,l}^*$.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht alle Kombinationen betrieblich machbar sind. Bei der Kombination von 2 der 28 möglichen Linienrouten bestehen $\binom{28}{2} = 378$ mögliche Kombinationen. Von diesen 378 möglichen Kombinationen sind aber nur 121 betrieblich machbar. Aus je mehr Linienrouten eine Kombination besteht, desto geringer wird der Anteil der betrieblich machbaren Kombinationen eingeschätzt. Demgegenüber wurden in dem Beispiel nur die betrieblichen Maßnahmen berücksichtigt, die bereits in SFP bestehen und keine weiteren möglichen betrieblichen Maßnahmen entwickelt.

Problemgröße

Die Problemgröße umfasst unter einer räumlichen Betrachtungsweise das gesamte S-Bahn-Netz, da der anzupassende Liniennetzplan das S-Bahn-Netz bestimmt. Die Infrastrukturmodellierung muss die Überprüfung der Bedingungen ermöglichen und daher u. a. für ein Erkennen von Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten auf Laufwegebene und für die Prüfung des Kapazitätskriteriums geeignet sein. Zeitlich betrachtet bestehen für den Liniennetzplan keine zeitlichen Abhängigkeiten oder eine zeitliche Ausdehnung.

Teilproblem I ist ein Problem der kombinatorischen Optimierung (siehe Anfang des Kapitels). Mögliche Kombinationen können aber durch die Nutzung von problemspezifischem Wissen ausgeschlossen werden (z. B. kann der Ausfall der Linie nicht mit einer Linienroute der Linie kombiniert werden). Mit dem Betriebskonzept des ausgewählten SFP ist ein Ausgangszustand gegeben (siehe Kapitel 3.1).

4.2.2 Methodendiskussion

Nachdem das Problem beschrieben wurde, erfolgt die Auswahl einer Methode zur Lösung von Teilproblem I.

Als Ansatz, der sich mit der Anpassung des Betriebskonzept während des Betriebs und somit mit der kombinatorischen Optimierung entsprechend Teilproblem I befasst, konnte in der Literatur lediglich die Arbeit von Van Lieshout et al. (2020) gefunden werden (siehe Kapitel 2.4.3). Das von Van Lieshout et al. (2020) gelöste Problem, das in dem Ansatz von Dekker et al. (2018) beschrieben wird, unterscheidet sich aber von dem in dieser Arbeit definierten Teilproblem I. So wird von Van Lieshout et al. (2020) bei einer Störung der von der Störung betroffene Bereich vom übrigen Netz getrennt und die Linien am Rand des gestörten Bereichs gebrochen. Ein Liniennetzplan wird nur für den von der Störung betroffenen Bereich bestimmt.

Dieser Ansatz bedeutet für zentralisierte S-Bahn-Netze einen zusätzlichen Umstieg für alle Verbindungen aus der Peripherie ins Zentrum. Dies führt zu einer Widerstandserhöhung für diese Verbindungen und entspricht nicht der Anforderung nach Zuverlässigkeit. Darüber hinaus werden mögliche Umleitungen zur Verbindung der Seiten einer Störung unter Auslassen des Bereichs der Störung nicht berücksichtigt.

Zusammengefasst ist die Anpassung des Liniennetzplans im Ansatz von Van Lieshout et al. (2020) grundsätzlich geeignet, um Teilproblem I zu lösen. Da der Ansatz aber eine Neuplanung unter Berücksichtigung der regulären Verbindungen und keine Anpassung des Liniennetzplans eines ausgewählten SFP verfolgt, wird dem Ansatz nicht weiter nachgegangen. Stattdessen wird ein Ansatz entwickelt, der sich stärker an den Anforderungen aus Kapitel 3.3 orientiert.

Ein Ansatz zur Lösung eines Optimierungsproblems und somit auch ein Ansatz zur Lösung von Teilproblem I kann grundsätzlich durch eine exakte Methode, die das Finden einer optimalen Lösung garantiert oder eine Heuristik, bei der eine Optimalität nicht gegeben ist, erfolgen. Zur Entscheidung, welche der beiden grundlegenden Methoden zur Lösung von Teilproblem I verwendet wird, werden die beiden Methoden zunächst anhand der Problembeschreibung und der relevanten Anforderungen diskutiert und anschließend die geeignetste Methode ausgewählt.

Die Größe des Suchraums schließt die Nutzung einer **exakten Methode** nicht grundsätzlich aus, ggf. müssen aber weitere Möglichkeiten zur Reduktion der Problemkomplexität (z. B. weitere Zerlegung in Teilprobleme) für die erforderliche schnelle Lösungsbereitstellung angewendet werden. Das Optimierungsziel ist die Maximierung der kundenorientierten Bewertung des SFP und die Nebenbedingungen umfassen sowohl betriebliche (Konfliktfreiheit) als auch verkehrliche (verkehrliche Mindestqualität) Kriterien. Optimierungsziel und Nebenbedingungen liegen nicht als analytische Funktionen vor. Für die Anwendung von Verfahren zur mathematischen Optimierung sind daher Zielfunktion und Nebenbedingungen in ein für eine mathematische Optimierung geeignetes Modell zu formulieren.

Anzahl und fachliche Breite (kundenorientierte Bewertung, Konfliktfreiheit, Konsistenz von Linienrouten und Liniennetzplan, Rückkopplungen) der Nebenbedingungen lassen ein komplexes Modell erwarten, wodurch die Einhaltung einer schnellen Lösungsbereitstellung erschwert wird. Die Anforderung an eine nachvollziehbare Anpassung bei einer mathematischen Optimierung ist durch die Methode selbst nicht gegeben, da kein direkter Zusammenhang zwischen dem ausgewählten SFP und der durch ein exaktes Verfahren gefundenen Lösung besteht. Der Zusammenhang kann durch eine weitere Analyse der Lösung bestimmt werden.

Bei der Nutzung einer **Heuristik** kann der Anforderung nach Nachvollziehbarkeit entsprochen werden, in dem sich die Anpassungen z. B. direkt auf die Erfüllung von Nebenbedingungen beziehen und die Auswahl von Lösungen problemspezifisches Wissen nutzen. Auch hinsichtlich der Anforderung einer schnellen Lösungsbereitstellung ist zu erwarten, dass eine Heuristik diese besser erfüllen kann.

Außerdem besteht problemspezifisches Wissen, welches zur Eingrenzung und Strukturierung des Suchraums und/oder zur Lenkung der Heuristik genutzt werden kann. Da sich die Performance der Heuristik verbessert, je mehr problemspezifisches Wissen verwendet wird (Weise et al. 2009, S. 34), sollte eine Heuristik entwickelt und keine problemunabhängige Heuristik (Metaheuristik) genutzt werden.

Nach der Diskussion der möglichen Methoden scheint eine Heuristik für die Lösung von Teilproblem I am besten geeignet zu sein, da zu erwarten ist, dass die Anforderungen nach schneller Lösungsbereitstellung und Nachvollziehbarkeit der Adaption am besten erfüllt werden.

Die Passung einer Heuristik zur Lösung eines Problems ist von den Eigenschaften der Heuristik abhängig, weshalb zunächst die Eigenschaften und Komponenten der Heuristik festgelegt werden. Als Ausgangspunkt für die Festlegung werden die in Kapitel 2.6 identifizierten Komponenten und Eigenschaften von Metaheuristiken genutzt. Für die Heuristik zur Lösung von Teilproblem I werden Komponenten und Eigenschaften ausgewählt, die die bestehenden Anforderungen am besten erfüllen.

Auf Grundlage der ausgewählten Komponenten und Eigenschaften wird im Weiteren unter Berücksichtigung von problemspezifischem Wissen die Heuristik entwickelt. Die Heuristik bildet wiederum die Grundlage für die Spezifizierung von Modul 1. Im nächsten Kapitel erfolgt die Auswahl der Komponenten und Eigenschaften der Heuristik.

4.2.3 Komponenten und Eigenschaften der Heuristik

Als Methode zur Lösung von Teilproblem I wurde eine Heuristik ausgewählt. Für die Entwicklung der Heuristik zur Anpassung des Betriebskonzepts werden aus den in Kapitel 2.6 identifizierten Komponenten und Eigenschaften von Metaheuristiken passende Komponenten und Eigenschaften bestimmt. Die ausgewählten Komponenten und Eigenschaften bilden die Grundlage für die weitere Entwicklung der Heuristik.

Zunächst werden die Eigenschaften der Heuristik ausgewählt, anschließend die Komponenten. Als Komponenten werden zunächst die Operatoren und anschließend Veränderungen während der Durchführung festgelegt.

Eigenschaften der Heuristik

Die in Kapitel 2.6 identifizierten Eigenschaften sind:

- Verbesserungs- oder Konstruktionsheuristik
- Diversifizierung oder Intensivierung
- deterministische oder stochastische Entscheidungsfindung

Verbesserungs- oder Konstruktionsheuristik

Eine Konstruktionsheuristik entspricht einer (Neu)Planung eines SFP. Eine Verbesserungsheuristik basiert auf der Änderung eines Ausgangszustands und kann als eine Anpassung des SFP angesehen werden. Mit dem Betriebskonzept des ausgewählten SFP ist ein Ausgangszustand gegeben und somit eine Verbesserungsheuristik zielführend einsetzbar. Die Anforderungen, dass möglichst wenig Änderungen bei der Anpassung erfolgen, kann durch die Anwendung einer Verbesserungsheuristik unterstützt werden. Eine Verbesserungsheuristik entspricht auch der Anforderung nach Nachvollziehbarkeit der Adaption, da ausgehend vom Ausgangszustand (ausgewähltes SFP) und durch dessen Anpassung eine Lösung des Problems gesucht wird. Als Eigenschaft wird eine Verbesserungsheuristik ausgewählt und somit das Betriebskonzept des ausgewählten SFP angepasst.

Diversifizierung oder Intensivierung

Ausgehend von der Problembeschreibung wird die erforderliche Ausprägung der Eigenschaft hergeleitet. Das ausgewählte SFP wurde hinsichtlich eines kundenorientierten Betriebs für das aktuelle Störungsszenario erstellt. Es kann daher angenommen werden, dass das ausgewählte SFP somit die optimale Lösung für das aktuelle Störungsszenario darstellt. Erforderliche Anpassungen an die aktuelle Infrastruktursituation sollten daher möglichst nah an dem ausgewählten SFP und damit nah an der optimalen Lösung für das aktuelle Störungsszenario liegen. Die Heuristik sollte demnach eine geringe Diversifizierung und eine ausgeprägte Intensivierung aufweisen.

Eine Anforderung an die Durchführung der Adaption ist, dass möglichst wenige Änderungen am Betriebskonzept vorgenommen werden. Zum ausgewählten SFP soll somit eine möglichst geringe Abweichung bestehen, was einer geringen Diversifizierung entspricht. Die Anforderung nach geringer Abweichung deckt sich somit mit der Analyse des Teilproblems. Ergebnis der Herleitung ist, dass die Heuristik eine geringe Diversifizierung und eine ausgeprägte Intensivierung aufweisen soll.

Deterministische oder stochastische Entscheidungsfindung

Entscheidungen innerhalb der Heuristik können entweder deterministisch oder stochastisch getroffen werden. Eine stochastische Entscheidungsfindung fördert die Diversifizierung der Heuristik (Blum und Roli 2003, S. 294 f.).

Außerdem ist durch stochastische Entscheidungen die Nachvollziehbarkeit der Lösungsfindung ggf. nicht gegeben, da auch vermeintlich schlechtere Entscheidungen getroffen werden. Um die Anforderung nach Nachvollziehbarkeit zu erfüllen, könnte eine weitere Analyse und Aufbereitung der Lösung (des Lösungswegs) im Nachgang erforderlich sein. Nicht der Anforderung nach Nachvollziehbarkeit der Lösungsfindung entspricht außerdem, dass bei einer

identischen Ausgangslage das Ergebnis der Anpassung durch eine stochastische Entscheidungsfindung variieren kann.

Um die Anforderungen an die Nachvollziehbarkeit zu erfüllen und da die Heuristik keine ausgeprägte Diversifizierung aufweisen sollte, wird eine deterministische Entscheidungsfindung festgelegt.

Zusammengefasst soll die Heuristik

- einer Verbesserungsheuristik entsprechen,
- eine geringe Diversifizierung und eine ausgeprägte Intensivierung aufweisen und
- eine deterministische Entscheidungsfindung nutzen.

Die festgelegten Eigenschaften sind bei der Diskussion und Auswahl der Komponenten der Heuristik zu berücksichtigen.

Operatoren der Heuristik

Nachdem die Eigenschaften der Heuristik bestimmt wurden, werden die Operatoren festgelegt. Ein Operator kann eine der folgenden Ansätze verfolgen (siehe Kapitel 2.6):

- Kombination
- Stigmergie
- Änderung

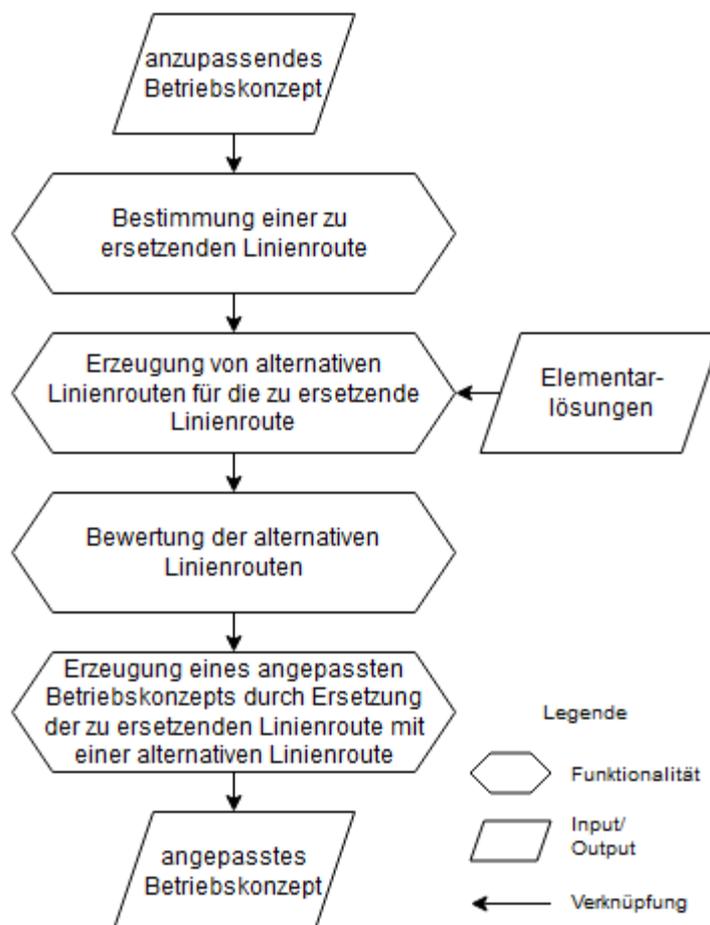


Abbildung 4-2: Ablauf von Operator 1

Als Eigenschaft der Heuristik wurde festgelegt, dass diese eine geringe Diversifizierung und eine ausgeprägte Intensivierung haben soll. Nach Talbi (2009, S. 25) sind lokale Suchen Heuristiken mit der ausgeprägtesten Intensivierung. Dementsprechend werden die Operatoren der Heuristik einer lokalen Suche folgen. Der Operator einer lokalen Suche ist die Änderung (Vaessens et al. 1998, S. 155 f.).

Die kleinste Änderung eines Betriebskonzepts und damit mit der ausgeprägtesten Intensivierung verbunden, ist die Ersetzung einer einzelnen Linienroute, wobei die Änderung des Laufwegs der Linienroute durch die Ersetzung möglichst gering sein soll. Da $LR_{G,l}$ nicht vorliegt (siehe Kapitel 4.2.1), ist für die Ersetzung einer Linienroute die Änderung einer Linienroute aus $LR_{p,l}$ unter Berücksichtigung der verwendeten elementaren Konfliktlösungen erforderlich. Operator 1 ist somit die Ersetzung einer Linienroute.

Die Nutzung von Störfalltrichtern bei der Erstellung (und der Adaption) von Betriebskonzepten (siehe Kapitel 2.4.1) entspricht einer Anwendung (bzw. Änderung) der elementaren Konfliktlösungen „alternative Wende“. Operator 1 wird somit auch als heuristischer Lösungsansatz in der Praxis angewendet.

Abbildung 4-2 gibt einen Überblick über den Ablauf von Operator 1 und Abbildung 4-3 zeigt die Objektstruktur von Operator 1. Das Beispiel innerhalb von Abbildung 4-3 baut auf dem in Abbildung 4-1 eingeführten Beispiel auf.

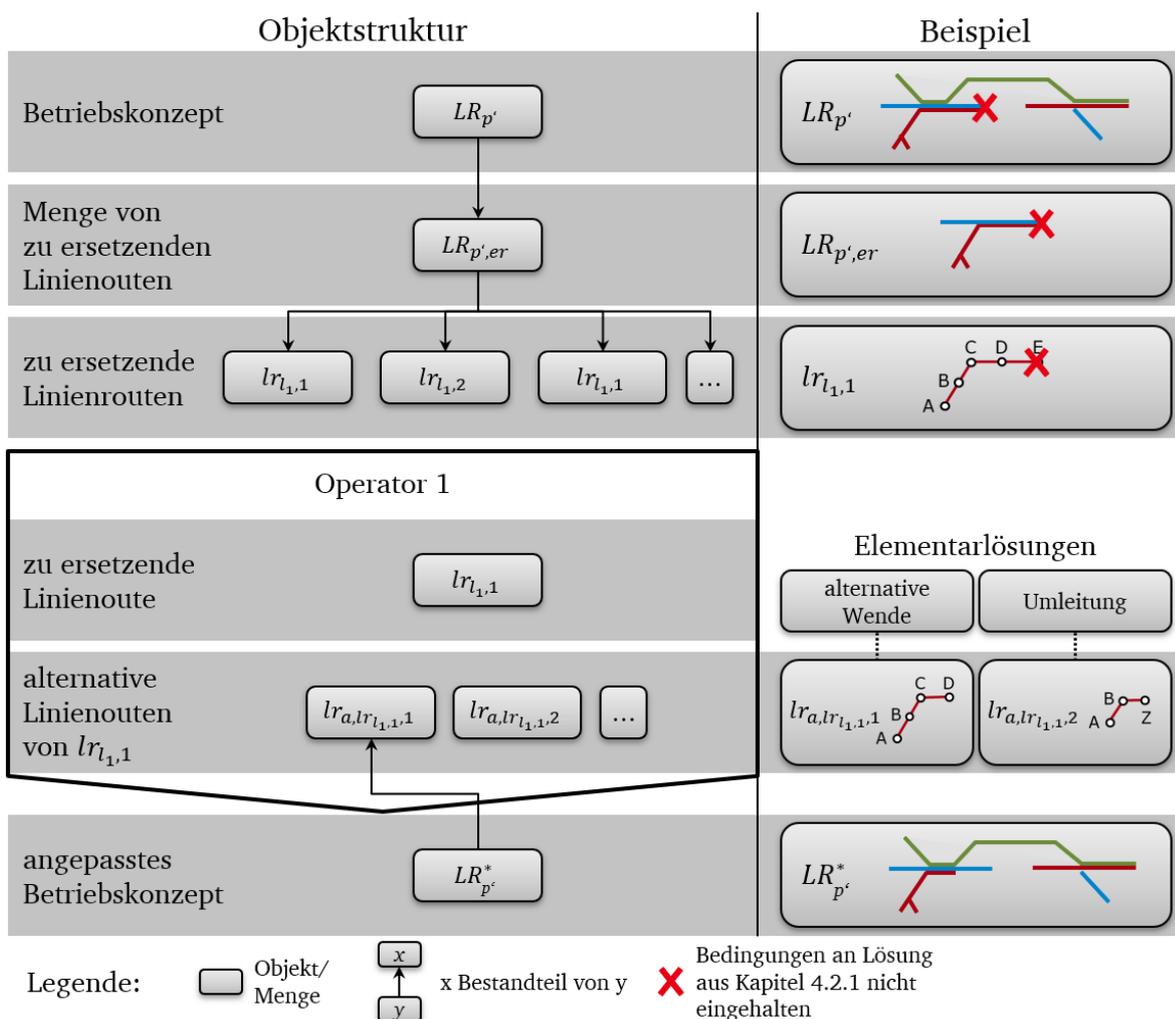


Abbildung 4-3: Überblick zur Objektstruktur von Operator 1

Für die Anwendung des Operators sind zunächst Linienrouten zu bestimmen, die durch den Operator ersetzt werden sollen. Linienrouten, die durch den Operator ersetzt werden, werden als „zu ersetzende Linienrouten“ bezeichnet. Für die Ersetzung werden in Operator 1, ausgehend von zu ersetzenden Linienrouten, durch Anwendung von elementaren Konfliktlösungen alternative Linienrouten erzeugt. Durch die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Änderung einer zu ersetzenden Linienroute (Anwendung von elementaren Konfliktlösungen) können i. d. R. eine Vielzahl an alternativen Linienrouten erzeugt werden. Für die Auswahl von alternativen Linienrouten für die Ersetzung der zu ersetzenden Linienrouten erfolgt eine Bewertung der alternativen Linienrouten. Durch die Ersetzung einer zu ersetzenden Linienroute durch eine alternative Linienroute wird ein angepasstes Betriebskonzept erzeugt.

Neben der Ersetzung einzelner Linienrouten in Operator 1, können auch Mengen von Linienrouten ersetzt werden. SFP haben oftmals gleiche Mengen von Linienrouten je Linie oder für eine Seite der Störung (siehe Kapitel 2.4.1). Eine Ersetzung von zu ersetzenden Linienrouten durch Mengen von Linienrouten aus bestehenden SFP entspricht deshalb der Anforderung nach der Nutzung gleicher Maßnahmen.

Die Nutzung von Mengen von Linienrouten aus dem Betriebskonzept bestehender SFP unterstützt außerdem die Anforderung nach Nachvollziehbarkeit, da Teillösungen aus bestehenden SFP genutzt werden und die Anforderung, dass möglichst wenige Maßnahmen

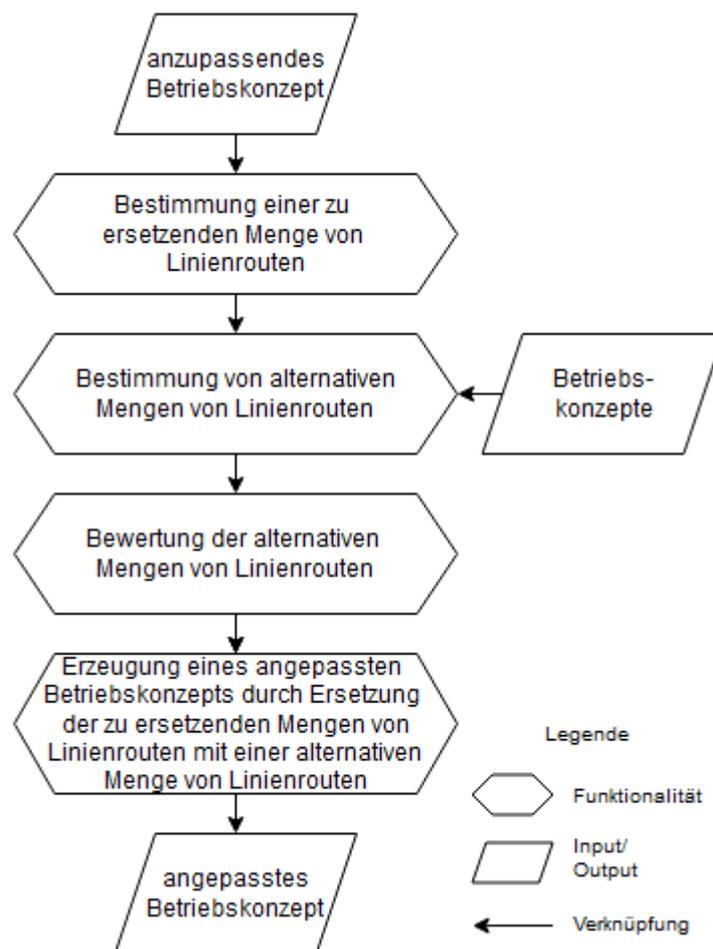


Abbildung 4-4: Ablauf Operator 2

angewendet werden. Da die Mengen von Linienrouten aus bestehenden Betriebskonzepten mit Verkehrskonzepten verknüpft sind, kann eine gute verkehrliche Machbarkeit erwartet werden.

Die Nutzung von Mengen von Linienrouten zur Anpassung eines Betriebskonzepts stellt als Operator ebenfalls eine Änderung dar (und keine Kombination). Die Ersetzung von Mengen von Linienrouten ist ein weiterer Operator (Operator 2). Da Operator 2 Mengen von Linienrouten statt einzelnen Linienrouten ändert, ist die Diversifizierung höher (die Intensivierung geringer) als bei Operator 1.

Durch die aktuelle Infrastruktursituation kann für die Betriebskonzepte bestehender SFP ggf. die in Kapitel 4.2.1 geforderte Konfliktfreiheit bzgl. Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte nicht gegeben sein oder das Kapazitätskriterium nicht eingehalten werden. Für die Ersetzung von zu ersetzenden Linienrouten sollten, um erneute Anpassungen des Betriebskonzepts zu vermeiden, nur Mengen von Linienrouten aus den Betriebskonzepten bestehender SFP verwendet werden, die die Bedingungen aus Kapitel 4.2.1 einhalten. Daneben können auch Mengen von Linienrouten aus funktionsfähigen Betriebskonzepten (= alle Bedingungen an die Lösung aus Kapitel 4.2.1 werden eingehalten), die in vorherigen Iterationsschritten erzeugt wurden, für die Ersetzung von zu ersetzenden Linienrouten des Betriebskonzepts des ausgewählten SFP genutzt werden.

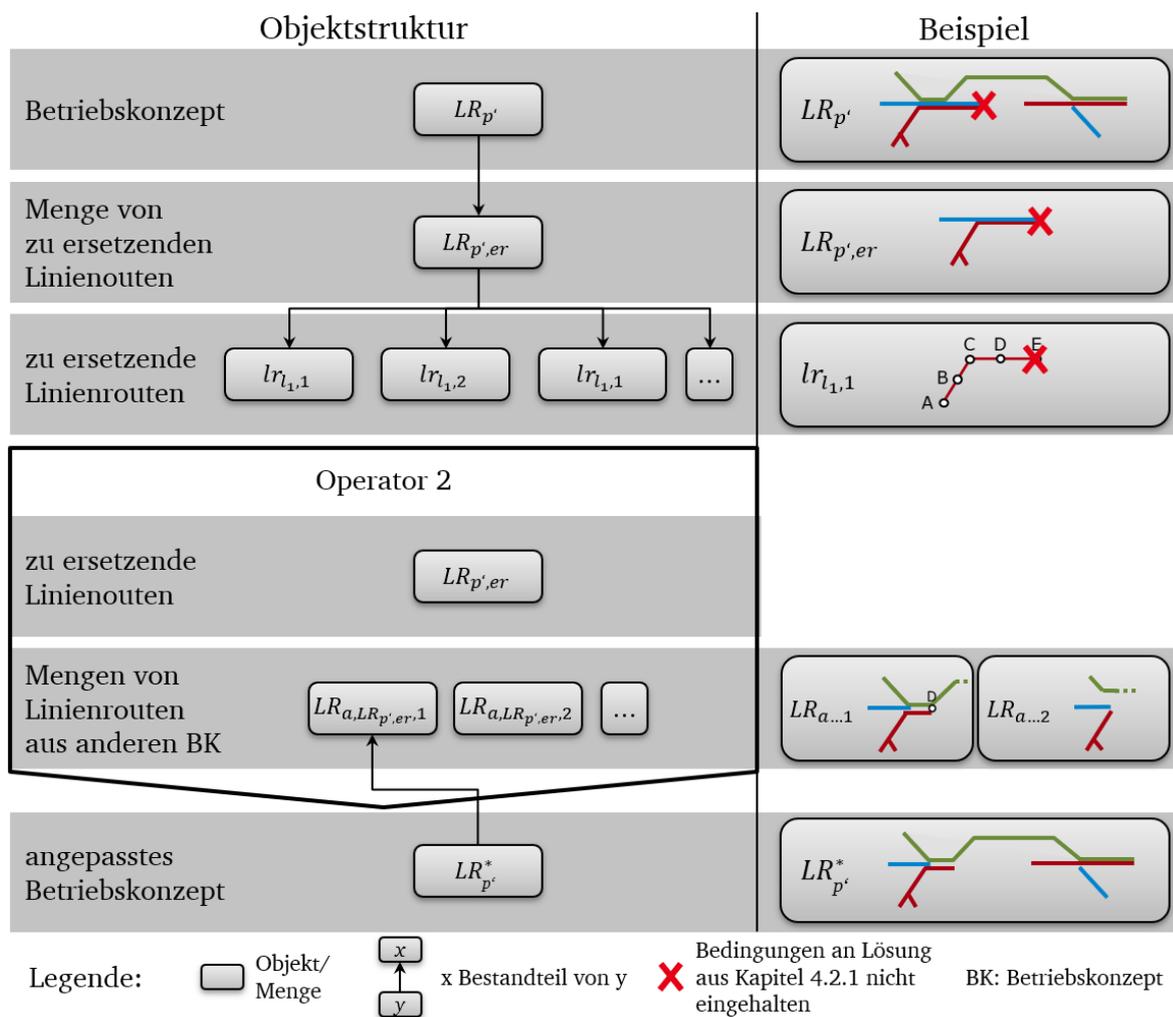


Abbildung 4-5: Überblick zur Objektstruktur von Operator 2

Abbildung 4-4 zeigt den Ablauf von Operator 2. Unterschied zu Operator 1 ist die Bestimmung der alternativen Linienrouten. Bei Operator 2 werden aus den funktionsfähigen Betriebskonzepten und den Betriebskonzepten bestehender SFP Mengen von Linienrouten bestimmt, die zu ersetzende Linienrouten ersetzen können. Die für die Ersetzung bestimmten Mengen von Linienrouten sollten als Ganzes in der Ersetzung verwendet werden und werden daher als „alternative Menge von Linienrouten“ bezeichnet. Analog wird eine Menge von Linienrouten, die zusammen ersetzt werden, als „zu ersetzende Mengen von Linienrouten“ bezeichnet.

Abbildung 4-5 zeigt die Objektstruktur beim Ablauf von Operator 2. Das Beispiel in Abbildung 4-5 baut auf der in Abbildung 4-1 eingeführten Objektstruktur auf.

Zusammenfassend wurden zwei Operatoren bestimmt:

- Operator 1: Ersetzung einer Linienroute
- Operator 2: Ersetzung von Mengen von Linienrouten

Veränderungen während der Durchführung der Heuristik

Als weitere Eigenschaften der Heuristik können Veränderungen während der Durchführung der Heuristik dienen (siehe Kapitel 2.6). Die Veränderungen während der Durchführung dienen vor allem dem „Entkommen“ aus lokalen Optima durch eine stärkere Diversifizierung. Veränderungen der Heuristik während der Durchführung der Heuristik können nach Kapitel 2.6

- den Suchraum,
- die Zielfunktion,
- die Operatoren oder
- die Suchparameter betreffen.

Verletzt eine Menge von Linienrouten eine Bedingung an die Lösung aus Kapitel 4.2.1, ist dies in Modul 1 zu identifizieren (siehe Kapitel 3.4). In der weiteren Durchführung der Heuristik kann aufgrund der unterschiedlichen Diversifizierung der beiden Operatoren (entspricht einer unterschiedlichen Schrittweite im Suchraum) ein Betriebskonzept erzeugt werden, das eine Menge von Linienrouten enthält, für die bereits eine Verletzung der Bedingungen erkannt wurde.

Um die Ergebnisse der Prüfungen der Bedingungen in den vorherigen Iterationsschritten der Heuristik einzubeziehen, sollte der Suchraum entsprechend angepasst werden. Die Mengen von Linienrouten, die eine Bedingung an die Lösung aus Kapitel 4.2.1 verletzen, sollten nicht für eine Ersetzung verwendet werden. Ein etablierter Ansatz zur Veränderung des Suchraums während der Durchführung der Heuristik ist die Nutzung einer Tabu-Liste (Talbi 2009, S. 140).

Es wird eine Tabu-Liste verwendet, deren Elemente Mengen von Linienrouten enthalten, die an mindestens einem Knoten oder einer Kante zu einer verletzten Bedingung führen. Dies entspricht einem Langzeitspeicher („Long-Term Memory“) und dient der Diversifizierung, da bereits bekannte, nicht-funktionsfähige Zustände nicht erneut erzeugt werden (Talbi 2009, S. 145 f.). Die Nutzung von Mengen von Linienrouten statt Betriebskonzepten in die Tabu-Liste geht mit einer stärkeren Diversifizierung einher.

Jedes Betriebskonzept, das eine Menge von Linienrouten enthält, die auch in der Tabu-Liste enthalten sind, ist nicht-funktionsfähig. Die Tabu-Liste verhindert somit nicht nur die

Erzeugung eines Betriebskonzepts, das bereits als nicht-funktionsfähig identifiziert wurde, sondern verhindert auch die Erzeugung von Betriebskonzepten, die aufgrund des bisher generierten Wissens nicht-funktionsfähig sind. Die Verwendung von Mengen von Linienrouten statt Betriebskonzepten ermöglicht somit eine bessere Nutzung des während der Durchführung der Heuristik generierten Wissens.

Durch die Nutzung von Mengen von Linienrouten statt Betriebskonzepten ist bei der Berücksichtigung von Bedingungen, die durch eine Erhöhung der Beförderungskapazität gelöst werden können, zusätzlich das „Nicht-Vorhandensein“ weiterer Linienrouten zu speichern. Dies kann beispielweise durch einen Bezug zu einem Knoten oder einer Kante erfolgen. Z. B. befindet sich in der Tabu-Liste eine Menge von Linienrouten LR_1 , da diese die Beförderungskapazität der Stammstrecke nicht einhalten. Ein Betriebskonzept, das LR_1 enthält, wird dann als nicht-funktionsfähig identifiziert, auch wenn es durch weitere Linienrouten die Beförderungskapazität einhält (siehe Abbildung 4-6). Daher ist für LR_1 ein Bezug zu den Kanten der Stammstrecke herzustellen. Der entsprechende Eintrag für LR_1 in der Tabu-Liste ist dann zu verstehen als: Ein Betriebskonzept ist nicht-funktionsfähig, wenn die Menge von Linienrouten in Kante X gleich LR_1 entspricht.

Ein zentraler Parameter einer Tabu-Liste ist die Anzahl der Elemente der Tabu-Liste (n_{Tabu}) (Talbi 2009, S. 143). Da eine Menge von Linienrouten eine Vielzahl an nicht-funktionsfähigen Betriebskonzepten repräsentieren kann, ermöglicht die Speicherung von Mengen von Linienrouten gegenüber der Speicherung von Betriebskonzepten – neben den oben genannten Vorteilen – auch einen geringeren Aufwand für die Speicherung der Daten und eine Reduzierung der Rechenzeit (Talbi 2009, S. 142).

Die Heuristik soll eine geringe Diversifizierung und eine ausgeprägte Intensivierung aufweisen (siehe weiter oben in diesem Kapitel). Durch Operator 2 und die Nutzung einer Tabu-Liste sind bereits Elemente zur Diversifizierung in der Heuristik enthalten. Die Etablierung einer weiteren Möglichkeit, die Heuristik während der Durchführung zu verändern und somit die Diversifizierung zu erhöhen, erscheint daher nicht erforderlich und wird nicht weiterverfolgt.

Zusammenfassend wird als Veränderung während der Durchführung der Heuristik die Nutzung einer Tabu-Liste festgelegt, um Mengen von Linienrouten, die an einem Knoten oder einer Kante die Bedingung (siehe Kapitel 4.2.1) verletzen, zu speichern.

Nicht-funktionsfähiges Betriebskonzept

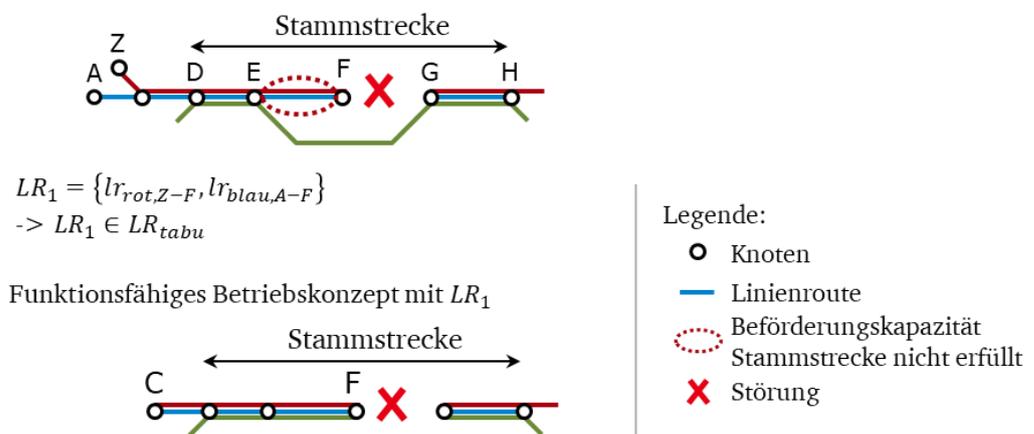


Abbildung 4-6: Beispiel für Probleme bei der Speicherung von Mengen von Linienrouten in der Tabu-Liste, die eine Bedingungen verletzen, die durch eine Erhöhung des Angebots gelöst werden kann

Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Eigenschaften der Heuristik bestimmt. Die Heuristik soll einer Verbesserungsheuristik entsprechen und Entscheidungsfindungen sollen deterministisch sein. Außerdem soll die Heuristik eine geringe Diversifizierung und somit eine ausgeprägte Intensivierung aufweisen.

Für die Anpassung von Betriebskonzepten wurden zwei Operatoren bestimmt: die Änderung einzelner Linienrouten (Operator 1) und die Änderung von Mengen von Linienrouten (Operator 2). Darüber hinaus wird die Heuristik eine Tabu-Liste nutzen. Die in diesem Kapitel festgelegten Eigenschaften bilden die Ausgangslage für die Spezifizierung der Heuristik in den nächsten Kapiteln.

4.2.4 Vorgehensweise

Für die Entwicklung der Algorithmen zur Anpassung des Betriebskonzepts wurde eine Heuristik ausgewählt und die Eigenschaften der Heuristik bestimmt. Bevor auf dieser Methode aufbauend die Entwicklung des Algorithmus von Modul 1 erfolgt, wird in diesem Kapitel 4.2.4 mit der Vorgehensweise der Aufbau des weiteren Kapitels 4 festgelegt.

In Kapitel 4.3 werden die Funktionalitäten der Heuristik entwickelt. Dafür sind zunächst die erforderlichen Funktionalitäten der Heuristik anhand der festgelegten Eigenschaften und Komponenten der Heuristik unter Beachtung relevanter Anforderungen zu bestimmen.

Darauffolgend wird in Kapitel 4.4 Modul 1 spezifiziert. Die Anpassung des Betriebskonzepts basiert auf den in Kapitel 4.3 entwickelten Funktionalitäten der Heuristik. Da Modul 1 das erste Modul der Systemarchitektur ist (siehe Kapitel 3.4), besteht keine Rückkopplung von Modul 1 zu einem anderen Modul.

4.3 Entwicklung der Funktionalitäten der Heuristik zur Anpassung des Betriebskonzepts

In Kapitel 4.2 wurde als Methode zur Lösung von Teilproblem I eine Heuristik ausgewählt und dessen Komponenten und Eigenschaften bestimmt. Ziel dieses Kapitels ist es, aus diesen Vorgaben zusammen mit den Anforderungen aus Kapitel 3.3 die erforderlichen Funktionalitäten der Heuristik zu entwickeln. Die entwickelten Funktionalitäten bilden die Grundlage für die darauf anschließende Spezifizierung von Modul 1.

Für die Entwicklung der Funktionalitäten der Heuristik werden die erforderlichen Funktionalitäten der Heuristik bestimmt (Kapitel 4.3.1) und anschließend entwickelt.

4.3.1 Erforderliche Funktionalitäten der Heuristik

$LR_{p'}$ ist anzupassen, wenn es nicht die in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Bedingungen erfüllt. Die erste Funktionalität ist daher eine Prüfung der Bedingungen aus Kapitel 4.2.1. Werden die Bedingungen nicht erfüllt, ist $LR_{p'}$ nicht-funktionsfähig.

Die Anpassung von $LR_{p'}$ erfolgt über die in Kapitel 4.2.3 bestimmten Operatoren der Heuristik. Die zweite Funktionalität ist die Erzeugung von Betriebskonzepten durch die Anwendung der Operatoren. Durch die Anwendung beider Operatoren und die möglichen Variationen innerhalb der Operatoren (siehe Kapitel 4.2.3) können mehrere angepasste Betriebskonzepte erzeugt werden.

Durch Operator 1 werden entsprechend Kapitel 4.2.3 elementare Konfliktlösungen zur Anpassung des Betriebskonzepts verwendet. Bei der Anwendung der elementaren Konfliktlösungen bestehen eine Vielzahl von Lösungsalternativen (z. B. mögliche Umleitungen bei der Elementarlösung „Änderung des Laufwegs“), die zusätzlich miteinander kombiniert werden können. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass die durch die Anwendung der elementaren Konfliktlösung erzeugten betrieblichen Maßnahmen machbar sind (z. B. erforderliche Signalisierung vorhanden, passende Bahnsteiglänge und -höhe). Dabei ist anzunehmen, dass während der Adaption eines SFP nicht alle erforderlichen Daten zur Prüfung der Machbarkeit von betrieblichen Maßnahmen vorliegen (siehe Kapitel 3.2).

Um dennoch eine Anpassung von Linienrouten durch Anwendung von elementaren Konfliktlösungen zu ermöglichen, können mögliche Anwendungen der elementaren Konfliktlösungen vorab bestimmt und geprüft werden (z. B. Bahnhof X für eine alternative Wende). Diese möglichen Anwendungen werden als elementare betriebliche Maßnahmen (ebM) bezeichnet. ebM stellen immer die Anwendung einer einzigen elementaren Konfliktlösung in G dar und sind somit Instanzen einer elementaren Konfliktlösung (siehe Abbildung 4-8).

ebM müssen nicht für jede Adaption erneut bestimmt werden, sondern können vorab festgelegt werden. Bei der Anwendung der ebM in den Operatoren kann die Prüfung erfolgen, ob die ebM in der aktuellen Infrastruktursituation anwendbar sind. Die Funktionalität der Bestimmung der ebM ist daher kein Bestandteil von Modul 1, sondern ein der Adaption vorgelagerter Funktionalität.

Nachdem durch die Operatoren Betriebskonzepte erzeugt wurden, ist zu entscheiden, ob die Anpassung von LR_p terminiert oder ob in einem weiteren Iterationsschritt weitere Betriebskonzepte erzeugt werden sollen. Dafür sind die erzeugten Betriebskonzepte zu bewerten.

Wenn die Heuristik nicht terminiert, werden entsprechend einer Verbesserungsheuristik (siehe Kapitel 4.2.3) die erzeugten Betriebskonzepte als Ausgangspunkte für die erneute Erzeugung von Betriebskonzepten ausgewählt. Die Iteration über die Funktionalitäten terminiert, wenn eine Abbruchbedingung erfüllt wird.

Ein Iterationsschritt der Heuristik umfasst jeweils die Anwendung der identifizierten Funktionalitäten (außer der vorgelagerten Bestimmung der elementaren betrieblichen Maßnahmen; siehe Abbildung 4-7). Innerhalb einer Funktionalität können verschiedene Funktionen bestehen, die beispielsweise für die Anwendung eines Operators in der Funktionalität „Erzeugung von Betriebskonzepten“ erforderlich sind.

Im weiteren Kapitel werden die identifizierten Funktionalitäten entwickelt:

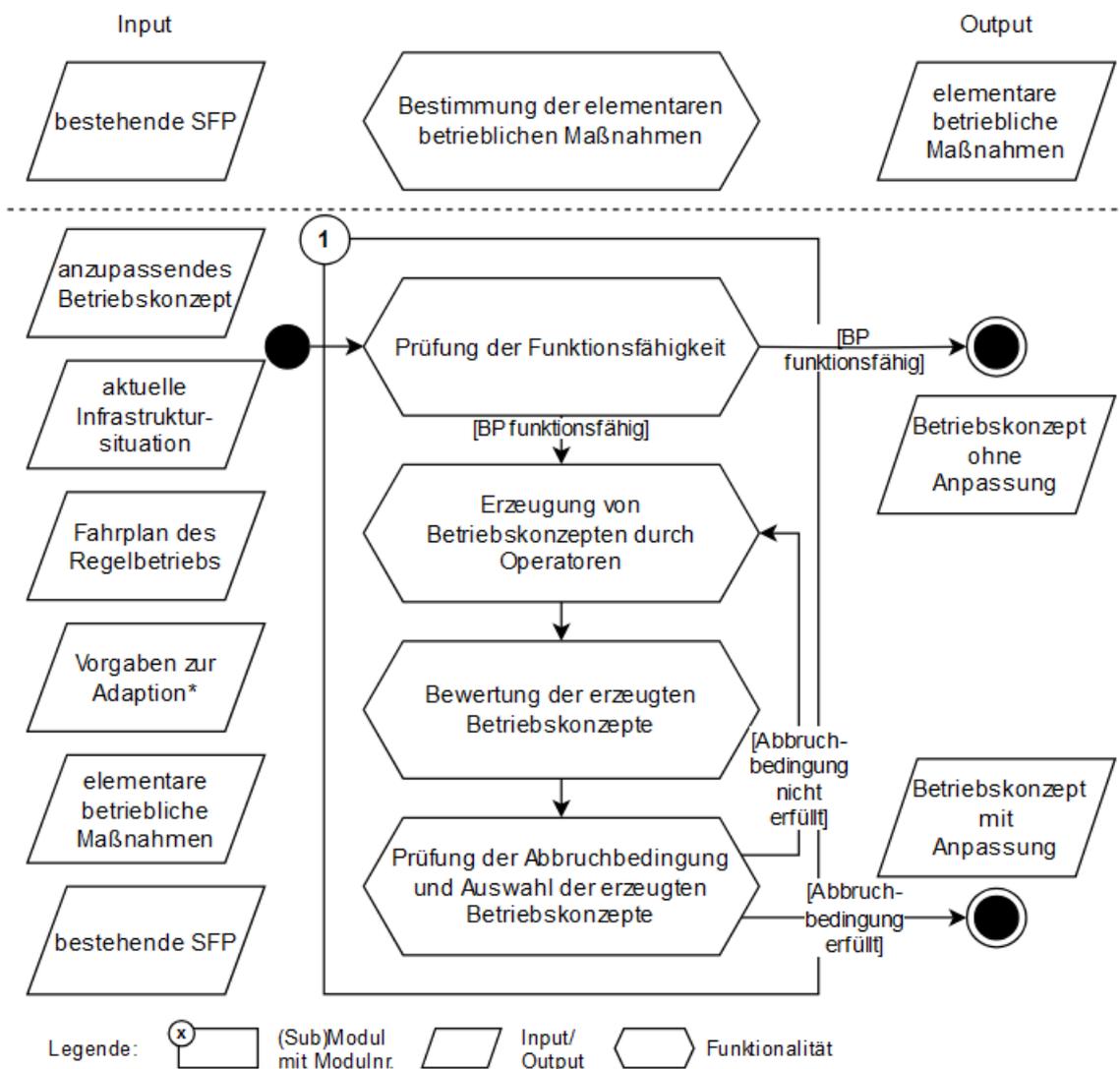
- Bestimmung der elementaren betrieblichen Maßnahmen (Kapitel 4.3.2)
- Prüfung der Funktionsfähigkeit (Kapitel 4.3.3)
- Erzeugung von Betriebskonzepten (Kapitel 4.3.4)
- Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte (Kapitel 4.3.5)
- Abbruchbedingung und Auswahl von Betriebskonzepten (Kapitel 4.3.6)

4.3.2 Bestimmung der elementaren betrieblichen Maßnahmen

Ziel des Kapitels ist die Entwicklung der Funktionalität „Bestimmung der elementaren betrieblichen Maßnahmen“. Die ebM dienen als Ausgangspunkt für die Anpassung des Betriebskonzepts (siehe Kapitel 4.3.1). ebM werden in Operator 1 für die Erzeugung von alternativen Linienrouten verwendet (siehe Kapitel 4.2.3). Für die Erzeugung von alternativen Linienrouten können mehrere ebM kombiniert werden oder es können ebM, die in der zu ersetzenden Linienroute angewendet werden, entfernt werden.

Für die Bestimmung der ebM können diese durch die Anwendung der elementaren Konfliktlösungen in einer ungestörten S-Bahn bestimmt werden. Dabei ist analog zur Planung von SFP (siehe Kapitel 2.4.2) die Machbarkeit der ebM zu prüfen.

Betriebliche Maßnahmen von Betriebskonzepten entsprechen einer ebM oder der Kombination mehrerer ebM (siehe Abbildung 4-8). Daher können ebM auch aus betrieblichen Maßnahmen bestehender Betriebskonzepte bestimmt werden.



* u.a. hinsichtlich minimalen Beförderungskapazitäten; Ausschlüssen von Linienrouten

Abbildung 4-7: Funktionalitäten und Ablauf eines Iterationsschritts der Heuristik zur Anpassung des Betriebskonzepts

Für ebM aus bestehenden SFP wurde bereits bei der Planung des SFP die Machbarkeit bestimmt und muss daher nicht erneut geprüft werden. Außerdem bestehen die Anforderungen, dass bei einer Änderung des SFP möglichst Maßnahmen verwendet werden, die bereits in anderen SFP enthalten sind (siehe Kapitel 3.3). Daher sollten die ebM vorwiegend aus den betrieblichen Maßnahmen der bestehenden SFP entnommen werden.

Für die Bestimmung von ebM aus betrieblichen Maßnahmen bestehender SFP ist zu prüfen, aus welchen ebM eine betriebliche Maßnahme besteht. Wie in Kapitel 3.4 festgelegt, werden in Modul 1 nur linienscharfe betriebliche Maßnahmen, die Laufweg und Takt betreffen, eingesetzt. Die betrieblichen Maßnahmen der bestehenden SFP sind daher auf ebM der folgenden drei elementaren Konfliktlösungen hin zu prüfen:

- Änderung der Taktzeit (bis hin zu Ausfall der Linienrouten)
- Änderung des Laufwegs (Umleitung)
- Änderung des Laufwegs (alternative Wende)

Für diese drei elementaren Konfliktlösungen wird die Bestimmung der ebM aus betrieblichen Maßnahmen im Weiteren dargestellt.

Da die Linien ggf. unterschiedliche Taktzeiten haben, ist eine ebM mit einer **Änderung der Taktzeit** immer nur für eine Linie gültig. Daher sind die bestehenden SFP darauf zu prüfen, ob eine Änderung der Taktzeit für eine Linie angewendet wird. Eine Ausnahme stellt die ebM „Ausfall der Linienroute“ dar. Für die ebM „Ausfall der Linienroute“ wird angenommen, dass diese für Linienrouten aller Linien anwendbar ist. Die ebM „Ausfall der Linienroute“ muss daher nicht aus bestehenden betrieblichen Maßnahmen bestimmt werden.

Die betrieblichen Maßnahmen der bestehenden SFP sind ebenfalls darauf zu prüfen, ob diese eine **Änderung des Laufwegs (Umleitung)** enthalten. Umleitungen bestehen aus einer Abfolge an Knoten und Kanten, die entfallen und einer Abfolge an Knoten und Kanten, die stattdessen bedient werden. Erstes und letztes Element der Abfolge ist immer eine Kante. Ein Beispiel einer ebM „Umleitung“ ist in Abbildung 4-9 mit der entfallenden Abfolge an Knoten und Kanten (blaue Punktlinie) und der stattdessen befahrenen Abfolge (blaue Strichlinie) dargestellt.

Da angenommen wird, dass die eingesetzten Züge eine ähnliche Charakteristik haben (siehe Kapitel 3.2), können ebM „Umleitung“ für die Linienrouten aller Linien verwendet werden.

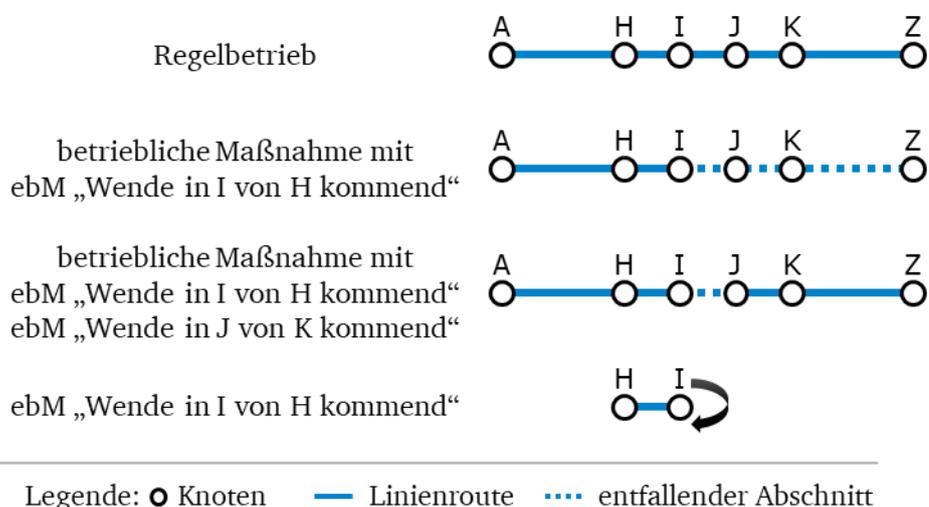
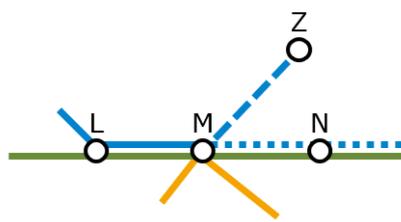


Abbildung 4-8: Beispiel für elementare betriebliche Maßnahmen (ebM)



Legende:

- Knoten
- Linienroute durch Wende
- ⋯ entfallender Abschnitt
- - - neu befahrener Abschnitt

Abbildung 4-10: Beispiel für die Bestimmung von ebM „Änderung des Laufwegs (alternative Wende)“

für die Erzeugung weiterer ebM dienen. Neben den ebM, die aus betrieblichen Maßnahmen der bestehenden SFP entnommen werden, können auch weitere ebM durch Anwendung von elementaren Konfliktlösungen im ungestörten S-Bahn-Netz erzeugt werden. Die Bestimmung der ebM kann vorab erfolgen und ist daher kein Teil von Modul 1.

4.3.3 Prüfung der Funktionsfähigkeit eines Betriebskonzepts

Ziel des Kapitels ist die Entwicklung der Funktionalität zur Prüfung der Funktionsfähigkeit des Betriebskonzepts. In der Problembeschreibung (siehe Kapitel 4.2.1) wurden aus den Anforderungen aus Kapitel 3.3 Bedingungen angeführt, die in Modul 1 für ein funktionsfähiges Betriebskonzept eingehalten werden müssen. Aufgabe der in diesem Kapitel entwickelten Funktionalität ist es, zu prüfen, ob ein Betriebskonzept die Bedingungen einhält.

Die in der Problembeschreibung aufgeführten Bedingungen sind (siehe Kapitel 4.2.1):

- Konfliktfreiheit bzgl. Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten auf Laufwegebene
- Einhaltung des Kapazitätskriteriums
- Bedingungen für konsistente Linien
- Bedingungen an den Liniennetzplan

Im weiteren Kapitel 4.3.3 wird die Funktionalität anhand der vier Bedingungen entwickelt.

Konfliktfreiheit bzgl. Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten auf Laufwegebene

Die erste Bedingung ist die Konfliktfreiheit bzgl. Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten auf Laufwegebene. Ein Infrastrukturverfügbarkeitskonflikt besteht, wenn ein Zug entsprechend dem Fahrplan ein Infrastrukturelement belegen soll, das nicht oder nicht in dem erforderlichen Zustand verfügbar ist (Pferdmenges und Schaefer 1995, S. 175). Entsprechend Kapitel 3.4 sind in Modul 1 nur Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte zu berücksichtigen, die zwingend eine Änderung des Laufwegs erfordern (Laufwegebene).

Ein Infrastrukturverfügbarkeitskonflikt auf Laufwegebene besteht immer, wenn eine Kante oder ein Knoten eines Laufwegs nicht verfügbar ist. Wenn nur einzelne Infrastrukturelemente einer Kante oder eines Knoten nicht verfügbar sind, ist zu prüfen, ob der Laufweg weiterhin machbar ist. Für diese Prüfung wird zwischen Knoten und Kante unterschieden.

Sind Infrastrukturelemente eines **Knotens** nicht verfügbar, kann dies für den Laufweg relevant sein, wenn folgende Infrastrukturelemente des Knotens betroffen sind:

- eine Fahrmöglichkeit (eine Verbindung durch mindestens einen Fahrweg zwischen Streckengleis und Teilgleisgruppe oder Streckengleis und Streckengleis)
- eine Teilgleisgruppe

In Knoten, in denen eine Fahrmöglichkeit oder eine Teilgleisgruppe nicht verfügbar ist, ist eine Änderung des Laufwegs zwingend erforderlich, wenn die benötigte Kanten-Kanten-Relation nicht mehr verfügbar ist.

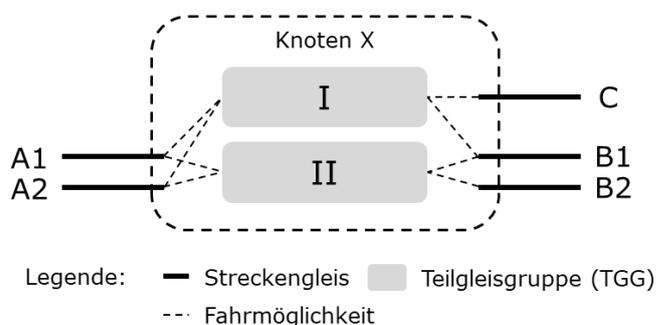
Abbildung 4-11 zeigt beispielhaft einen Knoten X mit Kanten zu den Knoten A, B und C. Besteht eine Linienroute, dessen Laufweg die Knotenabfolge A – X, X – C enthält, dann ist zwingend eine Anpassung des Laufwegs erforderlich, wenn z. B. Fahrmöglichkeit I – C oder Teilgleisgruppe I nicht verfügbar ist. Ist dagegen Fahrmöglichkeit A2 – I nicht verfügbar, könnte der Laufweg durch Nutzung des Gegengleises zusammen mit der Fahrmöglichkeit A1 – I aufrechterhalten werden.

Bei einer **Kante** kann eins der beiden Streckengleise gesperrt sein. Zur Prüfung, ob das verbleibende Streckengleis genutzt werden kann, sind die angrenzenden Knoten einzubeziehen. In den Knoten ist zu prüfen, ob die erforderlichen Kanten-Kanten-Relationen weiterhin bestehen. Sind die erforderlichen Kanten-Kanten-Relationen nicht vorhanden, besteht ein Infrastrukturverfügbarkeitskonflikt auf Laufwegebene.

Auch wenn die erforderlichen Relationen verfügbar sind, kommt es ggf. zu langen Fahrten auf dem Gegengleis (siehe Abbildung 4-12). Lange Fahrten auf dem Gegengleis haben bei weiterhin im Richtungsgleis stattfindenden Fahrten einen hohen Kapazitätsverbrauch. Dieser Kapazitätsverbrauch ist daher bei der Prüfung des Kapazitätskriteriums zu berücksichtigen. Da gerade in der dicht befahrenen Stammstrecke ein hoher Kapazitätsverbrauch zu vermeiden ist, sollten Vorgaben für die Nutzung des Gegengleises gemacht werden, z. B., dass die Nutzung des Gegengleises in der Stammstrecke nicht länger als zwischen zwei benachbarten Bahnhöfen mit Überleitverbindung stattfinden soll (wenn nicht anders durch das ausgewählte SFP vorgegeben). Dies ist bei der Prüfung der erforderlichen Relationen zu berücksichtigen. Außerdem ist zu prüfen, ob in den Knoten mit Verkehrshalt weiterhin ein Verkehrshalt möglich ist.

Weist eine Linienroute mehrere Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte auf, ist die Linienroute so zu verändern, dass alle Knoten und Kanten mit Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten nicht mehr enthalten sind. Daher können Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte einer Linienroute zusammengefasst werden, wenn diese sich auf benachbarte Knoten und Kanten beziehen.

Die festgelegten Bedingungen zur Konfliktfreiheit bzgl. Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten auf Laufwegebene werden im Weiteren als Bedingungen des Typs „Infrastrukturverfügbarkeit“ bezeichnet.



Matrix der Relationen für Knoten X

	A	B	C
A	I,II (W)	I*,II	I
B	I,II	I*,II (W)	I (W)
C	I	I (W)	I (W)

I, II: Mögliche TGG der Relation
 W: Fahrtrichtungswechsel erforderlich
 * : nur bei Gleiswechselbetrieb gültig

Abbildung 4-11: Beispiel zur Verdeutlichung des Zusammenhangs von nicht verfügbaren Infrastrukturelementen eines Knotens und Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten auf Laufwegebene

Einhaltung Kapazitätskriterium

Eine weitere Bedingung ist die Einhaltung eines Kapazitätskriteriums (siehe Kapitel 4.2.1). Das Kapazitätskriterium ist sowohl auf Knoten als auch Kanten anzuwenden und dient der Prüfung, ob ein stabiler Betrieb durchführbar ist (siehe Kapitel 3.4).

Chu (2014) hat gezeigt, dass bei der Anwendung von SFP die Gleisgruppen der Wendebahnhöfe kapazitätskritische Infrastrukturelemente sind. Außerdem wurde zuvor in diesem Kapitel hergeleitet, dass es in Kanten, bei denen durch die aktuelle Infrastruktursituation nur eins der beiden Streckengleise verfügbar ist, zu erhöhten Kapazitätsverbräuchen auf dem verbleibenden Streckengleis kommen kann. Das Kapazitätskriterium wird deshalb auf diese beiden Infrastrukturelemente angewendet.

Es bestehen eine Vielzahl von Kapazitätskriterien, die u. a. in fahrplanabhängige und fahrplanunabhängige Kriterien eingeteilt werden können (DB Ril 405.0104, S. 2). Einerseits wird eine Störungssituation allein durch ein fahrplanunabhängiges Kriterium nur unzureichend abgedeckt, da die Reihenfolge der Ankünfte in Abhängigkeit zu dem Fahrplan des Regelelebetriebs stehen. Andererseits stehen Fahrplandaten anderer EVU nicht vollständig zur Verfügung (siehe Kapitel 3.2). Außerdem ist Zweck der Anwendung des Kapazitätskriteriums in Modul 1 eine Abschätzung der Kapazitätsauslastung, um sicherzustellen, dass ein stabiler Betrieb möglich ist (siehe Kapitel 3.4). Eine Berücksichtigung von Belegungskonflikten innerhalb des S-Bahn-Netzes für die stabile Phase und die Einschwingphase findet im weiteren Verlauf der Adaption des SFPs statt (siehe Kapitel 3.4). Da die Prüfung des Kapazitätskriteriums einer Abschätzung dient und die Fahrplandaten nicht vollständig zur Verfügung stehen, wird als Bedingung für Modul 1 die Einhaltung eines fahrplanunabhängigen Kapazitätskriteriums ausgewählt.

Für die fahrplanunabhängige Ermittlung eines Kapazitätskriteriums können konstruktive, analytische und simulative Verfahren verwendet werden (Nießen 2023, S. 270). Für die Anwendung eines simulativen Verfahrens ist ein Fahrplan erforderlich (Pachl 2022, S. 166 ff.), weshalb sich simulative Verfahren für den genannten Einsatzzweck nicht eignen.

Nach Nießen (2023, S. 271) sollen für die fahrplanunabhängige Ermittlung eines Kapazitätskriteriums analytische Methoden angewendet werden. Wesentliche Kriterien sind dabei die Wartezeit oder die Wartewahrscheinlichkeit (Nießen 2023, S. 284). Analytische Methoden scheinen für das vorliegende Problem nicht geeignet zu sein, da zwar kein Fahrplan für eine Berechnung verwendet werden kann, die Reihenfolgen und Ankunftsabstände aber

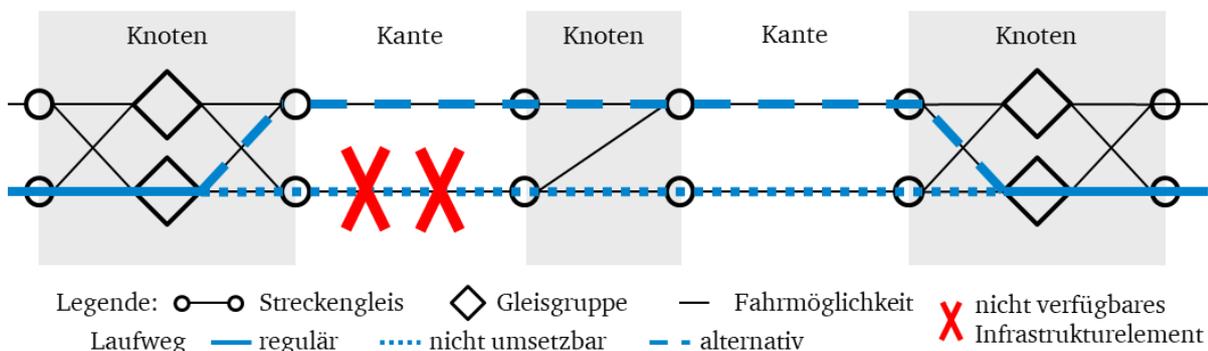


Abbildung 4-12: Beispiel zur Verdeutlichung des Zusammenhangs von einem nicht verfügbaren Streckengleis einer Kante und Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte auf Laufwegebene

dennoch durch den Fahrplan vorgegeben sind. Auch ist der Fahrplan, wie oben beschrieben, nicht konfliktfrei. Unabhängig von diesen Einschränkungen besteht außerdem kein anerkanntes Verfahren für die analytische Ermittlung von außerplanmäßigen Wartezeiten von Gleisgruppen (Nießen 2023, S. 302). Die Entwicklung eines solchen Verfahrens liegt nicht im Rahmen dieser Arbeit.

Für die Erstellung von SFP besteht mit dem Ansatz von Brauner und Oetting (2019) ein konstruktiver Ansatz zur Prüfung der Kapazitätsauslastung von Infrastrukturelementen anhand des Belegungsgrades. Dieser Ansatz ermöglicht eine fahrplanunabhängige Abschätzung der Kapazitätsauslastung und erfüllt die Anforderung nach Kontinuität. Da die Anwendung von simulativen und analytischen Methoden nicht geeignet erscheinen und der Ansatz von Brauner und Oetting (2019) eine fahrplanunabhängige Abschätzung der Kapazitätsauslastung ermöglicht, wird der Ansatz von Brauner und Oetting (2019) verwendet. Im Weiteren werden erforderliche Modifikationen des Ansatzes identifiziert und diskutiert.

In dem Ansatz von Brauner und Oetting (2019) erfolgt eine Ermittlung des Belegungsgrads einer Gleisgruppe für jedes Gleis. In der Planung des SFP anhand des Ansatzes von Brauner und Oetting (2019) ist dafür eine Aufteilung der Zugfahrten auf die einzelnen Gleise anhand von vorhandenen Datenquellen oder durch manuelle Eingaben erforderlich. Diese bereits in der Planung von SFP erforderliche Aufteilung kann für Modul 1 verwendet werden. Bei Abweichungen der Infrastruktursituation oder des Betriebskonzepts und damit einhergehenden alternativen Lauf- oder Fahrwegen kann diese Aufteilung nicht mehr genutzt werden. In diesem Fall ist eine anderweitige Aufteilung der Zugfahrten vorzunehmen.

Bei einer Aufteilung der Zugfahrten eines Knotens können alternative Fahrwege zugewiesen bekommen:

- entweder Zugfahrten von Linienrouten, die nicht auf dem im Betriebskonzept des ausgewählten SFP vorgesehenen Fahrweg verkehren können oder
- alle Zugfahrten des Knotens, unabhängig davon, ob dieses auf dem im Betriebskonzept des ausgewählten SFP vorgesehenen Fahrweg verkehren können oder nicht.

Die Aufteilung an sich kann erfolgen durch

- eine manuelle Vorgabe,
- eine gleichmäßige Verteilung auf alle alternativen Fahrwege oder
- einen für die Aufteilung entwickelten Algorithmus.

Die Aufteilung kann als ein spezieller Fall des Lastverteilungsproblems angesehen werden. Somit ist anzunehmen, dass es sich um ein NP-schweres Problem handelt (siehe Kleinberg und Tardos 2006, S. 600).

Ziel der Aufteilung der Zugfahrten ist eine Abschätzung, ob die Kapazität eines Knotens überschritten wird. Entsprechend der Anforderung nach geringer Änderung sollten Linienrouten, die auf dem im Betriebskonzept des ausgewählten SFP vorgesehenen Fahrweg verkehren können, dort weiterhin verkehren. Daher sollten nur Linienrouten, die nicht auf dem im Betriebskonzept des ausgewählten SFP vorgesehenen Fahrweg verkehren alternative Fahrwege zugewiesen bekommen. Dadurch erfolgt auch eine Reduzierung der Linienrouten, die für die Aufteilung zu berücksichtigten sind, was zu einer geringeren Problemgröße führt.

Eine manuelle Vorgabe der Aufteilung der Zugfahrten sollte aufgrund der Anforderung, dass manueller Input vermieden werden soll, nicht erfolgen. Entsprechend der Anforderung nach Nachvollziehbarkeit durch den Kunden, sollten die Zugfahrten einer Linie in eine Richtung den gleichen Fahrweg haben. Daher sollte keine gleichmäßige Aufteilung der Fahrtypen einer Linie in eine Richtung erfolgen, sondern ein alternativer Fahrweg sollte für alle Zugfahrten einer Linie in eine Richtung ausgewählt werden.

Da keine Aufteilung durch eine manuelle Vorgabe oder gleichmäßig auf alle alternativen Fahrwege erfolgen soll, wird für die Aufteilung der Zugfahrten innerhalb des Knotens ein Algorithmus entwickelt. Der Algorithmus soll für Linienrouten, die nicht auf dem im Betriebskonzept des ausgewählten SFP vorgesehenen Fahrweg verkehren können, einen alternativen Fahrweg auswählen. Außerdem ist aufgrund der Anforderung nach Nachvollziehbarkeit anzustreben, dass die Abschätzung möglichst mit dem Vorgehen von Disponenten übereinstimmt.

Die Problemgröße des durch den Algorithmus zu lösenden Problems ist erstens eingeschränkt durch die Vorgaben, dass nur Linienrouten, die nicht auf dem im Betriebskonzept des ausgewählten SFP vorgesehenen Fahrweg verkehren, alternative Fahrwege zugewiesen bekommen. Zweitens soll die Auswahl eines alternativen Fahrwegs für alle Zugfahrten einer Linie in eine Richtung erfolgen. Somit kann angenommen werden, dass die Problemgröße bei einer geringen Anzahl von Linienrouten oder Bahnsteiggleisen mit einem exakten Algorithmus lösbar ist. So gibt es z. B. für eine Richtung bei fünf unterschiedlichen Linien und vier Bahnsteiggleisen $5^4 = 625$ mögliche Lösungen. Die Aufteilung der Zugfahrten ist aber nur für die Prüfung, ob die Kapazitätsauslastung ausreichend ist, erforderlich und kann bei der Entwicklung des Fahrplankonzepts für die stabile Phase noch verändert werden. Daher kann für eine möglichst schnelle Lösungsbereitstellung auch eine für Lastverteilungsprobleme etablierte Heuristik eingesetzt werden (siehe z. B. Kleinberg und Tardos 2006, S. 600 ff.).

Die Bedingungen zur Einhaltung des fahrplanunabhängigen Kapazitätskriteriums wird im Weiteren als Bedingung des Typs „Kapazitätsverbrauch“ bezeichnet.

Bedingungen für konsistente Linien

Die dritte Bedingung ist die Sicherstellung von konsistenten Linien. Die Konsistenz einer Linie richtet sich nach den in Kapitel 3.2 getroffenen inhaltlichen Abgrenzungen und den in Kapitel 3.3 vorgegebenen Anforderungen:

- Eine Linie bedient maximal zwei Netzäste.
- Innerhalb des Kernbereichs hat eine Linie maximal einen Laufweg (es bestehen keine Verzweigungen der Linie oder parallele Laufwege).
- Die Schnittmenge der Laufwege zweier Zugfahrten einer Linie ist leer oder genau eine zusammenhängende Abfolge von Knoten und Kanten (keine Verzweigung und Wiedervereinigung von Laufwegen).
- Netzäste werden nur durch die Linien bedient, die diese auch im regulären Betrieb bedienen.
- Im Kernbereich ist kein Pendelverkehr vorgesehen.

Regelbetrieb



Kombinationen an Linienrouten der blauen Linien, bei denen Bedingungen nicht erfüllt sind:

Bedingung K1



es wird ein Netzast bedient, der nicht im Regelbetrieb bedient wird

Bedingung K2



Menge an Knoten und Kanten bildet einen Zyklus

Legende:

○ Knoten

— Linienroute

■ Kernbereich

Abbildung 4-13: Beispiel für Linien, die Bedingung K1 und Bedingung K2 nicht erfüllen.

Aus diesen Vorgaben ergeben sich folgende Bedingungen für konsistente Linien im Betriebskonzept von SFP:

Bedingung K1: Die Linienroute einer Linie darf nur die maximal zwei im Regelbetrieb bedienten Netzäste bedienen.

Bedingung K2: Die Menge von Knoten und Kanten, die durch alle Linienrouten einer Linie gebildet wird, darf keinen Zyklus enthalten.

Ein Beispiel für Linien, die die Bedingungen K1 und K2 nicht erfüllen, bietet Abbildung 4-13.

Entsprechend der Anforderung, dass keine Pendelfahrten im Kernbereich erfolgen sollen und da eine Linie maximal zwei Netzäste bedient (siehe Kapitel 4.2.1), darf eine Linie im Kernbereich aus maximal zwei Mengen von Knoten und Kanten bestehen. Die Mengen von Knoten und Kanten müssen eine zusammenhängende Abfolge an Knoten und Kanten darstellen und dürfen keine Überschneidungen aufweisen.

Bedingung K3: Die Knoten und Kanten innerhalb des Kernbereichs aller Linienrouten einer Linie bilden maximal zwei Mengen von Knoten und Kanten, die jeweils eine zusammenhängende Abfolge an Knoten und Kanten darstellen und keine Überschneidung aufweisen.

Bestehen für eine Linie zwei Mengen von Knoten und Kanten, folgt aus Bedingung K3, dass diese nicht mit dem gleichen Netzast verbunden sein können. Wird eine Pendelfahrt als eine Linienroute ohne Bedienung eines Netzastes definiert, wird Bedingung K2 und die Anforderung, dass im Kernbereich kein Pendelverkehr vorgesehen ist, erfüllt, wenn jede Linienroute mindestens einen der im Regelbetrieb bedienten Netzäste bedient.

Bedingung K4: Eine Linienroute bedient mindestens einen der im Regelbetrieb bedienten Netzäste.

Abbildung 4-14 zeigt jeweils ein Beispiel für Linien, die die Bedingungen K3 und K4 nicht erfüllen.

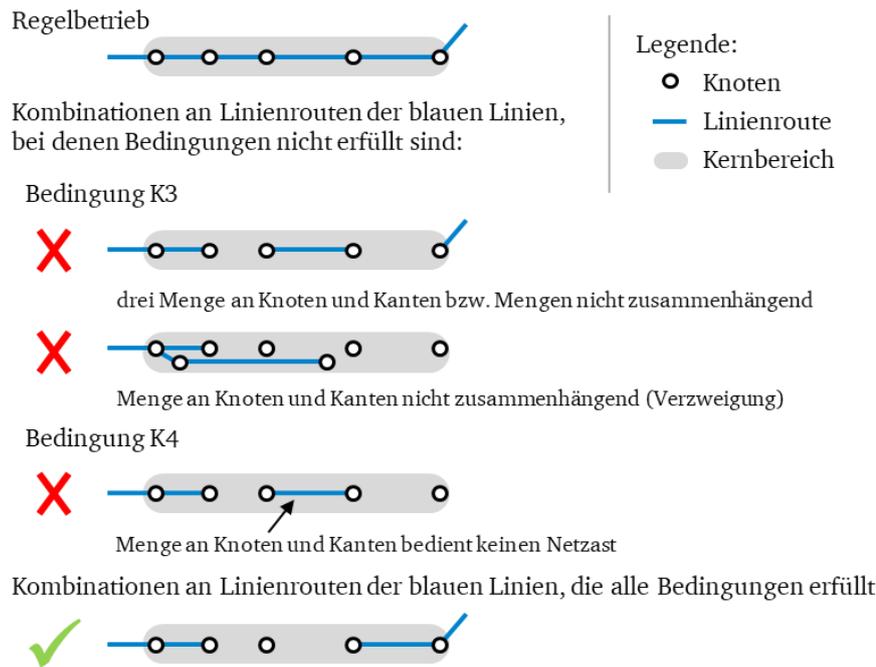


Abbildung 4-14: Beispiel für Linien, die Bedingung K3 und Bedingung K4 nicht erfüllen.

In den Netzästen oder im Übergang vom Kernbereich in einen Netzast können Linienrouten auftreten, die als Pendelverkehr angesehen werden können. Falls solche Linienrouten nicht erwünscht sind, sind zunächst Kriterien für Pendelverkehre zu bestimmen (z. B. Mindestlänge der Linienroute oder Kriterien für die (Anzahl der) bedienten Verkehrshalte) und die entsprechenden Linienrouten bei der Erzeugung von Betriebskonzepten auszuschließen. Alternativ können entsprechende Linienrouten durch die Disponenten manuell ausgeschlossen bzw. Ausnahmen vorgegeben werden. Da entsprechend den Anforderungen nur Pendelverkehre im Kernbereich ausgeschlossen werden und dafür ein Ansatz bereitgestellt wurde, erfolgt keine weitere Bestimmung der Kriterien für Pendelverkehre.

Die Bedingungen für konsistente Linien werden im Weiteren als Bedingungen des Typs „Konsistente Linien“ bezeichnet. Da die Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“ nicht von der aktuellen Infrastruktur- oder Betriebssituation abhängig sind, kann davon ausgegangen werden, dass die bestehenden SFP und somit auch das Betriebskonzept des ausgewählten SFP keine dieser Bedingungen verletzen. Die Bedingungen sind somit nur bei einer Anpassung des Betriebskonzepts zu prüfen oder die Anpassung ist so zu gestalten, dass die Bedingungen nicht verletzt werden. Da sich die Bedingungen K1 bis K4 auf eine Linie beziehen, kann das resultierende Betriebskonzept die Bedingungen nicht verletzen, wenn bei der Erzeugung des Betriebskonzepts sichergestellt wird, dass dies nur mit konsistenten Linien erfolgt.

Bedingungen an den Liniennetzplan

Zuletzt werden die Bedingungen für Liniennetzpläne betrachtet. Bezüglich des Liniennetzplans bestehen die folgenden Anforderungen (siehe Kapitel 3.3):

- Die Bedienung der Netzäste wird gewährleistet.
- Die Bedienung der Stammstrecke erfolgt nur bei Gewährleistung einer vorgegebenen Beförderungskapazität.
- Bestehende Vorgaben zur maximalen Anzahl von Zügen je Zeiteinheit für Strecken (z. B. für Umleitungsstrecken) werden eingehalten.

Bedingung K4 des Typs „Konsistente Linien“ stellt sicher, dass eine Linienroute mindestens einen Netzast bedient. Durch diese Bedingung wird auch die Anforderung, dass die Bedienung der Netzäste weiterhin gewährleistet werden sollen, ausreichend unterstützt. Aus den zwei verbleibenden Anforderungen folgen die beiden Bedingungen:

Bedingung L1: Die Bedienung der Stammstrecke muss eine vorgegebene Mindestbeförderungskapazität erfüllen.

Bedingung L2: Vorgaben zur maximalen Anzahl von Zügen je Zeiteinheit für Strecken müssen eingehalten werden.

Aus Bedingung L2 kann eine weitere Bedingung vom Typ „Konsistente Linien“ hergeleitet werden, da auch keine einzelne Linienroute die vorhandenen Vorgaben zur maximalen Anzahl von Zügen je Zeiteinheit für Strecken überschreiten darf.

Bedingung K5: Eine Linienroute bzw. eine Linie darf Vorgaben zur maximalen Anzahl von Zügen je Zeiteinheit für Strecken nicht überschreiten.

Bedingung K5 ermöglicht auch die Vorgaben von minimalen Taktzeiten für Linien.

Die Bedingungen an den Liniennetzplan werden im Weiteren als Bedingungen des Typs „Liniennetzplan“ bezeichnet. Da die Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“ ebenso wie die Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“ nicht von der aktuellen Infrastruktur- oder Betriebssituation abhängig sind, gelten die gleichen Schlussfolgerungen wie für die Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“. So kann davon ausgegangen werden, dass bestehende SFP und somit auch das Betriebskonzept des ausgewählten SFP keine dieser Bedingungen verletzen. Außerdem sind die Bedingungen nur bei einer Anpassung des Betriebskonzepts zu prüfen oder die Anpassung ist so zu gestalten, dass die Bedingungen nicht verletzt werden.

Da sich die Bedingung aber - anders als die Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“ - nicht nur auf eine Linie beziehen, sondern auf die Kombination der Linien im Liniennetzplan, können die Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“ erst für das resultierende Betriebskonzept geprüft werden und nicht bereits bei der Bestimmung der alternativen Linienrouten.

Zusammenfassung

Ziel des Kapitels 4.3.2 war die Entwicklung der Funktionalität zur Prüfung der Funktionsfähigkeit des Betriebskonzepts.

Entwickelt wurden Bedingungen zur Konfliktfreiheit bzgl. Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten auf Laufwegebene (Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“). Ein Infrastrukturverfügbarkeitskonflikt auf Laufwegebene besteht immer, wenn eine Kante oder ein Knoten eines Laufwegs nicht verfügbar ist. Wenn eine Kante oder ein Knoten nur teilweise nicht verfügbar ist, ist zu prüfen, ob die Laufwege weiterhin machbar sind.

Daneben wurde eine Bedingung zur Einhaltung des fahrplanunabhängigen Kapazitätskriteriums (Typ „Kapazitätsverbrauch“) hergeleitet. Dafür erfolgt eine Prüfung der Kapazitätsauslastung von Knoten und Kanten anhand des Belegungsgrades durch den bestehenden Ansatz von Brauner und Oetting (2019). Zur Anwendung des Ansatzes wird für die Bestimmung der Fahrwege im Knoten für Zugfahrten, die nicht auf dem im Betriebskonzept des ausgewählten SFP vorgesehenen Fahrweg verkehren können, ein Algorithmus verwendet.

Zusätzlich wurden fünf Bedingungen für konsistente Linien (Typ „Konsistente Linien“) und zwei Bedingungen an den Liniennetzplan (Typ „Liniennetzplan“) bestimmt. Die in diesem Kapitel entwickelten Inhalte zur Prüfung der Funktionsfähigkeit von Betriebskonzepten werden in Kapitel 4.4 als ein Teil von Modul 1 spezifiziert.

4.3.4 Erzeugung von Betriebskonzepten

Die dritte zu entwickelnde Funktionalität ist die Erzeugung von Betriebskonzepten. Die Erzeugung von Betriebskonzepten erfolgt durch die in Kapitel 4.2.3 bestimmten Operatoren der Heuristik. Ziel des Kapitels ist die Entwicklung der Funktionalität zur Erzeugung von Betriebskonzepten durch die Anwendung der Operatoren.

In Kapitel 4.2.3 wurden zwei Operatoren hergeleitet (Operator 1: Änderung einzelner Linienrouten und Operator 2: Änderung von Mengen von Linienrouten). Für die Entwicklung der Funktionalität wird der Ablauf der Anwendung der beiden Operatoren und die dabei erforderlichen Funktionen bestimmt. Anschließend werden die identifizierten Funktionen unter Berücksichtigung der Anforderungen aus Kapitel 3.3 und der in Kapitel 4.2.3 festgelegten Eigenschaften der Heuristik entwickelt.

Ablauf und Funktionen der Operatoren

Der Ablauf von Operator 1 und Operator 2 wurde bereits in Abbildung 4-2 bzw. Abbildung 4-4 dargestellt. Daher werden hier nur Ergänzungen und Konkretisierungen beschrieben.

In einem Iterationsschritt können mehrere Betriebskonzepte angepasst werden. Für jedes Betriebskonzept bk sind alle Funktionen des Iterationsschritts separat zu durchlaufen. In der ersten Funktion wird eine Menge der zu ersetzenden Linienrouten von bk ($LR_{bk,er}$) bestimmt.

Für Operator 1 werden alternative Linienrouten erzeugt, in dem die zu ersetzenden Linienrouten aus $LR_{bk,er}$ unter Anwendung von ebM geändert werden (siehe Kapitel 4.2.3). Somit werden Mengen von alternativen Linienrouten $LR_{a,y}$ je Element y aus $LR_{bk,er}$ erzeugt. Die Erzeugung von alternativen Linienrouten erfolgt in der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“.

Die Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“ sollen bereits bei der Erzeugung von Betriebskonzepten sichergestellt werden (siehe Kapitel 4.3.3). Zur Sicherstellung von Bedingung K1 ist daher keine ebM „Änderung des Laufwegs“, durch die ein anderer Netzzast bedient wird, anzuwenden. Mit Bezug auf Bedingung K4 ist darauf zu achten, dass jede Linienroute mindestens einen Netzzast bedient. Für Bedingung K5 sind die Vorgaben zur maximalen Anzahl von Zügen für die erzeugten Linienrouten zu prüfen.

Die Bedingungen K2, K3 und K5 vom Typ „Konsistente Linien“ sind nicht nur für eine Linienroute, sondern auch hinsichtlich der Kombination der Linienrouten in einer Linie zu prüfen. Bei der Ersetzung der zu ersetzenden Linienrouten kann ggf. eine Kombination an alternativen Linienrouten angewendet werden (z. B. zwei Linienrouten mit ebM „alternative Wende“). Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass es bei der Ersetzung nicht zu Inkonsistenzen innerhalb der Linien mit Linienrouten, die nicht verändert werden, kommt (beispielsweise, wenn im Betriebskonzept für eine Linie in zwei Linienrouten mit einer ebM „alternative Wende“ aufgeteilt ist und eine der Linienrouten wird mit einer Linienroute mit einer ebM „Umleitung“ ersetzt (siehe Abbildung 4-21)). Daher sind sowohl die zu ersetzenden als auch die alternativen Linienrouten so zusammenzufassen, dass es bei der Ersetzung zu keinen der in Kapitel 4.3.3

bestimmten Bedingungen K2, K3 oder K5 vom Typ „Konsistente Linien“ kommt. Diese Zusammenfassung erfolgt in der Funktion „Zusammenfassung von Linienrouten“.

Da für Operator 1 verschiedene alternative Linienrouten für die Ersetzung einer zu ersetzenden Linienroute verwendet werden können, ist eine alternative Linienroute für die Ersetzung auszuwählen. Für die Auswahl ist eine Bewertung der alternativen Linienrouten erforderlich (Funktion „Bewertung alternativer Linienrouten“).

Abschließend folgt für Operator 1 die Erzeugung angepasster Betriebskonzepte durch die Ersetzung der zu ersetzenden Linienrouten mit den erzeugten und bewerteten alternativen Linienrouten. Die erzeugten Betriebskonzepte werden hinsichtlich der Verletzung der Tabu-Liste geprüft (siehe Kapitel 4.2.3). Erzeugung und Prüfung der Betriebskonzepte erfolgt in der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten durch Ersetzung von Linienrouten“.

In Operator 2 werden aus bestehenden Betriebskonzepten und aus funktionsfähigen Betriebskonzepten aus vorherigen Iterationsschritten von Modul 1 alternative Mengen von Linienrouten bestimmt, die die Linienrouten aus $LR_{bk,er}$ ersetzen sollen (siehe Kapitel 4.2.3). Da anders als bei Operator 1 die Anzahl der alternativen Mengen von Linienrouten durch die Verwendung bestehender bzw. bereits erzeugter Betriebskonzepte deutlich geringer ist, wird erwartet, dass keine Bewertung und Auswahl der alternativen Mengen von Linienrouten erforderlich ist. Somit können die bestimmten alternativen Mengen von Linienrouten direkt für die Erzeugung von Betriebskonzepten durch Ersetzung verwendet werden.

Die erzeugten Betriebskonzepte werden hinsichtlich der Tabu-Liste und verletzten Bedingungen geprüft. Die Bestimmung von alternativen Mengen von Linienrouten und die Ersetzung für Operator 2 erfolgt in der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten mit alternativen Mengen von Linienrouten“.

Für Operator 1 und Operator 2 sind somit sechs Funktionen erforderlich, wobei die erste Funktion für Operator 1 und Operator 2 gleich ist. Die Funktionen sind:

- Funktion „Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten“ (Operator 1 und Operator 2)
- Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ (Operator 1)
- Funktion „Zusammenfassung von Linienrouten“ (Operator 1)
- Funktion „Bewertung alternativer Linienrouten“ (Operator 1)
- Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten durch Ersetzung von Linienrouten“ (Operator 1)
- Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten mit alternativen Mengen von Linienrouten“ (Operator 2)

Abbildung 4-15 zeigt aufbauend auf Abbildung 4-2 und Abbildung 4-4 den Aufbau der Funktionalität „Erzeugung von Betriebskonzepten durch Operatoren“ und somit den konkretisierten Ablauf von Operator 1 und Operator 2. Nachdem die sechs erforderlichen Funktionen für die Anwendung der beiden Operatoren bestimmt wurden, werden diese im Weiteren entwickelt.

Funktion: Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten

Die erste Funktion ist die Bestimmung von $LR_{bk,er}$. Ein Ziel der Anpassung des Betriebskonzepts ist, ein funktionsfähiges Betriebskonzept zu erhalten. Daher sind Linienrouten zu ersetzen, die zu einer Verletzung der in Kapitel 4.3.3 festgelegten Bedingung führen.

Unterschieden wird zwischen den folgenden Bedingungen (siehe Kapitel 4.3.3):

- Konfliktfreiheit bzgl. Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten auf Laufwegebene (Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“)
- Einhaltung des fahrplanunabhängigen Kapazitätskriteriums (Typ „Kapazitätsverbrauch“)
- Bedingungen für konsistente Linien (Typ „Konsistente Linien“)
- Bedingungen an den Liniennetzplan (Typ „Liniennetzplan“)

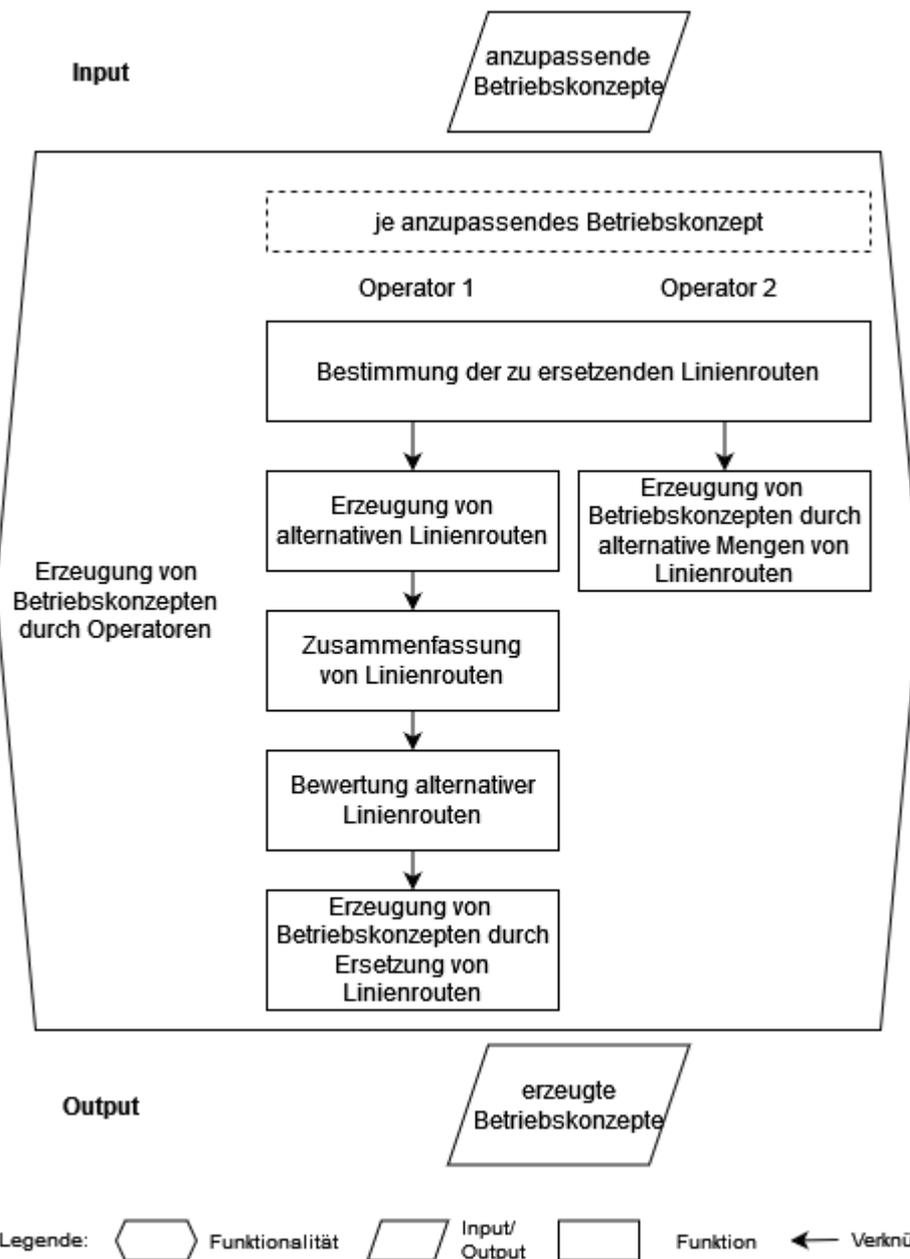


Abbildung 4-15: Aufbau der Funktionalität „Erzeugung von Betriebskonzepten durch Operatoren“

Im Betriebskonzept des ausgewählten SFP sind keine Bedingungen des Typs „Konsistente Linien“ oder des Typs „Liniennetzplan“ verletzt, da diese Bedingungen bei der Planung des SFP berücksichtigt wurden und nicht von der aktuellen Infrastruktur- oder Betriebsituation abhängen (siehe Kapitel 4.3.3). Entsprechend der zuvor bestimmten Funktionen werden die Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“ in den übrigen Funktionen berücksichtigt, sodass als Output keine erzeugten Betriebskonzepte mit Inkonsistenzen innerhalb der Linien oder des Liniennetzplans bestehen. Daher sind die Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“ bei der Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten nicht weiter zu berücksichtigen. Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“ können durch die Erzeugung von Betriebskonzepten verletzt werden. Bei der Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten sind daher die Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“, „Kapazitätsverbrauch“ und „Liniennetzplan“ zu berücksichtigen.

Linienrouten mit verletzten Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ müssen stets ersetzt werden. Anders ist es, wenn für einen Knoten oder eine Kante eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ oder vom Typ „Liniennetzplan“ besteht. Betrifft eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ mehrere Linienrouten, muss nicht jede der Linienrouten geändert werden, da die verletzte Bedingung bereits durch die Reduzierung des Kapazitätsverbrauchs gelöst werden kann, z. B. durch eine Änderung des Laufwegs einer der Linienrouten. Das gleiche gilt für eine verletzte Bedingung L2 vom Typ „Liniennetzplan“, bei der eine maximale Anzahl von Zügen nicht eingehalten wird.

Um erneute Anpassungen aufgrund von verletzten Bedingungen des Typs „Infrastrukturverfügbarkeit“ des Betriebskonzepts zu vermeiden, sind bei den Funktionen „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ und „Bestimmung von alternativen Mengen von Linienrouten“ keine Linienrouten mit verletzten Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ auszuwählen. Verletzte Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ bestehen somit lediglich im Betriebskonzept des ausgewählten SFP.

Da mit jeder erforderlichen Änderung des Laufwegs aufgrund einer verletzten Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ oder vom Typ „Liniennetzplan“ ebenfalls gelöst werden kann, sollten zunächst die verletzten Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ gelöst werden.

Je mehr zu ersetzende Linienrouten für eine Anpassung in einem Iterationsschritt ausgewählt werden (je mehr Elemente in $LR_{bk,er}$), desto mehr mögliche Kombinationen gibt es bei der Erzeugung von Betriebskonzepten, da für jede zu ersetzende Linienroute unterschiedliche alternative Linienrouten bestehen können. Mit der Anzahl der möglichen Kombinationen steigt die Diversifizierung in einem Iterationsschritt und es ist anzunehmen, dass auch die Dauer der Lösungsbereitstellung steigt. Daher sollte die Anzahl der zu ersetzenden Linienrouten begrenzt werden. Dazu wird der Parameter $n_{er,max}$ zur Festlegung der maximalen Anzahl der zu ersetzenden Linienrouten bestimmt.

Ist die Anzahl der Linienrouten, die eine verletzte Bedingung aufweisen, größer als $n_{er,max}$ sind Linienrouten, die in diesem Iterationsschritt angepasst werden sollen, auszuwählen. Bei der Auswahl der zu ersetzenden Linienrouten ist darauf zu achten, dass eine Tabu-Liste besteht, in der Mengen von Linienrouten enthalten sind, die zu verletzten Bedingungen führen (siehe Kapitel 4.2.3). Eine gleichzeitige Anpassung von mehreren Linienrouten eines Betriebskonzepts bietet gegenüber einer Anpassung der Linienrouten in aufeinanderfolgenden Iterationsschritten einen Mehrwert, wenn durch die Kombinationen der alternativen Linienrouten

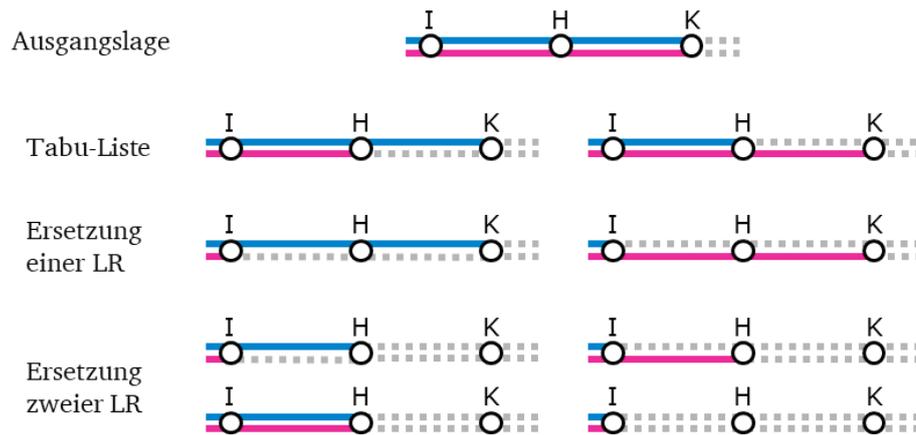


Abbildung 4-16: Beispiel der Diversifizierung durch die Ersetzung mehrerer zu ersetzender Linienrouten

Betriebskonzepte erzeugt werden, die sonst aufgrund der Tabu-Liste nicht erzeugt werden könnten. In Abbildung 4-16 wird dies verdeutlicht: Die Kombination „Ersetzung zweier Linienrouten“ kann nur erzeugt werden, wenn beide Linienrouten gleichzeitig ersetzt werden. Daher sollten in einem Iterationsschritt stets alle Linienrouten einer verletzten Bedingung als zu ersetzende Linienroute ausgewählt werden.

Eine Linienroute kann mehrere verletzte Bedingungen aufweisen, da eine Linienroute an mehreren Knoten oder Kanten Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“, „Kapazitätsverbrauch“ oder „Liniennetzplan“ verletzen kann (siehe Abbildung 4-17). Wird eine verletzte Bedingung gelöst, können dadurch weitere verletzte Bedingungen der beteiligten Linienroute entstehen. Außerdem können auch verletzte Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ oder „Liniennetzplan“ anderer Linienrouten gelöst werden. Daher sollten verletzte Bedingungen, an denen Linienrouten beteiligt sind, die eine große Anzahl an verletzten Bedingungen aufweisen, vorrangig gelöst werden. Auch sollten Linienrouten mit einer großen Anzahl an verletzten Bedingungen vorrangig gelöst werden.

Um eine möglichst optimale Lösung einer verletzten Bedingung zu ermöglichen, sollten für alle Linienrouten, die die gleiche verletzte Bedingung aufweisen, alternative Linienrouten erzeugt werden. Dadurch können unterschiedliche Kombinationen der Linienrouten zur Lösung der verletzten Bedingungen erzeugt werden (Abbildung 4-16). Die Auswahl der Linienrouten bei einer Überschreitung von $n_{er,max}$ erfolgt daher anhand einer Auswahl von verletzten Bedingungen, die in diesem Iterationsschritt gelöst werden sollen.

Abschließend werden die (Mengen von) Linienrouten der in diesem Iterationsschritt ausgewählten verletzten Bedingungen in die Tabu-Liste aufgenommen.

Zusammenfassend sind Linienrouten mit verletzten Bedingungen als zu ersetzende Linienrouten auszuwählen, sodass die Anzahl $n_{er,max}$ nicht überschritten wird. Bei der Auswahl der zu ersetzenden Linienrouten sind die folgenden drei Kriterien absteigend anzuwenden:

- Kriterium 1:** Verletzte Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ werden vor verletzten Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ gelöst.
- Kriterium 2:** Vorrangig auszuwählen sind verletzte Bedingungen, an denen Linienrouten mit einer hohen Anzahl an verletzten Bedingungen beteiligt sind.
- Kriterium 3:** Vorrangig auszuwählen sind Linienrouten mit einer hohen Anzahl an verletzten Bedingungen.

Funktion: Erzeugung von alternativen Linienrouten

In der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ werden entsprechend Operator 1 alternative Linienrouten erzeugt, indem die Linienrouten aus $LR_{bk,er}$ unter Anwendung von ebM geändert werden. Dabei sind die zu ersetzenden Linienrouten so zu ändern, dass die zuvor in der Funktion „Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten“ ausgewählten verletzten Bedingungen gelöst werden.

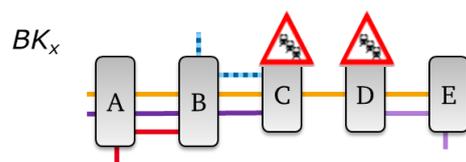
Wie in Kapitel 3.4 festgelegt, werden in Modul 1 nur linienscharfe betriebliche Maßnahmen, die Laufweg und Takt betreffen, eingesetzt. Als elementare Konfliktlösung der ebM können daher angewendet werden:

- Änderung der Taktzeit (bis hin zu Ausfall der Linienroute)
- Änderung des Laufwegs (Umleitung und/oder alternative Wende)

Verletzte Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ erfordern eine Änderung des Laufwegs und können somit durch ebM „Änderung des Laufwegs“ oder durch einen Ausfall der Linienroute (elementare Konfliktlösung „Änderung der Taktzeit“) gelöst werden (siehe Abbildung 4-18).

Ist eine Bedingung L1 vom Typ „Liniennetzplan“ verletzt, kann dies durch die Änderung einer Linienroute gelöst werden, wenn die Kante oder der Knoten mit einer verletzten Bedingung nicht mehr bedient wird. Alternativ kann eine Ausweitung des Angebots erfolgen. Bezogen auf die Linienroute ist eine Ausweitung des Angebots nur durch eine Erhöhung der Taktzeit möglich.

Bei verletzten Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ kann eine verletzte Bedingung durch ebM „Änderung des Laufwegs“ oder „Änderung der Taktzeit“ gelöst werden (siehe Abbildung 4-18). Eine verletzte Bedingung L2 vom Typ „Liniennetzplan“ kann durch die gleichen elementaren Konfliktlösungen gelöst werden. Daher wird eine verletzte Bedingung L2 vom Typ „Liniennetzplan“ wie eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ behandelt werden.



- vb_1 :
- Typ „Kapazitätsverbrauch“
 - in Knoten C
 - mit den LR ● ● ● ●

- vb_2 :
- Typ „Kapazitätsverbrauch“
 - in Knoten D
 - mit den LR ● ●

vb: Verletzte Bedingung

Abbildung 4-17: Beispiel einer Menge von Linienrouten mit verletzten Bedingungen

Anders als bei einer verletzten Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ muss nicht jede Linienroute einer verletzten Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ verändert werden (in Abbildung 4-18 muss bei der verletzten Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ ggf. die Linienroute der gelben Linie nicht verändert werden, wenn ebM auf die blaue Linie angewendet werden). Daher sollte es bei der Anpassung eines Betriebskonzepts aufgrund einer verletzten Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ für eine Linienroute sowohl alternative Linienrouten geben, die die Knoten und Kanten mit der verletzten Bedingung weiterhin enthalten als auch ebM angewendet werden, die die Knoten und Kanten nicht enthalten. Wenn eine zu ersetzende Linienroute mehrere verletzte Bedingungen aufweist, sind folglich (falls möglich) alternative Linienrouten zu erzeugen, die nur einen Teil der verletzten Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ zu lösen versuchen.

Um Kombinationen an ebM bei der Erzeugung von alternativen Linienrouten zu ermöglichen, werden die ebM nacheinander angewendet. Zunächst erfolgt die Anwendung von Umleitungen (Teil der ebM „Änderung des Laufwegs“), um die dadurch bestimmten Laufwege anschließend ggf. mit weiteren ebM zu kombinieren (siehe Abbildung 4-19 (1)). Für jede verletzte Bedingung werden Umleitungen (ebM „Umleitung“) angewendet, sodass die Knoten und Kanten der verletzten Bedingung in der resultierenden alternativen Linienroute nicht mehr enthalten ist. Falls sich verletzte Bedingungen auf einer Umleitung befinden, sind auch alternative Linienrouten durch ein Verwerfen der bisher angewendeten Umleitung zu erzeugen (siehe Abbildung 4-20 (1)).

Im nächsten Schritt werden (weitere) alternative Linienrouten erzeugt, indem mögliche alternative Wendungen angewendet werden. Die Anwendung der alternativen Wendungen kann auf die zu ersetzenden Linienrouten als auch auf bereits erzeugte alternative Linienrouten, die weitere verletzte Bedingungen aufweisen, erfolgen (siehe Abbildung 4-19 (2)).

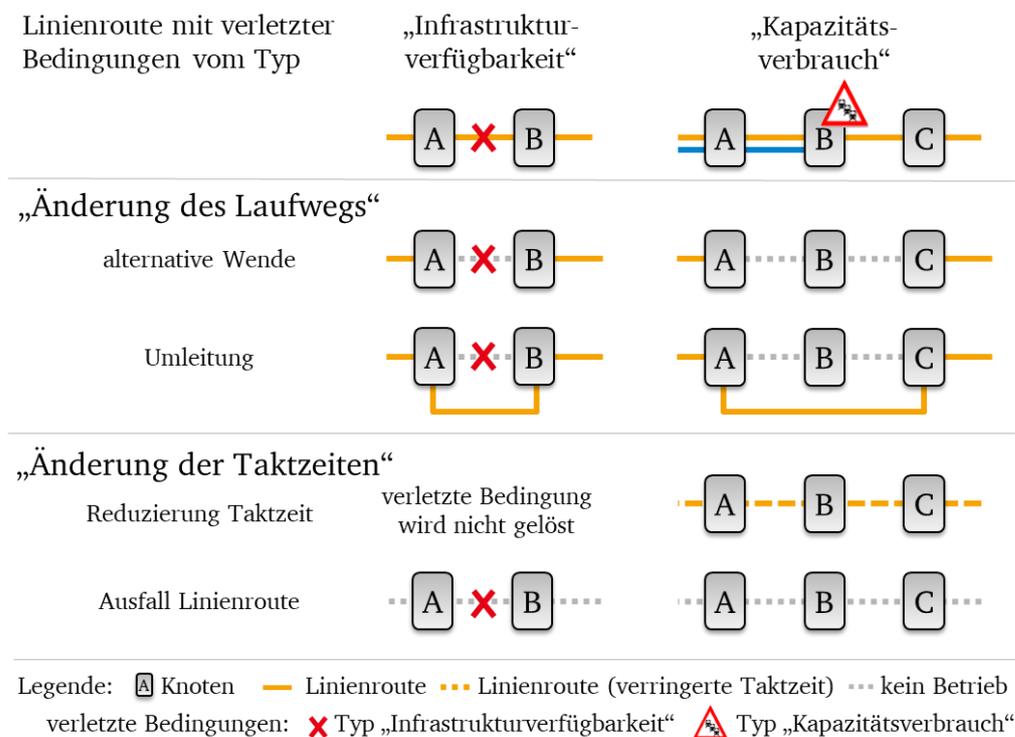


Abbildung 4-18: Beispiel für die Änderung von Linienrouten 4 mit einer verletzten Bedingung durch Operator 1

Durch die Anwendung von ebM „Änderung der Taktzeit“ auf die zu ersetzenden Linienrouten als auch auf bereits erzeugte alternative Linienroute mit weiterhin enthaltenen verletzten Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ oder Bedingung L1 vom Typ „Liniennetzplan“ werden (weitere) alternative Linienrouten erzeugt (z. B. für die jeweils ersten Linienrouten aus (1) und (2) aus Abbildung 4-19).

Durch die Änderung der Linienrouten sollte es möglichst zu keinen neuen verletzten Bedingungen kommen, da ansonsten weitere Iterationsschritte der Heuristik erforderlich sind. Dies kann bei der Erzeugung von alternativen Linienrouten für Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ und Bedingung K1 und K4 vom Typ „Konsistente Linien“ sichergestellt werden, da diese Bedingungen unabhängig vom resultierenden Betriebskonzept sind. Die Bedingungen können durch Hinzufügen oder Entfernen von Knoten und Kanten (z. B. durch eine Umleitung) in eine Linienroute verletzt werden. ebM sind daher nur anzuwenden, wenn dadurch keine der drei Bedingungen verletzt werden. Bei einem Verwerfen einer ebM sind die aufgenommenen Knoten und Kanten auf Verfügbarkeit zu prüfen und ggf. weitere ebM anzuwenden (siehe Abbildung 4-20 (2)).

Für Bedingung K1 vom Typ „Konsistente Linien“ ist sicherzustellen, dass keine ebM „Änderung des Laufwegs“ für eine Linie verwendet werden, die einen anderen Netzast bedienen als im Regelbetrieb. Dies kann dadurch umgesetzt werden, dass die ebM je Linie, die einen Input für Modul 1 darstellen (siehe Kapitel 4.3.1), vorab auf Bedingung K1 geprüft werden.

Bedingung K4 verlangt, dass jede Linienroute mindestens einen Netzast bedienen muss. Daher sind nach der Erzeugung der alternativen Linienrouten alle alternativen Linienrouten zu löschen, die nur innerhalb des Kernbereichs verkehren und somit nicht mindestens einen Netzast bedienen.

Eine Anforderung an das Ergebnis der Adaption ist, dass die Anzahl der Maßnahmen möglichst gering sein soll (siehe Kapitel 3.3). Je mehr ebM eine Linienroute enthält, desto aufwendiger und fehleranfälliger wird die Verarbeitung und Kommunikation der Anpassung. Die Anzahl der ebM je Linienroute ist bereits dadurch begrenzt, dass es je Linienroute maximal zwei alternative Wendungen gibt und nur eine Taktzeit möglich ist.

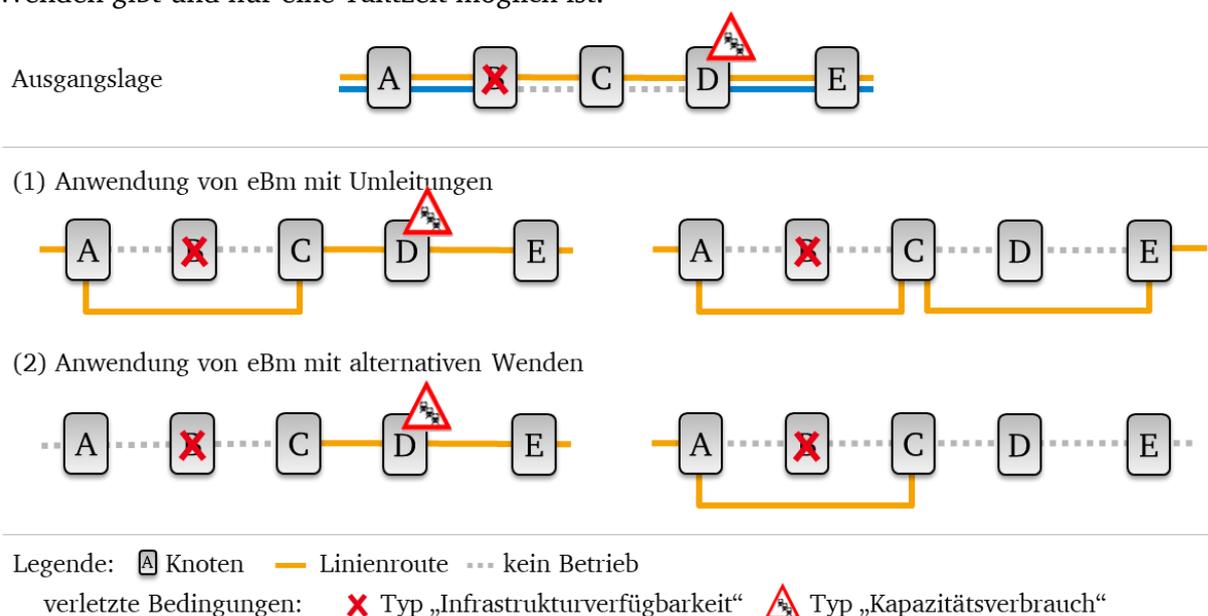


Abbildung 4-19: Beispiel für die Änderung von Linienrouten mit zwei verletzten Bedingungen durch Operator 1

Für die Anzahl der Umleitungen gibt es keine solche Begrenzung. Lediglich die Topologie des Netzwerks stellt eine „natürliche“ Einschränkung der Umleitungen dar. Um der Anforderung nach möglichst wenigen Maßnahmen zu entsprechen, wird die Anzahl der Umleitungen einer Linienroute eingeschränkt. Als Parameter zur Begrenzung dient die Vorgabe der maximalen Anzahl an Umleitungen einer Linienroute ($n_{U,max}$). Der Parameter kann individuell je S-Bahn-Netz oder je Linie vergeben werden.

Funktion: Zusammenfassung von Linienrouten

Ziel der Funktion „Zusammenfassung von Linienrouten“ ist es, dass die aus der Ersetzung resultierende Betriebskonzepte keine Verletzung der in Kapitel 4.3.3 bestimmten Bedingungen K2, K3 und K5 vom Typ „Konsistente Linien“ aufweisen. Dies wird erreicht, in dem sowohl zu ersetzende als auch die alternativen Linienrouten einer Linie zusammengefasst werden, sodass für die Ersetzung genutzte alternative Linienrouten für Operator 1 konsistent sind.

Eine Verletzung der Bedingungen K2, K3 und K5 vom Typ „Konsistente Linien“ kann nur auftreten, wenn durch die Ersetzung ein gemeinsamer Laufwegabschnitt von zwei Linienrouten einer Linie besteht. Somit sind zwei zu ersetzende Linienrouten (lr_1 und lr_2) zusammenzufassen, wenn diese der gleichen Linie angehören und ein gemeinsamer Laufwegabschnitt zwischen einer Linienroute aus LR_{a,lr_1} und einer Linienroute aus LR_{a,lr_2} besteht (siehe Abbildung 4-21).

Außerdem kann es zu einer Überschneidung von Laufwegabschnitten zwischen einer alternativen Linienroute und einer Linienroute des Betriebskonzepts, die nicht ersetzt werden soll, kommen (z. B. bei einer gebrochenen Linie; wenn eine der beiden Linienrouten mit einer Umleitung ersetzt werden soll, ist ggf. die zweite Linienroute der Linie ebenfalls zu ersetzen, wenn sonst eine der Bedingungen nicht erfüllt ist; siehe Abbildung 4-22).

Daher sind ebenfalls eine zu ersetzende Linienroute (lr_1) und eine nicht zu ersetzende Linienroute (lr_2) zusammenzufassen, wenn diese der gleichen Linie angehören und ein gemeinsamer Laufwegabschnitt zwischen lr_2 und einer Linienroute aus LR_{a,lr_1} besteht. Da eine nicht zu ersetzende Linienroute entweder im Betriebskonzept verbleibt oder entfällt, bilden diese beiden Möglichkeiten die alternativen Linienrouten einer nicht zu ersetzenden Linienroute (in dem Beispiel die Elemente von LR_{a,lr_2}).

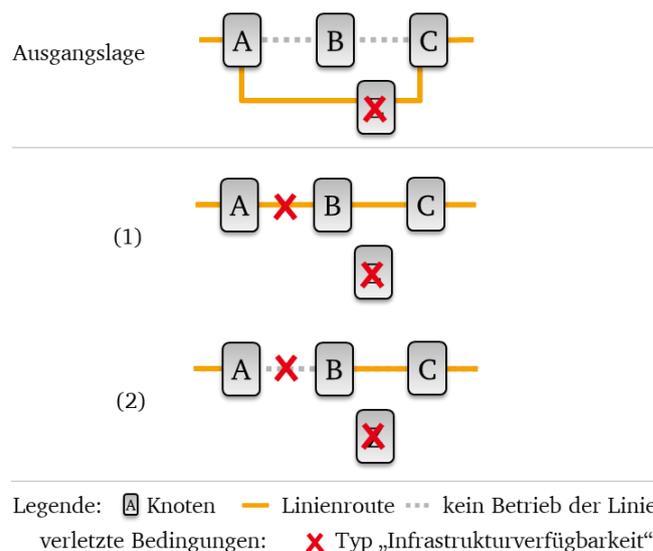


Abbildung 4-20: Beispiel für eine verletzen Bedingung auf einer ebM „Umleitung“

Durch die Aufnahme von Linienrouten in $LR_{bk,er}$ kann die Anzahl der zu ersetzenden Linienrouten den Parameter $n_{er,max}$ übersteigen. Die Anzahl der Elemente in $LR_{bk,er}$ ändert sich aber nicht, da die Linienrouten in bestehende Element von $LR_{bk,er}$ aufgenommen werden. Bei der Ersetzung verbleiben die neu aufgenommenen Linienrouten außerdem im Betriebskonzept oder entfallen. Es handelt sich somit nicht um zu ersetzende Linienrouten im eigentlichen Sinne. Daher wird $LR_{bk,er}$ nicht erneut bezüglich des Parameters $n_{er,max}$ geprüft.

Um sicherzustellen, dass die Bedingungen K2, K3 und K5 vom Typ „Konsistente Linien“ eingehalten werden, sind die Elemente der $LR_{a,y}$ zu kombinieren. Somit wird beispielsweise auch ermöglicht, dass eine Linie gebrochen wird, d. h. eine Linienroute wird durch zwei Linienrouten mit alternativen Wendungen ersetzt. Die beiden Linienrouten mit alternativen Wendungen bleiben bei der Kombination aber auch als einzelne alternative Linienrouten bestehen, sodass auch eine Ersetzung nur mit einer der beiden Linienrouten möglich bleibt. Somit bestehen 2^n mögliche Kombinationen, wobei n die Anzahl der Elemente in $LR_{a,y}$ ist. Jede Kombination an alternativen Linienrouten ist zu verwerfen, wenn diese die Bedingungen K2, K3 und K5 vom Typ „Konsistente Linien“ nicht erfüllt oder auf der Tabu-Liste enthalten ist.

Funktion: Bewertung alternativer Linienrouten

In den vorangegangenen Funktionen wurden die $LR_{a,y}$ für Operator 1 bestimmt. Für die Erzeugung von Betriebskonzepten müssen alternative Linienrouten aus $LR_{a,y}$ ausgewählt werden, die jeweils die Elemente aus $LR_{bk,er}$ ersetzen sollen. Die Funktion „Bewertung alternativer Linienrouten“ dient der Bewertung der alternativen Linienrouten, um darauf aufbauend eine Auswahl der alternativen Linienrouten zu ermöglichen.

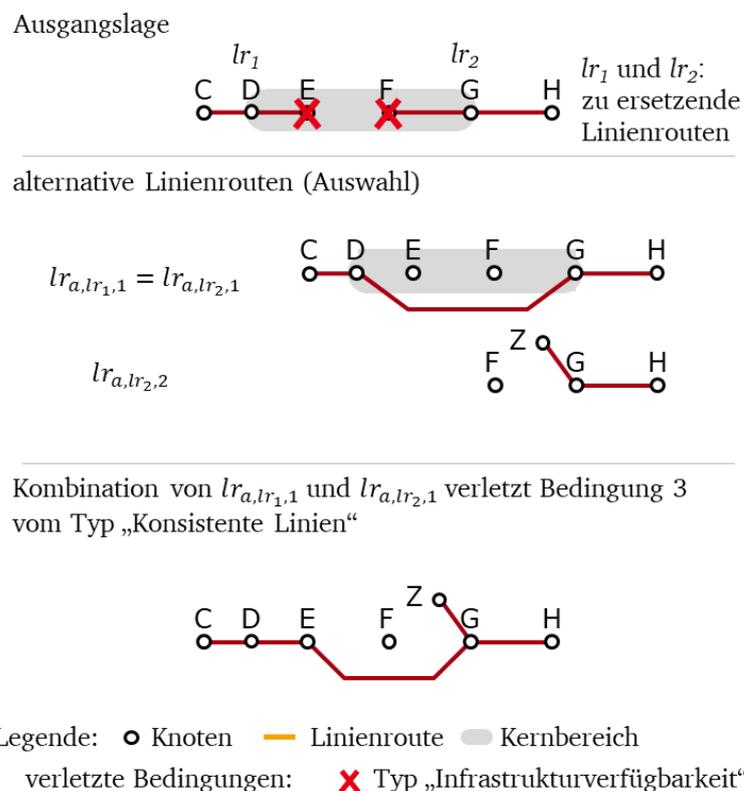


Abbildung 4-21: Beispiel für die Zusammenfassung von alternativen Linienrouten

Für die Heuristik zur Anpassung des Betriebskonzepts wird keine ausgeprägte Diversifizierung angestrebt (siehe Kapitel 4.2.3). Je größer der Unterschied zwischen der zu ersetzenden Linienroute und der alternativen Linienroute ist, desto größer ist die Diversifizierung, da das resultierende Betriebskonzept stärker vom Ausgangszustand abweicht. Außerdem sollte bei der Anpassung von Betriebskonzepten die Widerstandsveränderung für die Fahrgäste möglichst gering sein (siehe Kapitel 4.2.1). Daher sollten für die Ersetzung alternative Linienrouten ausgewählt werden, die ähnlich zu der zu ersetzenden Linienroute sind und die kundenorientierte Bewertung des Betriebskonzepts möglichst wenig reduzieren.

Für den Fahrgast ist vor allem die verkehrliche Änderung durch die Ersetzung relevant. Durch die Ersetzung einer Linienroute kann es aus verkehrlicher Sicht zu Änderungen bei den Verbindungen kommen (z. B. ein Verkehrsknoten wird von der Linienroute nicht mehr bedient und die im Verkehrskonzept gewählte Konfliktlösung eines Verbindungskonflikts ist nicht mehr machbar). Eine Ersetzung kann für einzelne Verbindungen eine Erhöhung (vorhergehendes Beispiel) oder aber auch eine Reduzierung des Widerstands zur Folge haben (z. B. bei der Änderung einer Linienroute, sodass ein zuvor nicht bedienter Verkehrsknoten bedient wird). Dadurch kann ein im Verkehrskonzept ungelöster Verbindungskonflikt nicht mehr vorhanden sein).

Eine vollständige Aussage zur Änderung der Verbindungen ist nur unter Berücksichtigung des gesamten SFP möglich. Daher kann die Auswirkung der Ersetzung einer Linienroute auf die kundenorientierte Bewertung des SFP nur abgeschätzt werden. Für die Bewertung der Linienrouten ist somit eine Heuristik für die Abschätzung der kundenorientierten Bewertung von Linienrouten erforderlich. Im Folgenden wird daher eine Heuristik für eine

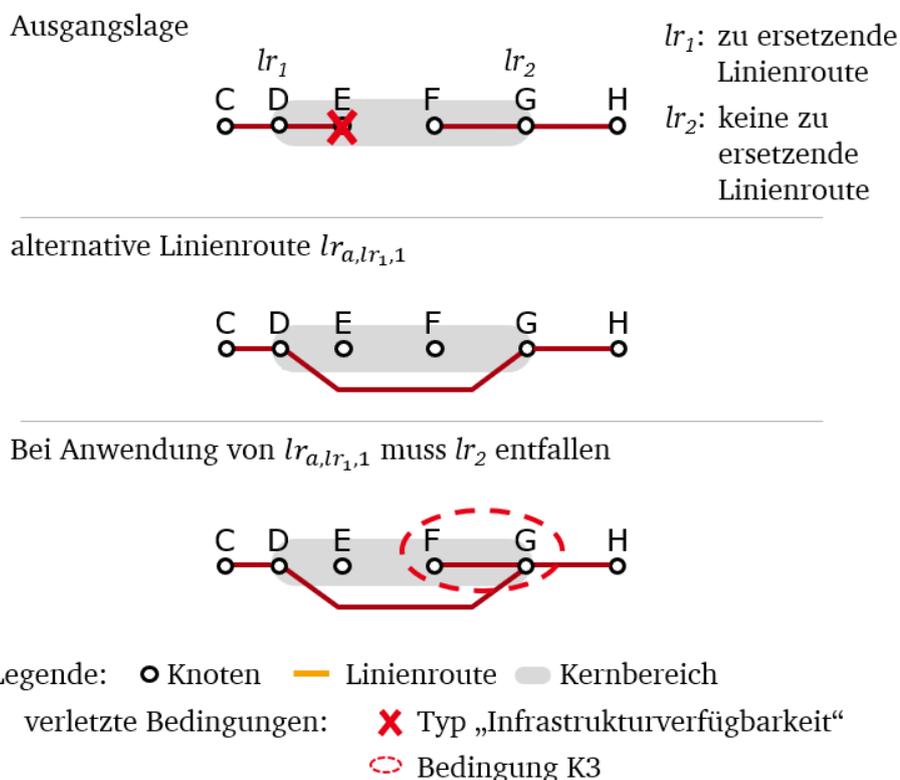


Abbildung 4-22: Beispiel für die Zusammenfassung zu ersetzender Linienrouten und nicht zu ersetzender Linienrouten

kundenorientierte Bewertung von alternativen Linienrouten hergeleitet. Dazu wird zunächst die Vorgehensweise für die Herleitung der Heuristik bestimmt.

Bei der Planung des SFP bilden die Fahrgastkorridore zusammen mit den Erschließungsfunktionen der Linienrouten die gewählten Konfliktlösungen der Verbindungskonflikte im Verkehrskonzept ab (siehe Kapitel 2.4.2). Daraus folgt, dass wenn das auf dem Verkehrskonzept beruhende Mobilitätsverhalten weiterhin umsetzbar sein soll, die Fahrgastkorridore weiterhin machbar sein und die Linienrouten Ihre Erschließungsfunktionen behalten müssen. Um die Auswirkung der Ersetzung von Linienrouten auf die kundenorientierte Bewertung zu prüfen, ist daher die Auswirkung der Ersetzung auf die Erschließungsfunktion der Linienrouten sowie die Fahrgastkorridore zu analysieren.

Eine Ersetzung von Linienrouten kann auch eine Widerstandsveränderung von Verbindungen bewirken. Daher wird auch eine mögliche Widerstandsveränderung durch die Ersetzung berücksichtigt. Die Widerstandsveränderung sollte möglichst gering sein.

Die Widerstandsveränderung in der Planung bezieht sich auf die Differenz zwischen dem regulären Betrieb (Soll-Fahrplan) und dem Betriebskonzept des ausgewählten SFP. Dagegen soll die Heuristik zur kundenorientierten Bewertung von alternativen Linienrouten die Widerstandsveränderung zwischen dem anzupassenden Betriebskonzept und dem angepassten Betriebskonzept ermitteln. Die Heuristik betrachtet dementsprechend die Veränderung der Widerstandsveränderung. Da der Bezug für alle zu bewertenden alternativen Linienrouten gleich ist (das anzupassende Betriebskonzept), wird im Weiteren ebenfalls der Begriff der „Widerstandsveränderung“ genutzt.

Zusammengefasst wird für die Heuristik zur kundenorientierten Bewertung von alternativen Linienrouten die Auswirkung der Ersetzung auf die Erschließungsfunktion der Linienrouten und die Fahrgastkorridore sowie Widerstandsveränderungen berücksichtigt. Die Herleitung der Heuristik erfolgt durch folgende Schritte:

1. Bestimmung von Bewertungskriterien durch die Analyse der Auswirkungen der Ersetzung einer Linienroute auf die Erschließungsfunktion der Linienroute sowie die Fahrgastkorridore
2. Bestimmung von Bewertungskriterien durch die Analyse der möglichen Widerstandsveränderung bei der Ersetzung einer Linienroute
3. Diskussion der Verknüpfung der identifizierten Bewertungskriterien
4. Ausdetaillierung der Heuristik anhand der bestimmten Bewertungskriterien

Bestimmung von Bewertungskriterien durch die Analyse der Auswirkungen der Ersetzung einer Linienroute auf die Erschließungsfunktion der Linienroute sowie die Fahrgastkorridore

Bei der Ersetzung einer Linienroute können sich die bedienten Verkehrsknoten oder die Taktzeit ändern. Für die Bestimmung der Bewertungskriterien wird die Auswirkung der Veränderung der beiden Eigenschaften auf die Erschließungsfunktion der Linienroute sowie die Fahrgastkorridore diskutiert. Entsprechend der Anforderung nach Zuverlässigkeit liegt der Fokus auf den negativen Veränderungen.

Durch den Wegfall von zuvor **bedienten Verkehrsknoten** einer Linienroute, kann eine Erschließungsfunktion (teilweise) entfallen (z. B., wenn der Störbereich nicht mehr bedient wird) oder ein Fahrgastkorridor nicht mehr umsetzbar sein, wenn die Linienroute ein Teil des Fahrgastkorridors war.

Die Erschließungsfunktion der Linienrouten während einer Störung werden angelehnt an die Erschließungsfunktion der Fahrgastkorridore (siehe Brauner 2023, S. 183) und es bestehen somit die drei Erschließungsfunktionen:

- Basisfunktion (Erschließung des gestörten Bereichs)
- Qualitätsfunktion (Bedienung eines verkehrlich wichtigen Verkehrsknotens)
- Kapazitätsfunktion (Verknüpfung von Störseiten unter Auslassung des gestörten Bereichs)

Die Erschließungsfunktion einer Linienroute ist weiterhin vollständig erfüllt, wenn:

- Basisfunktion: keine Verkehrsknoten im Störbereich der Linie, die im Betriebskonzept des ausgewählten SFP mit einem Einbruchknoten/Wendebahnhof verknüpft sind, entfallen.
- Qualitätsfunktion: der ausgewählte Verkehrsknoten weiterhin bedient wird.
- Kapazitätsfunktion: eine Umleitung unter Auslassung des Störbereichs zwischen den gleichen Netzästen wie im Betriebskonzept des ausgewählten SFP besteht.

Außerdem kann durch eine Änderung der bedienten Verkehrsknoten ein Fahrgastkorridor nicht mehr angebunden sein. Wenn die Linienroute Teil eines Fahrgastkorridors war, kann durch eine Änderung der bedienten Verkehrsknoten der Fahrgastkorridor ggf. nicht mehr umsetzbar sein.

Ein Engpass in einem Fahrgastkorridor kann sowohl aufgrund einer Fahrzeugüberlastung als auch einer Bahnsteig-/Fahrgastwechselüberlastung auftreten (Brauner 2023, S. 189). Durch eine Veränderung der bedienten Verkehrsknoten kann ein anderer Fahrweg im Knoten und dadurch auch eine Änderung des bedienten Bahnsteiggleises erforderlich sein. Eine Änderung des Bahnsteiggleises kann dann zu einer Bahnsteig-/Fahrgastwechselüberlastung führen. Ein Engpass kann aber nur unter Berücksichtigung aller Linienrouten und der Lösung der Verbindungskonflikte erkannt werden.

Bei der Anpassung des Betriebskonzepts wird das von einer Linienroute genutzte Bahnsteiggleis nicht festgelegt, sondern es kann nur bestimmt werden, ob das bisher genutzte Bahnsteiggleis weiterhin genutzt werden kann.

Die **Taktzeit** hat Einfluss auf die Bedienrate. Durch eine Erhöhung der Taktzeit kann eine Fahrzeugüberlastung und somit ein Engpass in einem Fahrgastkorridor auftreten. Außerdem kann durch eine Erhöhung der Taktzeit die Mindestbeförderungskapazität der Stammstrecke nicht mehr erfüllt sein. Ob ein Engpass auftritt oder die Mindestbeförderungskapazität weiterhin erfüllt ist, kann nur bei Berücksichtigung des gesamten Betriebskonzepts abschließend bestimmt werden. Jedoch steigt die Wahrscheinlichkeit eines Engpasses bzw. der Nichterfüllung der Mindestbeförderungskapazität durch eine Erhöhung der Taktzeit.

Tabelle 4-1 zeigt die mögliche Veränderung der Erschließungsfunktion der Linienroute sowie der Fahrgastkorridore bei der Ersetzung einer Linienroute. Zusammenfassend sind, um die Auswirkungen einer Ersetzung von Linienrouten auf das Verkehrskonzept abzuschätzen, die (Taktzeit der) Bedienung der Verkehrsknoten, die der Erschließungsfunktion dienen oder Teil eines Fahrgastkorridors sind, zu betrachten.

Bestimmung von Bewertungskriterien durch die Analyse der möglichen Widerstandsveränderung bei der Ersetzung einer Linienroute

Die Ersetzung einer Linienroute sollte möglichst so erfolgen, dass die Widerstandsveränderung der Linienroute möglichst gering ist. Daher werden die möglichen Auswirkungen der Ersetzung von Linienrouten auf die Widerstandsveränderung der Linienroute in der stabilen Phase geprüft. Tabelle 4-2 führt die Bestandteile der Bewertungsfunktion der Widerstandsveränderung (siehe Kapitel 2.4.2) noch einmal auf.

Durch eine Veränderung der **bedienten Verkehrsknoten** können Ein- und Ausstiegshaltestelle wegfallen und sich dadurch Zu- und Abgangszeiten verändern. Durch eine Änderung der bedienten Verkehrsknoten kann sich auch die mindestens erforderliche Regelbeförderungszeit zwischen zwei Verkehrsknoten ändern. Dies hat einen Einfluss auf die Beförderungszeit und ggf. auch auf Umsteigezeiten, da sich Ankunftszeiten ändern können.

Zu einem Einfluss auf die Umsteigezeiten kann es auch kommen, wenn eine Veränderung der bedienten Verkehrsknoten eine Änderung des bedienten Bahnsteiggleises erforderlich macht. Durch eine Veränderung der bedienten Verkehrsknoten kann auch die Anzahl der Umsteige verändert werden. Je weniger Verkehrsknoten bedient werden, desto eher wird ein Umstieg erforderlich (für die Relationen innerhalb der Linienroute).

Eine Änderung der **Taktzeit** kann einen Einfluss auf die Ankunfts- und Abfahrtszeiten haben und somit Einfluss auf die Wartezeit an der Einstiegshaltestelle und auf die Umsteigezeit.

Tabelle 4-2 zeigt die möglichen Veränderungen von Bestandteilen der Bewertungsfunktion der Widerstandsveränderung bei einer Ersetzung von Linienrouten. Zusätzlich zu den Kriterien, die bereits im ersten Teil der Herleitung diskutiert wurden, kommt die Veränderung der Ankunfts- und Abfahrtszeiten sowie der Regelbeförderungszeit hinzu.

Tabelle 4-1: Veränderung der Erschließungsfunktion der Linienroute sowie der Fahrgastkorridore bei der Ersetzung einer Linienroute

Eigenschaft Verkehrskonzept	Einflussgröße	Eigenschaft Linienroute	
		bediente Verkehrsknoten	Taktzeit
Erschließungsfunktion Linienroute	bediente Verkehrsknoten	✓	-
	Bedienrate	-	✓
Anbindung Fahrgastkorridor	bediente Verkehrsknoten	✓	-
Bereitstellung Teil eines Fahrgastkorridors	bediente Verkehrsknoten	✓	-
	Engpass	(✓)	✓
	Widerstand	<i>im nächsten Teil der Herleitung betrachtet</i>	

✓ Einfluss (✓) indirekter Einfluss – kein Einfluss

Die Ankunfts- und Abfahrtszeiten sind bei der Anpassung des Betriebskonzepts nicht bekannt (siehe Kapitel 3.4). Außerdem besteht die Anforderung nach Zuverlässigkeit, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Änderungen der Abfahrtszeiten gering ausfallen. Die Veränderung der Abfahrtszeiten wird daher nicht weiter betrachtet.

Diskussion der Verknüpfung der identifizierten Bewertungskriterien

Zusammenfassend sind, um die Auswirkungen einer Ersetzung von Linienrouten auf das Verkehrskonzept abzuschätzen, folgende Kriterien zu betrachten:

- Bedienung der Verkehrsknoten
- Taktzeit der Bedienung von Verkehrsknoten
- Regelbeförderungszeit
- Bahnsteiggleis

Die drei Kriterien Taktzeit von Verkehrsknoten, Regelbeförderungszeit und Bahnsteiggleis können nur bewertet werden, wenn die Verkehrsknoten, für die die Kriterien betrachtet werden sollen, bedient werden.

Tabelle 4-2: Veränderung der Bestandteile der Bewertungsfunktion bei der Ersetzung einer Linienroute

Bestandteile Bewertungsfunktion	Einflussgröße	Eigenschaft Linienroute	
		bediente Verkehrsknoten	Taktzeit
Änderung der Beförderungszeit	Regelbeförderungs- zeit	(✓)	-
	planmäßige Warte- und Synchronisations- zeiten	-	-
Veränderte Ein- und Ausstiegshaltestelle und dadurch veränderte Zu- und Abgangszeit	bediente Verkehrsknoten	✓	-
Wartezeit Einstiegshaltestelle	Abfahrtszeit	-	(✓)
Wartezeit im verspäteten Fahrzeug	<i>in der stabilen Phase nicht betrachtet</i>		
Umstiege (Umsteigezeit)	Ankunftszeit	(✓)	(✓)
	Abfahrtszeit	-	(✓)
	Bahnsteiggleis	(✓)	-
Umstiege (Anzahl)	bediente Verkehrsknoten	✓	-

✓ Einfluss (✓) indirekter Einfluss - kein Einfluss

Die Kriterien Regelbeförderungszeit und Bahnsteiggleis sind indirekt abhängig von der Bedienung der Verkehrsknoten (siehe Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2). Auch haben die beiden Kriterien Änderung der Regelbeförderungszeit und das Bahnsteiggleis zwar einen Einfluss auf den Widerstand, aber nicht darauf, ob die Verbindungen weiterhin machbar sind. Daher wird der Bedienung der Verkehrsknoten die größte Relevanz zugesprochen. Die anderen beiden Kriterien haben dagegen sowohl auf die Verbindungen Einfluss als auch auf den Widerstand.

Die Auswirkung der Änderung des Bahnsteiggleises kann nur in Betrachtung des gesamten Betriebskonzepts bestimmt werden. Daher wird dieses Kriterium als am wenigsten relevant für die Bewertung angesehen.

Der Diskussion folgend, wird eine hierarchische Reihenfolge der Kriterien gewählt:

- Bedienung der Verkehrsknoten
- Taktzeit der Bedienung von Verkehrsknoten
- Regelbeförderungszeit
- Bahnsteiggleis

Ausdetaillierung der Heuristik anhand der bestimmten Bewertungskriterien

Ergebnis der bisherigen Herleitung der Heuristik zur kundenorientierten Bewertung von alternativen Linienrouten sind die Bewertungskriterien und eine Hierarchie der Kriterien. Im Weiteren werden die einzelnen Bewertungskriterien ausdetailliert.

Die Veränderung der **bedienten Verkehrsknoten** kann anhand der Anzahl und der Eigenschaften der von der Linienroute bedienten Verkehrsknoten bewertet werden. Den bedienten Verkehrsknoten wird anhand der vorangegangenen Herleitungen sowie den Anforderungen aus Kapitel 3.3 eine unterschiedliche Wertigkeit zugeordnet.

Der Anforderung nach einer möglichst geringen Änderung des Betriebskonzepts folgend, sollten möglichst die Verkehrsknoten nach einer Ersetzung weiterhin bedient werden, die auch im Betriebskonzept des ausgewählten SFP von der Linie bedient werden. Verkehrsknoten, die auch im Betriebskonzept des ausgewählten SFP von der Linie bedient werden, können für die Erschließungsfunktion oder die Fahrgastkorridore relevant sein (siehe erster Abschnitt der Herleitung). Da Verbindungskonflikte möglichst innerhalb des S-Bahn-Netzes gelöst werden sollen (siehe Vorgehen zur Bestimmung der KLA von Verbindungskonflikten in Kapitel 2.4.2), wird der Bedienung von Verkehrsknoten der Erschließungsfunktion eine höhere Priorität zugeordnet als Verkehrsknoten der Fahrgastkorridore.

Außerdem sind Verkehrsknoten, die auch im regulären Betrieb der Linie bedient werden, eher zu bedienen als sonstige Verkehrsknoten, da dies der Anforderung nach Zuverlässigkeit entspricht.

Somit können die bedienten Verkehrsknoten unterschieden werden in Verkehrsknoten:

- 1) die der Erschließungsfunktion dienen (Kriterien für die Erfüllung siehe erster Abschnitt der Herleitung),
- 2) die Teile eines Fahrgastkorridors sind,
- 3) die im Betriebskonzept des ausgewählten SFP von der Linienroute bedient werden,
- 4) die im regulären Betrieb der Linie bedient werden und
- 5) sonstige Verkehrsknoten.

Für 1) und 2) ist nicht die Anzahl der bedienten Verkehrsknoten entscheiden, sondern, ob die Erschließungsfunktion erfüllt bzw. der Fahrgastkorridor weiterhin möglich ist. Bei 1) kann eine Erschließungsfunktion auch teilweise erfüllt sein. Daher wird für die Bewertung von 1) die Anzahl der bedienten Verkehrsknoten, die für die Erfüllung der Erschließungsfunktion relevant sind, ins Verhältnis zur Anzahl der im Betriebskonzept des ausgewählten SFP bedienten Verkehrsknoten, die für die Erfüllung der Erschließungsfunktion relevant sind, gesetzt. Für 2) ist die Anzahl der weiterhin umsetzbaren Fahrgastkorridore entscheidend.

Für 3), 4) und 5) ist eine Linienroute umso höher zu bewerten, je größer die Anzahl an bedienten Verkehrsknoten einer hohen Wertigkeit ist. Um die Auswirkungen auf die Verbindungen (innerhalb der Linie) abzubilden, wird jeweils die Anzahl der bedienten Verkehrsknoten ausgehend von den Wendebahnhöfen in den Netzästen abgebildet. Dadurch werden „gebrochene“ Linien bei gleicher Anzahl der bedienten Knoten schlechter bewertet als „durchgebundene“ Linien (siehe Tabelle 4-3).

Für die **Taktzeit** der Linie gilt, dass je niedriger die Taktzeit ist, desto unwahrscheinlicher ist ein Engpass und desto geringer ist der Widerstand durch Wartezeiten an der Einstieghaltestelle oder bei Umstiegen. Die Änderung der Taktzeit kann durch die Anzahl der bedienten Verkehrsknoten pro Stunde bewertet werden. Eine Linienroute ist umso höher zu bewerten, je größer die Anzahl an bedienten Verkehrsknoten einer hohen Wertigkeit pro Stunde ist.

Da durch die vorangegangenen Bewertungskriterien anzunehmen ist, dass die Anzahl und Wertigkeit der bedienten Verkehrsknoten gleich sind, wird eine Linienroute besser bewertet, wenn dessen **Regelbeförderungszeit** geringer ist.

Wie in der Herleitung beschrieben, kann für die Änderung der **Bahnsteiggleise** nur bestimmt werden, ob das bisher genutzte Bahnsteiggleis weiterhin genutzt werden kann. Daher wird die Anzahl der erforderlichen Änderungen der Bahnsteiggleise einer Linienroute bewertet.

Tabelle 4-3: Vergleich der Bewertung der Anzahl der bedienten Verkehrsknoten von Linienrouten

Linienrouten	Anzahl bedienter Verkehrsknoten ausgehend von den Wendebahnhöfen in den Netzästen	Anzahl bedienter Verkehrsknoten
	10	6
	10	6
	4	6
	2	3
Legende: ○ Knoten — Linienroute ■ Kernbereich		

Sollte bei einem Vergleich zweier Linienrouten unter Beachtung der vier Bewertungskriterien keine eindeutige Auswahl möglich sein, ist aufgrund der Eigenschaft einer deterministischen Entscheidungsfindung eine beliebige deterministische Entscheidung herbeizuführen (z. B. durch Auswahl der zuerst erzeugten Linienroute).

Zusammenfassend ergibt sich folgende hierarchische Bewertung für alternative Linienrouten:

1. Quotient aus der Division der Anzahl der bedienten Verkehrsknoten, die für die Erfüllung der Erschließungsfunktion relevant sind durch die Anzahl der im Betriebskonzept des ausgewählten SFP bediente Verkehrsknoten, die für die Erfüllung der Erschließungsfunktion relevant sind
2. Anzahl der weiterhin umsetzbaren Fahrgastkorridore
3. Anzahl der Verkehrsknoten, die im Betriebskonzept des ausgewählten SFP von der Linienroute bedient werden
4. Anzahl der Verkehrsknoten, die im regulären Betrieb der Linie bedient werden
5. Anzahl sonstiger Verkehrsknoten
6. Quotient aus der Division der Anzahl der Bedienung *je Stunde* von Verkehrsknoten, die für die Erfüllung der Erschließungsfunktion relevant sind durch die Anzahl der Bedienung *je Stunde* im Betriebskonzept des ausgewählten SFP von Verkehrsknoten, die für die Erfüllung der Erschließungsfunktion relevant sind
7. Bedienung *je Stunde* von Verkehrsknoten, die für weiterhin umsetzbare Fahrgastkorridore relevant sind
8. Bedienung *je Stunde* von Verkehrsknoten, die im Betriebskonzept des ausgewählten SFP von der Linienroute bedient werden
9. Bedienung *je Stunde* von Verkehrsknoten, die im regulären Betrieb der Linie bedient werden
10. Bedienung *je Stunde* von sonstigen Verkehrsknoten
11. Regelbeförderungszeit der Linienroute
12. Anzahl der erforderlichen Änderungen der Bahnsteiggleise
13. beliebige deterministische Entscheidung

Funktion: Erzeugung von Betriebskonzepten durch Ersetzung von Linienrouten

In der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten durch Ersetzung von Linienrouten“ erfolgt für Operator 1 die Ersetzung der zu ersetzenden Linienrouten aus $LR_{bk,er}$ durch die alternativen Linienrouten aus $LR_{a,y}$. Durch die Ersetzung werden Betriebskonzepte erzeugt.

Für die Ersetzung wurden die $LR_{a,y}$ durch die vorherige Funktion bewertet. Durch die Ersetzungen eines Elements aus $LR_{bk,er}$ durch unterschiedliche Elemente aus $LR_{a,y}$, werden unterschiedliche Betriebskonzepte erzeugt. Je mehr Elemente aus $LR_{a,y}$ für die Ersetzung ausgewählt werden, desto größer ist die Diversifizierung, da die Wahrscheinlichkeit größer wird, dass die alternative(n) Linienroute(n) stärker von der (den) zu ersetzenden Linienroute(n) abweicht. Daher wird die Anzahl der für die Ersetzung verwendeten Elemente aus $LR_{a,y}$ durch den Parameter $n_{a,max}$ begrenzt.

Die Bewertung der alternativen Linienroute erfolgte anhand einer Abschätzung der verkehrlichen Änderung bei einer Ersetzung (siehe Funktion „Bewertung alternativer Linienroute“). Da durch die Ersetzung eine möglichst geringe verkehrliche Änderung erfolgen soll (siehe Kapitel 4.2.1), werden die Elemente aus $LR_{a,y}$ bei der Ersetzung absteigend nach ihrer Bewertung verwendet.

Für ein Betriebskonzept können mehrere Elemente in $LR_{bk,er}$ enthalten sein, sodass auch Kombinationen von Ersetzungen zu berücksichtigen sind. Alle möglichen Kombinationen an Ersetzungen können durch eine Matrix dargestellt werden, wobei die Dimensionen der Matrix der Anzahl an zu ersetzenden Elementen aus $LR_{bk,er}$ entspricht. Jedes Element der Matrix stellt ein erzeugtes Betriebskonzept dar (siehe Abbildung 4-23). Das Ergebnis der Funktion ist somit eine Menge von erzeugten Betriebskonzepten.

Die Mindestanzahl der Elemente einer Dimension entspricht $n_{a,max}$ oder der Anzahl der Elemente in der $LR_{a,y}$ der zu ersetzenden Linienroute, wenn diese Anzahl kleiner als $n_{a,max}$ ist. Durch die Kombinationen der Ersetzungen ergibt sich die maximale Anzahl an erzeugten Betriebskonzepten ($n_{BK,neu}$) für die Anpassung eines Betriebskonzepts aus dem Produkt der maximalen Ersetzungen je Element aus $LR_{bk,er}$ über alle Elemente aus $LR_{bk,er}$.

$$n_{BK,neu} = \prod_{y \in LR_{bk,er}} (\min \{n_{a,max}, |LR_{a,y}|\})$$

Unter den Annahmen

$$n_{a,max} \leq |LR_{a,y}| \forall y \in LR_{bk,er} \quad \text{und} \\ |LR_{bk,er}| \approx n_{er,max}$$

bestimmt sich die Anzahl an erzeugten Betriebskonzepten zu

$$n_{BK,neu} = (n_{a,max})^{n_{er,max}}$$

mit

$n_{BK,neu}$	Anzahl erzeugter Betriebskonzepte durch bk in einem Iterationsschritt
$LR_{bk,er}$	Menge der zu ersetzenden Linienrouten des Betriebskonzepts bk
$LR_{a,y}$	Mengen von alternativen Linienrouten je Element y aus $LR_{er,x}$
$n_{a,max}$	max. Anzahl an alternativen Linienrouten, die je Element, das ersetzt wird, ausgewählt werden
$n_{er,max}$	max. Anzahl an zu ersetzenden Linienrouten von bk je Iterationsschritt

Da bei der Ersetzung die Elemente aus $LR_{a,y}$ absteigend nach ihrer Bewertung verwendet werden, ist zu erwarten, dass das erzeugte Betriebskonzept mit den geringsten Indizes die geringste verkehrliche Änderung aufweist.

Betriebskonzepte, die Mengen von Linienrouten enthalten, die in der Tabu-Liste enthalten sind, sollen kein Ergebnis der Ersetzung sein (siehe Kapitel 4.2.3). Nach jeder Erzeugung ist deshalb zu prüfen, ob durch die Ersetzung eine Menge von Linienrouten des erzeugten Betriebskonzepts in der Tabu-Liste enthalten ist. Ggf. ist das erzeugte Betriebskonzept zu löschen.

Anhand der Indizes der Matrix kann nachvollzogen werden, welche weiteren Betriebskonzepte auf Grund der Tabu-Liste gelöscht werden würden. Diese Betriebskonzepte können ohne weitere Prüfung gelöscht werden bzw. sind erst gar nicht zu erzeugen. Ist zum Beispiel in Abbildung 4-23 die Menge $\{LR_{a,1}[1], LR_{a,2}[2]\}$ ein Element der Tabu-Liste, sind alle Betriebskonzepte mit den Indizes $(1,2,x)$ nicht-funktionsfähig. Daher sollte nach der Erzeugung und Prüfung eines der Betriebskonzepte mit einem Index $(1,2,1)$ keine weiteren Betriebskonzepte mit einem Index $(1,2,x)$ erzeugt werden.

Bei der Prüfung der erzeugten Betriebskonzepte ist zu beachten, dass nur Mengen von Linienrouten geprüft werden, die Linienrouten der aktuellen Ersetzung enthalten, da ggf.

(Mengen von) Linienrouten bestehen, die in der Tabu-Liste vorhanden sind, aber die erst in einem weiteren Iterationsschritt als zu ersetzende Linienrouten ausgewählt werden.

Da die Tabu-Liste der Diversifizierung dienen soll (siehe Kapitel 4.2.3), sind für Betriebskonzepte, die aufgrund der Tabu-Liste verworfen wurden, weitere alternative Linienrouten für eine Ersetzung zu nutzen. Dies kann durch eine entsprechende Erweiterung der Dimensionen der Matrix erfolgen. Dadurch kann sich die Anzahl der erzeugten Betriebskonzepte in einem Iterationsschritt erhöhen auf:

$$n_{BK,neu} = \prod_{lr \in LR_{x,er}} |LR_{a,y}|$$

Darüber hinaus wird die kundenorientierte Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte geprüft. Aufgrund der ausgeprägten Intensivierung der Heuristik können erzeugte Betriebskonzepte verworfen werden, wenn die kundenorientierte Bewertung geringer ist als die kundenorientierte Bewertung des funktionsfähigen Betriebskonzepts mit der besten kundenorientierten Bewertung. Das funktionsfähige Betriebskonzept kann in einem vorherigen Iterationsschritt erzeugt worden sein. Möglich ist auch, dass durch die Disponenten ein alternatives bestehendes SFP ausgewählt wird, das in der aktuellen Infrastruktur- und Betriebssituation einsetzbar ist und als untere Schranke der kundenorientierten Bewertung dient.

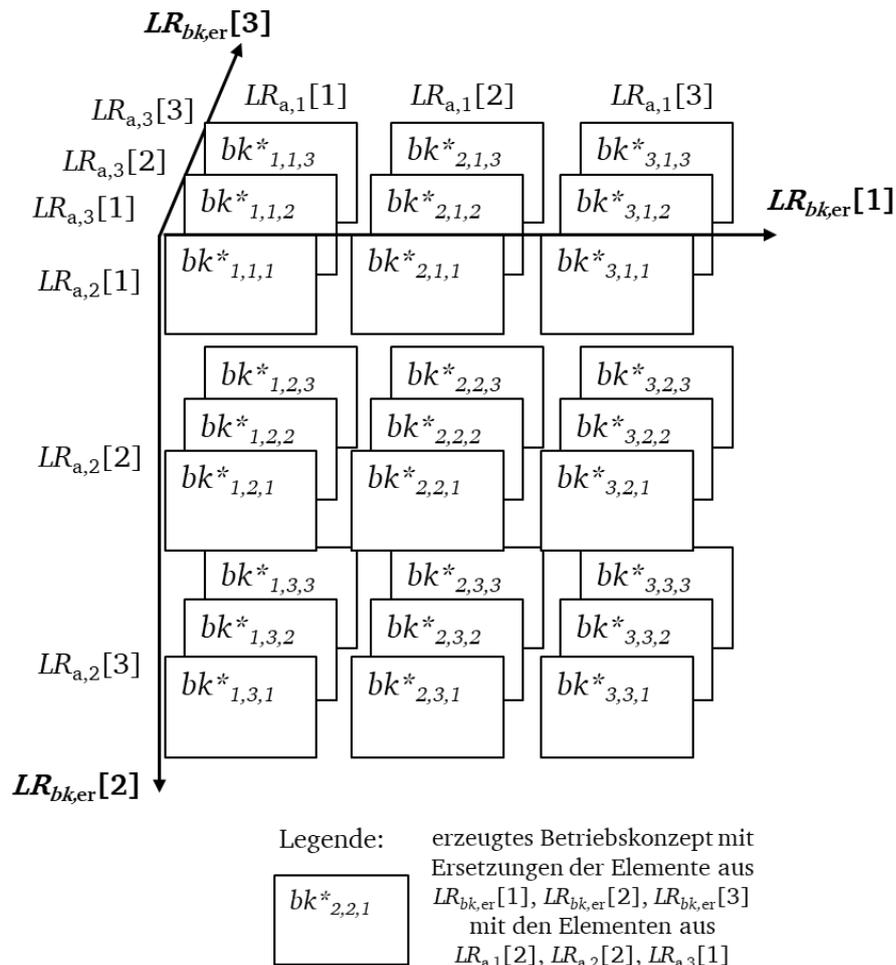


Abbildung 4-23: Durch die Ersetzung der $LR_{bk,er}$ entstehende Matrix aus erzeugten Betriebskonzepten

Zur Bewertung des Betriebskonzepts wird die Funktionalität „Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte“ herangezogen. Da bei der Ersetzung die alternativen Linienrouten absteigend nach ihrer kundenorientierten Bewertung verwendet werden, ist davon auszugehen, dass Betriebskonzepte mit steigenden Indizes eine geringere kundenorientierte Bewertung haben. Wird ein Betriebskonzept aufgrund einer geringen kundenorientierten Bewertung verworfen, werden daher keine Betriebskonzepte erzeugt, deren Indizes größer oder gleich der Indizes des verworfenen Betriebskonzepts sind.

Ist zum Beispiel die kundenorientierte Bewertung des Betriebskonzepts mit den Indizes (3,2,1) aus Abbildung 4-23 nicht ausreichend, wird davon ausgegangen, dass alle Betriebskonzepte mit Indizes, die höher sind (z. B. (3,2,2) oder (3,3,1)) ebenfalls eine nicht ausreichende kundenorientierte Bewertung erhalten werden. Diese Betriebskonzepte sollten nicht erzeugt werden.

Um die Erzeugung von nicht geeigneten Betriebskonzepten zu unterstützen, erfolgt die Füllung der Matrix und damit die Erzeugung von Betriebskonzepten entsprechend einer Breitensuche beginnend mit dem Element mit den geringsten Indizes.

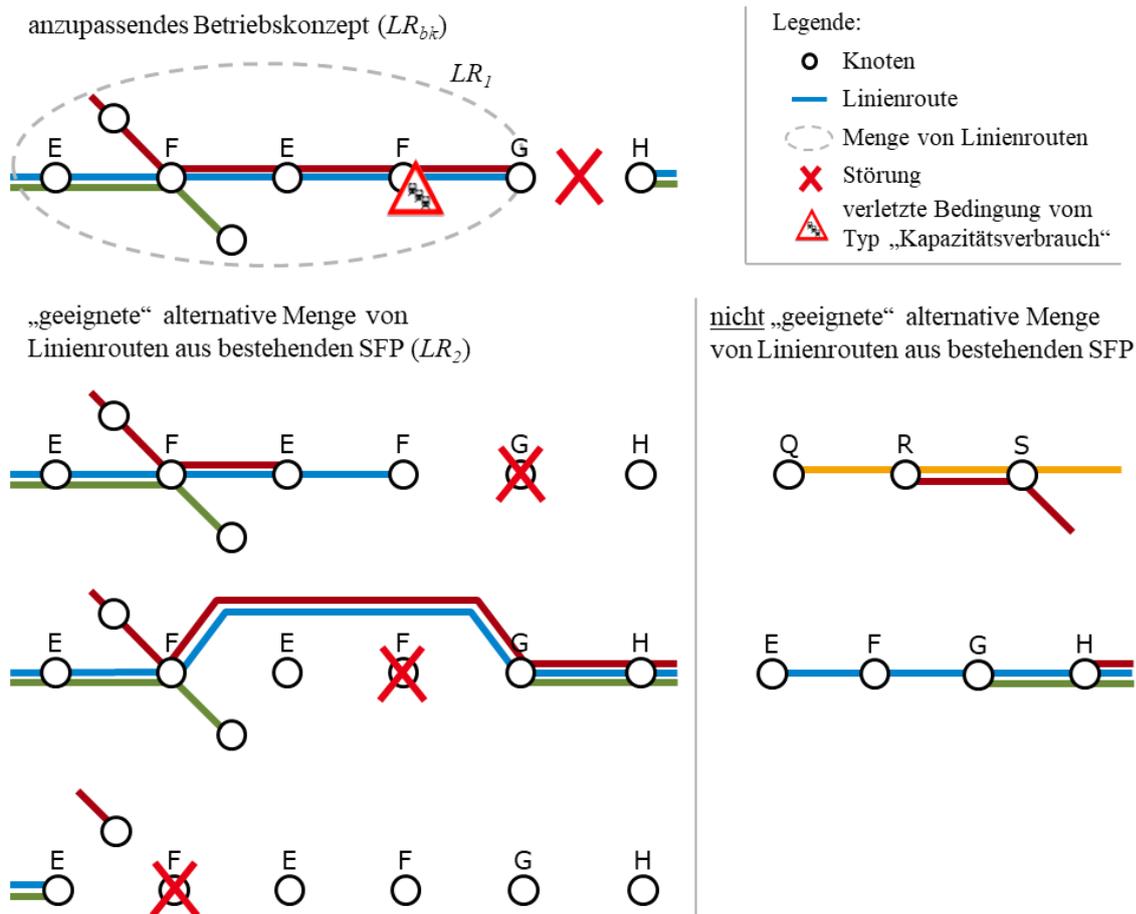


Abbildung 4-24: Beispiel für die Bestimmung von alternativen Mengen von Linienroute

Funktion: Erzeugung von Betriebskonzepten mit alternativen Mengen von Linienrouten

Die Funktion „Bestimmung von alternativen Mengen von Linienrouten“ ist Teil von Operator 2. Durch Operator 2 werden zu ersetzende Linienrouten durch funktionsfähige alternative Menge von Linienrouten ersetzt (siehe Kapitel 4.2.3).

Als Quelle für alternative Mengen von Linienrouten, die die Linienrouten des Ausgangszustands ersetzen sollen, werden – durch vorherige Iterationsschritten erzeugt – funktionsfähige Betriebskonzepte oder Betriebskonzepte eines bestehenden SFP genutzt (siehe Kapitel 4.2.3). Bei der Bestimmung der alternativen Menge von Linienrouten ist sicherzustellen, dass die alternative Menge von Linienrouten für eine Ersetzung der zu ersetzenden Linienroute geeignet ist. Da Linienrouten nur die im Regelbetrieb bedienten Netzäste bedienen (Kapitel 3.2), ist entsprechend Bedingung K1 vom Typ „Konsistente Linien“ eine alternative Menge von Linienrouten für eine Ersetzung geeignet, wenn durch diese Menge von Linienrouten Netzäste bedient werden, die auch von einer zu ersetzenden Linienroute bedient werden (siehe Abbildung 4-24).

Funktionsfähige Betriebskonzepte aus vorherigen Iterationsschritten weisen per Definition keine verletzten Bedingungen auf (siehe Kapitel 4.2.3).

Für Betriebskonzepte aus bestehenden SFP kann davon ausgegangen werden, dass diese keine verletzten Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“ und „Liniennetzplan“ aufweisen.

Sollen auch im durch die Ersetzung resultierenden Betriebskonzept Bedingungen möglichst nicht verletzt werden, müssen alle Linienrouten, die gemeinsame Knoten oder Kanten haben, in der alternativen Menge von Linienrouten enthalten sein. Durch nicht-verfügbare Infrastrukturelemente können für alternative Mengen von Linienrouten aus bestehenden Betriebskonzepten aber dennoch Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ verletzt sein.

Auch sind die Betriebskonzepte bestehender SFP für die aktuelle Infrastruktursituation hinsichtlich der Bedingung „Infrastrukturverfügbarkeit“ oftmals nicht-funktionsfähig, da die SFP für andere Störungsszenarien geplant wurden. Daher ist für alternative Mengen von Linienrouten aus bestehenden SFP zunächst zu prüfen, ob verletzte Bedingungen vorliegen. Zusätzlich muss für alternative Mengen von Linienrouten aus bestehenden Betriebskonzepten geprüft werden, ob diese nicht aus Mengen von Linienrouten bestehen, die in der Tabu-Liste enthalten sind.

Für die Ersetzung werden für jede zu ersetzende Linienroute alternative Mengen von Linienrouten der bestehenden und erzeugten funktionsfähigen Betriebskonzepte bestimmt, die auch mindestens einen Netzast der zu ersetzenden Linienroute bedienen. Für jede identifizierte alternative Menge von Linienrouten (LR_1) können alle Linienrouten von LR_{bk} bestimmt werden (LR_2), die mit LR_1 ersetzt werden. Durch die Ersetzung von LR_2 aus bk mit LR_1 wird ein neues Betriebskonzept erzeugt.

Zusammenfassung

Ziel des Kapitels war die Entwicklung der Funktionalität zur Erzeugung von Betriebskonzepten durch die Anwendung der Operatoren. Dafür wurde anhand des Ablaufs der beiden Operatoren sechs Funktionen identifiziert.

Zunächst wird in der Funktion „Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten“ aus einem anzupassenden Betriebskonzept Linienrouten bestimmt, die ersetzt werden sollen. Die maximale Anzahl an zu ersetzenden Linienrouten wird durch den Parameter $n_{er,max}$ vorgegeben.

Anschließend werden in der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ für die zu ersetzenden Linienrouten entsprechend Operator 1 alternative Linienrouten durch die Anwendung von ebM erzeugt.

Damit die resultierenden Betriebskonzepte aus konsistenten Linien bestehen, werden ggf. zu ersetzende Linienrouten und alternative Linienrouten in der Funktion „Zusammenfassung von Linienrouten“ zusammengefasst.

In der nächsten Funktion „Bewertung alternativer Linienrouten“ werden die alternativen Linienrouten hinsichtlich der erwarteten verkehrlichen Abweichung bei der Ersetzung bewertet. Für die Bewertung wurde eine Heuristik hergeleitet, die die möglichen Änderungen der Erschließungsfunktion, der Fahrgastkorridore sowie der Widerstandsveränderung bei der Ersetzung berücksichtigt.

Für Operator 1 erfolgt abschließend in der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten mit alternativen Mengen von Linienrouten“ die Erzeugung von Betriebskonzepten durch die Ersetzung der zu ersetzenden Linienrouten durch alternative Linienrouten. Da mehrere zu ersetzende Linienrouten und jeweils ebenfalls mehrere alternative Linienrouten bestehen können, wird eine Menge von Betriebskonzepten erzeugt.

Parallel zu Operator 1 können in der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten mit alternativen Mengen von Linienrouten“, wie von Operator 2 vorgesehen, alternative Mengen von Linienrouten bestimmt werden. Durch die Anwendung der alternativen Mengen von Linienrouten auf die zu ersetzenden Linienrouten werden weitere Betriebskonzepte erzeugt.

Die entwickelten Funktionalitäten werden in Kapitel 4.4 als ein Teil von Modul 1 spezifiziert.

4.3.5 Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte

Die vierte zu entwickelnde Funktionalität ist die Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte. In der im vorhergehenden Kapitel entwickelten Funktionalität „Erzeugung von Betriebskonzepten“ werden Betriebskonzepte erzeugt, die für die Prüfung der Abbruchbedingung und der ggf. erforderlichen Auswahl von Betriebskonzepten für einen weiteren Iterationsschritt bewertet werden müssen. Die Entwicklung der Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte erfolgt in diesem Kapitel und basiert auf den relevanten Anforderungen aus Kapitel 3.3 und den im Kapitel 4.2.3 bestimmten Eigenschaften.

Aus den Anforderungen wurde in Kapitel 4.2.1 bestimmt, dass

- das Betriebskonzept funktionsfähig sein soll und somit alle Bedingungen zur Funktionsfähigkeit (siehe Kapitel 4.3.3) erfüllen muss und
- die kundenorientierte Bewertung des SFP maximiert werden soll.

Anhand dieser beiden Anforderungen wird die Bewertung des Betriebskonzepts hergeleitet.

Anforderung Funktionsfähigkeit

Damit ein Betriebskonzept funktionsfähig ist, ist eine Lösung aller verletzten Bedingungen erforderlich (siehe Kapitel 4.3.3). Das Lösen von verletzten Bedingungen erfolgt durch Ersetzung von Linienrouten (siehe Kapitel 4.3.4). Entsprechend der Anforderungen, das bekannte Verkehrsangebot möglichst aufrechtzuerhalten und da möglichst geringe Änderungen zum linienspezifischen Betriebskonzept bestehen sollen, sollten möglichst wenige Ersetzungen erfolgen. Erforderliche Ersetzungen sollten mit möglichst ähnlichen Linienrouten erfolgen.

Ein Betriebskonzept ist daher besser zu bewerten, je weniger Ersetzungen erforderlich sind, um ein funktionsfähiges Betriebskonzept zu erhalten. Für die Bewertung wird daher die Anzahl der mindestens erforderlichen Ersetzungen eines Betriebskonzepts abgeschätzt.

Die Abschätzung der mindestens erforderlichen Ersetzungen erfolgt anhand der bestehenden verletzten Bedingungen eines Betriebskonzepts. Da die erzeugten Betriebskonzepte keine Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“ verletzen (siehe Kapitel 4.3.4), wird zwischen den verbleibenden drei Typen von Bedingungen unterschieden (siehe Kapitel 4.3.3):

- verletzte Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“
- verletzte Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“
- verletzte Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“

Verletzte Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“

Ist in einem Betriebskonzept eine Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ verletzt, ist immer eine Ersetzung der betroffenen Linienroute erforderlich. Die Ersetzung erfolgt mit Linienrouten, deren Knoten und Kanten verfügbar sind (siehe Kapitel 4.3.4). Daher ist auch, wenn mehrere Knoten und Kanten einer Linienroute nicht verfügbar sind, nur eine Ersetzung je Linienroute erforderlich.

Je mehr Knoten und Kanten einer Linienroute nicht verfügbar sind, desto größer ist die zu erwartende Abweichung der alternativen Linienroute. Daher sollten verletzte Bedingungen vom Typen „Infrastrukturverfügbarkeit“ je nicht verfügbaren Knoten bzw. Kanten in die Bewertung von Betriebskonzepten einfließen. Als Bewertungskriterium dient dafür die Anzahl der Knoten und Kanten für alle Linienrouten, die eine verletzte Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ aufweisen.

$$n_{vb,Infra,bk} = \sum_{lr \in bk} |K_{vb,Infra,lr}|$$

mit

- $n_{vb,Infra,bk}$ Anzahl der Knoten und Kanten über alle Linienrouten von Betriebskonzept bk , die eine verletzte Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ aufweisen
- $K_{vb,Infra,lr}$ Menge der Knoten und Kanten mit einer verletzten Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ von Linienroute lr
- bk Betriebskonzept aus dem aktuellen Iterationsschritt

Verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“

Besteht an einem Knoten oder einer Kante eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“, betrifft dies i. d. R. mehrere Linienrouten. Zur Lösung einer verletzten Bedingung an einem Knoten bzw. einer Kante ist der Kapazitätsverbrauch zu reduzieren. Dafür ist oftmals keine Ersetzung aller Linienroute erforderlich.

Durch die Ersetzung einer Linienroute können verletzte Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ an mehrere Knoten und Kanten entfallen. Gleichzeitig sind an allen Knoten und Kanten mit einer verletzten Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ mindestens eine Linienroute zu ändern. Daher fließen verletzte Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ je Knoten bzw. Kante eines Betriebskonzepts in die Bewertung von Betriebskonzepten ein. Als Bewertungskriterium dient die Anzahl der Knoten und Kanten eines Betriebskonzepts, die eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ aufweisen.

$$n_{vb,Kap,bk} = |K_{vb,Kap,bk}|$$

mit

- $n_{vb,Kap,bk}$ Anzahl der Knoten und Kanten im Betriebskonzept bk , die verletzte Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ aufweisen
- $K_{vb,Kap,bk}$ Menge der verletzten Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ von Betriebskonzept bk
- bk Betriebskonzept aus dem aktuellen Iterationsschritt

Verletzte Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“

Eine verletzte Bedingung vom Typ „Liniennetzplan“ bezieht sich entweder auf die Stammstrecke (Bedingung L1) oder auf eine beliebige Strecke (Bedingung L2). Dabei kann die verletzte Bedingung die gesamte Strecke oder nur einen Teil der Strecke betreffen.

Für die Lösung einer verletzten Bedingung vom Typ „Liniennetzplan“ ist die Beförderungskapazität der betroffenen (Teil)Strecke zu erhöhen (Bedingung L1) bzw. die Anzahl der Züge zu reduzieren (Bedingung L2). Alternativ ist die Strecke nicht mehr zu bedienen bzw. zu befahren. Analog zu den verletzten Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ gilt, dass durch die Ersetzung einer Linienroute verletzte Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“ an mehreren Kanten entfallen können. Auch ist an allen Kanten mit einer verletzten Bedingung vom Typ „Liniennetzplan“ mindestens eine Linienroute zu ändern. Daher fließen verletzte Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“ ebenfalls je Kante der betroffenen (Teil)Strecke in die Bewertung von Betriebskonzepten ein. Als Bewertungskriterium dient die Anzahl der Kanten der (Teil)Strecke, die eine verletzte Bedingung vom Typ „Liniennetzplan“ aufweisen.

$$n_{vb,LNP,bk} = |K_{vb,LNP,bk}|$$

mit

- $n_{vb,LNP,bk}$ Anzahl der Kanten in Betriebskonzept bk , die verletzte Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“ aufweisen
- $K_{vb,LNP,bk}$ Menge der Kanten mit einer verletzten Bedingung vom Typ „Liniennetzplan“ in Betriebskonzept bk
- bk Betriebskonzept aus dem aktuellen Iterationsschritt

Verknüpfung der Bewertungskriterien

Die Bewertungskriterien haben als Einheit eine Anzahl an Knoten und Kanten. Mindestens an jedem dieser Knoten und Kanten ist eine Änderung des Angebots erforderlich, um ein funktionsfähiges Betriebskonzept zu erhalten. Je höher die Anzahl der Knoten und Kanten, desto potenziell größer ist die erforderliche Anpassung des Betriebskonzepts. Die Auswahl von Betriebskonzepten sollte daher anhand der Gesamtheit der identifizierten Knoten und Kanten erfolgen. Für die Verknüpfung der Bewertungskriterien wird daher eine Addition dieser verwendet.

$$w_{bk,funk} = n_{vb,Infra,bk} + n_{vb,Kap,bk} + n_{vb,LNP,bk}$$

mit

$w_{bk,funk}$	Bewertung von Betriebskonzept bk hinsichtlich des Ziels „funktionsfähiges Betriebskonzept“
$n_{vb,Infra,bk}$	Anzahl der Knoten und Kanten über alle Linienrouten von Betriebskonzept bk , die verletzte Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ aufweisen
$n_{vb,Kap,bk}$	Anzahl der Knoten und Kanten in Betriebskonzept bk , die verletzte Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ aufweisen
$n_{vb,LNP,bk}$	Anzahl der Kanten in Betriebskonzept bk , die verletzte Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“ aufweisen
bk	Betriebskonzept aus dem aktuellen Iterationsschritt

Anforderung kundenorientierte Bewertung

Nachdem eine Bewertung von Betriebskonzepten anhand der Anforderung Funktionsfähigkeit bestimmt wurde, erfolgt nun die Herleitung einer Bewertung anhand der Anforderungen nach Maximierung der kundenorientierten Bewertung.

Eine kundenorientierte Bewertung von SFP ist ebenfalls in Modul 5 vorgesehen (siehe Kapitel 3.4). Daher ist zu prüfen, ob diese Bewertung entsprechend der Anforderung nach Wiederverwendbarkeit genutzt werden kann.

Bei der Anwendung von Modul 5 ist für das erzeugte Betriebskonzept zunächst zu prüfen, ob das Verkehrskonzept des ausgewählten SFP weiterhin angewendet werden kann oder ob eine Anpassung des Verkehrskonzepts erforderlich ist. Ist das Verkehrskonzept nicht nutzbar, ist zunächst z. B. durch die Anwendung von Modul 2 eine Anpassung des Verkehrskonzepts vorzunehmen.

Anders als bei Modul 5 wird erwartet, dass in den Iterationsschritten von Modul 1 eine Vielzahl von Betriebskonzepten bewertet werden müssen. Bei der Anwendung von Modul 2 und Modul 5 auf jedes erzeugte Betriebskonzept wird erwartet, dass aufgrund der für die Bewertung erforderlichen Lösung der Verbindungskonflikte die Anforderung nach einer schnellen Lösungsbereitstellung nicht zufriedenstellend erfüllt wird. Außerdem bestehen in den erzeugten Betriebskonzepten ggf. noch verletzte Bedingungen, sodass nur eine Abschätzung der kundenorientierten Bewertung möglich ist. Die Anwendung von Modul 2 und Modul 5 wird daher nicht weiterverfolgt. Stattdessen wird eine Heuristik zur Abschätzung der kundenorientierten Bewertung von erzeugten Betriebskonzepten entwickelt.

Durch die Funktionalität der Bewertung alternativer Linienrouten bei der Erzeugung von Betriebskonzepten (Kapitel 4.3.4) besteht bereits eine Heuristik. Diese bewertet aber die Veränderung bei der Ersetzung von einzelnen Linienrouten oder Mengen von Linienrouten, ohne das Zusammenwirken der Linienrouten innerhalb des Betriebskonzepts zu berücksichtigen. Um auch die Änderung der Verbindungen in die Bewertung der Betriebskonzepte einzubeziehen, wird eine Heuristik zur Abschätzung der kundenorientierten Bewertung des Betriebskonzepts anhand der erwarteten Änderung der Verbindungen bestimmt. Die Güte der Heuristik kann mit Abgleich durch die Bewertung bei Anwendung von Modul 2 und Modul 5 bestimmt werden.

Heuristik für die Abschätzung der kundenorientierten Bewertung von Betriebskonzepten

Für die Abschätzung der kundenorientierten Bewertung erfolgt eine Abschätzung der Widerstandsveränderung auf Basis der Verbindungen. Durch die Anpassung des Betriebskonzepts kann es für Verbindungen zu einer Erhöhung der Widerstände kommen, wenn z. B. die im Verkehrskonzept des ausgewählten SFP gewählten Konfliktlösungen nicht mehr machbar sind. Zu einer Reduzierung der Widerstände kann es kommen, wenn z. B. zuvor ungelöste Verbindungskonflikte gelöst werden oder nach der Anpassung des Betriebskonzepts eine attraktivere Lösung eines Verbindungskonflikts besteht. Für die Abschätzung der kundenorientierten Bewertung ist daher eine Analyse der möglichen Veränderungen der Verbindungen zwischen dem Betriebskonzept des ausgewählten SFP und dem angepassten Betriebskonzept erforderlich.

Bei dem Betriebskonzept des ausgewählten SFP ist für jede Verbindung bekannt, ob ein Verbindungskonflikt besteht. Wenn ein Verbindungskonflikt besteht, kann dieser (siehe Kapitel 2.4.2)

- durch die unveränderte Verbindung gelöst sein (gelöste Verbindungskonflikte, bei denen die Verbindung weiterhin verfügbar ist, aber eine Widerstandsveränderung besteht) oder
- durch eine Konfliktlösungsmaßnahme gelöst sein (durch Fahrgastkorridor oder individuelle Maßnahmen gelöste Verbindungskonflikte) oder
- ungelöst sein (ungelöste Verbindungskonflikte).

Für das erzeugte Betriebskonzept sind die Verbindungskonflikte nicht bekannt und müssen identifiziert werden. Dies kann z. B. über den bestehenden Ansatz von Brauner (2023) erfolgen (siehe Kapitel 2.4.2). Für eine Verwendung des Moduls ist zunächst zu prüfen, ob alle erforderlichen Inputs vorhanden sind. Die Inputs des Moduls „Verbindungskonflikterkennung“ sind (siehe Brauner 2023, S. 162)

- das Betriebskonzept,
- der Untersuchungszeitraum und
- der Untersuchungsraum.

Das Betriebskonzept liegt mit dem erzeugten Betriebskonzept vor. Der Untersuchungszeitraum entspricht der Dauer der Störung und mit Verweis auf Kapitel 3.2 wird angenommen, dass eine Abschätzung der Dauer vorliegt. Der Untersuchungsraum ist „[d]as gewünschte Nahverkehrsnetz und dessen Umfang [...]“ (Brauner 2023, S. 163) und ist nach Brauner (2023, S. 163) durch den Ersteller zu definieren. Die Definition aus der Planung des SFP kann für die

Anpassung übernommen werden. Das Modul „Verbindungskonflikterkennung“ kann somit verwendet werden.

Für Verbindungskonflikte, die eine Konfliktlösungsmaßnahme erfordern (also keine unveränderte Verbindung aufweisen), ist eine Lösung zu bestimmen. Da die erzeugten Betriebskonzepte noch verletzte Bedingungen aufweisen können und der Fahrplan der stabilen Phase noch konfliktbehaftet sein kann, könnten ermittelte KLA nicht umsetzbar sein. Weiterhin ist eine Vielzahl von Betriebskonzepten zu bewerten und daher soll insbesondere die Heuristik die Anforderung nach einer schnellen Lösungsbereitstellung erfüllen. Daher wird keine Konfliktlösung durch Erzeugung und Bewertung von KLA durchgeführt, sondern die Konfliktlösung soll abgeschätzt werden.

Entsprechend der Anforderung nach geringen Änderungen sollten für Verbindungskonflikte, die bereits im ausgewählten SFP bestehen, die dort verwendeten Konfliktlösungen weiterhin verwendet werden. Hat der Verbindungskonflikt bisher nicht bestanden oder ist die bisher vorhandene Konfliktlösung nicht anwendbar, ist abzuschätzen, welche (andere) Lösung des Verbindungskonflikts bei einer regulären Konfliktlösung unter Berücksichtigung der bestehenden Anforderungen erwartet wird.

Entsprechend der Anforderung nach Nutzung bestehender Verkehrskonzepte sollten bestehende Fahrgastkorridore genutzt werden. Daher ist zu prüfen, ob eine Lösung unter Nutzung der Fahrgastkorridore des (angepassten) Verkehrskonzepts besteht. Ist dies nicht der Fall, ist als Lösung des Verbindungskonflikts eine individuelle Lösung wahrscheinlich.

Da Brauner (2023, S. 170 f.) die Umleitung der Fahrgäste im eigenen System als wichtigste KLA bestimmt hat, sollte als individuelle Lösung zunächst geprüft werden, ob der Verbindungskonflikt durch eine Umleitung innerhalb des S-Bahn-Netzes gelöst werden kann. Dies erfolgt bei Brauner (2023) im Modul „Konfliktlösungsalternativensuche“.

Für das Modul „Konfliktlösungsalternativensuche“ sind als Input das Betriebskonzept und die Verbindungskonflikte erforderlich. Beide Inputs sind vorhanden und das Modul „Konfliktlösungsalternativensuche“ kann somit verwendet werden, um Verbindungskonflikte durch eine Umleitung innerhalb des S-Bahn-Netzes zu lösen.

Ist die Lösung eines Verbindungskonflikts durch eine Umleitung innerhalb des S-Bahn-Netzes nicht möglich, kann, der Anforderung nach Nutzung bereits in bestehenden SFP enthaltenen Maßnahmen folgend, eine alternative Lösung des Verbindungskonflikts in anderen SFP herangezogen werden. Ist mit den eingeführten KLA keine Lösung eines Verbindungskonflikts umsetzbar, ist eine andere individuelle Lösung möglich oder der Konflikt bleibt ungelöst. Um der Anforderung nach einer schnellen Lösungsbereitstellung zu entsprechen und da die bevorzugten Lösungsmöglichkeiten bereits berücksichtigt wurden (siehe Kapitel 2.4.2), wird der Suchraum nicht weiter vergrößert und der Verbindungskonflikt wird in der Heuristik als nicht gelöst berücksichtigt.

Zusammengefasst werden die Konfliktlösungen auf folgende Konfliktlösungen begrenzt:

- gewählte Konfliktlösungsalternative im Verkehrskonzept des ausgewählten SFP
- Fahrgastkorridore im (angepassten) Verkehrskonzept
- Umleitung der Fahrgäste innerhalb des S-Bahn-Netzes
- Lösungen des Verbindungskonflikts in anderem SFP

Ebenfalls den aufgeführten Anforderungen nach einer schnellen Lösungsbereitstellung folgend werden die KLA nicht bewertet, sondern hierarchisch entsprechend der obigen Reihenfolge ausgewählt. Für jede der KLA ist zu prüfen, ob die Konfliktlösungen im Betriebskonzept umsetzbar sind und die Anzahl der Umstiege die maximale Anzahl nicht übersteigt (siehe Brauner 2023, S. 173).

Um die erzeugten Betriebskonzepte miteinander zu vergleichen, ist eine Berechnung der Widerstandsveränderung aller Verbindungskonflikte erforderlich. Da die Konfliktlösungen nur abgeschätzt und nicht bewertet wurden, sind die Widerstandsveränderungen der KLA bislang nicht bekannt. Eine Berechnung der Widerstandsveränderungen kann, wie die Erstellung der KLA, außerdem nur eine Abschätzung sein, da die Betriebskonzepte ggf. noch verletzte Bedingungen aufweisen können und der Fahrplan der stabilen Phase noch konfliktbehaftet sein kann. Der Mehrwert einer exakten Berechnung gegenüber einer Abschätzung wird somit als geringer angenommen. Ein Entfall der exakten Berechnung der Widerstandsveränderung kann außerdem die Dauer der Lösungsbereitstellung reduzieren. Aufgrund der genannten Argumente wird keine Berechnung der Widerstandsveränderungen der Verbindungskonflikte durchgeführt.

Um Betriebskonzepte dennoch miteinander vergleichen zu können, werden als Gewichtung die aus der Planung des Verkehrskonzepts vorhandenen durchschnittlichen Widerstandsveränderungen je gelöstem bzw. ungelöstem Verbindungskonflikt verwendet. Unterschieden werden kann dabei zwischen

- gelösten Konflikten, die
 - durch unveränderte Verbindungen,
 - durch Lösungen aus einem bestehenden SFP oder
 - durch Umleitung der Fahrgäste im eigenen System gelöst werden und
- ungelösten Konflikten.

Das Ergebnis der Abschätzung der kundenorientierten Bewertung ist eine durchschnittliche Widerstandsveränderung eines erzeugten Betriebskonzepts.

Zusammenfassung

Ziel des Kapitels war die Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte. Dafür wurden aus den Anforderungen der Heuristik zwei Bewertungskriterien hergeleitet. Eine Bewertung erfolgt aufbauend auf den Bedingungen eines funktionsfähigen Betriebskonzepts. Dafür wird die Anzahl der mindestens erforderlichen Ersetzungen anhand der Knoten und Kanten mit verletzten Bedingungen abgeschätzt.

Eine zweite Bewertung, die auf der kundenorientierten Bewertung des SFP aufbaut, schätzt die kundenorientierte Bewertung des SFP durch eine Heuristik ab. In der Heuristik werden die Verbindungskonflikte erkannt sowie eine reduzierte Konfliktlösung und Bewertung durchgeführt.

Im Detail werden in der Heuristik zur Bewertung zunächst Verbindungskonflikte im erzeugten Betriebskonzept durch das Modul „Verbindungskonflikterkennung“ von Brauner (2023)

identifiziert. Die Lösung der Verbindungskonflikte erfolgt mit folgenden KLA, wobei die KLA mit Priorität in der Reihenfolge der Aufzählung ausgewählt werden:

- gewählte Konfliktlösungsalternative im Verkehrskonzept des ausgewählten SFP
- Fahrgastkorridore im (angepassten) Verkehrskonzept
- Umleitung der Fahrgäste im eigenen System
- Lösungen des Verbindungskonflikts in anderem SFP

Ist keine KLA für einen Verbindungskonflikt umsetzbar, gilt dieser als nicht gelöst.

Für eine kundenorientierte Bewertung der Betriebskonzepte werden die durchschnittlichen Widerstandsveränderungen je gelöstem bzw. ungelöstem Verbindungskonflikt des ausgewählten SFP verwendet. Das Ergebnis ist die durchschnittliche Widerstandsveränderung der erzeugten Betriebskonzepte. Aufbauend auf der Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte, kann in der letzten Funktionalität der Heuristik geprüft werden, ob die Heuristik terminiert und ggf. werden die im nächsten Iterationsschritt anzupassenden Betriebskonzepte ausgewählt.

4.3.6 Prüfung der Abbruchbedingungen und Auswahl von Betriebskonzept

Die verbleibende Funktionalität der Heuristik ist die Prüfung der Abbruchbedingung und die ggf. durchzuführende Auswahl erzeugter Betriebskonzepte für den nächsten Iterationsschritt. Ziel dieses Kapitels ist die Bestimmung der Abbruchbedingung und die Entwicklung der Auswahl der Betriebskonzepte, die als Ausgangszustand für den nächsten Iterationsschritt dienen sollen.

Die Heuristik zur Anpassung des Betriebskonzepts sollte terminieren, wenn ein funktionsfähiges Betriebskonzept erzeugt wurde, das eine verkehrliche Mindestqualität sicherstellt (siehe Kapitel 4.2.1) oder wenn abzusehen ist, dass in der weiteren Durchführung der Heuristik kein Betriebskonzept erzeugt werden kann, das die verkehrliche Mindestqualität sicherstellt. Die Voraussetzungen für eine Terminierung der Heuristik werden als Abbruchbedingungen formuliert.

Aufbauend auf den in Kapitel 3.4 als relevant für Modul 1 festgelegten Anforderungen und den im Kapitel 4.2.3 bestimmten Eigenschaften werden die Abbruchbedingung und anschließend die Auswahl der Betriebskonzepte hergeleitet.

Abbruchbedingung

Bei einer Reduzierung des Angebots mit perfekter Intensivierung durch die Heuristik (Angebot wird je Iterationsschritt im kleinstmöglichen Schritt reduziert) und einem streng monotonen Zusammenhang zwischen Angebot des Betriebskonzepts und kundenorientierter Bewertung, kann die Heuristik terminieren, sobald ein funktionsfähiges Betriebskonzept erzeugt wird. Unter diesen Annahmen hätten bei einer weiteren Anpassung alle weiteren erzeugten Betriebskonzepte ein geringes Angebot und würden somit eine schlechtere kundenorientierte Bewertung aufweisen.

Die angestrebte geringe Diversifikation der Heuristik (siehe Kapitel 4.2.3) stellt sicher, dass das Angebot in jedem Iterationsschritt nur geringfügig geändert wird, die genutzten Operatoren (vor allem Operator 2) bieten aber keine perfekte Intensivierung. Außerdem ist der Zusammenhang zwischen der kundenorientierten Bewertung und dem (betrieblichen) Angebot

komplex (kein streng monotoner Zusammenhang z. B. aufgrund der Fahrgastkorridore). Daher kann nicht sichergestellt werden, dass, wenn nicht-funktionsfähige Betriebskonzepte mit einer besseren kundenorientierten Bewertung als die in den bisherigen Iterationsschritten erzeugten funktionsfähigen Betriebskonzepten bestehen, in den weiteren Iterationsschritten nicht-funktionsfähige Betriebskonzepte mit einer besseren kundenorientierten Bewertung erzeugt werden.

Durch die Tabu-Liste und die Heuristik zur Abschätzung der kundenorientierten Bewertung einer Linienroute, die auf den Angebotsmerkmalen bediente Knoten, Taktzeit sowie Beförderungszeit basiert (siehe Kapitel 4.3.4), wird das Angebot der erzeugten Betriebskonzepte in jedem Iterationsschritt tendenziell schlechter. Der beschriebene Ansatz der Abbruchbedingung kann daher modifiziert angewendet werden

Mit einer Reduzierung des Angebots eines Betriebskonzepts nehmen die Verbindungskonflikte, auf denen die Heuristik zur Abschätzung der kundenorientierten Bewertung von Linienrouten basiert, tendenziell zu. Daher gilt für die Heuristik zur Anpassung des Betriebskonzepts ein Zusammenhang zwischen der kundenorientierten Bewertung und dem (betrieblichen) Angebot.

Insgesamt wird daher angenommen, dass nicht-funktionsfähige Betriebskonzepte in weiteren Iterationsschritten durch die tendenzielle Verschlechterung des Angebots nicht als Ausgangszustand für funktionsfähige Betriebskonzepte mit einer besseren kundenorientierten Bewertung dienen werden.

Mit diesen Voraussetzungen ist eine Terminierung der Heuristik möglich, wenn bereits ein funktionsfähiges Betriebskonzept erzeugt wurde und abzusehen ist, dass kein Betriebskonzept mit einer besseren kundenorientierten Bewertung erzeugt werden wird. Dies ist der Fall, wenn die kundenorientierte Bewertung des nicht-funktionsfähigen Betriebskonzepts mit der besten kundenorientierten Bewertung (= geringste Widerstandsveränderung) größer als die kundenorientierte Bewertung des funktionsfähigen Betriebskonzepts mit der besten kundenorientierten Bewertung (= geringste Widerstandsveränderung) aller funktionsfähigen Betriebskonzepte ist.

Abbruch, wenn: Widerstandsveränderung A > Widerstandsveränderung B

mit

- A nicht-funktionsfähiges Betriebskonzept mit der besten kundenorientierten Bewertung (= geringste Widerstandsveränderung) aller nicht-funktionsfähigen Betriebskonzepte
- B funktionsfähiges Betriebskonzept mit der besten kundenorientierten Bewertung (= geringste Widerstandsveränderung) aller funktionsfähigen Betriebskonzepte

Alternativ kann die Abbruchbedingung auch so formuliert werden, dass die Heuristik terminiert, wenn alle nicht-funktionsfähigen Betriebskonzepte eine schlechtere kundenorientierte Bewertung haben, als das bestbewertete funktionsfähige Betriebskonzept.

Da durch jeden Iterationsschritt der Heuristik das Angebot tendenziell verschlechtert wird, führt die fortdauernde Anpassung zu einem Ausfall aller Linien. Ein solches Betriebskonzept ist immer funktionsfähig und somit ist die Terminierung der Heuristik sichergestellt.

Wenn eine Anpassung des ausgewählten SFP durch den Disponenten abgelehnt wird, kommt ggf. ein alternatives SFP zum Einsatz, welches in der aktuellen Infrastruktursituation anwendbar ist (beispielsweise durch den Entfall von deutlich mehr Angebot). Wenn die Anpassung des ausgewählten SFP eine schlechtere kundenorientierte Bewertung als das „ausgewählte alternative SFP“ hat, wird das angepasste ausgewählte SFP nicht eingesetzt und die Adaption des SFP kann abgebrochen werden.

Daher kann die kundenorientierte Bewertung des Betriebskonzepts eines ausgewählten alternativen SFP (kundenorientierte Bewertung anhand des Verkehrskonzepts des ausgewählten alternativen SFP) als untere Schranke bei der Anpassung des Betriebskonzepts dienen und stellt somit eine Begrenzung des Suchraums dar. Die kundenorientierte Bewertung des ausgewählten alternativen Betriebskonzepts kann als funktionsfähiges Betriebskonzept angesehen werden und somit innerhalb der bestehenden Abbruchbedingung geprüft werden.

Besteht ein Wert, der die verkehrliche Mindestqualität definiert (siehe Brauner 2023, S. 202), kann dieser ebenfalls als untere Schranke verwendet werden. Besteht kein nicht-funktionsfähiges Betriebskonzept mit einer kundenorientierten Bewertung größer als die verkehrliche Mindestqualität, terminiert Modul 1 und damit auch die Adaption des SFP ohne Lösung.

Auswahl von Betriebskonzept für den nächsten Iterationsschritt

Je mehr Betriebskonzepte als Ausgangszustände für den nächsten Iterationsschritt ausgewählt werden, desto mehr Betriebskonzepte werden durch Anwendung der Operatoren erzeugt. Dies führt wiederum zu einer höheren Dauer der Lösungsbereitstellung. Die Anzahl der Ausgangszustände für den nächsten Iterationsschritt ist deshalb durch den Parameter $n_{BK,max}$ zu begrenzen.

Wie für die Herleitung der Abbruchbedingung beschrieben, wird in jedem Iterationsschritt das Angebot und damit die kundenorientierte Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte tendenziell schlechter. Außerdem endet die Heuristik, sobald ein funktionsfähiges Betriebskonzept eine bessere kundenorientierte Bewertung hat als alle nicht-funktionsfähigen Betriebskonzepte. Daher werden als Ausgangszustände für den nächsten Iterationsschritt nur Betriebskonzepte ausgewählt, die eine kundenorientierte Bewertung haben, die mindestens so hoch ist wie die kundenorientierte Bewertung des funktionsfähigen Betriebskonzepts mit der besten kundenorientierten Bewertung.

Somit werden Betriebskonzepte nicht ausgewählt, die funktionsfähig sind oder eine kundenorientierte Bewertung schlechter als das bestbewertete funktionsfähige Betriebskonzept aufweisen.

Erfüllen mehr als $n_{BK,max}$ Betriebskonzepte diese Vorgabe, sind $n_{BK,max}$ Betriebskonzepte auszuwählen. Für die Auswahl stehen die beiden Bewertungskriterien „kundenorientierte Bewertung“ und „Funktionsfähigkeit“ zur Verfügung (siehe Kapitel 4.3.5). Die Bewertungskriterien können entweder zu einer Bewertungsfunktion zusammengeführt werden, um eine eindimensionale Bewertung der Betriebskonzepte zu erhalten oder die Auswahl kann aufbauend auf den separaten Bewertungskriterien erfolgen.

Für einen Zusammenhang zwischen den beiden Bewertungskriterien müsste z. B. jeder erforderlichen Ersetzung eine Verschlechterung der kundenorientierten Bewertung zugeordnet werden. Da die erforderlichen Daten für eine Zusammenführung nicht vorliegen und der

zusätzliche Nutzen für eine Auswahl als gering angesehen wird, erfolgt eine Auswahl anhand der separaten Bewertungskriterien.

Sowohl die Betriebskonzepte mit der besten kundenorientierten Bewertung als auch Betriebskonzepte mit der besten Bewertung anhand des Kriteriums der Funktionsfähigkeit werden ausgewählt. Die Auswahl kann paritätisch zwischen beiden Bewertungen erfolgen oder anhand eines Faktors. Sollte weiterhin keine eindeutige Auswahl möglich sein, da kein Kriterium, auf Basis dessen eine Entscheidung erfolgen kann, eindeutig ist, ist der Eigenschaft einer deterministischen Entscheidungsfindung der Heuristik folgend (siehe Kapitel 4.2.3), eine beliebige deterministische Entscheidung herbeizuführen (z. B. Auswahl der zuerst erzeugten Betriebskonzepte).

Zusammenfassung

Ziel des Kapitels war die Bestimmung der Funktionalität der Heuristik der Anpassung des Betriebskonzepts bzgl. der Abbruchbedingung sowie die Bestimmung der Auswahl der Ausgangszustände für den nächsten Iterationsschritt.

Als Abbruchbedingung wurde festgelegt, dass die Heuristik terminiert, wenn die kundenorientierte Bewertung des nicht-funktionsfähigen Betriebskonzepts mit der besten kundenorientierten Bewertung größer als die kundenorientierte Bewertung des funktionsfähigen Betriebskonzepts mit der besten kundenorientierten Bewertung aller funktionsfähigen Betriebskonzepte ist. Als Schranke kann ebenfalls ein ausgewähltes alternatives SFP oder ein Wert, der die verkehrliche Mindestqualität definiert, dienen.

Wenn die Abbruchbedingung in einem Iterationsschritt nicht erfüllt wird, werden maximal $n_{BK,max}$ Betriebskonzepte, die eine bessere kundenorientierte Bewertung haben als das funktionsfähige Betriebskonzept, ausgewählt. Trifft diese Voraussetzung auf mehr als $n_{BK,max}$ Betriebskonzepte zu, werden die Betriebskonzepte mit den besten Bewertungen in den beiden Bewertungskriterien aus der Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte ausgewählt.

Mit der Bestimmung der Abbruchbedingung und der Auswahl der Ausgangszustände für den nächsten Iterationsschritt sind alle Funktionalitäten der Heuristik entwickelt, sodass im nächsten Kapitel die Spezifikation der Heuristik in Modul 1 erfolgen kann.

4.3.7 Zusammenfassung

Ziel dieses Kapitels war es, die Funktionalitäten der Heuristik zur Anpassung des Betriebskonzepts zu entwickeln. Dafür wurden fünf Funktionalitäten der Heuristik bestimmt:

- Bestimmung der elementaren betrieblichen Maßnahmen
- Prüfung der Funktionsfähigkeit
- Erzeugung von Betriebskonzepten
- Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte
- Abbruchbedingung und Auswahl von Betriebskonzepten

Zur Bestimmung ebM werden diese aus betrieblichen Maßnahmen der bestehenden SFP entnommen. Dafür werden die betrieblichen Maßnahmen der bestehenden SFP hinsichtlich der elementaren Konfliktlösungen

- Änderung der Taktzeit (bis hin zu Ausfall der Linienroute),
- Änderung des Laufwegs (Umleitung) und
- Änderung des Laufwegs (alternativer Wende) geprüft.

Die bestimmten ebM können als Ausgangspunkt für die Erzeugung weiterer ebM dienen. Auch können weitere ebM durch Anwendung von elementaren Konfliktlösungen im ungestörten S-Bahn-Netz erzeugt werden. Die Bestimmung der ebM kann vorab erfolgen und ist daher nicht Bestandteil von Modul 1.

Die Funktionsfähigkeit von Betriebskonzepten bemisst sich anhand von vier verschiedenen Typen von Bedingungen. Die Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ berücksichtigt die Konfliktfreiheit des Betriebskonzepts bzgl. Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten auf Laufwegebene. Die Einhaltung eines fahrplanunabhängigen Kapazitätskriteriums wird mit der Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ abgedeckt. Weiterhin bestehen Bedingungen für konsistente Linien (Bedingung vom Typ „Konsistente Linien“) und für den Liniennetzplan (Bedingung vom Typ „Liniennetzplan“).

Für die Erzeugung von Betriebskonzepten wurden anhand des Ablaufs der beiden in Kapitel 4.2.3 bestimmten Operatoren sechs Funktionen identifiziert. Zunächst werden Linienrouten bestimmt, die ersetzt werden sollen. Anschließend werden für die zu ersetzenden Linienrouten alternative Linienrouten durch die Anwendung von ebM und die Nutzung bestehender SFP sowie funktionsfähiger Betriebskonzepte erzeugt.

Nachdem die alternativen Linienrouten ggf. zur Vermeidung von inkonsistenten Linien zusammengefasst wurden, werden die alternativen Linienrouten hinsichtlich der erwarteten verkehrlichen Abweichung bei der Ersetzung bewertet. Zuletzt erfolgt die Erzeugung von Betriebskonzepten durch die Ersetzung der zu ersetzenden Linienroute durch die alternative Linienroute.

Für die Funktionalität der Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte wurden zwei Bewertungskriterien hinsichtlich der Funktionalität und der kundenorientierten Bewertung des Betriebskonzepts hergeleitet. Die Bewertung von Betriebskonzepten hinsichtlich der kundenorientierten Bewertung des SFP wird durch eine Heuristik abgeschätzt, die Verbindungskonflikte identifiziert sowie eine vereinfachte Konfliktlösung vornimmt.

Als letzte Funktionalität wurde die Abbruchbedingung sowie die Bestimmung der Auswahl der Ausgangszustände für den nächsten Iterationsschritt entwickelt. Als Abbruchbedingung wurde festgelegt, dass die Heuristik terminiert, wenn das funktionsfähige Betriebskonzept mit der besten kundenorientierten Bewertung eine bessere kundenorientierte Bewertung aufweist als das nicht-funktionsfähige Betriebskonzept mit der besten kundenorientierten Bewertung. Wenn die Abbruchbedingung in einem Iterationsschritt nicht erfüllt wird, werden maximal $n_{BK,max}$ Betriebskonzepte, die eine bessere kundenorientierte Bewertung haben als das funktionsfähige Betriebskonzept ausgewählt.

Die in diesem Kapitel entwickelten Funktionalitäten bilden die Grundlage für die nun anschließende Spezifizierung von Modul 1.

4.4 Spezifizierung von Modul 1

In Kapitel 4.2 wurde als Methode zur Lösung von Teilproblem I eine Heuristik ausgewählt und deren Komponenten und Eigenschaften bestimmt. Darauf aufbauend wurden in Kapitel 4.3 die Funktionalitäten der Heuristik entwickelt. Die Objektstruktur von Modul 1 wurde bereits in Kapitel 4.2 eingeführt (siehe Abbildung 4-1, Abbildung 4-3 und Abbildung 4-5). Ziel dieses Kapitels ist es, die entwickelten Funktionalitäten, die zusammen Modul 1 bilden, zu spezifizieren.

Für die Spezifizierung von Modul 1 werden zunächst die Parameter, die bei der Entwicklung der Funktionalitäten in Kapitel 4.3 bestimmt wurden, zusammengefasst (Kapitel 4.4.1). Anschließend wird in Kapitel 4.4.2 der Aufbau von Modul 1 beschrieben. Der restliche Aufbau von Kapitel 4.4 folgt den vier Funktionalitäten, die Modul 1 bilden. Jede Funktionalität entspricht einem Submodul von Modul 1:

- Modul 1.1: Prüfung der Funktionalität (Kapitel 4.4.3)
- Modul 1.2: Erzeugung von Betriebskonzepten (Kapitel 4.4.3)
- Modul 1.3: Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte (Kapitel 4.4.3)
- Modul 1.4: Prüfung der Abbruchbedingung und Auswahl der erzeugten Betriebskonzepte (Kapitel 4.4.3)

Die Bestimmung der elementaren betrieblichen Maßnahmen ist nicht in Modul 1 enthalten, da diese vorab und nicht während der Anpassung des Betriebskonzepts erfolgt (siehe Kapitel 4.3.3).

4.4.1 Parameter von Modul 1

In der Entwicklung der Heuristik in Kapitel 4.3 wurden die in Tabelle 4-4 aufgeführten Parameter bestimmt. Im Folgenden wird anhand der Anforderungen an die Heuristik bestimmt, welche Werte die Parameter erhalten sollten.

Für die Parameter $n_{BK,max}$, $n_{er,max}$, $n_{a,max}$, gilt: Je höher der Wert des Parameters, desto höher ist die Anzahl von Betriebskonzepten, die in einem Iterationsschritt erzeugt werden und somit auch die Diversifizierung und die Dauer der Lösungsbereitstellung (Kapitel 4.3.4). Um den Anforderungen nach schneller Lösungsbereitstellung und geringer Diversifizierung zu entsprechen, sollten daher geringe Werte für die Parameter gewählt werden.

Der Parameter $n_{U,max}$ wurde eingeführt, um die Anzahl der Umleitungen einer Linienroute zu begrenzen und so das Betriebskonzept für Personale handhabbar und für Kunden verständlich zu machen (siehe Kapitel 4.3.4). Der Parameter sollte daher hinsichtlich dieser Anforderungen durch erfahrene Disponenten gesetzt werden und so die Besonderheit des jeweiligen S-Bahn-Netztes berücksichtigen. Eine Begrenzung der Anzahl der Umleitungen entspricht auch den Anforderungen nach schneller Lösungsbereitstellung und geringer Diversifizierung.

Der Parameter n_{Tabu} gibt die Anzahl der Iterationsschritte vor, die ein Element in der Tabu-Liste verbleibt. Je mehr Iterationsschritte ein Element in der Tabu-Liste gespeichert bleibt, desto höher sind die Diversifizierung und die Dauer der Lösungsbereitstellung, da die Tabu-Liste tendenziell länger wird und bei der Erzeugung von Betriebskonzepten ein Abgleich mit der Tabu-Liste erforderlich ist (Talbi 2009, S. 142 f.). Da die Tabu-Liste der Diversifizierung dient (siehe Kapitel 4.2.3) und auch die Abbruchbedingung darauf aufbaut (siehe Kapitel 4.3.6), dass

nicht-funktionsfähige Betriebskonzepte nicht erneut erzeugt werden, sollten die Elemente der Tabu-Liste möglichst lange dort verbleiben.

Durch die Speicherung von Mengen von Linienrouten statt Betriebskonzepten in der Tabu-Liste werden Bestandteile von Lösungen anstatt ganzer Lösungen gespeichert. Dadurch wird der Aufwand für die Speicherung der Daten reduziert (siehe Kapitel 4.2.3). Während der Anwendung der Heuristik können außerdem Elemente der Tabu-Liste gelöscht werden, wenn neu aufgenommene Elemente eine Teilmenge dieser sind (z. B. kann die Menge $LR_1 = \{lr_1, lr_2, lr_3\}$ gelöscht werden, sobald die Teilmenge $LR_2 = \{lr_1, lr_2\}$ aufgenommen wird). LR_2 ist bereits ausreichend, um sicherzustellen, dass keine Betriebskonzepte mit LR_1 erzeugt werden.

Verbleiben die Elemente die gesamte Durchführung über in der Tabu-Liste, können Informationen über nicht-funktionsfähige Mengen von Linienrouten entnommen und für weitere Durchführungen der Heuristik oder auch andere Anwendungen genutzt werden (z. B. für die weitere Disposition oder die Planung von SFP). Vorgaben von Disponenten für die Betriebskonzepte (z. B. Ausschluss bestimmter Mengen von Linienrouten) können ebenfalls durch eine initiale Befüllung der Tabu-Liste berücksichtigt werden (dies entspricht der Anforderung nach Anpassbarkeit). Außerdem steigt die Dauer der Lösungsbereitstellung mit der Länge der Tabu-Liste nur linear an. Daher sollte der Parameter n_{Tabu} möglichst groß gewählt werden.

Aufgrund der Möglichkeit der Reduzierung der Größe der Tabu-Liste, der Verwendung von Mengen von Linienrouten und der geringen Diversifikation der Operatoren wird davon ausgegangen, dass im Praxiseinsatz die Anzahl der Elemente in der Tabu-Liste bzgl. Speichergröße und Laufzeit nicht zu groß wird. Daher sollte der Wert des Parameters auf „unendlich“ festgelegt werden, damit die Elemente dauerhaft in der Tabu-Liste verbleiben.

Nachdem die Werte der Parameter diskutiert wurden, erfolgt im Weiteren die Bestimmung des Aufbaus von Modul 1.

Tabelle 4-4: Übersicht der Parameter der Heuristik

Parameter	Beschreibung	empfohlener Wert des Parameters
$n_{BK,max}$	maximale Anzahl an Betriebskonzepten, die in einem Iterationsschritt angepasst werden	niedrig
$n_{er,max}$	maximale Anzahl an zu ersetzenden Linienrouten je Betriebskonzept je Iterationsschritt	niedrig
$n_{a,max}$	maximale Anzahl an Alternativen, die je Element, das ersetzt wird, für die Ersetzung verwendet werden	niedrig
$n_{U,max}$	maximale Anzahl an Umleitungen einer Linienroute	niedrig
n_{Tabu}	Anzahl der Iterationsschritte, die ein Element in der Tabu-Liste verbleibt	unendlich

4.4.1 Aufbau von Modul 1

In Kapitel 4.3 wurden die erforderlichen Funktionalitäten von Modul 1 bestimmt und entwickelt. Für die Spezifizierung von Modul 1 ist darauf aufbauend der Ablauf von Modul 1 zu bestimmen. Bei der Herleitung der Funktionalitäten (siehe Kapitel 4.3.1) wurde eine Reihenfolge der Funktionalitäten bestimmt (siehe Abbildung 4-7), die das Grundgerüst von Modul 1 darstellt.

Der Aufbau von Modul 1 ist in Abbildung 4-25 dargestellt. Entsprechend der Systemarchitektur (siehe Kapitel 3.4) wird Modul 1 entweder zu Beginn der Adaption eines SFP aufgerufen oder durch eine Rückkopplung von Modul 3, 4 oder 5.

Bei der erstmaligen Durchführung von Modul 1 ist das Betriebskonzept des ausgewählten SFP zunächst auf Funktionsfähigkeit zu prüfen. Dies erfolgt in Modul 1.1. Ist das Betriebskonzept des ausgewählten SFP funktionsfähig, terminiert Modul 1 und es folgt die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase in Modul 3 (siehe Kapitel 3.4).

Wenn Modul 1 durch eine Rückkopplung aufgerufen wird, dann besteht bereits ein angepasstes Betriebskonzept, das Modul 1 durchlaufen hat. Dieses Betriebskonzept ist somit gemäß Modul 1.1 funktionsfähig, da ansonsten Modul 1 nicht erfolgreich terminiert wäre (siehe Kapitel 4.3.6).

Bei dem Aufrufen von Modul 1 durch eine Rückkopplung ist somit keine Prüfung der Funktionsfähigkeit zu Beginn erforderlich, da keine verletzten Bedingungen erkannt werden würden. Vielmehr ist eine Zuweisung von verletzten Bedingungen erforderlich, die den Grund der Rückkopplung repräsentieren. Diese Zuweisung erfolgt bei der Bestimmung der Rückkopplungen in den Kapiteln 6, 7 und 8.

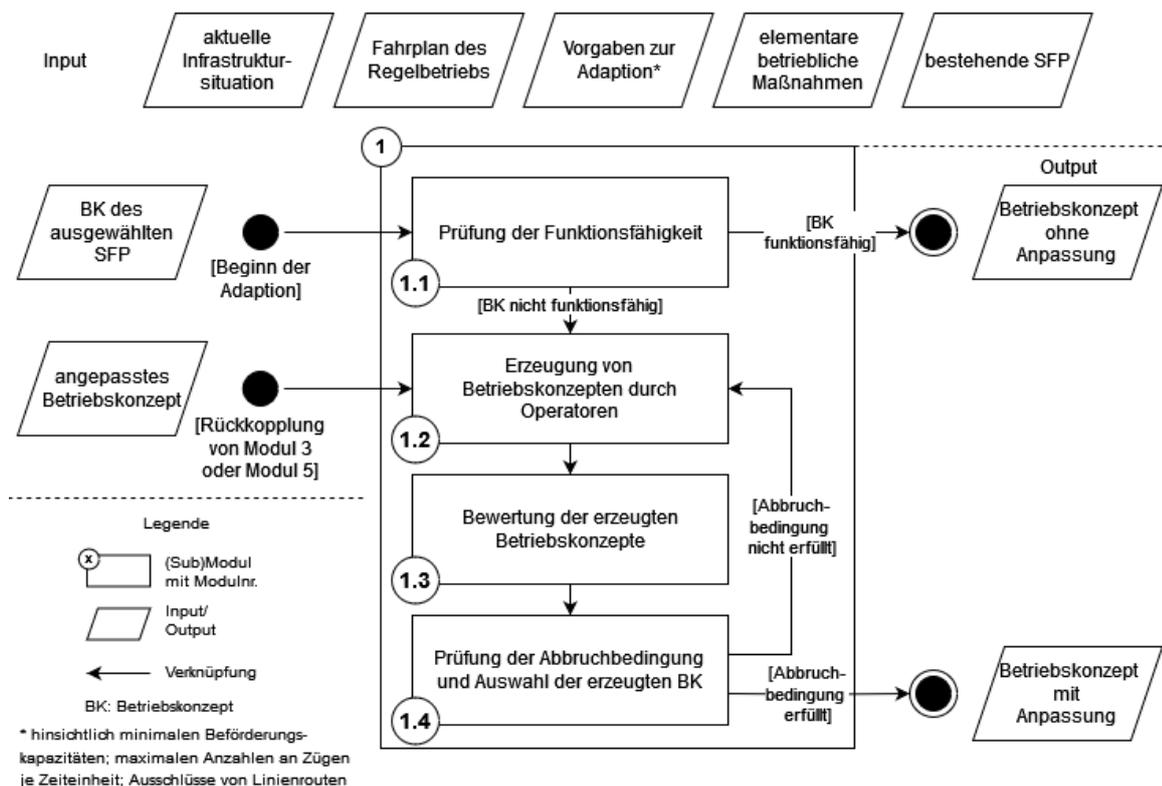


Abbildung 4-25: Aufbau von Modul 1

Als Nächstes erfolgt die Erzeugung von Betriebskonzepten in Modul 1.2. Ausgangspunkt für die Erzeugung von Betriebskonzepten ist das Betriebskonzept des ausgewählten SFP, das rückgekoppelte Betriebskonzept oder ein im vorherigen Iterationsschritt erzeugtes Betriebskonzept. Die Betriebskonzepte, die als Ausgangspunkt für Modul 1.2 dienen, werden als „anzupassende Betriebskonzepte“ bezeichnet. Modul 1.2 ist für jedes anzupassende Betriebskonzept (*bk*) separat zu durchlaufen.

Nach Abschluss von Modul 1.2 erfolgt für die Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte in Modul 1.3 u. a. eine Prüfung der Funktionalität (siehe Kapitel 4.3.5). Für die Prüfung der Funktionalität kann Modul 1.1 verwendet werden.

Das letzte Submodul von Modul 1 ist die Prüfung der Abbruchbedingung und die Auswahl der erzeugten Betriebskonzepte (Modul 1.4). Wird die Abbruchbedingung erfüllt, dann terminiert Modul 1. Wird die Abbruchbedingung nicht erfüllt, dann startet der nächste Iterationsschritt von Modul 1. Im nächsten Iterationsschritt ist keine erneute Prüfung der Funktionalitäten erforderlich, da dies bereits in Modul 1.3 erfolgt ist.

Eine Rückkopplung von Modul 1 zu einem anderen Modul besteht nicht, da Modul 1 das erste Modul der Systemarchitektur ist (siehe Kapitel 3.4).

4.4.2 Modul 1.1: Prüfung der Funktionsfähigkeit

Die erste Funktionalität des Moduls ist die Prüfung der Funktionsfähigkeit eines Betriebskonzepts. Diese Funktionalität wurde in Kapitel 4.3.3 entwickelt und wird in Modul 1.1 überführt.

Für die Funktionalität wurden vier Typen von Bedingungen bestimmt. Die Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“ werden in der Erzeugung von Betriebskonzepten berücksichtigt (siehe Kapitel 4.3.4). In Modul 1.1 erfolgt deshalb nur eine Prüfung der Bedingungen vom Typ

- „Infrastrukturverfügbarkeit“,
- „Kapazitätsverbrauch“ und vom Typ
- „Liniennetzplan“.

Abschließend wird die Tabu-Liste aktualisiert. Dazu werden die (Mengen von) Linienrouten der in den Funktionen identifizierten verletzten Bedingungen in die Tabu-Liste aufgenommen. Anschließend können Mengen von Linienrouten aus der Tabu-Liste entfernt werden, wenn eine Teilmenge in der Tabu-Liste enthalten ist (siehe Kapitel 4.4.1).

Funktion: Bestimmung verletzter Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“

Input der Funktion ist ein anzupassendes Betriebskonzept und die aktuelle Infrastruktursituation.

Eine verletzte Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ liegt vor, wenn ein Infrastrukturverfügbarkeitskonflikt besteht, der nur durch eine Änderung des Laufweges zu lösen ist (siehe Kapitel 4.3.4). Die Identifikation dieser Art von Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten erfolgt für alle Linienrouten des anzupassenden Betriebskonzepts. Dafür sind alle Knoten und Kanten einer Linienroute auf Infrastrukturverfügbarkeitskonflikt zu prüfen. Ist ein Knoten oder eine Kante nicht verfügbar, besteht ein Infrastrukturverfügbarkeitskonflikt und dieser wird in die Menge der Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte der Linienroute aufgenommen.

Sind nur einzelne Infrastrukturelemente eines Knotens oder einer Kante nicht verfügbar, ist zu prüfen, ob ein alternativer Fahrweg besteht, sodass eine Änderung des Laufwegs nicht erforderlich ist (siehe Kapitel 4.3.3). Für die Prüfung ist zu unterscheiden, ob ein Knoten oder eine Kante geprüft wird.

Bei einem Knoten wird geprüft, ob innerhalb des Knotens oder unter Einbeziehung der benachbarten Knoten der Linienroute ein alternativer Fahrweg besteht. Dabei sind alle Knoten und Kanten der Linienroute weiterhin zu befahren, da ansonsten eine Umleitung bzw. alternative Wende erfolgt. Außerdem müssen für einen alternativen Fahrweg Beginn und Ende des alternativen Fahrwegs verfügbare Regelgleise sein. Die Ausweitung der Suche nach einem alternativen Fahrweg durch Einbeziehung der benachbarten Knoten ist durch Vorgaben für die Nutzung des Gegengleises, wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, zu begrenzen. Kann kein alternativer Fahrweg bestimmt werden, besteht für den Knoten ein Infrastrukturverfügbarkeitskonflikt und dieser wird in die Menge der Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte der Linienroute aufgenommen.

Analog zur Prüfung der Knoten erfolgt die Prüfung der Kanten. Der Unterschied ist, dass für die Suche nach einem alternativen Fahrweg in jedem Fall die benachbarten Knoten berücksichtigt werden müssen. Beziehen sich verletzte Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ der gleichen Linienroute auf benachbarte Knoten und Kanten, können diese zusammengefasst werden.

Output der Funktion ist die Menge der verletzten Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ für jede Linienroute des anzupassenden Betriebskonzepts.

Funktion: Bestimmung verletzter Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“

Für die Prüfung des fahrplanunabhängigen Kapazitätskriteriums wird der Ansatz von Brauner und Oetting (2019) verwendet (siehe Kapitel 4.3.3). Für eine detaillierte Beschreibung des Ansatzes wird auf Brauner und Oetting (2019) verwiesen. Der Ansatz ist zu erweitern, da ggf. Zugfahrten bestehen, die nicht in den im Betriebskonzept des ausgewählten SFP vorgesehenen Fahrwegen verkehren. Input der Funktion ist ein anzupassendes Betriebskonzept und die aktuelle Infrastruktursituation.

Auf eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ geprüft werden alle Knoten und Kanten mit Linienrouten, die

- teilweise nicht verfügbar sind (einzelne Infrastrukturelemente stehen nicht zur Verfügung),
- eine Erhöhung der Zuganzahl oder
- für eine Linienroute eine Änderung der Fahrwege im Vergleich zum ausgewählten SFP bzw. für eine Linienroute keinen Fahrweg aufweisen.

Bestehen für Knoten oder Kanten Linienrouten, für die keine Fahrwege vorgegeben sind, werden für diese Linienrouten alternative Fahrwege bestimmt. Zu beachten sind dabei die erforderlichen Änderungen der Fahrwege, die sich in der Funktion „Bestimmung verletzter Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit““ aufgrund teilweise nicht verfügbarer Knoten und Kanten ergeben haben.

Die Bestimmung der alternativen Fahrwege im Knoten kann durch einen Algorithmus zur Routensuche erfolgen. Anschließend sind Fahrwege aus den alternativen Fahrwegen

auszuwählen, sodass bei Anwendung des Ansatzes von Brauner und Oetting (2019) das Kapazitätskriterium eingehalten wird. Wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben ist dafür ein Algorithmus zu entwickeln. Für Knoten und Kanten, bei denen alle Fahrwege vorgeben sind, kommt der Ansatz von Brauner und Oetting (2019) ohne Erweiterung zum Einsatz. Für Knoten und Kanten, bei denen das Kapazitätskriterium im Ansatz von Brauner und Oetting (2019) nicht eingehalten wird, besteht eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“, die den beteiligten Linienrouten zugeordnet wird.

Output der Funktion ist die Menge der verletzten Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ für jede Linienroute des anzupassenden Betriebskonzepts.

Funktion: Bestimmung verletzter Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“

Input der Funktion ist ein anzupassendes Betriebskonzept. Diese ist auf die beiden Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“ (Bedingung L1 und L2) zu prüfen. Die beiden Bedingungen wurden in Kapitel 4.3.3 formuliert.

Für Bedingung L1 ist zu prüfen, ob die Bedienung der Stammstrecke die vorgegebenen Mindestbeförderungskapazitäten erfüllt. Dafür ist die durch die Linienrouten bereitgestellte Beförderungskapazität zwischen den Verkehrsknoten der Stammstrecke zu berechnen und mit der geforderten Mindestbeförderungskapazität zu vergleichen. Wird die Mindestbeförderungskapazität nicht eingehalten, besteht für die Kanten eine verletzte Bedingung L1.

Bedingung L2 gibt für Kanten eine maximale Anzahl von Zügen je Zeiteinheit vor. Für die Kanten ist somit die durch die Linienrouten vorgesehene Anzahl von Zügen zu bestimmen. Werden die Vorgaben zur Zuganzahl nicht eingehalten, besteht für die Kanten eine verletzte Bedingung L2.

Output der Funktion ist die Menge der verletzten Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“ für jede Linienroute des anzupassenden Betriebskonzepts.

4.4.3 Modul 1.2: Erzeugung von Betriebskonzepten

Die zweite Funktionalität von Modul 1 ist die Erzeugung von Betriebskonzepten. Diese Funktionalität wurde in Kapitel 4.3.4 entwickelt und wird in ein Modul 1.2 überführt.

Das Modul 1.2 „Erzeugung von Betriebskonzepten“ besteht aus sechs Funktionen, die dazu dienen, durch zwei Operatoren Betriebskonzepte zu erzeugen (siehe Kapitel 4.3.4). Der Ablauf der Funktionen ist in Abbildung 4-15 dargestellt. Der zweite und jeder weitere Iterationsschritt der Heuristik startet direkt mit Modul 2.1 (siehe Abbildung 4-25).

Bestehen in einem Iterationsschritt mehrere anzupassende Betriebskonzepte, ist Modul 1.2 für jedes anzupassende Betriebskonzept *bk* separat zu durchlaufen. Im Weiteren werden die Funktionen von Modul 1.2 beschrieben.

Funktion: Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten

Die Funktion „Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten“ dient der Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten des im aktuellen Iterationsschritt anzupassenden Betriebskonzepts *bk*. Input der Funktion ist ein anzupassendes Betriebskonzept *bk* und die in *bk* verletzten Bedingungen.

Sind verletzte Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ vorhanden, sind nur die Linienrouten dieser verletzten Bedingung als zu ersetzende Linienroute auszuwählen (siehe Kriterium 1 zur Auswahl der zu ersetzenden Linienroute in Kapitel 4.3.4). Ansonsten bilden die Linienrouten der verletzten Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ und vom Typ „Liniennetzplan“ die zu ersetzenden Linienrouten.

Übersteigt die Anzahl der zu ersetzenden Linienrouten Parameter $n_{er,max}$, ist die Anzahl der zu ersetzenden Linienrouten zu reduzieren. Dies erfolgt anhand von zwei weiteren Kriterien (siehe Kapitel 4.3.4).

Vorrangig werden die verletzten Bedingungen ausgewählt an denen Linienrouten mit einer hohen Anzahl an verletzten Bedingungen beteiligt sind. Anhand dieses Kriteriums können die verletzten Bedingungen gereiht werden. Absteigend werden verletzte Bedingungen ausgewählt, sodass die Anzahl der zu ersetzenden Linienroute $n_{er,max}$ nicht überstiegen wird. Ist nur noch eine verletzte Bedingung übrig und $n_{er,max}$ ist weiterhin nicht eingehalten, dann erfolgt die Auswahl anhand des dritten Kriteriums. Dafür werden vorrangig die Linienrouten mit einer hohen Anzahl an verletzten Bedingungen ausgewählt.

Output der Funktion ist die Menge der zu ersetzenden Linienrouten von bk ($LR_{bk,er}$) und die Menge der im aktuellen Iterationsschritt ausgewählten verletzten Bedingungen von bk (VB_{bk}).

Abbildung 4-26 zeigt die beispielhafte Anwendung der Funktion „Bestimmung der zu ersetzenden Linienroute“. Ausgangslage ist der Ausschnitt eines Betriebskonzepts mit fünf Knoten (A – E) und vier Linien (Linien blau, gelb, lila und rot). Die gelbe und rote Linie besteht jeweils aus einer Linienroute, die blau und lila Linie jeweils aus zwei Linienrouten. Das Betriebskonzept beinhaltet somit sechs Linienrouten.

Die Linienrouten werden in Abbildung 4-26 teilweise als Kreise repräsentiert. An Knoten C und an Knoten D besteht jeweils eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverfügbarkeit“ (vb_1 und vb_2). vb_1 betrifft die Linienrouten dunkelblau, hellblau, gelb und dunkellila und vb_2 die Linienrouten gelb und helllila. Somit bestehen fünf Linienrouten mit verletzten Bedingungen, die potenziell die Menge der zu ersetzenden Linienrouten bilden. Entsprechend Kapitel 4.3.4 sollen zunächst verletzte Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ gelöst werden. Da in dem Beispiel keine verletzten Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ vorkommen, werden die verletzten Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ als zu ersetzende Linienrouten betrachtet.

Zur Veranschaulichung einer Auswahl der zu ersetzenden Linienrouten wird in dem Beispiel dem Parameter $n_{er,max}$ der Wert vier zugewiesen. Die Menge der zu ersetzenden Linienrouten darf deshalb nicht alle fünf Linienrouten enthalten. Die Liste der verletzten Bedingungen wird daher mit dem in Kapitel 4.3.4 festgelegten weiteren Kriterien sortiert. Somit sind vorrangig verletzte Bedingungen, an denen Linienrouten mit einer hohen Anzahl an verletzten Bedingungen beteiligt sind, auszuwählen. Es entscheidet somit die Gesamtzahl der verletzten Bedingungen aller Linienrouten der beiden verletzten Bedingungen über die Reihenfolge.

In dem Beispiel haben, außer der roten Linienroute mit keiner verletzten Bedingung und die gelbe Linienroute mit zwei verletzten Bedingungen, alle Linienrouten eine verletzte Bedingung. Somit ist die Gesamtzahl der verletzten Bedingungen aller Linienrouten von vb_1 mit fünf verletzten Bedingungen um zwei verletzte Bedingungen höher als von vb_2 . Aus der Menge der zu ersetzenden Linienrouten werden daher die Linienrouten von vb_1 ausgewählt.

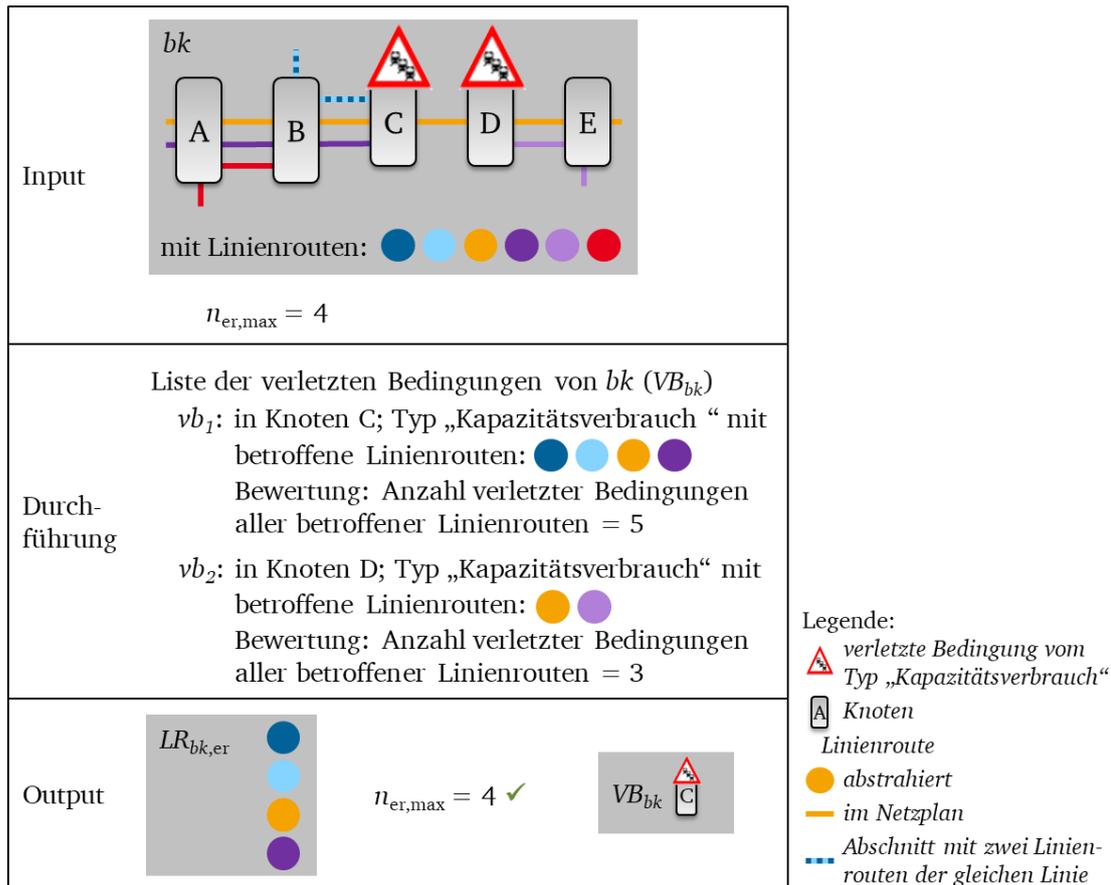


Abbildung 4-26: Beispielhafte Anwendung der Funktion „Bestimmung der zu ersetzenden Linienroute“

Output des Beispiels ist die Menge der zu ersetzenden Linienrouten ($LR_{bk,er}$) mit den vier Linienrouten {dunkelblau, hellblau, gelb, dunkellila} und die Menge der ausgewählten verletzten Bedingungen von bk (VB_{bk}) mit dem Element $\{vb_1\}$.

Funktion: Erzeugung von alternativen Linienrouten

Nachdem die zu ersetzenden Linienrouten bestimmt wurden, werden alternative Linienrouten für die Ersetzung der ersetzenden Linienrouten bestimmt. In der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ werden entsprechend Operator 1 alternative Linienrouten erzeugt, indem ebM auf die zu ersetzende Linienroute angewendet oder entfernt werden (siehe Kapitel 4.3.4).

Inputs der Funktion sind die Menge der zu ersetzenden Linienrouten von bk ($LR_{bk,er}$), die Menge der ausgewählten verletzten Bedingungen von bk (VB_{bk}) und die vorab bestimmten ebM. Die Funktion gliedert sich in drei Abschnitte (siehe Kapitel 4.3.4):

- Anwendung ebM „Umleitung“
- Anwendung ebM „alternative Wende“
- Anwendung ebM „Änderung der Taktzeit“

Die drei Abschnitte werden für jede zu ersetzende Linienroute aus $LR_{bk,er}$ durchlaufen. Als Ergebnis besteht für jede zu ersetzende Linienroute aus $LR_{bk,er}$ eine Menge von alternativen Linienrouten ($LR_{a,y}$). Output der Funktion ist somit die Menge der alternativen Linienrouten $LR_{a,y}$ je zu ersetzender Linienroute aus $LR_{bk,er}$.

Bei der Erzeugung von Betriebskonzepten sind verletzte Bedingungen L2 vom Typ „Liniennetzplan“ wie verletzte Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ zu behandeln (siehe Kapitel 4.3.4). Verletzte Bedingungen L1 vom Typ „Liniennetzplan“ können durch eine Änderung des Laufwegs oder durch eine Erhöhung der Taktzeit gelöst werden. Daher wird mit verletzten Bedingungen L1 vom Typ „Liniennetzplan“ in den ersten beiden Abschnitten der Funktion wie mit verletzten Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ verfahren. Im dritten Abschnitt ist für verletzte Bedingungen L1 vom Typ „Liniennetzplan“ eine Erhöhung der Taktzeit zu berücksichtigen.

Abschnitt 1: Anwendung ebM „Umleitung“

In Abschnitt 1 werden für verletzte Bedingungen einer zu ersetzenden Linienroute aus $LR_{bk,er}$ ebM „Umleitung“ angewendet. Inputs von Abschnitt 1 sind

- die zu ersetzenden Linienrouten aus $LR_{bk,er}$,
- die Menge der ausgewählten verletzten Bedingungen von bk (VB_{bk}) und
- die ebM „Umleitung“.

Die Anwendung der ebM erfolgt schrittweise und Linienrouten, die als „Zwischenprodukte“ mit weiterhin vorhandenen verletzten Bedingungen entstehen, werden als „prä-alternative“ Linienrouten (lr_{pa}) bezeichnet. Das Struktogramm in Abbildung 4-27 zeigt den Ablauf des ersten Abschnitts der Funktion.

Zunächst erfolgt eine Initialisierung (weiße Strukturblöcke in Abbildung 4-27). Die ersten beiden lr_{pa} entsprechen jeweils der zu ersetzenden Linienroute aus $LR_{bk,er}$, wobei jeder der beiden lr_{pa} ein anderer Wendebahnhof der zu ersetzenden Linienroute aus $LR_{bk,er}$ zugeordnet ist.

Im Verlauf von Abschnitt 1 können weitere lr_{pa} erzeugt werden. Die weiteren Schritte des ersten Abschnitts werden jeweils für eine verletzte Bedingung einer lr_{pa} durchlaufen. Abschnitt 1 endet, wenn keine weiteren lr_{pa} bestehen.

Für eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ müssen nicht alle Linienrouten der betroffenen Knoten und Kanten ersetzt werden. Daher sollen für zu ersetzende Linienrouten mit verletzten Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ sowohl alternative Linienrouten bestehen, die die Knoten und Kanten mit der verletzten Bedingung weiterhin enthalten als auch Linienrouten, die die Knoten und Kanten nicht enthalten (siehe Kapitel 4.3.4). Für verletzte Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ wird daher eine lr_{pa} beibehalten, die weiterhin die betroffenen Knoten und Kanten enthält (gelbe Strukturblöcke in Abbildung 4-27).

Das Beibehalten einer alternativen Linienroute mit verletzten Bedingungen dient auch als Vorbereitung der Anwendung von ebM „Änderung der Taktzeit“, da verletzte Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ auch bei Beibehaltung des Laufwegs mit einer Änderung der Taktzeit gelöst werden können. Die tatsächliche Anwendung von ebM „Änderung der Taktzeit“ erfolgt im dritten Abschnitt der Funktion.

Gesondert zu betrachten sind verletzte Bedingungen, die Knoten und Kanten außerhalb des regulären Laufwegs der Linienroute betreffen. In diesem Fall wird die ebM der Linienroute, die die Knoten oder Kanten mit der verletzten Bedingung enthält, verworfen (grüne Strukturblöcke in Abbildung 4-27). Auf dem regulären Laufweg können anschließend verletzte Bedingungen durch Modul 1.1 identifiziert werden.

Entsprechend Kapitel 4.3.4 werden die Umleitungen einer alternativen Linienroute anhand von Parameter $n_{U,max}$ begrenzt (graue Strukturblöcke in Abbildung 4-27). Prä-alternative Linienrouten, die bereits zwei Umleitungen enthalten und weitere verletzte Bedingungen aufweisen, können nur noch mit einer weiteren ebM „alternative Wende“ zu einer alternativen Linienroute werden. Daher werden diese Linienrouten in die Menge $LR_{pa,w}$ aufgenommen und in Abschnitt 2 aufgegriffen.

Zuletzt werden in Abschnitt 1 für die betrachtete verletzte Bedingung von lr_{pa} ebM „Umleitung“ angewendet (blaue Strukturblöcke in Abbildung 4-27). Für die verletzte Bedingung können ggf. verschiedene Umleitungen angewendet werden, sodass verschiedene Linienrouten erzeugt werden. Bestehen für die erzeugten Linienrouten keine weiteren verletzten Bedingungen, konnte eine alternative Linienroute erzeugt werden. Ansonsten handelt es sich bei der erzeugten Linienroute um eine weitere prä-alternative Linienroute. Durch die Kombination von verschiedenen Umleitungen für verschiedene verletzte Bedingungen können somit aus der zu ersetzenden Linienroute eine Vielzahl an alternativen Linienrouten entstehen. Die Kombinationen sind aber durch den Parameter $n_{U,max}$ begrenzt.

Besteht keine passende ebM „Umleitung“, könnten durch die Anwendung von ebM „alternative Wende“ dennoch alternative Linienrouten erzeugt werden. Daher werden lr_{pa} mit einer verletzten Bedingung ohne passende ebM „Umleitung“ in $LR_{pa,w}$ aufgenommen und in Abschnitt 2 aufgegriffen.

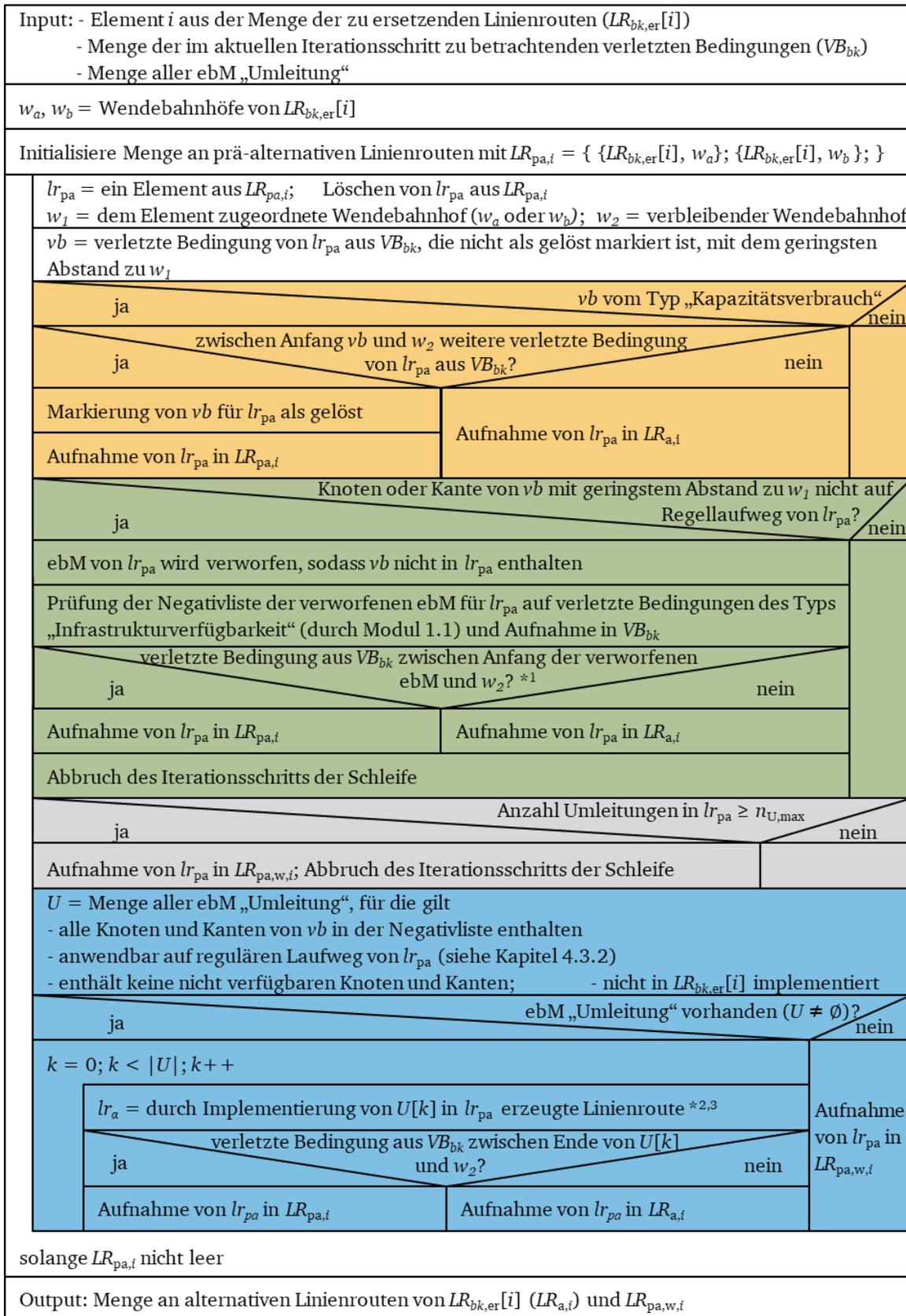
Output von Abschnitt 1 sind alternative Linienrouten der zu ersetzenden Linienroute aus $LR_{bk,er}$ und prä-alternative Linienrouten, die weitere verletzte Bedingungen aufweisen ($LR_{pa,w}$).

Abbildung 4-28 zeigt die beispielhafte Anwendung von Abschnitt 1 der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“. Dabei wird das zuvor eingeführte Beispiel aus Abbildung 4-26 weitergeführt. Um ein übersichtliches Beispiel zu schaffen und um Redundanzen zu vermeiden, wird nur die gelbe Linienroute als eine der vier Linienrouten aus $LR_{bk,er}$ betrachtet.

In dem Beispiel bestehen für die gelbe Linie drei verschiedene ebM „Umleitung“. Bei den ersten beiden Umleitungen wird der Knoten der verletzten Bedingung weiterhin bedient, weshalb diese beiden Umleitungen nicht für die Erzeugung einer alternativen Linienroute herangezogen werden. Die Anwendung der verbleibenden Umleitungen ergibt die alternative Linienrouten, die durch den vertikal gestreiften Kreis dargestellt ist.

Da die verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ ist, wird durch die gelben Strukturblöcke (siehe Abbildung 4-27) sichergestellt, dass die ursprüngliche Linienroute (einfarbiger Kreis) ebenfalls eine alternative Linienroute darstellt. Somit kann auch eine Erhöhung der Taktzeit der gelben Linie zur Lösung der verletzten Bedingungen angewendet werden (Abschnitt 3 der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“).

Output von Abschnitt 1 sind somit drei alternative Linienrouten für die zu ersetzende gelbe Linienroute.



*1 w_2 kann sich durch das Verwerfen der ebM verändert haben

*2 wenn das Ende von $U[k]$ nicht in lr_{pa} enthalten ist, muss der Laufweg von lr_{pa} verändert werden, indem
 - (Priorität 1) der Regellaufweg von lr_{pa} genutzt wird
 - (Priorität 2) ein Regellaufweg der Linie bis zum nächsten Wendebahnhof genutzt wird

*3 ggf. ändert sich w_1 und/oder w_2 durch die Implementierung von $U[k]$

Abbildung 4-27: Struktogramm von Abschnitt 1 der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten“

Abschnitt 2: Anwendung ebM „alternative Wende“

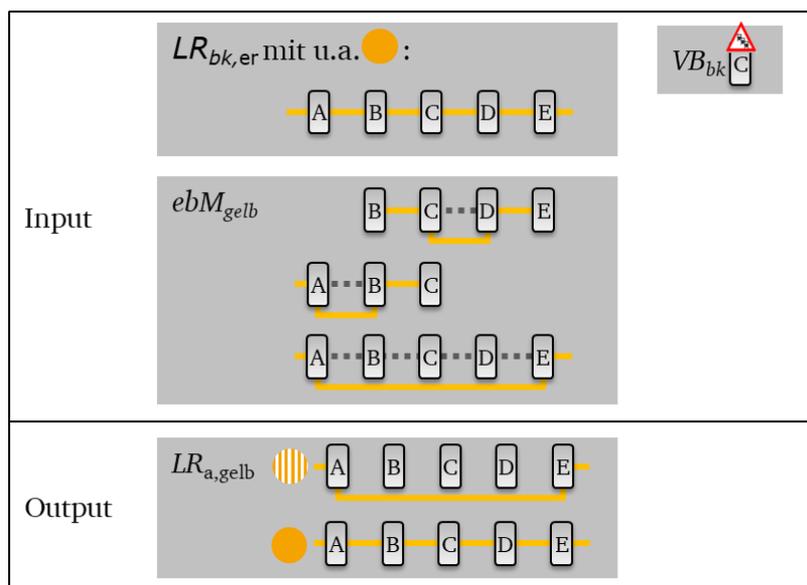
Der zweite Abschnitt der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ ist die Anwendung von ebM „alternative Wende“. Inputs des zweiten Abschnitts sind

- die zu ersetzenden Linienrouten aus $LR_{bk,er}$,
- die Menge der ausgewählten verletzten Bedingungen von bk (VB_{bk}),
- die ebM „alternative Wende“,
- alternative Linienrouten aus Abschnitt 1 und
- prä-alternative Linienrouten aus Abschnitt 1 ($LR_{pa,w}$).

Der Ablauf von Abschnitt 2 ist durch das Struktogramm in Abbildung 4-29 dargestellt. Zunächst werden alternative Linienrouten ausgehend von den Wendebahnhöfen der zu ersetzenden Linienrouten bestimmt (türkise Strukturböcke in Abbildung 4-29). Dazu wird eine Linienroute (lr_{pa}) mit dem Regellaufweg der zu ersetzenden Linienrouten bestimmt.

Ausgehend von den Wendebahnhöfen von lr_{pa} können ebM „alternative Wende“ bis zur ersten verletzten Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ angewendet werden. Wenn alternative Linienrouten für verletzte Bedingungen erstellt werden, die vom Wendebahnhof ausgehend räumlich nach einer verletzten Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ liegen, würden die resultierenden alternativen Linienrouten stets die verletzte Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ enthalten (siehe Abbildung 4-30 (1)). Nach Kapitel 4.3.3 sollen alternative Linienrouten aber keine verletzten Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ enthalten.

Besteht keine verletzte Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“, werden ebM „alternative Wende“ bis zur letzten verletzten Bedingung angewendet. Die durch die Anwendung von ebM „alternative Wende“ erzeugten Linienrouten ergänzen die alternativen Linienrouten aus Abschnitt 1.



Legende siehe Abbildung 4-26; ergänzend:

⦿ vertikal gestreifter Kreis: Linienroute mit ebM „Umleitung“

Abbildung 4-28: Beispielhafte Anwendung von Abschnitt 1 der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ mit Fokus auf die gelbe Linienroute

<p>Input: - Element i aus der Menge der zu ersetzenden Linienrouten ($LR_{bk,er}[i]$)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Menge der im aktuellen Iterationsschritt zu betrachtenden verletzten Bedingungen (VB_{bk}) - Menge von alternativen Linienrouten von $LR_{bk,er}[i]$ aus Abschnitt 1 ($LR_{a,i}$) - Menge von prä-alternativen Linienrouten aus Abschnitt 1 ($LR_{pa,w,i}$) - Menge aller ebM „alternative Wende“
<p>$W =$ Menge aller Wendebahnhöfe von $LR_{bk,er}[i]$</p>
<p>für $j = 0; j < W ; j++$</p>
<p>$lr_{pa} = LR_{bk,er}[i]$ mit Regellaufweg (Prüfung für verworfenen ebM auf verletzte Bedingungen des Typs „Infrastrukturverfügbarkeit“ (durch Modul 1.1))</p>
<p>$vb =$ räumlich von $W[j]$ gesehen erste verletzte Bedingung von lr_{pa} aus VB_{bk} vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ oder (wenn keine verletzte Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ vorhanden) letzte verletzte Bedingung vor dem anderen Wendebahnhof</p>
<p>$AW =$ Bestimmung aller ebM „alternative Wende“ für die gilt:</p> <ul style="list-style-type: none"> - anwendbar auf lr_{pa} (siehe Kapitel 4.3.2), aber nicht in $LR_{bk,er}[i]$ implementiert - alle Knoten und Kanten von vb in der Negativliste enthalten - enthält keine nicht verfügbaren Knoten und Kanten
<p>Implementierung aller AW in lr_{pa} und Aufnahme der erzeugten Linienrouten in $LR_{a,i}$</p>
<p>$LR_{pa,i} = LR_{a,i}$ (aus dem Input) $\cap LR_{pa,w,i} \cap LR_{bk,er}[i]$ ($LR_{bk,er}[i]$, wenn ebM Umleitung enthalten)</p>
<p>für $ii = 0; ii < LR_{pa,i} ; ii++$</p>
<p>$W =$ Menge aller Wendebahnhöfe von $LR_{pa,i}[ii]$</p>
<p>für $j = 0; j < W ; jj++$</p>
<p>$U =$ ebM Umleitungen von $LR_{pa,i}[ii]$ räumlich sortiert, beginnend mit der Umleitung, die $W[j]$ am nächstgelegenen ist</p>
<p>für $k = 1; k < U ; k++$</p>
<p>$lr_{pa} = LR_{pa,i}[ii]$ mit Entfernung aller $U[x]$ für die gilt: $U[x] \geq U[k]$</p>
<p>$vb =$ räumlich ab Ende $U[k-1]$ gesehen erste verletzte Bedingung von lr_{pa} (aus VB_{bk} und durch Modul 1.1 bestimmt) vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ oder (wenn keine verletzte Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ vorhanden) letzte verletzte Bedingung vor dem anderen Wendebahnhof</p>
<p>$AW =$ Bestimmung aller ebM „alternative Wende“ für die gilt:</p> <ul style="list-style-type: none"> - anwendbar auf lr_{pa} (siehe Kapitel 4.3.2) ab Ende $U[k-1]$ - nicht in $LR_{bk,er}[i]$ implementiert - alle Knoten und Kanten von vb in der Negativliste enthalten - enthält keine nicht verfügbaren Knoten und Kanten
<p>Implementierung aller AW zwischen Ende $U[k-1]$ und vb in lr_{pa} und Aufnahme der erzeugten Linienrouten in $LR_{a,i}$</p>
<p>Löschen aller alternativen Linienrouten aus $LR_{a,i}$, die nicht mindestens einen Netzast bedienen</p>
<p>Output: Menge an alternativen Linienrouten von $LR_{bk,er}[i]$ ($LR_{a,i}$)</p>

Abbildung 4-29: Struktogramm von Abschnitt 2 der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten“

Weitere alternative Linienrouten können generiert werden, indem ebM „alternative Wende“ räumlich nach einer ebM „Umleitung“ angewendet werden (siehe Abbildung 4-30 (2)). Sowohl die zu ersetzenden Linienrouten als auch die alternativen Linienrouten aus dem ersten Abschnitt der Funktion und die prä-alternativen Linienrouten aus $LR_{pa,w}$ können ebM „Umleitung“ enthalten. Die Anwendung der ebM „alternative Wende“ für diese Linienrouten erfolgt in den lila Strukturblöcken in Abbildung 4-29.

Der Ablauf der Anwendung der ebM „alternative Wende“ für Linienrouten mit Umleitung erfolgt analog zum ersten Teil von Abschnitt 2. Der Unterschied ist, dass für die Linienroute mit Umleitung für jede bestehende Umleitung jeweils der Bereich räumlich nach der Umleitung betrachtet wird. Für die Anwendung der ebM „alternative Wende“ werden – wenn vorhanden – weitere Umleitungen räumlich nach der betrachteten Umleitung verworfen. Dadurch können auch ebM „alternative Wende“ für Knoten angewendet werden, die sonst aufgrund einer Umleitung nicht bedient werden (Knoten E in Abbildung 4-30 (2)).

Zuletzt werden alle bisher erzeugten alternativen Linienrouten gelöscht, die nicht mindestens einen Netzzast bedienen (Bedingung K4 vom Typ „Konsistente Linien“, siehe Kapitel 4.3.3; grauer Strukturblock in Abbildung 4-29). Wenn, wie in Kapitel 4.3.3 ausgeführt, weitere Kriterien für Pendelverkehr außerhalb des Kernbereich definiert werden, können diese in der entsprechenden Abfrage ergänzt werden.

Output von Abschnitt 2 sind alternative Linienrouten der zu ersetzenden Linienroute aus $LR_{bk,er}$.

Abbildung 4-31 zeigt die beispielhafte Anwendung des zweiten Abschnitts der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“, dabei wird das zuvor eingeführte Beispiel aus Abbildung 4-26 weitergeführt. Wie im vorhergehenden Beispiel liegt der Fokus auf der gelben Linienroute. Angenommen die Knoten B, C und E sind mögliche Wendebahnhöfe, dann bestehen zwei weitere alternative Linienrouten. Außerdem besteht eine weitere ebM mit Wende in Z, sodass eine weitere alternative Linienroute erzeugt werden kann.

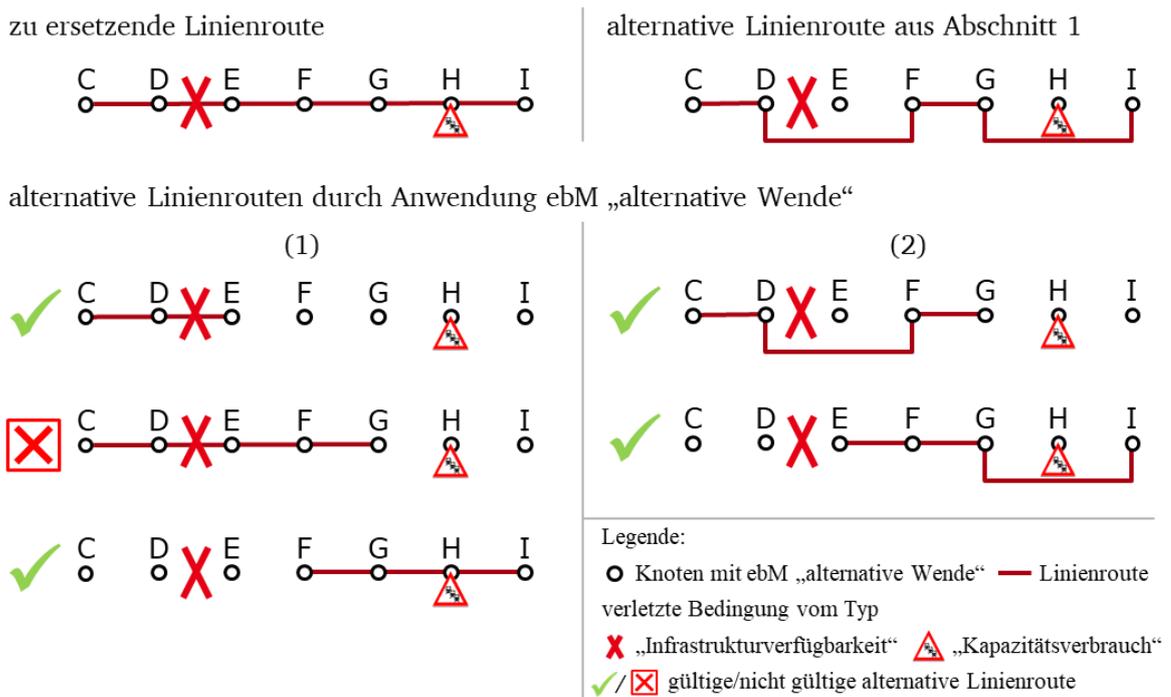


Abbildung 4-30: Beispiel für die Anwendung ebM „alternative Wende“ auf eine zu ersetzende Linienroute (1) und eine alternative Linienroute aus Abschnitt 1 (2)

Abschnitt 3: Anwendung ebM „Änderung der Taktzeit“

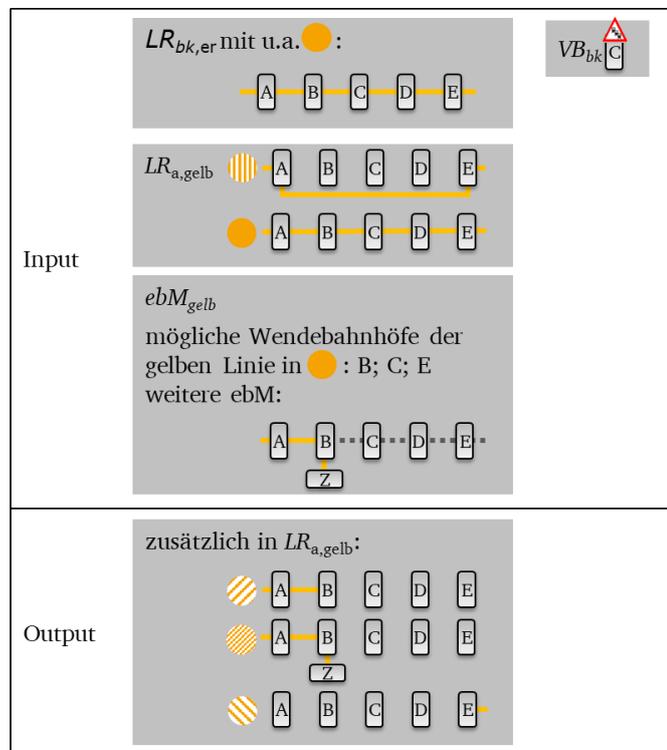
Der letzte Abschnitt der Funktion dient der Anwendung ebM „Änderung der Taktzeit“. Inputs des dritten Abschnitts sind

- die zu ersetzenden Linienrouten aus $LR_{bk,er}$,
- die ebM „Änderung der Taktzeit“ und
- die alternativen Linienrouten aus Abschnitt 1 und Abschnitt 2.

In den vorangegangenen beiden Abschnitten der Funktion wurden für die verletzten Bedingungen alternative Linienrouten durch eine Änderung des Laufwegs erzeugt. Für die verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ wurden auch alternative Linienrouten, die die verletzte Bedingung weiterhin enthalten, als alternative Linienrouten bestimmt. Für jede alternative Linienroute mit einer verletzten Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ wird eine alternative Linienroute mit dem gleichen Laufweg und einer erhöhten Taktzeit erstellt, wenn die Taktzeit weiter erhöht werden kann. Mögliche Änderungen der Taktzeiten einer Linie sind durch die ebM „Änderung der Taktzeit“ vorgegeben.

Für die verletzte Bedingung L1 vom Typ „Liniennetzplan“ ist eine Reduzierung der Taktzeit zu prüfen. Weiterhin in die Menge der alternativen Linienrouten wird ein Element aufgenommen, das den Ausfall der zu ersetzenden Linienroute vorsieht (ebM „Änderung der Taktzeit“).

Abschnitt 3 endet damit, dass alle bisher erzeugten alternativen Linienrouten gelöscht werden, die die Vorgaben zur maximalen Anzahl von Zügen je Zeiteinheit für Strecken überschreiten (Bedingung K5 vom Typ „Konsistente Linien“, siehe Kapitel 4.3.3). Auch können die erzeugten alternativen Linienrouten hinsichtlich der Einhaltung der Tabu-Liste geprüft werden.



Legende siehe Abbildung 4-26; ergänzend:

diagonal gestreifter Kreis: Linienroute mit ebM „alternative Wende“

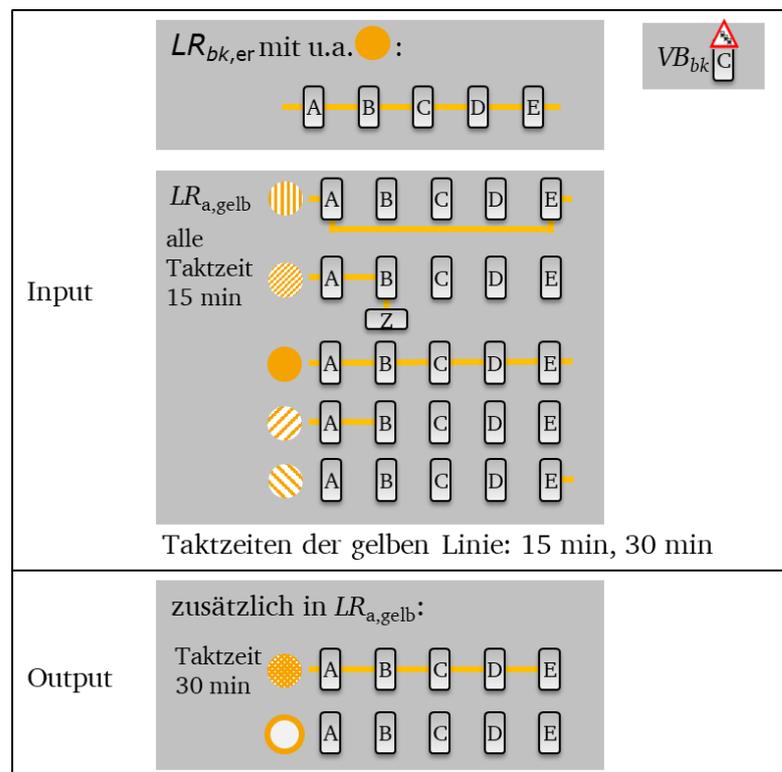
Abbildung 4-31: Beispielhafte Anwendung von Abschnitt 2 der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ mit Fokus auf die gelbe Linienroute

Output des Abschnitts sind die alternativen Linienrouten der zu ersetzenden Linienroute aus $LR_{bk,er}$. Sind für jede zu ersetzende Linienroute aus $LR_{bk,er}$ alternative Linienrouten erzeugt, erfolgt in der nächsten Funktion eine Zusammenfassung von alternativen Linienrouten der gleichen Linie.

Abbildung 4-32 zeigt die beispielhafte Anwendung des dritten Abschnitts der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“. Dabei wird das zuvor eingeführte Beispiel aus Abbildung 4-26 weitergeführt. Wie in den Beispielen zuvor wird nur die gelbe Linienroute betrachtet. Angenommen wird, dass für die gelbe Linie mit 15 Minuten und 30 Minuten zwei Taktzeiten bestehen.

Beträgt die Taktzeit in dem Betriebskonzept des Ausgangszustands 15 Minuten, haben auch alle bisher erzeugten alternativen Linienrouten eine Taktzeit von 15 Minuten. Da die verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ ist, kann diese auch durch eine Erhöhung der Taktzeit gelöst werden. Eine Erhöhung der Taktzeit wird für alle alternativen Linienrouten angewendet, die weiterhin die verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ aufweisen. Das ist in dem Beispiel eine alternative Linienroute. Weiterhin wird ein Element aufgenommen, das den Ausfall der zu ersetzenden Linienroute vorsieht.

Unter Berücksichtigung der ebM „Änderung der Taktzeit“ wurden durch die Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ somit insgesamt sieben alternative Linienrouten erzeugt.



Legende siehe Abbildung 4-26; ergänzend:

- gepunkteter Kreis: Linienroute mit ebM „alternative Wende“
- Kreis ohne Füllung: Ausfall der Linienroute

Abbildung 4-32: Beispielhafte Anwendung von Abschnitt 3 der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ mit Fokus auf die gelbe Linienroute

Funktion: Zusammenfassung von Linienrouten

Bei der Ersetzung ist sicherzustellen, dass Linienrouten einer Linie im resultierenden Betriebskonzept eine konsistente Linie ergeben (siehe Kapitel 4.3.4). Inkonsistenzen innerhalb einer Linie werden vermieden, indem sowohl zu ersetzende als auch alternative Linienrouten zusammengefasst werden (siehe Kapitel 4.3.4). Durch die Zusammenfassung wird sichergestellt, dass die Linien in den resultierenden Betriebskonzepten die Bedingungen K2, K3 und K5 nicht verletzen. Input der Funktion ist die Menge von zu ersetzenden Linienrouten $LR_{bk,er}$ und die Menge von alternativen Linienrouten $LR_{a,y}$ je Element aus $LR_{bk,er}$.

Zunächst werden zu ersetzende Linienrouten einer Linie zusammengefasst, bei denen es nach der Ersetzung zu einer Überschneidung der Laufwege kommen kann (siehe Kapitel 4.3.4). Eine Überschneidung bedeutet, dass eine Abfolge von Knoten und Kanten besteht, die in beiden Laufwegen vorhanden ist. Zwei zu ersetzende Linienrouten werden zusammengefasst, wenn eine Überschneidung der Laufwege zwischen alternativen Linienrouten der beiden zu ersetzenden Linienrouten besteht. Ebenfalls zusammengefasst werden alle zu ersetzenden Linienrouten und weitere Linienrouten von bk der gleichen Linie, wenn eine Überschneidung der Laufwege zwischen der nicht zu ersetzenden Linienroute und einer alternativen Linienroute der zu ersetzenden Linienroute besteht (siehe Kapitel 4.3.4). Ergebnis des ersten Teils der Funktion ist die Menge von zu ersetzenden Linienrouten ($LR_{bk,er}$), die als Elemente nun nicht mehr nur Linienrouten, sondern auch Mengen von Linienrouten enthalten kann. Die Mengen von Linienrouten, die Elemente von $LR_{bk,er}$ sind, sind das Ergebnis der Zusammenfassung

- von zu ersetzenden Linienrouten sowie
- von zu ersetzenden Linienrouten und nicht zu ersetzenden Linienrouten.

Im weiteren Verlauf der Funktion werden alternative Linienrouten zusammengefasst. Für die Zusammenfassungen werden für jedes Element aus $LR_{bk,er}$ Kombination der alternativen Linienrouten erstellt. Die Kombinationen werden hinsichtlich der Bedingungen K2, K3 und K5 vom Typ „Konsistente Linien“ sowie der Tabu-Liste geprüft. Kombinationen, die die Bedingungen nicht erfüllen oder bereits auf der Tabu-Liste enthalten sind, werden verworfen.

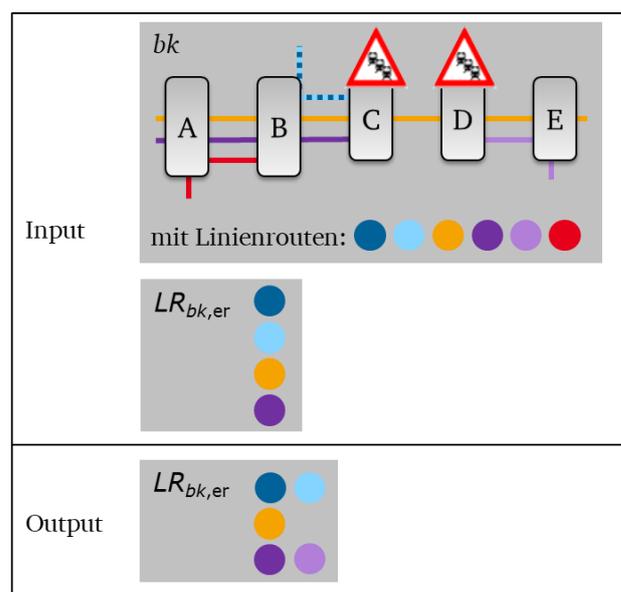


Abbildung 4-33: Beispielhafte Anwendung der Funktion „Zusammenfassung von Linienrouten“ (Teil 1) (Legende siehe Abbildung 4-26)

Die übrigen Kombinationen an alternativen Linienrouten werden bei der Ersetzung genutzt, um die zu ersetzenden Linienrouten zu ersetzen.

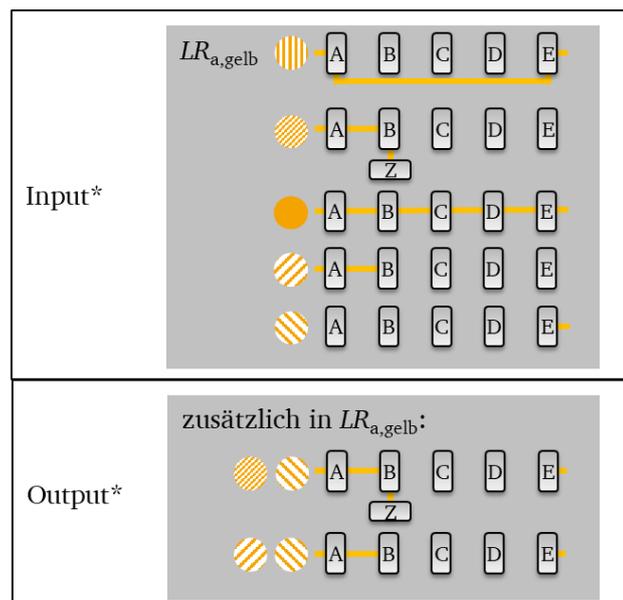
Output der Funktion ist die Menge von zu ersetzenden Linienrouten ($LR_{bk,er}$) sowie deren jeweilige Menge von alternativen Linienrouten ($LR_{a,y}$).

Die Funktion „Zusammenfassung von Linienrouten“ wird ebenfalls auf das eingeführte Beispiel angewendet. In zwei Tabellen ist die beispielhafte Anwendung der Funktion dargestellt. Abbildung 4-33 zeigt die Zusammenfassung von $LR_{bk,er}$, Abbildung 4-34 die Zusammenfassung der alternativen Linienrouten. Bei der beispielhaften Anwendung wird das in Abbildung 4-26 eingeführte Beispiel weitergeführt.

In der Menge der zu ersetzenden Linienrouten werden die beiden Linienrouten der blauen Linie zusammengefasst, wenn angenommen wird, dass es nach der Ersetzung zu einem gemeinsamen Laufweg kommen kann. Unter der Annahme, dass für die dunkellila Linienroute eine alternative Linienroute besteht, die einen gemeinsamen Linienabschnitt mit der helllila Linienroute enthält (z. B. eine Umleitung zwischen den Knoten B und E zur Entlastung von Knoten C), wird die helllila Linienroute in die Menge der zu ersetzenden Linienroute aufgenommen und in beide Linienrouten der lila Linie zusammengefasst. In der resultierenden Menge von zu ersetzenden Linienrouten sind somit nun fünf Linienrouten enthalten. Diese teilen sich auf in drei Elemente, wobei zwei Elemente aus zwei Linienrouten bestehen.

Für den zweiten Teil des Beispiels wird, wie in den Beispielen zur Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“, die gelbe Linienroute und dabei lediglich alternative Linienroute mit einer 15-minütigen Taktzeit betrachtet.

Für die Zusammenfassung der alternativen Linienrouten werden diese kombiniert. Anschließend wird jede Kombination gelöscht, die die Bedingungen K2, K3 und K5 vom Typ „Konsistente Linien“ verletzt oder in der Tabu-Liste enthalten ist. Für Bedingung K5 wird angenommen, dass zur Einhaltung der minimalen Taktzeit der Linie jede Kante nur einer



* übersichtshalber ist nur Taktzeit 15 min dargestellt

Abbildung 4-34: Beispielhafte Anwendung der Funktion „Zusammenfassung von Linienrouten“ (Teil 2) mit Fokus auf die gelbe Linienroute (Legende siehe Abbildung 4-26)

Linienroute zugeordnet sein darf. In dem Beispiel entstehen zwei Kombination, die die Bedingungen K2, K3 und K5 vom Typ „Konsistente Linien“ erfüllen. Diese zwei Kombinationen werden in die Menge der alternativen Linienrouten aufgenommen.

Funktion: Bewertung der alternativen Linienrouten

Um zu bestimmen, welche der alternativen Linienrouten eine zu ersetzende Linienroute ersetzen soll, ist eine Bewertung der alternativen Linienrouten erforderlich. Die Bewertung erfolgt anhand der in Kapitel 4.3.4 festgelegten Heuristik zur Bewertung der alternativen Linienrouten. Input der Funktion sind die Mengen von alternativen Linienrouten ($LR_{a,y}$) je Element der Menge von zu ersetzenden Linienrouten ($LR_{bk,er}$).

Die Heuristik sieht eine Bewertung anhand von dreizehn hierarchischen Bewertungskriterien (H) vor (siehe Kapitel 4.3.4):

- H[1]: Quotient aus der Division der Anzahl der bedienten Verkehrsknoten, die für die Erfüllung der Erschließungsfunktion relevant sind durch die Anzahl der im Betriebskonzept des ausgewählten SFP bedienten Verkehrsknoten, die für die Erfüllung der Erschließungsfunktion relevant sind
- H[2]: Anzahl der weiterhin umsetzbaren Fahrgastkorridore
- H[3]: Anzahl der bedienten Verkehrsknoten, die im Betriebskonzept des ausgewählten SFP von der Linienroute bedient werden
- H[4]: Anzahl der bedienten Verkehrsknoten, die im regulären Betrieb der Linie bedient werden
- H[5]: Anzahl der sonstigen bedienten Verkehrsknoten
- H[6]: Quotient aus der Division der Anzahl der Bedienung je Stunde von Verkehrsknoten, die für die Erfüllung der Erschließungsfunktion relevant sind, durch die Anzahl der Bedienung je Stunde im Betriebskonzept des ausgewählten SFP von Verkehrsknoten, die für die Erfüllung der Erschließungsfunktion relevant sind
- H[7]: Bedienung je Stunde von Verkehrsknoten, die für weiterhin umsetzbare Fahrgastkorridore relevant sind
- H[8-10]: Anzahl der bedienten Verkehrsknoten je Wertigkeit je Stunde
- H[11]: Beförderungszeit der Linienroute
- H[12]: Anzahl der erforderlichen Änderungen der Bahnsteiggleise
- H[13]: beliebige deterministische Entscheidung

Output der Funktion sind die bewerteten und sortierten Mengen von alternativen Linienrouten ($LR_{a,y}$) je Element der Menge von zu ersetzenden Linienrouten ($LR_{bk,er}$). (Durch die Sortierung ist die „Menge der alternativen Linienrouten“ keine Menge, sondern ein Tupel. Um eine durchgängige Bezeichnung zu erhalten, wird dennoch der Begriff „Menge der alternativen Linienrouten“ beibehalten).

Die Funktion „Bewertung der alternativen Linienrouten“ wird auf das eingeführte Beispiel angewendet und ebenfalls die alternativen Linienrouten der gelben Linienroute betrachtet (siehe Tabelle 4-5). Zur Übersichtlichkeit ist das Beispiel auf die alternativen Linienrouten mit einer Taktzeit von 15 Minuten und dem Ausfall der Linienroute begrenzt.

Aufgrund der gleichen Taktzeit ergeben sich durch die Bewertungskriterien H[6] – H[10] keine Unterschiede zwischen den alternativen Linienrouten im Vergleich zu den Bewertungskriterien H[1] – H[5]. Die Werte der Bewertungskriterien H[6] – H[10] sind daher nicht in Tabelle 4-5

dargestellt. Ebenfalls nicht in der Tabelle dargestellt sind H[11] – H[13], da durch die Werte H[1] – H[5] bereits eine eindeutige Reihung der alternativen Linienrouten möglich ist. Die Bewertungskriterien H[11] – H[13] sind daher für die Festlegung der Reihenfolge der alternativen Linienrouten nicht erforderlich.

Für die Bestimmung der Bewertung der alternativen Linienrouten der gelben Linienroute sind weitere Annahme erforderlich:

- Die alternativen Linienrouten werden nur anhand der fünf Knoten A – E bewertet.
- Die Erschließungsfunktion der gelben Linie ist die „Basisfunktion“.
- Der Störbereich umfasst die Knoten B, C und D.
- Fahrgastkorridore bestehen zwischen B und Z sowie E und Z.
- Der reguläre Betrieb der gelben Linie ist gleich dem Betrieb im Betriebskonzept des ausgewählten SFP. Die Linienroute der gelben Linie im regulären Betrieb ist somit die Linienroute, die durch den einfarbigen Kreis repräsentiert ist.

Durch die Anwendung der Funktion „Bewertung der alternativen Linienrouten“ ergibt sich die in Tabelle 4-5 dargestellte Reihenfolge der alternativen Linienrouten der gelben Linienroute. In Tabelle 4-5 sind auch die Werte der relevanten Bewertungskriterien aufgeführt. Auffällig ist, dass die alternative Linienroute, die mit einer Umleitung die Knoten A und E verbinden (vertikal gestreifter Kreis), unter alternativen Linienrouten positioniert ist, die keine durchgehende Verbindung haben. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Erschließungsfunktion „Basisfunktion“ die Bedienung des Störbereichs priorisiert. Unter der Annahme einer anderen Erschließungsfunktion (z. B. Kapazitätsfunktion) würde die Linienroute mit Umleitung höher bewertet werden.

Tabelle 4-5: Beispielhafte Anwendung der Funktion „Bewertung der alternativen Linienrouten“ mit Fokus auf die gelbe Linienroute (Legende siehe Abbildung 4-26)

	$LR_{a, \text{gelb}}$	H				
		1	2	3	4	5
1	 	1	2	10	10	0
2	 	0,16	2	3	3	1
7	 	0,16	2	3	3	0
4	 	0,16	1	2	2	1
8	 	0,16	1	2	2	0
6	 	0	1	4	4	0
9	 	0	1	1	1	0
10	 	0	0	0	0	0

Funktion: Erzeugung von Betriebskonzepten durch Ersetzung von Linienrouten

Ein Betriebskonzept wird erzeugt, indem zu ersetzende Linienrouten durch alternative Linienrouten ersetzt werden. Die Elemente der Menge der zu ersetzenden Linienrouten ($LR_{bk,er}$) werden anhand der Elemente der zugeordneten Mengen von alternativen Linienrouten ($LR_{a,y}$) ersetzt. Unterschiedliche Betriebskonzepte werden erzeugt, da jedes Element aus $LR_{bk,er}$ durch ein Element aus $LR_{a,y}$ ersetzt werden kann und diese Ersetzungen der Elemente aus $LR_{bk,er}$ kombiniert werden können. Input der Funktion ist die Menge von zu ersetzenden Linienrouten ($LR_{bk,er}$) sowie deren jeweilige Mengen von alternativen Linienrouten ($LR_{a,y}$).

Die Erzeugung von Betriebskonzepten durch Ersetzung von Linienrouten kann als Füllung eines Arrays verbildlicht werden (siehe Abbildung 4-23). Die Ersetzung bzw. die Füllung des Arrays soll einer lokalen Suche entsprechen (siehe Kapitel 4.2.3) und erfolgt daher im Sinne einer Breitensuche, beginnend mit dem Element mit den geringsten Indizes. Für ein Element des Arrays werden die zu ersetzenden Linienrouten entsprechend der Indizes mit alternativen Linienrouten ersetzt. Bei der Ersetzung werden die Elemente in $LR_{a,y}$ absteigend nach ihrer Bewertung verwendet.

Kein Ergebnis der Ersetzung sollen Betriebskonzepte sein, die Mengen von Linienrouten enthalten, die in der Tabu-Liste enthalten sind (siehe Kapitel 4.3.4). Daher ist nach einer Ersetzung zu prüfen, ob das erzeugte Betriebskonzept eine Menge von Linienrouten enthält, die in der Tabu-Liste enthalten sind. Ist eine Teilmenge des Betriebskonzepts in der Tabu-Liste enthalten, ist das erzeugte Betriebskonzept nicht-funktionsfähig. Außerdem sind alle weiteren Elemente des Arrays mit der gleichen Teilmenge (identifizierbar anhand der Indizes) ebenfalls nicht-funktionsfähig und eine Erzeugung dieser kann ausgeschlossen werden (siehe Kapitel 4.3.4).

Bei der Prüfung der Tabu-Liste ist darauf zu achten, dass Betriebskonzepte nur anhand von Linienrouten, die in diesem Iterationsschritt geändert werden, auf Funktionsfähigkeit geprüft werden, da ggf. nicht alle in Modul 1.1 identifizierten verletzten Bedingungen in einem Iterationsschritt betrachtet werden (siehe Funktion „Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten“). Werden alle Linienrouten bei der Prüfung berücksichtigt, könnten Betriebskonzepte aufgrund von verletzten Bedingungen, die in diesem Iterationsschritt nicht berücksichtigt und somit auch nicht gelöst werden sollten, verworfen werden.

Neben der Prüfung der Tabu-Liste ist die kundenorientierte Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte zu prüfen. Für die kundenorientierte Bewertung wird der kundenorientierte Teil der Bewertung aus Modul 1.3 verwendet. Nach der kundenorientierten Bewertung eines erzeugten Betriebskonzepts wird geprüft, ob diese kleiner ist als die kundenorientierte Bewertung des bestbewerteten funktionsfähigen Betriebskonzepts. Ist dies der Fall, ist das erzeugte Betriebskonzept aus verkehrlicher Sicht nicht ausreichend und wird verworfen. Da die Elemente von $LR_{a,y}$ absteigend nach ihrer Bewertung verwendet werden, wird davon ausgegangen, dass alle Elemente des Arrays, deren Indizes gleich groß oder größer sind, ebenfalls verkehrlich nicht ausreichend sind (siehe Kapitel 4.3.4). Analog zur Prüfung der Tabu-Liste wird eine Erzeugung dieser Betriebskonzepte ausgeschlossen.

Die lokale Suche sieht vor, dass für aufgrund der Tabu-Liste gelöschte Betriebskonzepte die Suche diversifiziert wird (siehe Kapitel 4.2.3). Die Diversifizierung kann je Dimension des Arrays erfolgen. Für alle Teilarrays einer Dimension (die Teilarrays sind eindimensional) wird, wenn diese nicht insgesamt als nicht-funktionsfähig markiert sind, für jedes aufgrund der Tabu-

Liste gelöschte Betriebskonzept des Teilarrays ein weiteres Betriebskonzept mit einer weiteren alternativen Linienroute dieser Dimension erzeugt.

Die erzeugten Betriebskonzepte sind ebenfalls anhand der Tabu-Liste zu prüfen und einer kundenorientierten Bewertung zu unterziehen. Keine weiteren Betriebskonzepte eines Teilarrays einer Dimension werden erzeugt, wenn alle alternativen Linienrouten der Dimension verwendet wurden oder weitere Betriebskonzepte schlechtere kundenorientierte Bewertungen erwarten lassen.

Wurden für mindestens zwei Dimensionen, also für mindestens zwei Elemente aus $LR_{bk,er}$, eine Diversifizierung durchgeführt, erfolgt eine weitere Diversifizierung durch eine Ersetzung mit Kombinationen der zusätzlich verwendeten alternativen Linienrouten. Die Ersetzung erfolgt analog zur vorherigen Ersetzung und die resultierenden Betriebskonzepte werden wiederum bzgl. der Tabu-Liste und der kundenorientierten Bewertung geprüft.

Alle erzeugten Betriebskonzepte des Arrays, die ausreichend als funktionsfähig und kundenorientiert identifiziert wurden, werden in die Menge der erzeugten Betriebskonzepte (BK_e) aufgenommen. Output der Funktion sind erzeugte Betriebskonzepte für bk .

Abbildung 4-35 zeigt die Anwendung der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten durch Ersetzung von Linienrouten“ auf das eingeführte Beispiel. Im oberen Teil der Durchführung ist der Teil der Breitensuche ohne Diversifizierung dargestellt. Der untere Teil der Durchführung zeigt das Array mit den Diversifizierungen aufgrund der Tabu-Liste. Jedes Rechteck stellt ein erzeugtes Betriebskonzept dar. Die Betriebskonzepte mit den Indizes (2,1,1), (3,2,1) und (3,3,3) sind noch einmal detaillierter dargestellt.

Die Tabu-Liste enthält die Mengen von Linienrouten, die zu vb_1 geführt haben. Da vb_1 von Typ „Kapazitätsverbrauch“ ist, können die $LR_{a,y}$ die zu ersetzenden Linienrouten enthalten. Das Betriebskonzept mit den Indizes (1,1,1) entspricht bk und enthält demnach die Menge von Linienrouten der Tabu-Liste. Das erzeugte Betriebskonzept wird deshalb verworfen. Da die Tabu-Liste weiterhin ein Element mit einer Linienroute der blauen und gelben Linie enthält und diese Kombination an Linienrouten im Betriebskonzept mit dem Indizes (2,1,1) vorkommt, kann daraus geschlossen werden, dass alle Betriebskonzepte mit den Indizes (2,1,x) nicht-funktionsfähig sind.

Außerdem wurde das Betriebskonzept mit den Indizes (3,2,1) als verkehrlich nicht ausreichend bewertet. Daher gelten alle Betriebskonzepte mit Indizes, die höher sind (z. B. (3,2,2) oder (3,3,1)), ebenfalls als nicht verkehrlich ausreichend. Alle Betriebskonzepte, die kein Element der Tabu-Liste enthalten oder als verkehrlich ausreichend gelten, werden in BK_e aufgenommen.

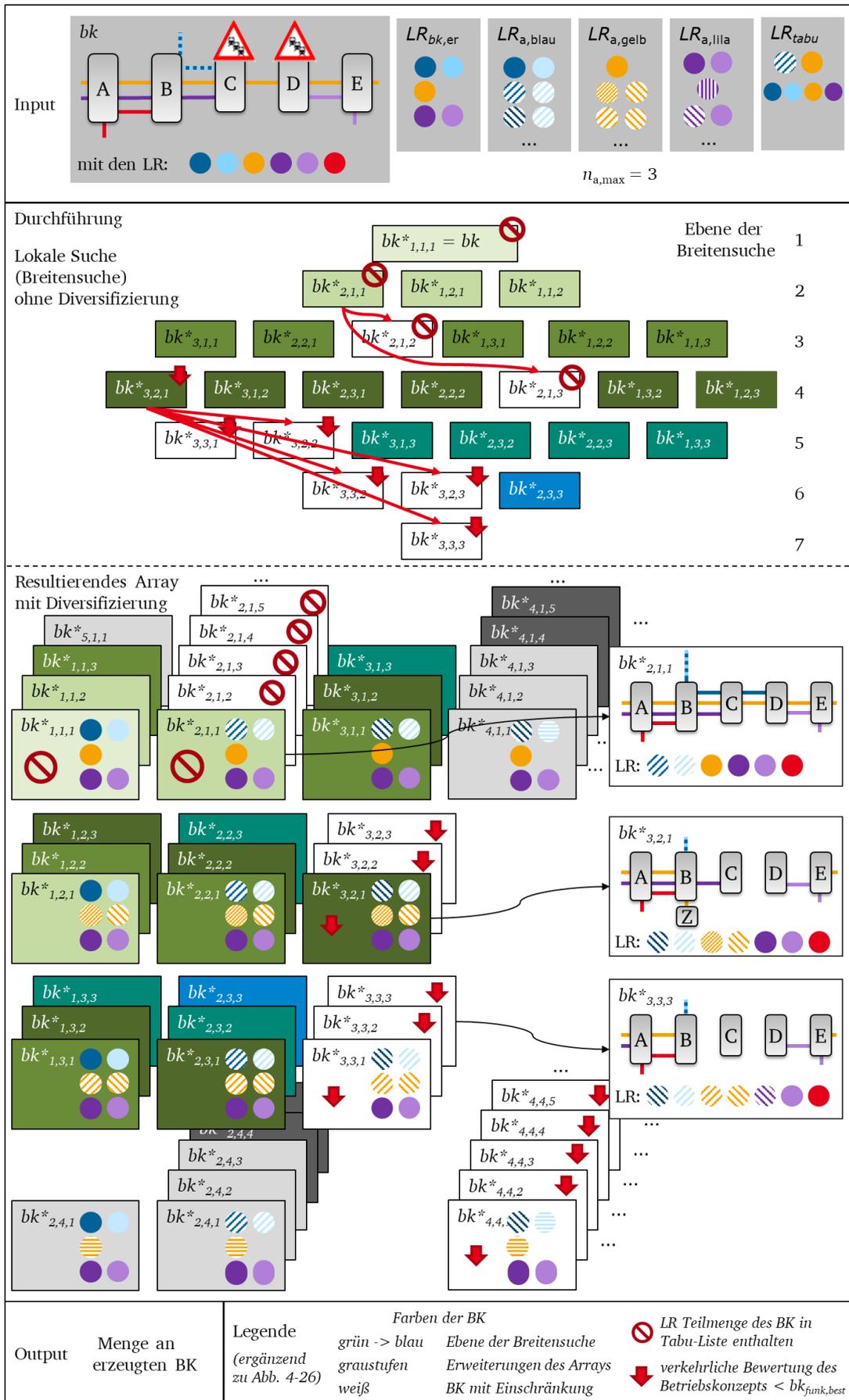


Abbildung 4-35: Beispielhafte Anwendung der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten durch Ersetzung von Linienrouten“

Funktion: Erzeugung von Betriebskonzepten mit alternativen Mengen von Linienrouten

Die Funktion „Bestimmung von alternativen Mengen von Linienrouten“ ist Teil von Operator 2 (siehe Kapitel 4.2.3). Für Operator 2 werden für die Ersetzung Mengen von alternativen Linienrouten bestimmt. Die alternative Menge von Linienrouten wird dem funktionsfähigen Betriebskonzept sowie dem bestehenden Betriebskonzept entnommen (siehe Kapitel 4.2.3). Anschließend erfolgt die Ersetzung. Input für die Funktion „Bestimmung von alternativen Mengen von Linienrouten“ sind

- die Menge von zu ersetzenden Linienrouten $LR_{bk,er}$,
- die in den bisherigen Iterationsschritten erzeugten funktionsfähigen Betriebskonzepte (BK_{funkt}) und
- die bestehenden Betriebskonzepte.

Für jede zu ersetzende Linienroute aus $LR_{bk,er}$ werden alternative Mengen von Linienrouten bestimmt. Wie in Kapitel 4.3.4 festgelegt, werden die alternativen Mengen von Linienrouten sowohl aus den funktionsfähigen Betriebskonzepten als auch aus den Betriebskonzepten bestehender SFP bestimmt. Die alternativen Mengen von Linienrouten sollen für die Ersetzung relevante Linienrouten enthalten, daher sollen die zu ersetzenden Linienrouten (lr_1) und die alternativen Mengen von Linienrouten einen gleichen Netzast bedienen.

Für die alternativen Mengen von Linienrouten der bestehenden Betriebskonzepte muss zusätzliche geprüft werden, ob Teilmengen in der Tabu-Liste enthalten sind und keine verletzten Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ bestehen. Die Prüfung verletzter Bedingungen kann mit Modul 1.1 erfolgen.

Wie in Kapitel 4.3.4 beschrieben, wird für ein alternative Menge von Linienrouten (LR_1) identifiziert, welche Linienroute von bk durch LR_1 ersetzt werden (LR_2). LR_2 erweitern lr_1 zu einer zu ersetzenden Menge von Linienrouten. Für die Erzeugung von Betriebskonzepten wird LR_2 von bk durch LR_1 ersetzt. Die erzeugten Betriebskonzepte sind auf verletzte Bedingungen zu prüfen und Betriebskonzepte mit verletzten Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“ werden verworfen.

Output der Funktion sind die erzeugten Betriebskonzepte für bk .

Nachdem Modul 1.2 für alle anzupassende Betriebskonzepte bk durchlaufen ist, bildet BK_e den Output von Modul 1.2.

4.4.4 Modul 1.3: Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte

In Modul 1.3 erfolgt die Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte. Die Bewertung ist zweigeteilt in eine betriebliche Bewertung aufbauend auf den Bedingungen eines funktionsfähigen Betriebskonzepts und eine kundenorientierte Bewertung (siehe Kapitel 4.3.5). Die beiden Teile der Bewertung bilden jeweils eine Funktion von Modul 1.3. Beide Funktionen haben als Input ein erzeugtes Betriebskonzept.

In der Funktion für den betrieblichen Teil der Bewertung wird zunächst für jedes erzeugte Betriebskonzept anhand Modul 1.1 geprüft, ob verletzte Bedingungen bestehen. Anschließend wird das Kriterium der Funktionsfähigkeit berechnet (siehe Kapitel 4.3.5). Output der Funktion ist die Bewertung des Betriebskonzepts hinsichtlich des Ziels „funktionsfähiges Betriebskonzept“ ($w_{x,funkt}$).

In der Funktion für den kundenorientierten Teil der Bewertung werden zunächst im erzeugten Betriebskonzept Verbindungskonflikte durch das Modul „Verbindungskonflikterkennung“ von Brauner (2023) identifiziert. Die Lösung der Verbindungskonflikte erfolgt durch das Modul „Konfliktlösungsalternativensuche“ mit Beschränkung auf folgende KLA, wobei eine hierarchische Konfliktlösung mit Priorität in der Reihenfolge der Aufzählung besteht:

- gewählte Konfliktlösungsalternative im Verkehrskonzept des ausgewählten SFP
- Fahrgastkorridore im (angepassten) Verkehrskonzept
- Umleitung der Fahrgäste im eigenen System
- Lösungen des Verbindungskonflikts in anderen bestehenden SFP

Zur Bewertung werden die Veränderungen der Verbindungen zwischen erzeugtem Betriebskonzept und dem Betriebskonzept des ausgewählten SFP mit den durchschnittlichen Widerstandsveränderungen je gelöstem bzw. ungelöstem Verbindungskonflikt aus dem ausgewählten SFP gewichtet. Output der Funktion ist die durchschnittliche Widerstandsveränderung des erzeugten Betriebskonzepts.

4.4.5 Modul 1.4: Prüfung der Abbruchbedingung und Auswahl der erzeugten Betriebskonzepte

Im letzte Submodul von Modul 1 erfolgt die Prüfung der Abbruchbedingung sowie die Auswahl von erzeugten Betriebskonzepten für einen potenziellen weiteren Iterationsschritt. Input von Modul 1.4 ist BK_e , wobei die enthaltenen Betriebskonzepte bereits durch die beiden Funktionen aus Modul 1.3 bewertet wurden.

Alle Betriebskonzepte aus BK_e , die keine verletzten Bedingungen aufweisen ($w_{x,funk} = 0$), können in die Menge der funktionsfähigen Betriebskonzepte aufgenommen werden. Alle anderen erzeugten Betriebskonzepte stellen die Menge von anzupassenden Betriebskonzepten für den nächsten Iterationsschritt dar.

Nach dieser Aufteilung kann die Prüfung der Abbruchbedingung erfolgen (siehe Kapitel 4.3.6). Dafür wird zunächst aus der Menge der funktionsfähigen Betriebskonzepte das Betriebskonzept ausgewählt, das die beste kundenorientierte Bewertung aufweist. Modul 1 wird abgebrochen, wenn kein anzupassendes Betriebskonzept besteht, das eine bessere kundenorientierte Bewertung aufweist als

- das bestbewertete funktionsfähige Betriebskonzept oder
- die verkehrliche Mindestqualität.

Terminiert Modul 1, ist der Output das funktionsfähige Betriebskonzept mit der besten kundenorientierten Bewertung. Ist kein funktionsfähiges Betriebskonzept vorhanden, terminiert Modul 1 ohne Output.

Terminiert Modul 1 nicht, werden für den nächsten Iterationsschritt die anzupassenden Betriebskonzepte ausgewählt. Dazu sind aus der Menge der anzupassenden Betriebskonzepte alle Betriebskonzepte zu löschen, deren kundenorientierte Bewertung schlechter ist als die kundenorientierte Bewertung aller funktionsfähiger Betriebskonzepte. Übersteigt die Menge der anzupassenden Betriebskonzepte den Parameter $n_{BK,max}$, sind maximal $n_{BK,max}$ anzupassende Betriebskonzepte auszuwählen. Die Auswahl kann anhand der vorhandenen Bewertung der Betriebskonzepte durch die Funktionen aus Modul 1.3 erfolgen (siehe Kapitel 4.3.6).

Im Fall, dass Modul 1.4 im aktuellen Iterationsschritt nicht terminiert, sind der Output von Modul 1.4 die anzupassenden Betriebskonzepte für den nächsten Iterationsschritt.

4.4.6 Zusammenfassung

Ziel des Kapitels war es, Modul 1 zu spezifizieren. Dafür wurde zunächst der Aufbau und die Parameter von Modul 1 bestimmt und anschließend die Submodule von Modul 1 beschrieben. Modul 1 gliedert sich in vier Submodule, die sich aus den Funktionalitäten der Heuristik zur Anpassung des Betriebskonzepts ergeben:

- Modul 1.1: Prüfung der Funktionsfähigkeit
- Modul 1.2: Erzeugung von Betriebskonzepten durch Operatoren
- Modul 1.3: Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte
- Modul 1.4: Prüfung der Abbruchbedingung und Auswahl der erzeugten Betriebskonzepte

Der Aufbau von Modul 1 ist in Abbildung 4-25 dargestellt.

In Modul 1.1 erfolgt die Prüfung der Funktionsfähigkeit eines Betriebskonzepts anhand von drei Funktionen. In jeder der drei Funktionen erfolgt die Prüfung einer der Typen an Bedingungen, die für ein funktionsfähiges Betriebskonzept bestehen (Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“, „Kapazitätsverbrauch“ und „Liniennetzplan“). Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“ werden bei der Erzeugung von Betriebskonzepten in Modul 1.2 berücksichtigt.

Modul 1.2 ist in sechs Funktionen unterteilt. Sind in einem Iterationsschritt von Modul 1.1 mehrere Betriebskonzepte anzupassen, sind die Funktionen für jedes Betriebskonzept durchzuführen. In der Funktion „Bestimmung der zu ersetzenden Linienroute“ werden die zu ersetzenden Linienrouten des Betriebskonzepts bestimmt.

Für Operator 1 werden in der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ alternative Linienrouten bestimmt. Um sicherzustellen, dass in den durch Operator 1 resultierenden Betriebskonzepten die Linienrouten konsistente Linien ergeben, werden in der Funktion „Zusammenfassung von Linienrouten“ sowohl zu ersetzende Linienrouten als auch alternative Linienrouten zusammengefasst. Weiterhin besteht die Funktion „Bewertung der alternativen Linienrouten“, um die alternativen Linienrouten zu bewerten. Operator 1 wird vervollständigt durch eine Funktion, in der durch die Ersetzung von zu ersetzenden Linienrouten durch alternative Linienrouten Betriebskonzepte erzeugt werden (Funktion: „Erzeugung von Betriebskonzepten durch die Ersetzung von Linienrouten“).

Für Operator 2 werden in der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten mit alternativen Mengen von Linienrouten“ aus Betriebskonzepten bestehender SFP und zuvor erzeugter funktionsfähiger Betriebskonzepte alternative Mengen von Linienrouten bestimmt. Die alternativen Mengen von Linienrouten werden verwendet, um Betriebskonzepte durch Ersetzung zu erzeugen. Output von Modul 1.2 sind die erzeugten Betriebskonzepte.

Modul 1.3 dient der Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte. Modul 1.3 ist zweigeteilt in eine Funktion für den betrieblichen und eine Funktion für den kundenorientierten Teil der Bewertung.

In Modul 1.4 wird geprüft, ob die Abbruchbedingung der Heuristik erfüllt ist. Wird die Abbruchbedingung nicht erfüllt, findet in Modul 1.4 auch eine Auswahl der erzeugten

Betriebskonzepte für den nächsten Iterationsschritt von Modul 1 statt. Output von Modul 1 ist ein funktionsfähiges Betriebskonzept.

4.5 Zusammenfassung von Kapitel 4 und Diskussion

Ziel von Kapitel 4 war die Lösung von Teilproblem I durch die Entwicklung von Algorithmen zur Anpassung eines Betriebskonzepts. Ergebnis der entwickelten Algorithmen ist Modul 1 der Systemarchitektur.

Als Methode für die Algorithmen zur Anpassung des Betriebskonzepts wurde eine Heuristik ausgewählt. Weiterhin wurde festgelegt, dass die Heuristik eine geringe Diversifizierung und somit eine ausgeprägte Intensivierung aufweist, einer Verbesserungsheuristik entspricht und deterministisch Entscheidungen treffen soll. Für die Anpassung von Betriebskonzepten wurden mit der Änderung einzelner Linienrouten (Operator 1) und die Änderung von Mengen von Linienrouten (Operator 2) zwei Operatoren bestimmt. Zusätzlich wurde festgelegt, dass die Heuristik eine Tabu-Liste nutzt.

Aufbauend auf der ausgewählten Methode und den bestimmten Eigenschaften wurden fünf Funktionalitäten von Modul 1 bestimmt. Vier der Funktionalitäten wurden in die vier Submodule von Modul 1 überführt. Die verbliebene Funktionalität umfasst die Bestimmung der ebM und kann bereits vorab durchgeführt werden.

Für die Prüfung der Funktionsfähigkeit von Betriebskonzepten wurden vier verschiedene Typen von Bedingungen bestimmt. Drei der vier Bedingungen (Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“, „Kapazitätsverbrauch“ und „Liniennetzplan“) werden in Modul 1.1 bestimmt. Bedingungen vom Typ „Konsistente Linien“ werden in der Erzeugung von Betriebskonzepten berücksichtigt. Wird für das Betriebskonzept des ausgewählten SFP in Modul 1.1 festgestellt, dass keine verletzte Bedingung besteht, dann endet Modul 1 und damit auch die Adaption des SFP, da keine Anpassung erforderlich ist.

Die Bedingungen „Liniennetzplan“ und „Konsistente Linien“ können auf die jeweiligen Bedürfnisse der S-Bahn-Systeme angepasst werden. Weitere Bedingungen, beispielsweise zu Pendelverkehren, können formuliert oder ohne weitere Anpassung von Modul 4 aufgenommen werden. Es ist auch möglich, Linienrouten zu bestimmen, die im angepassten Betriebskonzept enthalten sein sollen. Dadurch kann z. B. sichergestellt werden, dass Knoten mit wichtigen Funktionen für den Fahrzeug- oder Personalumlauf (z. B. Depots) weiterhin bedient werden.

Bestehen verletzte Bedingungen, ist das Betriebskonzept anzupassen. Dazu wurden zwei Operatoren bestimmt, die durch eine Ersetzung von Linienrouten neue Betriebskonzepte erzeugen. Für die Erzeugung von Betriebskonzepten wurden aufbauend auf den zwei Operatoren sechs Funktionen entwickelt. Diese sechs Funktionen bilden zusammen Modul 1.2. Ergebnis des Moduls ist eine Menge von erzeugten Betriebskonzepten.

Eine mögliche Erweiterung von Modul 1.2 ist die stärkere Zusammenfassung der beiden Operatoren. Die alternativen Mengen von Linienrouten könnten gemeinsam mit den alternativen Linienrouten zusammengefasst und bewertet werden. Dadurch könnte in weniger Iterationsschritten eine Lösung gefunden werden. Die Herausforderung dabei ist, sicherzustellen, dass Betriebskonzepte mit konsistenten Linien erzeugt werden. Mit dem bisherigen Ansatz würde es bereits bei der Zusammenfassung der Linien zu einer Enumeration der möglichen Kombinationen der alternativen Linienrouten kommen. Zur Reduzierung der

Dauer der Lösungsbereitstellung ist dies im bisherigen Ansatz aber erst nach der Bewertung der alternativen Linienrouten bei der Erzeugung der Betriebskonzepte vorgesehen.

Die Bewertung von erzeugten Betriebskonzepten als weitere Funktionalität ist zweigeteilt und berücksichtigt sowohl die Bedingungen für ein funktionsfähiges Betriebskonzept als auch kundenorientierte Anforderungen. Umgesetzt ist die Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte in die zwei Funktionen von Modul 1.3.

Zentral für Modul 1 ist die kundenorientierte Bewertung der alternativen Linienrouten und der erzeugten Betriebskonzepte. Aufbauend auf der Bewertung der alternativen Linienrouten erfolgt die Reihung der alternativen Linienrouten für die Verwendung in der Ersetzung. Von der Reihung hängt wiederum ab, ob eine Ersetzung ggf. nicht stattfindet. Wird ein erzeugtes Betriebskonzept als verkehrlich nicht ausreichend bewertet, werden weitere Erzeugungen mit alternativen Linienrouten, die schlechter bewertet wurden, nicht durchgeführt. Daher sollten die beiden Bewertungen die kundenorientierte Bewertung in Modul 5 gut abschätzen können. Für die Bewertung der alternativen Linienrouten könnten dazu weitere Einflussgrößen, wie die Fahrgastzahlen oder die Anzahl der von der Linienroute ausgehenden Verbindungen, berücksichtigt werden.

Die letzte Funktionalität ist die Prüfung der Abbruchbedingung sowie die Auswahl der Betriebskonzepte bei einem weiteren Iterationsschritt der Heuristik. Die Abbruchbedingung ist erfüllt, wenn das funktionsfähige Betriebskonzept mit der besten kundenorientierten Bewertung eine bessere kundenorientierte Bewertung aufweist als das nicht-funktionsfähige Betriebskonzept mit der besten kundenorientierten Bewertung. Wenn die Abbruchbedingung nicht erfüllt ist, erfolgt ein weiterer Iterationsschritt. Dafür erfolgt eine Auswahl der Betriebskonzepte anhand der zwei Bewertungen aus Modul 1.3. Bei einer Weiterentwicklung des Moduls können die beiden Bewertungen zusammengeführt werden, sodass Betriebskonzepte, die eine gute kundenorientierte Bewertung erwarten lassen, ausgewählt werden. Durch die Tabu-Liste und da ein Betriebskonzept mit dem Ausfall aller Leistungen funktionsfähig ist, ist sichergestellt, dass die Heuristik terminiert.

Nachdem durch Modul 1 ein angepasstes Betriebskonzept bestimmt wurde, erfolgt die Anpassung des Verkehrskonzepts.

5 Anpassung des Verkehrskonzepts

5.1 Einleitung

In Kapitel 4 wurde Teilproblem I der Adaption von SFP bearbeitet. Das zweite Teilproblem ist die Anpassung des Verkehrskonzepts (siehe Kapitel 3.4). Ein Verkehrskonzept besteht nach Brauner (2023) aus individuellen Lösungen, Lösungen die in Fahrgastkorridoren (FGK) zusammengefasst sind und ungelösten Verbindungskonflikten. Die Lösungen dienen dazu, Verbindungskonflikte zu lösen, die durch den eingeschränkten Betrieb (vorgegeben durch das angepasste Betriebskonzept) während der Störung entstehen. Durch die Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 (siehe Kapitel 4) können im Vergleich zum Betriebskonzept des ausgewählten SFP u. a. neue Verbindungskonflikte entstehen oder bestehende Konfliktlösungen nicht mehr umsetzbar sein. Daher umfasst Modul 2 die Prüfung, ob eine Anpassung des Verkehrskonzepts erforderlich ist und die Anpassung des Verkehrskonzepts.

Ziel des Kapitels ist die Lösung von Teilproblem II durch die Entwicklung von Algorithmen zur Anpassung des Verkehrskonzepts. Gemäß Kapitel 3.4 entspricht dies der Entwicklung von Modul 2 der Systemarchitektur.

Der Input von Modul 2 besteht aus dem in Modul 1 angepassten Betriebskonzept, das gemäß der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Anforderungen funktionsfähig ist und dem ausgewählten SFP. Außerdem stehen weitere Verkehrskonzepte bestehender SFP zur Verfügung.

In Modul 2 erfolgt die Anpassung des Verkehrskonzepts an das angepasste Betriebskonzept. Eine Anpassung des Verkehrskonzepts ist stets möglich, da ein Verkehrskonzept Verbindungskonflikte ohne Lösungen enthalten kann. Die Bewertung des SFP anhand des Verkehrskonzepts erfolgt in Modul 5 (siehe Kapitel 3.4). Ergebnis von Modul 2 kann somit

- ein angepasstes Verkehrskonzept oder
- das nicht angepasste Verkehrskonzept, wenn keine Anpassung des Verkehrskonzepts erforderlich ist, sein.

Der Aufbau von Kapitel 5 folgt dem grundsätzlichen Aufbau der Hauptkapitel gemäß Kapitel 3.5. Zunächst wird in Kapitel 5.2 eine Methode zur Anpassung des Verkehrskonzepts ausgewählt sowie erforderliche Modifikationen zur Anwendung der Methoden auf Teilproblem II bestimmt. Anschließend werden erforderliche Modifikationen der ausgewählten Methode in Kapitel 5.3 festgelegt. Aufbauend auf die ausgewählte Methode und deren Modifikationen erfolgt in Kapitel 5.4 die detaillierte Beschreibung von Modul 2. Abschließend werden in Kapitel 5.5 die Ergebnisse des Kapitels zusammengefasst und diskutiert.

5.2 Methode zur Anpassung des Verkehrskonzepts

Ziel dieses Kapitels ist es, die Methode zur Lösung von Teilproblem II auszuwählen. Die ausgewählte Methode ist die Grundlage für Modul 2.

Zur Auswahl einer Methode wird zunächst Teilproblem II beschrieben (Kapitel 5.2.1). Anschließend werden mögliche Methoden anhand der relevanten Anforderungen aus Kapitel 3.3 diskutiert und eine Methode ausgewählt (Kapitel 5.2.2). Danach werden erforderliche Anpassungen der Methode bestimmt (Kapitel 5.2.3). Abschließend kann aufbauend auf den ausgewählten Methoden und den erforderlichen Anpassungen die

Vorgehensweise zur Entwicklung der Algorithmen zur Anpassung des Verkehrskonzepts festgelegt werden (Kapitel 5.2.5).

5.2.1 Problembeschreibung Anpassung des Verkehrskonzepts

Für die Auswahl der Methode erfolgt eine Problembeschreibung von Teilproblem II. Dafür wird das Problem zunächst bestimmt und anschließend die Bedingungen an die Problemlösung behandelt.

Problemformulierung

Bei der Anpassung des Verkehrskonzepts sind die Lösungen der bestehenden Verbindungskonflikte an das durch das angepasste Betriebskonzept geänderte betriebliche Angebot anzupassen und ggf. neue Verbindungskonflikte zu lösen. Die möglichen Veränderungen der Verbindungskonflikte des ausgewählten SFP und deren Lösungen durch die Anpassung von Betriebs- und Verkehrskonzept sind in Tabelle 5-1 aufgeführt. Abbildung 5-1 zeigt ein Beispiel für die Anpassung des Betriebskonzepts, mit dem die in Tabelle 5-1 aufgeführten Fälle verdeutlicht werden.

Durch die Anpassung des Betriebskonzepts können Lösungen von Verbindungskonflikten aus dem ausgewählten SFP im angepassten Betriebskonzept nicht umsetzbar sein (Fall A in Tabelle 5-1). Dabei kann ein FGK nicht mehr vorhanden (A1) oder eine individuelle Lösung nicht mehr umsetzbar sein (A2). Auf die Gründe dafür, dass ein FGK nicht mehr vorhanden ist, wird im Anschluss an die Diskussion von Tabelle 5-1 weiter eingegangen.

Tabelle 5-1: Veränderung der Verbindungskonflikte des ausgewählten SFP und deren Lösungen durch die Anpassung des Betriebskonzepts

		Verbindungskonflikt im ausgewählten SFP			
		Lösung (FGK)	Lösung (individuelle)	nicht gelöst	nicht vorhanden
Verbindungskonflikt im angepassten Verkehrskonzept	Lösung (FGK)	<ul style="list-style-type: none"> • FGK nicht mehr vorhanden (A1.1) • besserer FGK (B1.1) • gleiche Lösung (C.1) 	<ul style="list-style-type: none"> • indiv. Lsg. nicht umsetzbar (A2.1) • Lösung durch FGK (B2.1) 	E.1	F.1
	Lösung (indiv.)	<ul style="list-style-type: none"> • FGK nicht mehr vorhanden (A1.2) • bessere indiv. Lsg (B1.2) 	<ul style="list-style-type: none"> • indiv. Lsg. nicht umsetzbar (A2.2) • bessere indiv. Lsg (B2.2) • gleiche Lösung (C.2) 	E.2	F.2
	keine Lösung möglich	<ul style="list-style-type: none"> • FGK nicht vorhanden (A1.3) 	<ul style="list-style-type: none"> • indiv. Lsg. nicht umsetzbar (A2.3) 	keine Änderung	F.3
	nicht vorhanden	D			keine Änderung

FGK: Fahrgastkorridor
 indi. Lsg.: individuelle Lösung

Abbildung 5-1 zeigt ein Beispiel für eine nicht mehr umsetzbare Lösung. Die Lösung eines Verbindungskonflikts B – E innerhalb des S-Bahn-Systems ist nicht mehr umsetzbar, da die Verbindung B – E entfällt. Im angepassten Verkehrskonzept können Verbindungskonflikte mit nicht mehr umsetzbarer Lösung (A)

- durch einen FGK gelöst sein (A1.1 und A2.1)
- durch eine individuelle Lösung gelöst sein (A1.2 und A2.2) oder
- keine Lösung mehr haben (A1.3 und A2.3).

Lösungen von Verbindungskonflikten aus dem ausgewählten SFP können im angepassten Betriebskonzept auch weiterhin vorhanden sein. Zusätzlich kann durch die Anpassung des Betriebskonzepts eine bessere Lösung vorhanden sein (Fall B in Tabelle 5-1). Eine Lösung ist „besser“, wenn diese den Konflikt durch eine höhere Hierarchieebene (Brauner 2023, S. 171) löst oder bei gleicher Hierarchieebene eine geringere Widerstandsveränderung aufweist. Bei einer Verbesserung kann

- eine Lösung durch einen besseren FGK bestehen (B1.1),
- eine individuelle Lösung nun durch einen FGK gelöst sein (B2.1) oder
- eine bessere individuelle KLA bestehen (B1.2 oder B2.2).

Eine bessere Lösung eines Verbindungskonflikts besteht in Abbildung 5-1 z. B. für einen Verbindungskonflikt Z – D durch Umstieg in E auf die rote Linie statt der Nutzung des Busersatzverkehrs. Durch die Nutzung einer Lösung innerhalb des S-Bahn-Systems statt dem Busersatzverkehr, ist dies eine Lösung einer höheren Hierarchieebene. Für einen Verbindungskonflikt X – E kann angenommen werden, dass durch das angepasste Betriebskonzept eine Lösung der gleichen Hierarchieebene mit einer geringeren Widerstandsveränderung durch die direkte Verbindung der beiden Knoten durch die blaue Linie besteht.

Ist die Lösung eines Verbindungskonflikts aus dem ausgewählten SFP im angepassten Betriebskonzept weiterhin vorhanden und besteht keine bessere Lösung (Fall C in Tabelle 5-1), dann kann durch die Anpassung des Betriebskonzepts die Widerstandsveränderung der Lösung verändert sein. Ist die Widerstandsveränderung gleich, besteht keine Änderung durch die Anpassung des Betriebskonzepts.

Weiterhin kann ein Verbindungskonflikt aus dem ausgewählten SFP durch die Anpassung des Betriebskonzepts nicht mehr vorhanden sein (Fall D in Tabelle 5-1). Damit kann die Lösung eines Verbindungskonflikts aus dem ausgewählten SFP nicht mehr erforderlich sein oder im ausgewählten SFP bestand keine Lösung für den Verbindungskonflikt. In Abbildung 5-1 erfordert ein Verbindungskonflikt D – F im angepassten Betriebskonzept keine Lösung mehr, da nun die direkte Verbindung D – F durch die rote Linie gegeben ist.

Für im ausgewählten SFP nicht gelöste Verbindungskonflikte, die im angepassten Betriebskonzept weiterhin vorhanden sind, kann durch die Anpassung des Betriebskonzepts nun eine Lösung möglich sein (Fall E in Tabelle 5-1). Im angepassten Verkehrskonzept können diese Verbindungskonflikte durch einen FGK (E.1) oder eine individuelle Lösung gelöst sein (E.2).

Zuletzt können Verbindungskonflikte im angepassten Betriebskonzept vorhanden sein, die im Betriebskonzept des ausgewählten SFP nicht enthalten sind (Fall F in Tabelle 5-1). Die Verbindungskonflikte können im angepassten Verkehrskonzept

- durch einen FGK gelöst sein (F.1),
- durch eine individuelle Lösung gelöst sein (F.2) oder
- keine Lösung haben (F.3).

Für das angepasste Betriebskonzept in Abbildung 5-1 können z. B. für die Verbindung X–B Verbindungskonflikte im angepassten Betriebskonzept bestehen.

Wie zuvor beschrieben, kann durch die Anpassung des Betriebskonzepts ein FGK nicht mehr vorhanden sein (Fall A1 in Tabelle 5-1). Dass ein FGK nicht mehr vorhanden ist, kann mehrere Gründe haben.

Zunächst kann ein FGK nicht mehr umsetzbar sein, wenn die zugrundeliegende Route nicht mehr verfügbar ist. In Abbildung 5-1 ist dies der Fall, wenn im ausgewählten SFP ein FGK zwischen B und E bestand. Ein FGK kann aber auch nicht mehr erforderlich sein, weil die durch die Korridorart zugewiesene Funktion nicht mehr erforderlich ist (z.B. wenn der Korridorendpunkt eines FGKs mit Basisfunktion durch den Netzast direkt bedient wird).

Ein FGK kann ebenfalls nicht mehr erforderlich sein, wenn dieser keine Lösungen von Verbindungskonflikten mehr bündelt. Dazu kann es z. B. kommen, wenn für die Route des FGK keine Verbindungskonflikte mehr bestehen. In Abbildung 5-1 könnte dies z. B. für einen FGK des ausgewählten SFP zwischen F nach D zutreffen.

Ein weiterer Grund dafür, dass ein FGK nicht mehr umsetzbar ist, sind Engpässe. Entsteht durch die Anpassung des Betriebskonzepts ein Engpass in einem FGK müssen die FGK geändert werden, sodass kein Engpass mehr auftritt.

Zusammenfassend lässt sich Teilproblem II weiter untergliedern in zwei Teilprobleme. Zum einen ist eine Lösung von Verbindungskonflikten erforderlich. Zu lösen sind neue (F in Tabelle 5-1) sowie bisher ungelöste Verbindungskonflikte (E). Auch Verbindungskonflikte mit einer nicht mehr umsetzbaren Lösung (A) erfordern eine neue Konfliktlösung. Außerdem ist

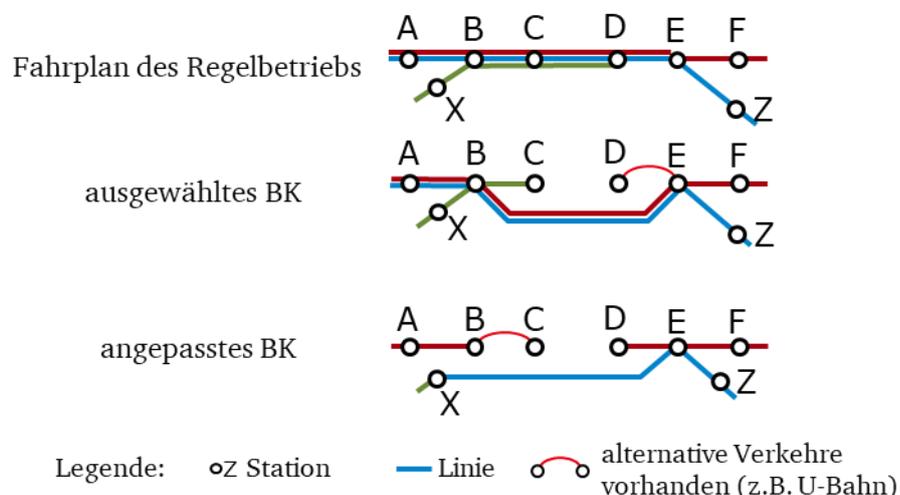


Abbildung 5-1: Beispiel für die Anpassung eines Betriebskonzepts

eine Lösung von Verbindungskonflikten erforderlich, um zu prüfen, ob für Verbindungskonflikte eine Verbesserung der Lösung möglich ist (B1 und B2).

Als zweites Teilproblem ist eine Prüfung und ggf. Anpassung der FGK des Verkehrskonzepts notwendig, da FGK aus den oben genannten Gründen nicht mehr umsetzbar oder erforderlich sein können. Auch können bei der Anpassung des Verkehrskonzepts für einen Netzastr FGK bestimmt werden, wenn im Verkehrskonzept des ausgewählten SFP noch kein FGK für diesen Netzastr besteht.

Eine Änderung eines FGK ist nur möglich, wenn ein alternativer Fahrgaststrom ausgewählt wird (siehe Kapitel 2.4.2). Für die Änderung eines FGK ist somit eine Bestimmung von Fahrgastströmen erforderlich. Fahrgastströme wiederum basieren auf den individuellen Lösungen der Verbindungskonflikte, daher kann die Anpassung der FGK erst nach der Lösung der Verbindungskonflikte durch individuelle Lösungen erfolgen.

Somit ist für Teilproblem II eine

- Lösung von Verbindungskonflikten anhand individueller Lösungen und eine
- Bestimmung von FGK erforderlich.

Für eine detaillierte Beschreibung der Probleme zur Lösung von Verbindungskonflikten und zur Bestimmung von FGK wird auf Brauner (2023) verwiesen. Auf den Suchraum der beiden Probleme wird bei der Diskussion der Methoden näher eingegangen.

Bedingungen an die Problemlösung

Bei der Lösung von Teilproblem II sind neben den Anforderungen an die Durchführung der Adaption (Anforderungen 2.A bis 2.C aus Tabelle 3-1) und an das gesamte SFP (Anforderungen 1.A aus Tabelle 3-2) insbesondere auch die verkehrlichen Anforderungen (1.C) zu berücksichtigen.

Bei Lösungen von Verbindungskonflikten wird zwischen individuellen Lösungen und Lösungen, die Teil von FGK sind, unterschieden. FGK werden allgemein kommuniziert und können ggf. vorab mit anderen Verkehrsunternehmen abgesprochen sein. Eine Änderung der FGK in einem Verkehrskonzept ist daher nicht nur mit einer Anpassung von Maßnahmen zur kollektiven Kommunikation der FGK (z. B. Ansagen) verbunden, sondern kann auch neue Abstimmungen mit anderen Verkehrsunternehmen erforderlich machen. Wie in der Anforderung nach geringer Änderung beschrieben (siehe Kapitel 3.3), sollte das Verkehrskonzept daher möglichst beibehalten werden. Eine Beibehaltung des Verkehrskonzepts entspricht auch der Anforderung der Nachvollziehbarkeit durch den Kunden (siehe Kapitel 3.3).

Individuelle Lösungen des Verkehrskonzepts werden individuell an den Kunden kommuniziert (Brauner 2023, S. 179). Die Änderung einer individuellen Lösung ist daher, anders als eine Änderung eines FGK, mit geringem Aufwand verbunden, da eine Anpassung von Maßnahmen zur Kommunikation der FGK (z. B. Ansagen) nicht erforderlich ist. Die Anforderungen nach geringer Änderung und Nachvollziehbarkeit für Kunden beziehen sich daher vor allem auf FGK. Da nach Brauner (2023, S. 147) während einer Störung kollektive Lösungen durch FGK wichtig sind, sollten Verbindungskonflikte möglichst durch einen FGK gelöst werden.

5.2.2 Methodendiskussion zur Anpassung des Verkehrskonzepts

Nachdem Teilproblem II beschrieben wurde, ist das Ziel dieses Kapitels, darauf aufbauend eine Methode zur Lösung des Problems zu diskutieren und auszuwählen. Wie im vorherigen Kapitel 5.2.1 aufgezeigt, ist jeweils eine Methode zur

- Lösung von Verbindungskonflikten anhand individueller Lösungen und zur
- Bestimmung von FGK erforderlich.

In der weiteren Methodendiskussion wird für die Auswahl der Methoden zunächst der resultierende Suchraum bei Anwendung der Methode aufgezeigt und anschließend die Methode anhand der relevanten Anforderungen diskutiert und ausgewählt.

Lösung von Verbindungskonflikten anhand individueller Lösungen

Für die Lösung von Verbindungskonflikten anhand individueller Lösungen können Lösungen aus bestehenden SFP verwendet oder KLA erzeugt werden.

Suchraum

Der Suchraum bei der Nutzung von Lösungen aus bestehenden SFP ist durch die bestehenden SFP vorgegeben. Ein Verbindungskonflikt kann in anderen bestehenden SFP

- nicht vorkommen bzw. nicht gelöst sein oder
- vorkommen und
 - durch die gleiche Lösung oder
 - durch eine andere Lösung gelöst sein.

Die maximale Anzahl der möglichen Lösungen eines Verbindungskonfliktes bei der Nutzung von Lösungen aus bestehenden SFP entspricht somit der Anzahl der bestehenden SFP. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass für die Lösung von Verbindungskonflikten Abschnitte von FGK des Verkehrskonzepts des ausgewählten SFP oder anderer bestehender SFP genutzt werden, wodurch sich der Suchraum vergrößert.

Der Suchraum bei der Erzeugung von KLA ist deutlich größer als bei der Verwendung von Lösungen aus bestehenden SFP, da eine Vielzahl von Routen und Verkehrsmitteln zur Lösung von Verbindungskonflikten herangezogen werden können. Für eine Analyse des Suchraums für die Lösung von Verbindungskonflikten wird auf Brauner (2023, S.142 ff.) verwiesen. Für die Einschränkung der Problemkomplexität zur Ermittlung von KLA nutzt Brauner (2023) eine Heuristik u. a. in Form einer Hierarchie der elementaren Konfliktlösungen (siehe Kapitel 2.4.2).

Diskussion der Ansätze

Aufgrund der relativ geringen Größe des Suchraums bei einer Verwendung von Lösungen aus bestehenden SFP kann eine erschöpfende Suche verwendet werden und gleichzeitig die Anforderung nach einer schnelle Lösungsbereitstellung erfüllt werden. Mit dem Ansatz von Brauner (2023) besteht ein Ansatz zur Erzeugung von KLA für die Planung von SFP.

Brauner hat bei der Entwicklung des Ansatzes die Anforderung nach schneller Lösungsbereitstellung berücksichtigt (Brauner 2023, S. 53 ff. und S. 241). Die Hierarchie der elementaren Konfliktlösungen entspricht dabei den Anforderungen nach Nachvollziehbarkeit durch den Fahrgast.

Die Verwendung von Lösungen aus bestehenden SFP entspricht der Nutzung von bereits geplanten verkehrlichen Maßnahmen und folgt dadurch den Anforderungen nach „Umsetzbarkeit“ und „Nachvollziehbarkeit der Adaption“. Diese Anforderungen werden auch durch den Ansatz von Brauner (2023, S. 53 f. und S. 240) berücksichtigt.

Die geringe Größe des Suchraums bei der Verwendung von Lösungen aus bestehenden SFP im Vergleich zur Erzeugung von KLA kann dazu führen, dass ggf. keine Lösungen bestimmt werden können. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Ersetzung einer Lösung erfolgreich ist, ist somit bei der Ermittlung neuer Lösungen größer als durch die Verwendung von Lösungen aus bestehenden SFP. Auch kann aufgrund der Unterschiede im Suchraum bei der Erzeugung von KLA öfter Lösungen mit einer geringeren Widerstandsveränderung vorhanden sein. Daher wird die Anforderung, dass Lösungen mit möglichst geringer Widerstandsveränderung ausgewählt werden sollen, bei einer Erzeugung von KLA umfassender erfüllt.

Wenn durch die Verwendung von Lösungen bestehender SFP keine Lösung gefunden wird oder es zu Engpässen in den FGK kommt, ist eine Auflösung der Engpässe nur durch Erzeugung von KLA möglich. Alternativ kann keine Lösung oder eine Lösung mit Engpässen kommuniziert werden.

Methodenauswahl

Da die Wahrscheinlichkeit zur Lösung von Verbindungskonflikten bei der Erzeugung von KLA größer und die erwartete Widerstandsveränderung kleiner ist sowie die übrigen Anforderungen von beiden Ansätzen berücksichtigt werden, wird als Methode zur Lösung von Verbindungskonflikten die Erzeugung von KLA ausgewählt.

Mit dem Ansatz von Brauner (2023) besteht bereits ein Ansatz zur Erstellung von Lösungen von Verbindungskonflikten (siehe auch Kapitel 2.4.2). Der Ansatz berücksichtigt alle verkehrlichen Anforderungen aus Tabelle 3-1 (Brauner 2023, S. 53 ff. und S. 240 ff.).

In dem Ansatz von Brauner (2023) wurden auch Anforderungen nach „Nachvollziehbarkeit der Adaption“ und „schneller Lösungsbereitstellung“ berücksichtigt (Brauner 2023, S. 53 ff. und S. 241). Auch wurde die „Weiterentwicklungsfähigkeit“ in der Entwicklung des Ansatzes von Brauner (2023) berücksichtigt (Brauner 2023, S. 55), indem der Ansatz u. a. modular aufgebaut wurde und so einzelne Funktionen in andere Ansätze integriert werden können.

Den Anforderungen nach Nachvollziehbarkeit der Adaption durch Disponenten und Kunden (siehe Kapitel 3.3) entsprechend, sollten Lösungen der Verbindungskonflikte dem Vorgehen in der Planung des Verkehrskonzepts entsprechen. Auch die Anforderung nach Kontinuität fordert möglichst bestehende Ansätze zu nutzen.

Da der Ansatz von Brauner (2023) die relevanten Anforderungen erfüllt, wird für die Lösungen von Verbindungskonflikten anhand individueller Lösungen eine Erzeugung von KLA durch den Ansatz von Brauner (2023) verwendet.

Bestimmung von FGK

Für die Bestimmung von FGK können FGK aus anderen bestehenden SFP verwendet oder neue FGK erzeugt werden.

Suchraum

Der Suchraum für die Verwendung von FGK aus bestehenden SFP ist abhängig von der Anzahl der FGK in den bestehenden SFP. Die Anzahl an FGK ist nach Brauner (2023, S. 182) auf drei FGK mit unterschiedlicher Erschließungsfunktion je auf die Störung zulaufenden Netzast festgelegt. Der Suchraum (S_{II}) umfasst die FGK der bestehenden SFP und die Anzahl der FGK in Suchraum S_{II} ($n_{S,II}$) ergibt sich aus:

$$n_{S,II} = \sum_{p \in P} (n_{\text{Netzast},p})$$

und mit $\forall p \in P$ gilt $n_{\text{Netzast},p} \leq n_{\text{Netzast}}$ zu

$$n_{S,II} = n_{\text{Netzast}} \cdot |P|$$

mit

$n_{S,II}$	Anzahl der Elemente in Suchraum von Teilproblem II
P	Menge der SFP des S-Bahn-Systems
$n_{\text{Netzast},p}$	Anzahl der auf die Störung zulaufenden Netzäste im SFP p
n_{Netzast}	Anzahl der Netzäste des S-Bahn-Netzes

Somit sind Größen, die maßgeblich die Berechnungsdauer des Optimierungsproblems beeinflussen:

- Anzahl der Netzäste im S-Bahn-System (n_{Netzast})
- Anzahl der SFP des S-Bahn-Systems ($|P|$)

Der Suchraum wächst linear mit diesen Größen. Für die Anzahl der SFP eines S-Bahn-Systems kann angenommen werden, dass diese aufgrund der aufwendigen Erstellung und für einen effizienten Einsatz durch die Disponenten nicht über einen zweistelligen Wert hinausgeht. Für die Anzahl der Netzäste kann ein niedriger zweistelliger Wert angenommen werden, da die Aufnahmefähigkeit der Stammstrecke begrenzt ist. Gleichzeitig kann erwartet werden, dass FGK in mehreren SFP verwendet werden, wodurch der Suchraum kleiner wird.

Der Suchraum bei der Erstellung von FGK ist auf Grund der erforderlichen Bestimmung von Start, Ziel- und ggf. Umstiegsknoten der Fahrgastströme bei der Erstellung von FGK größer als bei der Verwendung von FGK aus bestehenden SFP. Für eine detaillierte Analyse des Suchraums für die Erstellung von FGK wird auf Brauner (2023, S.178 ff.) verwiesen.

Diskussion der Ansätze

Aufgrund der relativ geringen Größe des Suchraums für die Verwendung von KLA aus bestehenden SFP ist zu erwarten, dass eine erschöpfende Suche verwendet und gleichzeitig die Anforderung nach einer schnellen Lösungsbereitstellung erfüllt werden kann. Dazu kommt, dass durch problemspezifisches Wissen der Suchraum eingeschränkt oder strukturiert werden kann (z. B. zunächst Suche in bestehenden SFP mit ähnlichen Störungsszenarien). Gleichzeitig erhöht die geringe Größe des Suchraums die Wahrscheinlichkeit, dass ggf. kein FGK bestimmt werden kann. Die Verwendung von FGK aus bestehenden SFP entspricht den Anforderungen nach Nutzung bestehender verkehrlicher Maßnahmen (Anforderung „Nutzung bestehender Verkehrskonzepte“ und Anforderung „Nutzung bestehender Maßnahmen“) sowie der Anforderung nach Zuverlässigkeit.

Methodenauswahl

Entsprechend den Anforderungen nach Nutzung bestehender verkehrlicher Maßnahmen und Zuverlässigkeit ist die Verwendung von FGK aus bestehenden SFP der Erstellung von FGK vorzuziehen. Daher wird als Methode zur Bestimmung von FGK die Verwendung von FGK aus bestehenden SFP ausgewählt. Falls bei der Verwendung von FGK aus bestehenden SFP keine FGK bestimmt werden können, können FGK erzeugt werden. Somit werden beide Methoden zur Bestimmung von FGK verwendet.

Für die Erstellung von FGK wird, basierend auf den gleichen Argumenten wie für die Nutzung des Ansatzes von Brauner (2023) für die Ermittlung von individuellen Lösungen, der Ansatz von Brauner (2023) ausgewählt. Entsprechend den Anforderungen nach Gewohnheit und Nutzung gleicher Maßnahmen sollten möglichst Fahrgastströme erzeugt werden, die in Teilen mit FGK aus bestehenden SFP übereinstimmen.

Zusammenfassend wird für die Lösung von Verbindungskonflikten anhand individueller Lösungen eine Erzeugung von KLA verwendet. Die Erzeugung von KLA erfolgt durch den Ansatz von Brauner (2023). Für die Bestimmung von FGK wird eine erschöpfende Suche zur Bestimmung bestehender FGK sowie, wenn kein bestehender FGK bestimmt werden konnte, der Ansatz von Brauner (2023) zur Erstellung von FGK verwendet. Somit besteht ein zweistufiger Ansatz zur Bestimmung von FGK.

5.2.3 Erforderliche Modifikationen der Ansätze

Als Methode für die Lösung von Verbindungskonflikten wurde die Erzeugung von KLA ausgewählt. Für die Erzeugung der KLA wird der Ansatz von Brauner (2023) verwendet. Für die Bestimmung der FGK wird ein zweigeteilter Ansatz bestehend aus einer erschöpfenden Suche und der Erstellung von FGK entsprechend dem Ansatz von Brauner (2023) verwendet.

Die Ansätze von Brauner (2023) zur Lösung von Verbindungskonflikten anhand individueller Lösungen und zur Erstellung von FGK sind für die Planung von SFP konzipiert worden. Soweit bekannt wurden diese bisher nicht für die Anpassung von Verkehrskonzepten während des Betriebs genutzt. Im Weiteren werden daher erforderliche Modifikationen der Ansätze für die Anwendung auf Teilproblem II bestimmt.

Für die Lösung von Verbindungskonflikten werden im Ansatz von Brauner (2023) die zwei Module „Verbindungskonflikterkennung“ und „Konfliktlösungsalternativensuche“ verwendet. Für beide Module wurde bereits in Kapitel 4.3.5 gezeigt, dass diese verwendet werden können.

Für die Erstellung von FGK wird im Ansatz von Brauner (2023) das Modul „Verkehrskonzepterstellung“ genutzt (siehe Kapitel 2.4.2). Inputs für das Modul sind (siehe Brauner 2023, S. 192 ff.):

- die Netzäste des S-Bahn-Netzes
- von Disponenten bestimmte Korridorendpunkte für die FGK
- das Betriebskonzept
- Lösungen der Verbindungskonflikte (KLA bzw. ungelöste Verbindungskonflikte)
- Grenzwerte für die Überlastung von Bahnsteigen und Fahrzeugen

Die Netzäste und Grenzwerte werden für die Planung des Verkehrskonzepts festgelegt und können aus der Planung des Verkehrskonzepts übernommen werden. Da es sich um eine

Adaption des SFP handelt, ist zu prüfen, ob die gewählten Korridorendpunkte weiterhin verfügbar und dafür geeignet sind, die Funktion der Korridorart zu erfüllen. Ist dies der Fall oder ist ein FGK aus anderen Gründen nicht umsetzbar oder erforderlich, ist zu prüfen, ob alternative Korridorendpunkte bestehen, die zur Bestimmung von FGK verwendet werden können.

Das für das Modul erforderliche Betriebskonzept liegt mit dem angepassten Betriebskonzept aus Modul 1 vor. Die Lösungen der Verbindungskonflikte liegen als Output des Moduls „Konfliktlösungsalternativensuche“ vor. Das Modul „Verkehrskonzepterstellung“ kann somit grundsätzlich verwendet werden.

Wie eben beschrieben, werden bei der Erstellung des Verkehrskonzepts die Korridorendpunkte der FGK manuell vorgegeben und die möglichen Fahrgastströme anhand dieser Vorgabe bestimmt (siehe Kapitel 2.4.2). Ggf. ist bei der Bestimmung eines FGK ein alternativer Korridorendpunkt zu bestimmen.

Entsprechend den Anforderungen ist ein manueller Input zu vermeiden. Daher sollte ein alternativer Korridorendpunkt möglichst nicht durch den Disponenten vorgegeben werden müssen. Als Modifikation ist deshalb zu prüfen, wie ein alternativer Korridorendpunkte bestimmt werden kann.

Werden FGK aus bestehenden SFP für die Bestimmung von FGK verwendet, stehen ggf. mehrere FGK zur Verfügung. Für die Bestimmung von FGK muss in diesem Fall eine Auswahl der möglichen FGK erfolgen. Als Modifikation ist deshalb zu bestimmen, wie aus einer Menge von möglichen FGK ein FGK ausgewählt werden kann.

Zusammenfassend wurden zwei Modifikationen für die Bestimmung von FGK identifiziert:

- die Bestimmung alternativer Korridorendpunkte
- die Auswahl von FGK

5.2.4 Vorgehensweise

Für die Entwicklung der Algorithmen zur Anpassung des Verkehrskonzepts wurde ein Ansatz zur Lösung für Verbindungskonflikte und ein zweistufiger Ansatz zur Bestimmung von FGK ausgewählt. Bevor auf den ausgewählten Ansätzen aufbauend die Entwicklung des Algorithmus von Modul 2 erfolgt, wird mit der Vorgehensweise der Aufbau des weiteren Kapitels 5 festgelegt.

In Kapitel 5.3 werden zunächst die in Kapitel 5.2.3 bestimmten erforderlichen Modifikationen für die Bestimmungen von FGK festgelegt. Da die Vorgabe von Korridorendpunkten für die Erstellung von FGK erforderlich ist, erfolgt zunächst die Festlegung der Modifikation zur Bestimmung alternativer Korridorendpunkte. Anschließend wird die Modifikation zur Auswahl von FGK diskutiert.

In Kapitel 5.4 wird Modul 2 beschrieben. Die Anpassung des Verkehrskonzepts basiert auf dem Ansatz von Brauner (2023) zur Lösung von Verbindungskonflikten und dem zweistufigen Ansatz zur Bestimmung von FGK mit den in Kapitel 5.3 bestimmten Modifikationen. Auch ist entsprechend der Systemarchitektur (siehe Kapitel 3.4) eine Rückkopplung ausgehend von Modul 2 zu Modul 1 zu prüfen.

5.3 Modifikationen der Ansätze zur Bestimmung von FGK

In Kapitel 5.2 wurde zur Bestimmung von FGK ein zweistufiger Ansatz ausgewählt. Entsprechend den Ergebnissen aus Kapitel 5.2.3 sind zwei Modifikationen für die Anwendung der Ansätze zu bestimmen:

1. die Bestimmung alternativer Korridorendpunkte
2. die Auswahl von FGK

Ziel dieses Kapitels ist die Bestimmung der Modifikationen. Grundlagen für die Auswahl der Modifikationen bilden die relevanten Anforderungen aus Kapitel 3.3. Die Modifikationen werden in Modul 2 angewendet (Kapitel 5.4).

5.3.1 Bestimmung alternativer Korridorendpunkte

Die ersten Modifikationen für die Anwendung der Methoden zur Bestimmung von FGK umfasst die Bestimmung alternativer Korridorendpunkte. Alternative Korridorendpunkte können entweder

- manuell durch die Disponenten vorgegeben oder
- automatisch bestimmt werden.

Da die FGK an den Korridorendpunkten ausgerichtet sind, sind diese zentral für das Verkehrskonzept (Brauner 2023, S. 184). Da keine eindeutigen Kriterien für die Auswahl der Korridorendpunkte bestehen (Brauner 2023, S. 183), werden in der weniger zeitkritischen Planung von Verkehrskonzepten die Korridorendpunkte manuell vorgegeben. Eine automatische Bestimmung von Korridorendpunkten kann somit nur auf den Korridorendpunkten der Verkehrskonzepte bestehender SFP beruhen. Für die bestehenden SFP wurden bereits Korridorendpunkte für verschiedene Szenarien vorgegeben und damit als wichtige Knoten definiert. Für die Korridorendpunkte aus bestehenden SFP kann daher geprüft werden, ob diese als alternative Korridorendpunkte geeignet sind.

Vorteile einer automatischen Vorgabe ist die Entsprechung der Anforderung nach Automatisierung und der Vermeidung manueller Inputs. Wenn bei der automatischen Bestimmung der Korridorendpunkte kein alternativer Korridorendpunkt identifiziert werden konnte oder die alternativen Korridorendpunkte zu einem unbefriedigenden Verkehrskonzept führen, kann weiterhin eine manuelle Vorgabe erfolgen.

Aufgrund der Anforderung nach Automatisierung und der Vermeidung manueller Inputs wird zur Bestimmung alternativerer Korridorendpunkte eine automatische Bestimmung ergänzt durch eine manuelle Vorgabe festgelegt.

5.3.2 Auswahl der FGK

Die zweiten Modifikationen für die Anwendung der Methoden zur Bestimmung von FGK umfasst die Auswahl von FGK.

Werden FGK aus bestehenden SFP für die Bestimmung von FGK verwendet, bestehen ggf. mehrere FGK, von denen ein FGK auszuwählen ist. Bei der Erstellung des Verkehrskonzepts hat Brauner (2023, S. 182 ff.) eine zweistufige Heuristik zur Auswahl der erzeugten FGK entwickelt (siehe Kapitel 2.4.2). In dieser erfolgt zunächst durch einen Greedy-Algorithmus anhand der geringsten durchschnittlichen Widerstandserhöhung eine erste Auswahl von FGK (siehe

Kapitel 2.4.2). Anschließend werden in der zweiten Stufe, wenn vorhanden, Engpässe aufgelöst (siehe Kapitel 2.4.2).

In der ersten Stufe erfolgt die Auswahl der FGK anhand der durchschnittlichen Widerstandsveränderung der dem Fahrgaststrom zugeordneten Verbindungskonflikten (siehe Brauner 2023, S. 195). Dazu wurde vorab jeder gelöste Verbindungskonflikt einem erzeugten Fahrgaststrom zugeordnet (siehe Brauner 2023, S. 194). Für Verbindungskonflikte können mehrere KLA bestehen, sodass diese zu verschiedenen Fahrgastströmen zugeordnet werden können.

Nach der Auswahl des Fahrgaststroms wird für Verbindungskonflikte, die nicht den ausgewählten Fahrgastströmen zugeordnet sind, geprüft, ob diese den FGK zugeordnet werden können (siehe Brauner 2023, S. 195). Den FGK sind somit im resultierenden Verkehrskonzept mehr Verbindungskonflikte zugeordnet als bei der Auswahl der Fahrgastströme. Die Auswahl der Fahrgastströme basiert somit nicht auf der tatsächlichen Widerstandserhöhung des Fahrgaststroms. Außerdem lässt die zweite Stufe zur Auflösung von Engpässen auf Grund der strikten Bedingung, dass keine Engpässe neu erzeugt werden dürfen, eine Verschlechterung der Lösung erwarten.

Bei einem Vorgehen zur Lösung des kombinatorischen Problems der Auswahl der FGK unter Berücksichtigung der resultierenden Widerstandserhöhung aller Verbindungskonflikte und möglicher Engpässe, wird eine bessere Lösung erwartet. Wird weiterhin eine Heuristik zur Lösung des Problems genutzt, sollte auch den Anforderungen nach schneller Lösungsbereitstellung weiterhin entsprochen werden können.

Die Anpassung des Verkehrskonzepts soll entsprechend den Anforderungen für Kunden und Disponenten nachvollziehbar sein. Die Nutzung einer anderen Methode für die Anpassung von Verkehrskonzepten als bei der Planung von Verkehrskonzepten steht dieser Anforderung entgegen. Daher wird der Ansatz von Brauner (2023) zur Auswahl der FGK übernommen. Durch den geforderten modularen Aufbau (siehe Anforderung in Kapitel 3.4) wird gleichzeitig sichergestellt, dass bei einer späteren Modifikation der Auswahl der FGK dieser sowohl in der Planung als auch für die Anpassung des Verkehrskonzepts übernommen werden kann.

5.3.3 Zusammenfassung

Ziel des Kapitels war die Auswahl der Modifikationen der Ansätze zur Bestimmung von FGK. Als Modifikation wurde für die Bestimmung alternativer Korridorendpunkte eine automatische Bestimmung der Korridorendpunkte ergänzt durch eine manuelle Vorgabe ausgewählt. Für die Auswahl der FGK wird der Ansatz von Brauner (2023) übernommen. Die in diesem Kapitel ausgewählten Modifikationen der Bestimmung von FGK werden in Modul 2 angewendet (Kapitel 5.4).

5.4 Beschreibung von Modul 2

In Kapitel 5.2 wurde als Methode für die Anpassung des Verkehrskonzepts (Teilproblem II) eine Erzeugung von KLA (durch den Ansatz von Brauner (2023)) zur Lösung von Verbindungskonflikten und ein zweistufiger Ansatz zur Bestimmung von FGK ausgewählt.

In Kapitel 5.3 wurden erforderliche Modifikationen der Ansätze zur Bestimmung von FGK festgelegt. In diesem Kapitel wird aufbauend auf den ausgewählten Methoden und den festgelegten Modifikationen Modul 2 beschrieben.

Dafür werden zunächst die erforderlichen Submodule für den Aufbau von Modul 2 sowie eine mögliche Rückkopplung zu Modul 1 festgelegt. Anschließend werden die einzelnen Submodule beschrieben. Kapitel 5.4 endet mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse.

5.4.1 Aufbau von Modul 2

Modul 2 umfasst die Prüfung, ob eine Anpassung des Verkehrskonzepts erforderlich ist und die Anpassung des Verkehrskonzepts.

Die erforderlichen Gründe für eine Anpassung des Verkehrskonzepts wurden in Kapitel 5.2.1 beschrieben (für eine Zusammenfassung siehe Tabelle 5-1). Zunächst ist zu bestimmen, in welcher Reihenfolge die Prüfung der Gründe für eine Anpassung durchgeführt wird.

Für die Prüfung und Bestimmung von FGK müssen die Verbindungskonflikte bekannt sein und ob diese individuell gelöst, durch ein FGK gelöst oder ungelöst sind (siehe Kapitel 2.4.2). Daher sind zunächst die Verbindungskonflikte und deren Lösungen zu prüfen (Modul 2.1). Dazu gehört auch die Prüfung der FGK des Verkehrskonzepts des ausgewählten SFP (Fall A1 in Tabelle 5-1). Anschließend sind ggf. die Lösungen der Verbindungskonflikte zu ersetzen (A und B). Außerdem sind neue und bisher nicht gelöste Verbindungskonflikte zu erkennen und zu lösen (E und F).

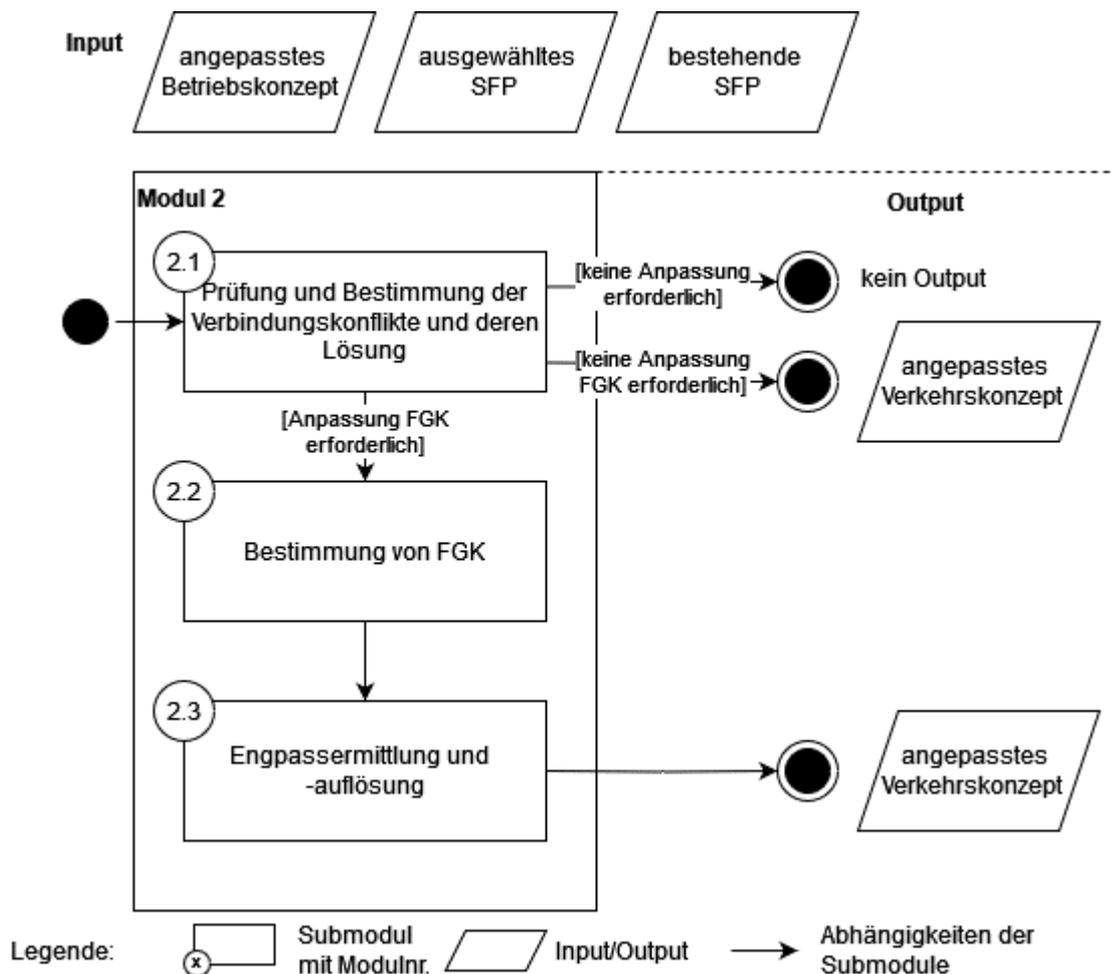


Abbildung 5-2: Aufbau von Modul 2

Anschließend können, falls erforderlich, neue FGK bestimmt werden (Modul 2.2). Dafür sind ggf. zunächst Korridorendpunkte zu bestimmen. Die Bestimmung der FGK erfolgt, wie in Kapitel 5.2.2 festgelegt, durch einen zweistufigen Ansatz. Im letzten Schritt werden Engpässe im (angepassten) Verkehrskonzept erkannt und aufgelöst (Modul 2.3).

Die erforderlichen Submodule von Modul 2 zur Anpassung des Verkehrskonzepts sind in Abbildung 5-2 dargestellt. Besteht für das angepasste Betriebskonzept kein Erfordernis, neue FGK zu bestimmen, endet Modul 2 nach Modul 2.1.

Da für den Ansatz von Brauner (2023) die Terminierung ggf. durch Input der Disponenten sichergestellt ist (Brauner 2023, S.190 ff.) und ansonsten eine erschöpfende Suche zum Einsatz kommt, muss die Terminierung des Moduls nicht gesondert sichergestellt werden.

Der Ansatz von Brauner bestimmt für jeden Verbindungskonflikt entweder eine Lösung oder der Verbindungskonflikt geht ungelöst in das Verkehrskonzept ein. Eine Rückkopplung von Modul 2 zu Modul 1 ist daher nicht erforderlich, um eine Lösung von Teilproblem II zu ermöglichen. Gleichzeitig ist eine Aussage über die Qualität des angepassten Verkehrskonzepts erst mit der kundenorientierten Bewertung in Modul 5 möglich. Daher erfolgt eine Rückkopplung zu Modul 1 erst nach der kundenorientierten Bewertung in Modul 5.

Im Weiteren werden die Module 2.1, 2.2 und 2.3 beschrieben. Dafür werden für jedes der drei Module die erforderlichen Submodule bestimmt und anschließend beschrieben.

5.4.2 Modul 2.1: Prüfung und Bestimmung der Verbindungskonflikte und deren Lösungen

Modul 2.1 dient der Prüfung der Verbindungskonflikte und deren Lösungen. Geprüft werden die in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Gründe für eine Anpassung ausgenommen der Prüfung der FGK auf Engpässe (siehe Kapitel 5.4.1). Den Aufbau von Modul 2.1 zeigt Abbildung 5-3.

Wie in Kapitel 5.4.1 beschrieben, erfolgt zunächst die Erkennung und Lösung von Verbindungskonflikten. Dies ist für alle Fälle aus Tabelle 5-1 erforderlich. Anschließend erfolgt die Prüfung der FGK, wobei die Prüfung der Routen der FGK unabhängig von den Verbindungskonflikten und dessen Lösungen ist.

Für die Prüfung von nicht mehr und bisher nicht vorhandener Verbindungskonflikte (Fall D und Fall F in Tabelle 5-1) sind die Verbindungskonflikte des angepassten Betriebskonzepts zu bestimmen und mit den Verbindungskonflikten des ausgewählten SFP zu vergleichen. Die Verbindungskonflikterkennung für die beiden Betriebskonzepte erfolgt in den Modulen 2.1.1 und 2.1.2. Weiterhin sind die FGK des Verkehrskonzepts des ausgewählten SFP zu prüfen (A1). Dies erfolgt in Modul 2.1.3.

Die Prüfung, ob eine Lösung eines Verbindungskonfliktes aus dem Verkehrskonzept des ausgewählten SFP auch im angepassten Betriebskonzept umsetzbar ist (A), erfolgt in Modul 2.1.4. Für die Lösung bisher nicht vorhandener (F) und nicht bzw. nicht mehr gelöster Verbindungskonflikte (A und E) sind individuelle Lösungen der Verbindungskonflikte für das angepasste Betriebskonzept zu bestimmen (Modul 2.1.5). Die Lösung der Verbindungskonflikte für das angepasste Betriebskonzept dient auch der Vorbereitung zur Bestimmung von Verbesserungen der Lösungen (B).

Um zu prüfen, ob Lösungen aus dem Verkehrskonzept des ausgewählten SFP ersetzt werden sollen (B), wird in Modul 2.1.6 für die Verbindungskonflikte, die im Verkehrskonzept des ausgewählten SFP bereits gelöst sind, geprüft, ob KLA mit einer höheren Hierarchieebene oder einer geringeren Widerstandsveränderung bei gleicher Hierarchieebene bestehen.

Da für alle Verbindungskonflikte des angepassten Betriebskonzepts nun eine Lösung besteht (außer der Verbindungskonflikt ist nicht lösbar), kann für die FGK, die ihre Funktion erfüllen, geprüft werden, ob weiterhin Lösungen von Verbindungskonflikten bestehen, die Teil des FGK sind. Dies erfolgt in Modul 2.1.7. In dem Modul ist außerdem abzuschätzen, ob für Netzäste, die im Verkehrskonzept des ausgewählten SFP weniger als 3 FGK aufweisen, neue FGK bestimmt werden sollen.

Nachdem bestimmt wurde, dass sieben Submodule für Modul 2.1 erforderlich sind, werden diese im Weiteren detaillierter beschrieben.

Modul 2.1.1 / 2.1.2: Bestimmung der Verbindungskonflikte des angepassten Betriebskonzepts / des ausgewählten SFP

Die Verbindungskonflikte des angepassten Betriebskonzepts und des ausgewählten SFP können mit dem Modul „Verbindungskonflikterkennung“ von Brauner (2023) bestimmt werden. Die Verbindungskonflikte des ausgewählten SFP können auch anhand der im Verkehrskonzept hinterlegten Lösungen bestimmt oder aus der Planung übernommen werden.

Falls durch Rückkopplungen Modul 2 erneut angewendet wird, können die Ergebnisse für Modul 2.1.2 aus der ersten Anwendung von Modul 2 verwendet werden, da sich die Verbindungskonflikte des ausgewählten SFP nicht ändern. Die Ergebnisse für Modul 2.1.1 können ebenfalls übernommen werden, solange keine Änderungen des Betriebskonzepts durch Modul 3 erfolgt ist.

Modul 2.1.3: Prüfung der FGK des ausgewählten SFP

In Modul 2.1.3 werden die FGK des Verkehrskonzepts des ausgewählten SFP geprüft (A1). Zunächst wird geprüft, ob die dem FGK zugrundeliegenden Routen verfügbar sind oder die Routen sich verändert haben. Die für den FGK kommunizierten Routen bzw. Verkehrsknoten müssen weiterhin vorhanden sein bzw. bedient werden. Die Prüfung der Verbindungen kann analog zum Ansatz von Brauner (2023) durch ein externes Modul erfolgen. Wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, kann eine Route nicht mehr vorhanden sein bzw. ein für den FGK kommunizierter Verkehrsknoten nicht mehr bedient werden. In diesem Fall ist der FGK nicht mehr umsetzbar und kann durch einen anderen FGK ersetzt werden.

Auch kann die Route eines FGK nicht mehr in der im Verkehrskonzept des ausgewählten SFP kommunizierten Form vorhanden sein, da sich z. B. Linien oder Verkehrsknoten für Umstiege geändert haben. In diesem Fall ist der FGK weiterhin umsetzbar, die Kommunikation für den FGK muss aber angepasst werden.

Außerdem wird geprüft, ob die durch die Korridorart zugewiesene Funktion eine FGK weiterhin erfüllt wird. Die Korridorart wird maßgeblich durch den Korridorendpunkt vorgegeben (siehe Kapitel 2.4.2). Daher erfolgt die Prüfung, ob die FGK die durch die Korridorart zugewiesene Funktion erfüllen, anhand einer Analyse des Korridorendpunktes.

Für die Prüfung, ob ein FGK die durch die Korridorart zugewiesene Funktion erfüllt, sind die drei Korridorarten zu unterscheiden (siehe Kapitel 2.4.2). Die Basis- und Qualitätsfunktion dient der Erschließung des Störbereichs. Da bei der Adaption des SFP das wesentliche Szenario und damit der Störbereich weiterhin besteht (siehe Kapitel 3.2), wird davon ausgegangen, dass der Korridorendpunkt für die Erschließung des Störbereichs weiterhin geeignet ist. Für die Basis- und Qualitätsfunktion ist daher nicht relevant, ob der Korridorendpunkt des FGK im angepassten Betriebskonzept bedient wird oder nicht. Wird der Korridorendpunkt eines FGK aber im angepassten Betriebskonzept durch den Netzast direkt bedient, ist der FGK obsolet. In diesem Fall kann ein anderer FGK bestimmt werden oder der FGK entfallen.

Ein FGK der Korridorart „Kapazitätsfunktion“ soll den Störbereich entlasten und eine andere Seite der Störung erschließen (siehe Kapitel 2.4.2). Wird der Korridorendpunkt von einem Netzast der anderen Seite der Störung nicht mehr bedient, erfüllt der FGK die Kapazitätsfunktion nicht mehr (bzw. entspricht die Bedingung des Korridorendpunkts nun der Basis- bzw. Qualitätsfunktion). Im Modul zur Bestimmung der FGK (Modul 2.2) ist somit ein alternativer Korridorendpunkt zu bestimmen. Liegt der Korridorendpunkt durch die Anpassung des Betriebskonzepts nicht mehr auf einer anderen Seite der Störung als der Netzast des FGK, ist der FGK obsolet. In diesem Fall kann ein anderer FGK bestimmt werden oder der FGK entfallen.

Modul 2.1.4: Prüfung der Umsetzbarkeit der Lösungen der Verbindungskonflikte des ausgewählten SFP

In Modul 2.1.4 erfolgt die Prüfung, ob die Lösung eines Verbindungskonfliktes aus dem Verkehrskonzept des ausgewählten SFP auch im angepassten Betriebskonzept umsetzbar ist (A2). Für Verbindungskonflikte, die im angepassten Betriebskonzept nicht mehr vorhanden sind (D), ist diese Prüfung nicht erforderlich.

Die Lösung eines Verbindungskonfliktes besteht aus einem Start- und Endpunkt sowie einer Verbindung zwischen Start- und Endpunkt mit max. zwei Umstiegen (Brauner 2023, S. 174 ff.). Die Lösung eines Verbindungskonfliktes ist daher nicht umsetzbar, wenn der Startpunkt im angepassten Betriebskonzept nicht bedient wird oder wenn ein Teil der Verbindung der Lösung nicht angeboten wird.

Modul 2.1.5: Bestimmung der Verbindungskonfliktlösungen im angepassten Betriebskonzept

Aufbauend auf den in Modul 2.1.1 erkannten Verbindungskonflikten, können die Lösungen der Verbindungskonflikte für das angepasste Betriebskonzept bestimmt werden. Dafür sind zunächst für die Verbindungskonflikte des angepassten Betriebskonzepts individuelle Lösungen zu bestimmen. Dies erfolgt durch das Modul „Konfliktlösungsalternativensuche“ von Brauner (2023).

Für Verbindungskonflikte des angepassten Betriebskonzepts, die im ausgewählten SFP keine Lösung haben (da ungelöst (E) oder nicht vorhanden (F)) oder deren Lösung nicht mehr umsetzbar ist (A), stehen nur die in diesem Modul bestimmten Lösungen zur Verfügung. Für die übrigen Verbindungskonflikte (B und C) bietet das Verkehrskonzept des ausgewählten SFP weiterhin eine Lösung an und es ist zu bestimmen, ob eine Ersetzung der Lösung stattfinden soll (B).

Modul 2.1.6: Vergleich und ggf. Ersetzung von Verbindungskonfliktlösungen

In Modul 2.1.6 wird für die Verbindungskonflikte, deren Lösung aus dem ausgewählten SFP weiterhin umsetzbar ist, geprüft, ob die Lösung beibehalten werden soll (B). Eine Ersetzung der Lösung kann erfolgen, wenn durch das angepasste Betriebskonzept KLA eine Lösung mit einer höheren Hierarchieebene oder einer geringeren Widerstandsveränderung bei gleicher Hierarchieebene besteht. Die KLA der Verbindungskonflikte für das angepasste Betriebskonzept sind dafür mit den Lösungen des Verkehrskonzepts des ausgewählten SFP zu vergleichen. Bei der Ersetzung von Lösungen von Verbindungskonflikten, die bereits im Verkehrskonzept des ausgewählten SFP gelöst sind, ist zu unterscheiden, ob eine Lösung ersetzt wird, die individuell oder Teil eines FGK ist (siehe Kapitel 5.2.1).

Ein FGK soll, anders als eine individuelle Lösung, möglichst beibehalten werden (siehe Kapitel 5.2.1) und ein FGK stellt nicht immer die beste Lösung für jeden durch den FGK gelösten

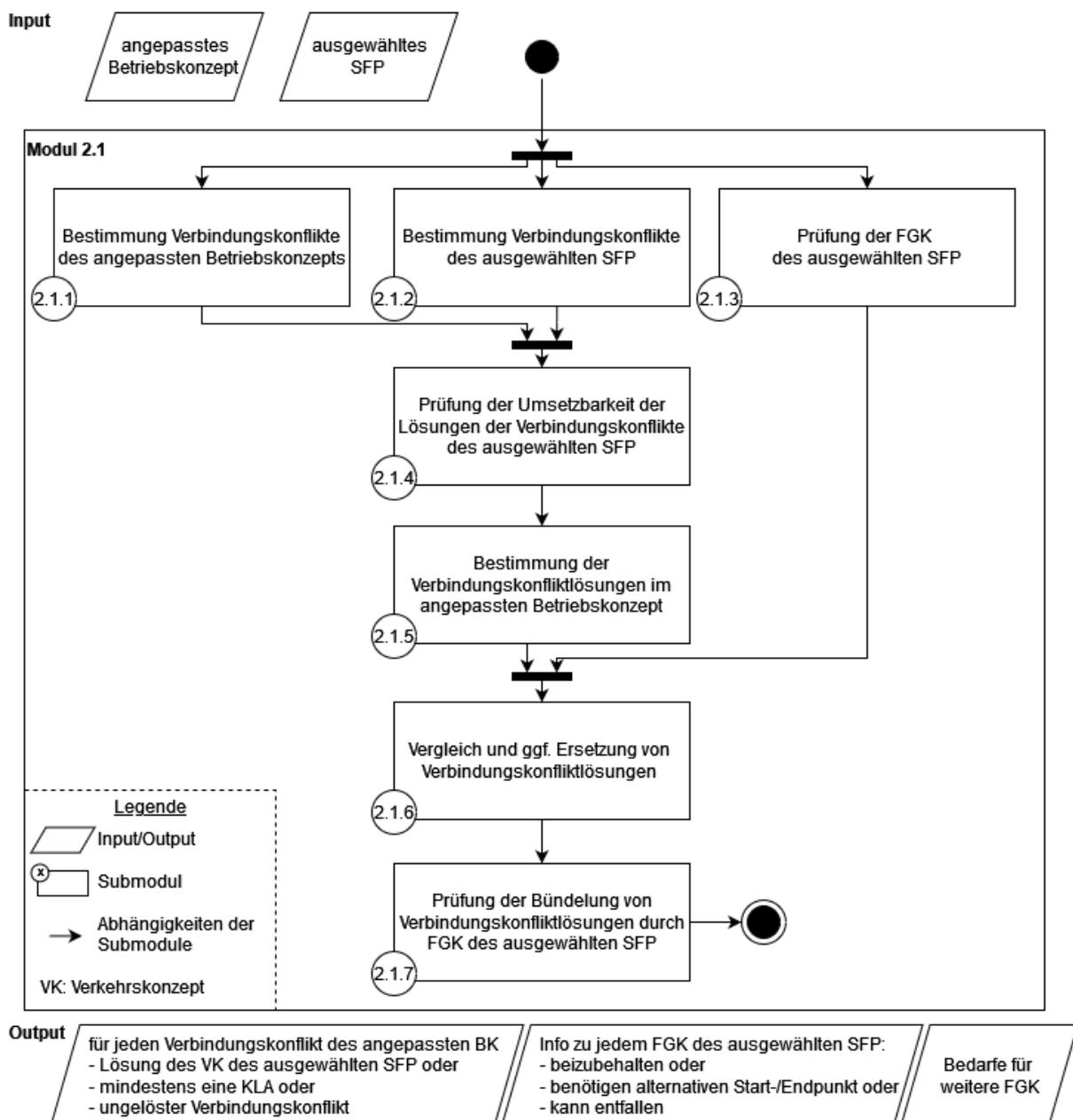


Abbildung 5-3: Aufbau von Modul 2.1

Verbindungskonflikt dar (siehe Kapitel 2.4.2). Deshalb wird eine Lösung eines Verbindungskonflikts der gleichen Hierarchieebene mit einer geringeren Widerstandsveränderung nicht verwendet, wenn dadurch die Lösung des Verbindungskonflikts nicht mehr Teil eines FGK ist. Diese Bedingung stellt sicher, dass eine Ersetzung bei gleicher Hierarchieebene nur in den Fällen B1.1, B2.1 und B2.2 erfolgt. Für Verbindungskonflikte, deren Lösung Teil eines weiterhin funktionserfüllenden FGK ist, wird demzufolge nur geprüft, ob KLA einer höheren Hierarchieebene vorhanden sind (B1.2). Ist dies nicht der Fall, wird die Lösung beibehalten.

Modul 2.1.7: Prüfung der Bündelung von Verbindungskonfliktlösungen durch FGK des ausgewählten SFP

Da für alle Verbindungskonflikte des angepassten Betriebskonzepts nun eine Lösung besteht (außer der Verbindungskonflikt ist nicht lösbar), kann für die FGK, die ihre Funktion erfüllen, geprüft werden, ob weiterhin Lösungen von Verbindungskonflikten bestehen, die Teil des FGK sind. Dafür werden die Verbindungskonflikte den FGK zugeordnet (siehe Brauner 2023, S. 194). Sind einem FGK keine Lösungen aus dem Verkehrskonzept des ausgewählten SFP mehr zugeordnet, die dieser bündelt, ist der FGK nicht mehr auf Grund der Anforderung „Zuverlässigkeit“ (siehe Kapitel 3.3) aufrechtzuerhalten. In diesem Fall ist der FGK obsolet und es kann in Modul 2.2 ein neuer FGK bestimmt werden.

Auch wird geprüft, ob für Netzäste, die im Verkehrskonzept des ausgewählten SFP weniger als drei FGK aufweisen, neue FGK bestimmt werden sollen. Durch die Anpassung des Betriebskonzepts kann für einen Netzast (weiterer) Bedarf nach einem FGK bestehen. Daher ist für jeden Netzast, bei dem mehr oder veränderte Verbindungskonflikte im Vergleich zum ausgewählten SFP bestehen, zu prüfen, ob (weitere) FGK bestimmt werden können. Für die Bestimmung ist zunächst ein Korridorendpunkt festzulegen. Bestehen bereits FGK für einen Netzast, sind zunächst FGK einer anderen Korridorart zu bestimmen.

Als Output von Modul 2.1 ist jedem Verbindungskonflikt des angepassten Verkehrskonzepts entweder

- die Lösung des Verkehrskonzepts des ausgewählten SFP zugeordnet oder
- es besteht mindestens eine individuelle KLA oder
- es handelt sich um einen ungelösten Verbindungskonflikt.

Außerdem ist für jeden FGK des Verkehrskonzepts des ausgewählten SFP bekannt, ob dieser

- weiterhin die durch die Korridorart zugewiesene Funktion erfüllt,
- einen alternativen Korridorendpunkt benötigt oder
- entfallen kann und dafür ein anderer FGK bestimmt werden kann.

Auch kann Bedarf für weitere FGK bestehen.

5.4.3 Modul 2.2: Bestimmung von FGK

Modul 2.2 dient der Bestimmung von FGK, sodass nicht-umsetzbare oder obsoletere FGK aus Modul 2.1 (zu ersetzende FGK) ersetzt werden können. Bei Bedarf können auch neue FGK bestimmt werden.

Die Bestimmung von FGK basiert auf vorgegebenen Korridorendpunkten (siehe Kapitel 2.4.2). Wurde in Modul 2.1.3 bestimmt, dass der Korridorendpunkt eines FGK nicht mehr geeignet ist

oder ist noch kein Korridorendpunkt bekannt, erfolgt in Modul 2.2.1 eine Bestimmung alternativer Korridorendpunkte. Die Prüfung der Route des FGK in Modul 2.1.3 kann auch ergeben, dass der Startpunkt des FGK nicht mehr bedient wird. Daher werden in Modul 2.2.2, falls erforderlich, alternative Startpunkte bestimmt. Ein Startpunkt ist auch für neue FGK erforderlich.

Anschließend kann die eigentliche Bestimmung der FGK erfolgen. In Kapitel 5.2.2 wurde dafür ein zweistufiger Ansatz festgelegt. Zunächst sollen FGK aus bestehenden SFP bestimmt werden. Dies erfolgt in Modul 2.2.3. Wenn kein FGK bestimmt werden konnte, werden durch den Ansatz von Brauner (2023) in Modul 2.2.4 Fahrgastströme erzeugt. Wurde für die Ersetzung eines nicht umsetzbaren oder obsoleten FGK mehr als ein FGK in Modul 2.2.3 oder mehr als ein Fahrgaststrom in Modul 2.2.4 bestimmt, wird ein FGK in Modul 2.2.5 ausgewählt.

Ergebnis von Modul 2.2 ist ein angepasstes Verkehrskonzept, das ggf. Engpässe enthält. Der Aufbau von Modul 2.2 ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

Modul 2.2.1: Bestimmung Korridorendpunkte

Wie in Kapitel 5.3.1 festgelegt, sollen die (alternativen) Korridorendpunkte automatisiert bestimmt werden. Da Korridorendpunkte eng mit der Korridorart verknüpft sind, wird bei der Bestimmung der Korridorendpunkte zwischen den drei Korridorarten unterschieden.

Für FGK der Basis- bzw. Qualitätsfunktion muss der Korridorendpunkt ein durch den Netzzast nicht bedienter Knoten im Störbereich sein. Für FGK der Kapazitätsfunktion muss der Korridorendpunkt in einem Netzzast einer anderen Seite der Störung liegen, und zwar möglichst in einem Netzzast, in dem auch der zu ersetzende Endknoten lag. Für alle drei Korridorarten gilt, dass ein möglicher Korridorendpunkt in einem Verkehrskonzept eines bestehenden SFP bereits Endknoten eines FGK der jeweiligen Korridorart gewesen sein sollte (siehe Kapitel 5.3.1).

Da es bei jeder Störung einen Störbereich gibt, kann für die Basis- und Qualitätsfunktion stets ein alternativer Endknoten gefunden werden. Für die Kapazitätsfunktion könnte es sein, dass es kein Angebot auf der anderen Seite der Störung gibt. Dieser Fall wird als unwahrscheinlich angenommen. Sollte er dennoch auftreten, wird auf eine manuelle Vorgabe eines Korridorendpunktes (z. B. ein Knoten mit vielen Fahrgast(zwischen)zielen, wie z. B. ein Bahnhof mit vielen Anschlussmöglichkeiten oder ein Flughafen), durch die Disponenten zurückgegriffen.

Wenn mehr als ein möglicher Korridorendpunkt identifiziert wird, dann wird der Korridorendpunkt für die Basis- und Qualitätsfunktion anhand der verkehrlichen Bedeutung ausgewählt, beispielsweise anhand der Fahrgäste pro Tag. Aufgrund der vielen Einflussgrößen zur Auswahl der Korridorendpunkte, sollte eine manuelle Bestätigung bzw. Auswahl durch die Disponenten integriert werden.

Für die Kapazitätsfunktion ist die Möglichkeit zur Verbindung der Seiten der Störung entscheidend. Dies wird in dem Ansatz von Brauner (2023) bei der Bestimmung der Startpunkte der Fahrgastströme berücksichtigt. Dieser Ansatz wird daher für die Bestimmung eines Endknotens der Kapazitätsfunktion übernommen. Auch hier sollte manuelle Bestätigung bzw. Auswahl durch die Disponenten integriert werden.

Bei einer Einbeziehung der Disponenten ist es durch die Vorgabe des Korridorendpunkts möglich, dass eine andere Korridorart angewendet wird und somit für einen Netzast nicht mehr alle drei Korridorarten bestehen.

Modul 2.2.2: Bestimmung alternativer Startpunkte

Bevor FGK bestimmt werden können, sind für FGK, deren Startpunkte von dem Netzast des FGK im angepassten Betriebskonzept nicht bedient werden, alternative Startpunkte zu bestimmen. Auch für neu zu bestimmende FGK besteht kein Startpunkt.

Für die Bestimmung von Startpunkten besteht ein Ansatz von Brauner (2023) im Modul „Verkehrskonzepterstellung“, der in der Ermittlung von Fahrgastströmen genutzt wird. Entsprechend der Anforderung nach Kontinuität wird dieser Ansatz auch für die Bestimmung der Startpunkte bei der Anpassung des Verkehrskonzepts genutzt. Ein FGK kann somit auch mehrere alternative Startpunkte haben.

Modul 2.2.3: Bestimmung FGK aus bestehenden SFP

Nach der Bestimmung der Startpunkte besteht für jeden zu ersetzenden FGK mindestens ein (alternativer) Startpunkt und ein (alternativer) Korridorendpunkt. Damit kann die Bestimmung von FGK aus bestehenden SFP erfolgen.

Bei der Bestimmung von FGK aus bestehenden SFP sind aus den bestehenden SFP alle FGK zu bestimmen, die den gleichen Start- und Korridorendpunkt aufweisen und entsprechend Modul 2.1.3 umsetzbar sind. Ist die Suche nicht erfolgreich, können auch andere Startpunkte für die Suche zugelassen werden. Da die Korridorendpunkte maßgebend für die Korridorart sind, sollten diese nicht verändert werden. Somit sind alle FGK im Verkehrskonzept bestehender SFP zu bestimmen, die den gleichen Korridorendpunkt aufweisen. Der Startpunkt muss im gleichen Netzast wie der eigentlich vorgesehene Startpunkt liegen und im angepassten Betriebskonzept bedient werden.

Modul 2.2.4: Ermittlung von Fahrgastströmen

Für jeden zu ersetzenden FGK, in dem in Modul 2.2.3 kein alternativer FGK gefunden wurde, wird der Ansatz von Brauner (2023) zur Ermittlung von Fahrgastströmen verwendet. Die Ermittlung der Fahrgastströme erfolgt durch das Modul „Verkehrskonzepterstellung“ von Brauner (2023) aufbauend auf den in Modul 2.1 ermittelten und gelösten Verbindungskonflikten.

Die Ermittlung von Fahrgastströmen sollte, wenn möglich, mit dem Startpunkt aus dem ausgewählten SFP durchgeführt werden. Entsprechend Kapitel 5.2.2 sind für die Ermittlung der Fahrgastströme zunächst Abschnitte aus FGK bestehenden SFP, die den gleichen Korridorendpunkt haben, zu verwenden. Dafür ist für die Ermittlung von Fahrgastströmen von Brauner (2023) von den Anschlusspunkten der FGK zu starten.

Können keine Fahrgastströme ermittelt werden, kann eine weitere Ermittlung von Fahrgastströmen mit Ermittlung aller möglicher Startpunkte durchgeführt werden. Weiterhin kann zur Ermittlung weiterer Fahrgastströme die Vorgaben zur Nutzung von Abschnitten aus FGK bestehender SFP ausgesetzt werden.

Nach Abschluss von Modul 2.2.4 bestehen für jeden zu ersetzenden FGK entweder

- ein oder mehrere alternative FGK (aus Modul 2.2.3) oder
- ein oder mehrere Fahrgastströme (aus Modul 2.2.4).

Da S-Bahn-Systeme i.d.R. in Gebieten mit dichtem ÖPNV-Netz liegen, wird die Wahrscheinlichkeit, dass kein Fahrgaststrom ermittelt werden kann, als gering eingeschätzt. Sollte der Fall dennoch auftreten, kann durch Modul 2.2.1 ein alternativer Korridorendpunkt bestimmt werden. Andernfalls entfällt der FGK für den Netzzast.

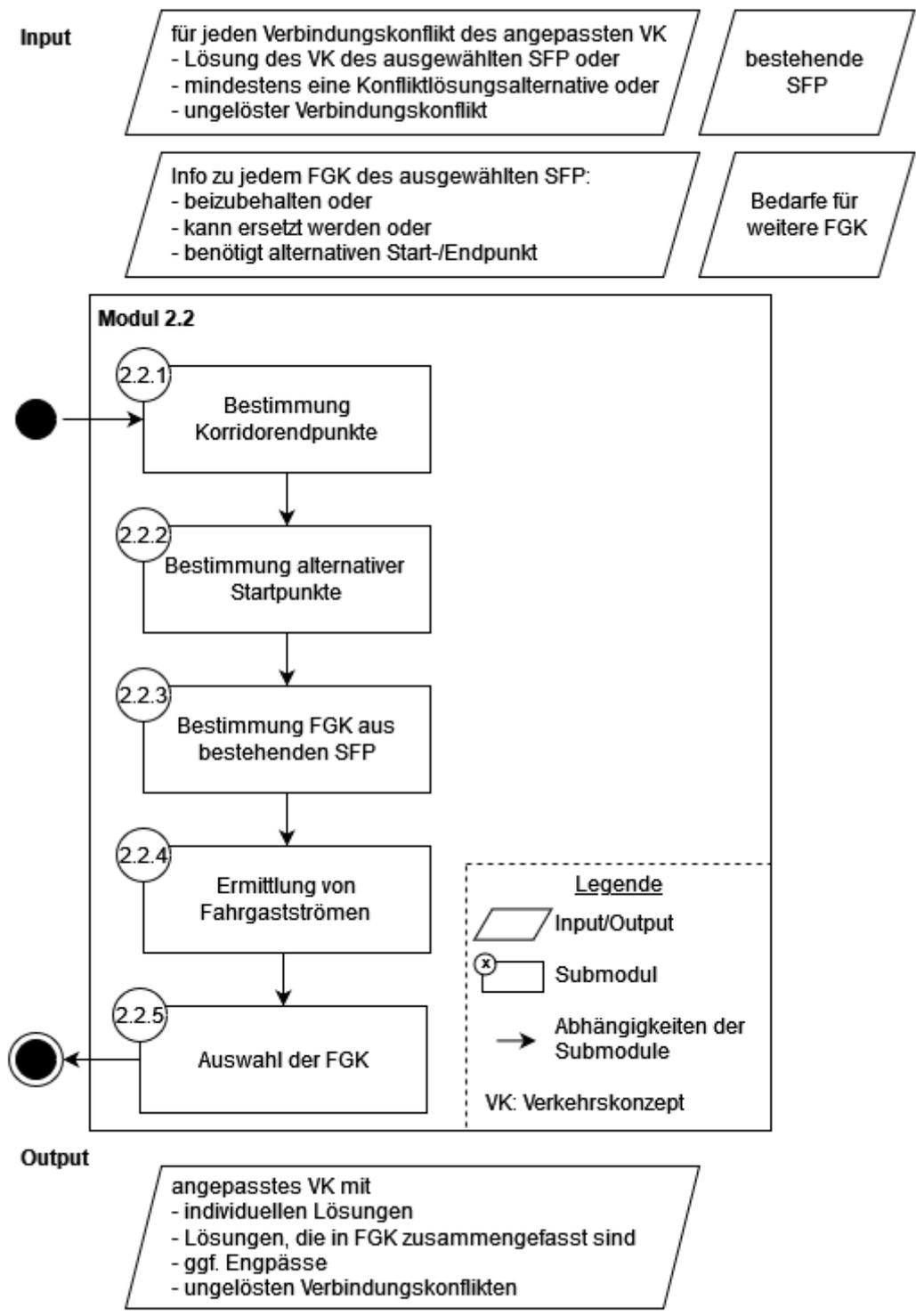


Abbildung 5-4: Aufbau von Modul 2.2

Modul 2.2.5: Auswahl der FGK

Wurden mehrere alternative FGK oder mehrere Fahrgastströme (jeder Fahrgaststrom kann ein FGK sein (siehe Kapitel 2.4.2)) bestimmt, ist ein FGK auszuwählen. Nach Kapitel 5.2.3 ist dafür der Ansatz zur Auswahl der FGK von Brauner (2023) aus dem Modul „Verkehrskonzepterstellung“ zu nutzen. Zur Auswahl ist eine Bewertung der FGK anhand der durch die FGK hervorgerufene durchschnittliche Widerstandsveränderung der FGK vorzunehmen. Dafür sind die Verbindungskonflikte den FGK bzw. Fahrgastströmen zuzuordnen (siehe Brauner 2023, S. 194).

Da in Kapitel 2.1.7 der Bedarf für FGK nur abgeschätzt wurde, kann es vorkommen, dass einem FGK bzw. Fahrgaststrom keine Verbindungskonflikte zugewiesen werden. In diesem Fall wird der FGK nicht verwendet. Eine Zuordnung der Verbindungskonflikte ist somit auch für die FGK vorzunehmen, für die in Modul 2.1.7 Bedarf erkannt wurde.

Als Ergebnis von Modul 2.2 besteht für jeden zu ersetzenden FGK ein alternativer FGK. Die alternativen FGK werden statt dem zu ersetzenden FGK in das Verkehrskonzept aufgenommen. Die individuellen Lösungen sowie die nicht gelösten Verbindungskonflikte aus Modul 2.2 komplementieren das angepasste Verkehrskonzept.

5.4.4 Modul 2.3: Engpassermittlung und -auflösung

Modul 2.3 dient der Engpassermittlung und -auflösung. Für die Engpassermittlung und -auflösung kommt das entsprechende Modul von Brauner 2023 zum Einsatz. Modul 2.3 ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

Für die Lösung der Engpässe werden alternative Fahrgastströme für einen FGK benötigt. Wurden diese nicht im Zuge der Ersetzung eines FGK in Modul 2.2.4 bestimmt, ist eine Ermittlung alternativer Fahrgastströme erforderlich. Dabei kann die Reihenfolge der Ermittlung von FGK/Fahrgastströmen analog zu Modul 2.2 erfolgen und auf dessen Funktionen zurückgegriffen werden.

Zunächst wird eine Bestimmung von FGK aus bestehenden SFP (Modul 2.2.3) mit gleichem Startpunkt durchgeführt. Ist die Suche nicht erfolgreich, können auch andere Startpunkte zugelassen werden. Können auch mit anderen Startpunkten keine FGK aus bestehenden SFP ermittelt werden oder ist die Engpassauflösung nicht erfolgreich, kann eine Ermittlung von Fahrgastströmen mit einem gegebenen Startpunkt durchgeführt werden (Modul 2.2.4). Als weitere Möglichkeit kann eine Ermittlung von Fahrgastströmen mit Ermittlung aller möglicher Startpunkte oder ohne die Vorgaben zur Nutzung von Abschnitten aus FGK bestehender SFP durchgeführt werden.

In der Engpassauflösung von Brauner (2023, S. 195) ist vorgesehen, dass der FGK mit der größten Anzahl an Fahrgästen geändert wird. Entsprechend der Anforderung nach Zuverlässigkeit sollten aber zunächst die FGK geändert werden, die im ausgewählten SFP nicht enthalten sind.

Wie von Brauner (2023, S. 191) beschrieben, kann es vorkommen, dass eine Auflösung aller Engpässe nicht erreicht wird. In diesem Fall sind die Disponenten zu informieren und ggf. weitere Maßnahmen, wie beispielweise Fahrgastlenker, einzusetzen (Brauner 2023, S. 191).

Ergebnis von Modul 2.3 sind die FGK ohne Engpässe, die zusammen mit den individuellen Lösungen und den nicht gelösten Verbindungskonflikten das angepasste Verkehrskonzept bilden.

5.4.5 Zusammenfassung

Ziel des Kapitels war die Beschreibung der Anpassung des Verkehrskonzepts in Modul 2. Modul 2 besteht aus drei Submodulen (siehe auch Abbildung 5-2).

In Modul 2.1 erfolgt die Prüfung der Verbindungskonflikte und deren Lösung. Dazu werden die Verbindungskonflikte des angepassten Betriebskonzepts bestimmt und gelöst. Für das ausgewählte SFP werden die Lösungen der Verbindungskonflikte auf Umsetzbarkeit und die FGK zusätzlich auf Erfüllung der durch die Korridorart zugewiesenen Funktion geprüft. Anschließend wird entschieden, welche Verbindungskonflikte weiterhin wie im Verkehrskonzept des ausgewählten SFP gelöst werden und welche Verbindungskonflikte eine alternative Lösung erhalten. Für die Verbindungskonflikterkennung und -lösung werden Module aus dem Ansatz von Brauner (2023) verwendet.

Nicht umsetzbare FGK, FGK, die ihre Funktion nicht mehr erfüllen oder FGK, die keine Verbindungskonfliktlösungen mehr bündeln, werden im Modul 2.2 ersetzt. Außerdem werden bei Bedarf neue FGK bestimmt. Zur Bestimmung der FGK erfolgt, falls erforderlich, eine Bestimmung eines (alternativen) Korridorendpunktes und/oder eines (alternativen) Startpunkts. Die Bestimmung der FGK basiert auf dem zweistufigen Ansatz. Stehen verschiedene FGK oder Fahrgastströme zur Verfügung, erfolgt die Auswahl eines FGK.

Das letzte Modul dient der Engpassermittlung und -auflösung (Modul 2.3). Die Engpassermittlung und -auflösung entspricht den Modulen zur Engpassermittlung und -auflösung von Brauner (2023).

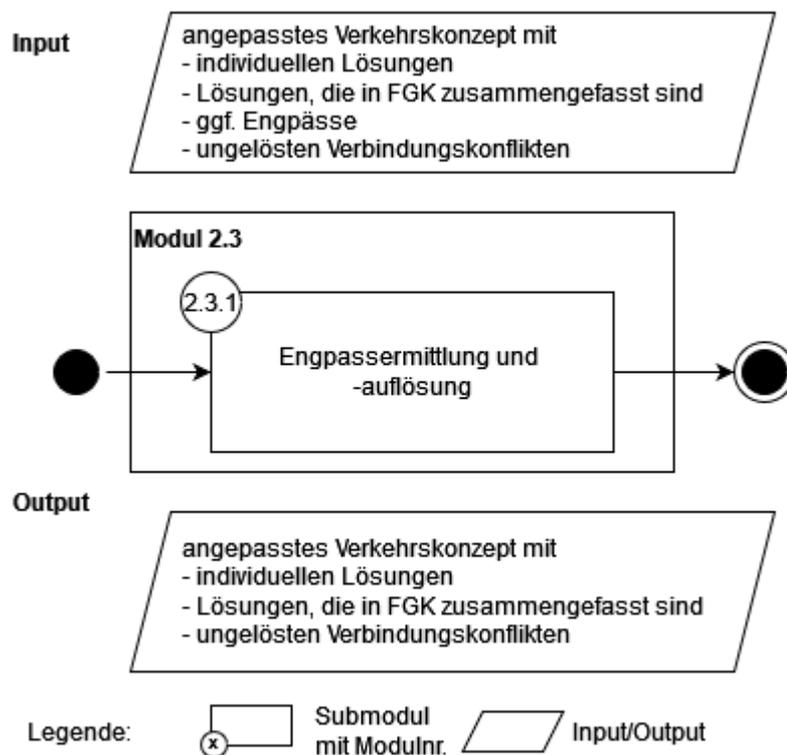


Abbildung 5-5: Aufbau von Modul 2.3

Ergebnis von Modul 2 ist das (angepasste) Verkehrskonzept mit FGK, individuellen Lösungen und ggf. nicht gelösten Verbindungskonflikten.

5.5 Zusammenfassung von Kapitel 5 und Diskussion

Ziel von Kapitel 5 war die Lösung von Teilproblem II durch die Entwicklung von Algorithmen zur Anpassung des Verkehrskonzepts. Die entwickelten Algorithmen bilden Modul 2 der Systemarchitektur.

Anhand der Auswirkungen der Anpassung des Betriebskonzepts auf das Verkehrskonzept wurde bestimmt, dass für die Lösung von Teilproblem II eine Lösung von Verbindungskonflikten und eine Bestimmung von FGK erforderlich ist. Als Methode zur Lösung von Verbindungskonflikten wurde die Erzeugung von KLA ausgewählt. Die Erzeugung von KLA erfolgt durch den Ansatz von Brauner (2023). Für die Bestimmung von FGK wurde ein zweistufiger Ansatz ausgewählt, der zunächst die Bestimmung von FGK aus bestehenden SFP und ggf. anschließend die Erzeugung und Auswahl von Fahrgastströmen vorsieht.

Für die Ansätze zur Bestimmung von FGK waren zwei Modifikationen erforderlich. So wurde eine automatische Bestimmung der Korridorendpunkte – ggf. bestätigt oder ergänzt durch eine manuelle Eingabe – ausgewählt. Ist eine Auswahl der FGK erforderlich, erfolgt dies wie bei der Planung von SFP durch den Ansatz von Brauner (2023) zur Auswahl von FGK.

Die Ansätze und deren Modifikationen wurden in drei Submodule umgesetzt, die zusammen Modul 2 bilden (Abbildung 5-2). In Modul 2.1 erfolgt zunächst die Prüfung der Verbindungskonflikte und deren Lösung. Dabei werden auch die FGK des ausgewählten SFP auf Umsetzbarkeit und Erfüllung der durch die Korridorart zugewiesenen Funktion geprüft. Sind FGK im ausgewählten SFP im angepassten Betriebskonzept nicht umsetzbar, obsolet oder sollen neue FGK bestimmt werden, erfolgt eine Bestimmung alternativer FGK in Modul 2.2. Das letzte Modul (Modul 2.3) dient der Engpassermittlung und -auflösung. Output von Modul 2 ist das angepasste Verkehrskonzept.

Durch eine Weiterentwicklung des Ansatzes könnte die Automatisierung der Auswahl der Korridorendpunkte und die Auswahl der FGK verbessert werden. Für die Auswahl der Korridorendpunkte könnten bei der Planung, unabhängig von den verschiedenen Störungen, Korridorendpunkte vorgegeben werden. Die Auswahl der FGK sollte mit der Engpasserkennung und -auflösung verknüpft sowie die Berücksichtigung der tatsächlich resultierenden Widerstandserhöhung angestrebt werden. Werden für die Auswahl der Korridorendpunkte und FGK (aktuelle) verkehrliche Einflussgrößen (z. B. Tageszeit, große Veranstaltungen wie Messen oder Sportereignisse) einbezogen, könnten die Passungen der FGK zu den verkehrlichen Erfordernissen der Fahrgäste weiter verbessert werden.

Nachdem das Verkehrskonzept angepasst wurde, erfolgt als nächster Schritt der Adaption eine kundenorientierte Bewertung.

6 Kundenorientierte Bewertung des SFP

6.1 Einleitung

Neben den vier Teilproblemen umfasst die Adaption des SFP eine kundenorientierte Bewertung des SFP (siehe Kapitel 3.4). Durch die Anpassung des Betriebskonzepts (Teilproblem I) und die ggf. folgende Anpassung des Verkehrskonzepts (Teilproblem II) ist nicht sichergestellt, dass das adaptierte SFP weiterhin den kundenorientierten Anforderungen (siehe Kapitel 3.3) an ein SFP entspricht. Daher erfolgt eine kundenorientierte Bewertung des adaptierten SFP, die in Modul 5 durchgeführt wird.

Eine erste kundenorientierte Bewertung findet nach Modul 2 statt, um zu prüfen, ob durch die Anpassung von Betriebskonzept und ggf. Verkehrskonzept die kundenorientierten Anforderungen weiterhin erfüllt sind (siehe Kapitel 3.4). Eine vollständige kundenorientierte Bewertung des SFP inklusive Einschwingphase und stabiler Phase ist erst nach Lösung von Teilproblem IV möglich. Daher findet eine zweite kundenorientierte Bewertung nach der Lösung von Teilproblem IV statt (siehe Kapitel 3.4).

Ziel des Kapitels ist die Entwicklung eines Algorithmus zur kundenorientierten Bewertung des adaptierten SFP nach Teilproblem II (Modul 2) und nach Teilproblem IV (Modul 4). Gemäß Kapitel 3.4 entspricht dies der Entwicklung von Modul 5 der Systemarchitektur.

Der Input von Modul 5 besteht, wenn es nach Modul 2 aufgerufen wird, aus dem adaptierten SFP mit angepasstem Betriebskonzept aus Modul 1 und ggf. angepasstem Verkehrskonzept aus Modul 2. Wird Modul 5 nach Modul 4 aufgerufen, besteht zusätzlich ein Fahrplankonzept der stabilen Phase aus Modul 3 und der Fahrplan der Einschwingphase aus Modul 4.

In Modul 5 erfolgt die kundenorientierte Bewertung des adaptierten SFP. Für die kundenorientierte Bewertung relevante Anforderungen wurden in Kapitel 3.3 bestimmt. So ist in der kundenorientierten Bewertung zu prüfen, ob die verkehrlichen Anforderungen an ein SFP (Anforderungen 1.C in Tabelle 3-1) eingehalten werden. Für die Durchführung der Bewertung sind die Anforderungen aus Tabelle 3-2 zu berücksichtigen. Aus den Anforderungen der Wiederverwendbarkeit (Anforderung an die Systemarchitektur; siehe Tabelle 3-3) und der Nachvollziehbarkeit der Adaption (Anforderung an die Durchführung der Adaption; siehe Tabelle 3-2) folgt, dass möglichst einheitliche Bewertungsverfahren für die Bewertung nach Modul 1 und nach Modul 5 bestehen sollen.

Die kundenorientierte Bewertung des (adaptierten) SFP kann zu zwei möglichen Ergebnissen führen:

- 1) Das adaptierte SFP hat die Anforderungen an ein kundenorientiertes SFP erfüllt
- 2) Das adaptierte SFP hat die Anforderungen an ein kundenorientiertes SFP nicht erfüllt

Werden die Anforderungen nicht erfüllt (Fall 2), erfolgt eine Rückkopplung zu Modul 1 oder Modul 2 (siehe Kapitel 3.4). Eine Rückkopplung erfolgt, in dem in Modul 1 bzw. Modul 2 weitere Bedingungen eingeführt werden, mit dem Ziel eine Lösung zu erhalten, die bei einer erneuten Bewertung durch Modul 5 ohne erneute Iteration die Anforderungen an ein kundenorientiertes SFP erfüllt. Werden die Anforderungen an ein kundenorientiertes SFP von dem adaptierten SFP erfüllt, ist die Adaption des SFP abgeschlossen.

Der Aufbau von Kapitel 6 folgt dem grundsätzlichen Aufbau der Hauptkapitel gemäß Kapitel 3.5. Zunächst wird in Kapitel 6.2 eine Methode zur kundenorientierten Bewertung von SFP ausgewählt sowie erforderliche Modifikationen der Methode bestimmt. Dafür erfolgt zunächst eine Diskussion von Methoden zur kundenorientierten Bewertung von SFP und die Auswahl einer Methode. Die ausgewählte Methode bildet die Grundlage für Modul 5. Aufbauend auf der gewählten Methode und den Anforderungen zur verkehrlichen Bewertung wird der Algorithmus des Moduls in Kapitel 6.3 entwickelt.

Anschließend erfolgt in Kapitel 6.4 die Beschreibung von Modul 5, basierend auf der ausgewählten Methode und dem entwickelten Algorithmus. Abschließend werden in Kapitel 6.5 die Ergebnisse von Kapitel 6 zusammengefasst und diskutiert.

6.2 Methoden zur kundenorientierten Bewertung des SFP

Ziel dieses Kapitels ist es, die Methode zur kundenorientierten Bewertung des SFP auszuwählen. In Kapitel 6.2.1 werden dafür mögliche Methoden anhand der relevanten Anforderungen aus Kapitel 3.3 (in Kapitel 3.4 wurden die Anforderungen aus Kapitel 3.3 bestimmt, die relevant für dieses Kapitel sind) diskutiert und eine Methode ausgewählt. Anschließend wird aufbauend auf der Methode die Vorgehensweise zur Entwicklung des Algorithmus von Modul 5 festgelegt (Kapitel 6.2.2).

6.2.1 Methodendiskussion

Für eine kundenorientierte Bewertung des SFP besteht mit dem Ansatz von Brauner (2023) eine Bewertung auf Basis der Widerstandsveränderungen (siehe Kapitel 2.4.2). Da keine weiteren Ansätze zur kundenorientierten Bewertung von SFP aus der Literatur bekannt sind, besteht neben der Option zur Nutzung und ggf. Anpassung des Ansatzes von Brauner (2023) die Möglichkeit, einen neuen Ansatz zu entwickeln.

Die kundenorientierte Bewertung von Brauner (2023) wurde u. a. hinsichtlich der folgenden Anforderungen entwickelt:

- Kundenorientierung
- Nachvollziehbarkeit
- Qualitätseinordnung
- Automatisierung
- Allgemeingültigkeit
- Auslösung einer interaktiven Rückkopplung
- schnelle Lösungsbereitstellung

Die berücksichtigten Anforderungen decken sich vollständig mit den relevanten Anforderungen aus Kapitel 3.3. Dazu entspricht die Nutzung eines bestehenden Ansatzes der Störungsdisposition der Anforderungen nach Kontinuität. Somit besteht die Möglichkeit Inputs, die für die Bewertung benötigt werden (z. B. Fahrgastzahlen) und nicht als aktuelle Daten vorliegen, aus der Erstellung des SFP zu übernehmen, wenn der Ansatz von Brauner (2023) in der Planung von SFP zum Einsatz kommt.

Da der Ansatz von Brauner (2023) bereits die Anforderungen an die kundenorientierte Bewertung erfüllt, wird nicht erwartet, dass ein neu entwickelter Ansatz die Anforderungen besser erfüllt. Aus den genannten Gründen wird zur kundenorientierten Bewertung des SFP der Ansatz von Brauner (2023) verwendet.

6.2.2 Vorgehensweise

Für die Entwicklung des Moduls zur kundenorientierten Bewertung wurde die Nutzung des Ansatzes von Brauner (2023) ausgewählt. Bevor auf diesem Ansatz aufbauend die Entwicklung der Algorithmen von Modul 5 erfolgt, wird in diesem Kapitel mit der Vorgehensweise der Aufbau des weiteren Kapitels 6 festgelegt.

Die kundenorientierte Bewertung von Brauner (2023) ist in zwei Module unterteilt (siehe Kapitel 2.4.2):

- „Verkehrskonzeptbewertung“
- „kundenorientierte SFP-Bewertung“

Die beiden Module sind bei Brauner (2023) in einem Ansatz für die betriebliche und kundenorientierte Bewertung von SFP während der Erstellung von SFP integriert (siehe Kapitel 2.4.2). Für einen Einsatz in der Adaption von SFP ist in Kapitel 6.3 zu prüfen, ob alle Inputs für die kundenorientierte Bewertung durch die beiden Module vorliegen und ggf. zu diskutieren, wie mit fehlenden Inputs umgegangen wird. Außerdem ist der Aufbau von Modul 5 zu bestimmen.

In Kapitel 6.4 wird Modul 5 unter Beachtung des bestimmten Aufbaus des Moduls und ggf. vorhandenen Vorgaben aus Kapitel 6.3 beschrieben. Entsprechend der Systemarchitektur besteht im Zuge des iterativen Prozesses zur Adaption von SFP eine Rückkopplung von Modul 5 zu Modul 2 und/oder zu Modul 1, wenn das adaptierte SFP die Anforderungen an ein kundenorientiertes SFP nicht einhält (siehe Kapitel 3.4).

6.3 Entwicklung des Algorithmus für die kundenorientierte Bewertung

In Kapitel 6.2 wurde als Ansatz zur kundenorientierten Bewertung der Ansatz von Brauner (2023) ausgewählt. Als Vorbereitung für die anschließende Beschreibung des Moduls 5 (Kapitel 6.4) wird in diesem Kapitel der Aufbau von Modul 5 bestimmt. Anschließend wird für die Module „Verkehrskonzeptbewertung“ und „kundenorientierte SFP-Bewertung“ von Brauner (2023) geprüft, ob alle Inputs für die kundenorientierte Bewertung vorliegen und ggf. diskutiert, wie mit fehlenden Inputs umgegangen wird.

6.3.1 Aufbau von Modul 5

In Kapitel 3.4 wurde festgelegt, dass die kundenorientierte Bewertung des SFP nach Modul 2 und Modul 4 erfolgen soll. Nach Modul 2 besteht ein adaptiertes SFP mit angepasstem Betriebskonzept und ggf. angepasstem Verkehrskonzept. Es besteht aber noch kein Fahrplankonzept für die stabile Phase und kein Fahrplan der Einschwingphase, da diese erst in Modul 3 bzw. 4 bestimmt werden.

Für die Durchführung der kundenorientierten Bewertung im Ansatz von Brauner (2023) wird ein Fahrplankonzept der stabilen Phase verwendet, das hinsichtlich eines fahrplanunabhängigen Kapazitätskriteriums geprüft wurde (siehe Kapitel 2.4.2). Da eine Identifizierung und Lösung von Belegungs- oder Umlaufkonflikten für das Fahrplankonzept der stabilen Phase im Ansatz von Brauner (2023) nicht stattgefunden hat und auch kein Fahrplan der Einschwingphase verwendet wird, ist für die Anwendung der Module von Brauner (2023) keine Durchführung von Modul 3 und Modul 4 erforderlich. Das adaptierte SFP als Output nach Modul 2 kann verwendet werden. Nach Modul 2 erfolgt somit eine kundenorientierte

Bewertung des SFP anhand der beiden Module „Verkehrskonzeptbewertung“ und „kundenorientierte SFP-Bewertung“.

Eine weitere kundenorientierte Bewertung des SFP soll am Ende der Adaption und somit nach der Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der Einschwingphase erfolgen (siehe Kapitel 3.4). In diese Bewertung kann sowohl das Fahrplankonzept der stabilen Phase (Output von Modul 3) als auch der Fahrplan der Einschwingphase (Output von Modul 4) einbezogen werden. Die kundenorientierte Bewertung kann somit unter Einbeziehung von stabiler Phase und Einschwingphase erfolgen.

Für eine kundenorientierte Bewertung unter Einbeziehung von beiden Phasen ist ggf. eine Anpassung der beiden Module „Verkehrskonzeptbewertung“ und „kundenorientierte SFP-Bewertung“ erforderlich. Dies ist im Rahmen der Prüfung der Inputs der verwendeten Module (Kapitel 6.3.2) zu untersuchen.

Zusammenfassend sind zwei Submodule für die kundenorientierte Bewertung des SFP in Modul 2 erforderlich (siehe Abbildung 6-1):

- Kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase durch das Modul „Verkehrskonzeptbewertung“ von Brauner (2023)
- Kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase und der Einschwingphase durch das Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“ von Brauner (2023)

Durch die Übernahme des Ansatzes von Brauner (2023), in dem die Terminierung der beiden Module sichergestellt ist, ist eine Sicherstellung der Terminierung von Modul 6 nicht erforderlich.

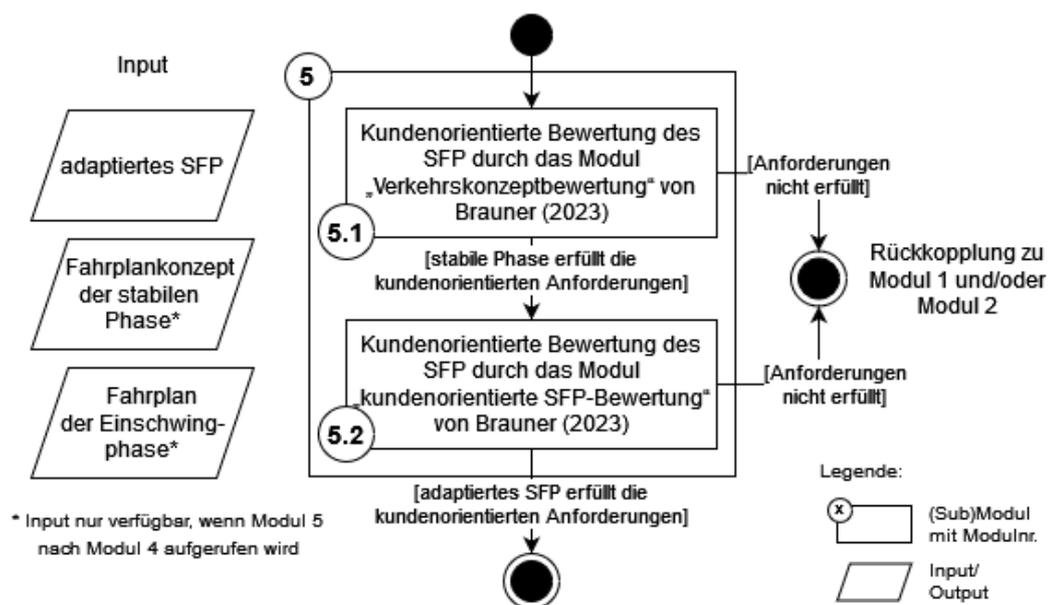


Abbildung 6-1: Aufbau von Modul 5

6.3.2 Prüfung der Inputs der verwendeten Module

Nachdem der Aufbau von Modul 5 bestimmt wurde, wird geprüft, ob alle Inputs für die Module „Verkehrskonzeptbewertung“ und „kundenorientierte SFP-Bewertung“ vorliegen und ggf. diskutiert, wie mit fehlenden Inputs umgegangen wird. Außerdem wird geprüft, ob das Fahrplankonzept der stabilen Phase (Output von Modul 3) und der Fahrplan der Einschwingphase (Output von Modul 4) in der verkehrlichen Bewertung berücksichtigt werden kann.

Modul „Verkehrskonzeptbewertung“

In dem Modul „Verkehrskonzeptbewertung“ erfolgt die Bewertung des Verkehrskonzepts anhand der stabilen Phase (siehe Kapitel 2.4.2). Ein Teil der erforderlichen Inputs des Moduls sind in Abbildung 6-2 dargestellt.

Für die Berechnung der Widerstandsveränderung (Berechnungsschritte 1 und 2 in Abbildung 6-2) werden die Verbindungskonflikte und deren Lösungen (individuell, kollektiv, unverändert) bzw. ungelöste Verbindungskonflikte benötigt. Verbindungskonflikte des adaptierten SFP und deren Lösungen wurden bereits in Modul 2.1 bestimmt (siehe Kapitel 5.4.2) und können, wenn Modul 5 nach Modul 2 aufgerufen wird, von dort übernommen werden.

Erfolgt die Durchführung von Modul 5 nach Modul 4, sind die Einflüsse der Ergebnisse von Modul 3 und Modul 4 auf die Verbindungskonflikte sowie deren Lösungen in der stabilen Phase zu berücksichtigen. Modul 4 hat keinen Einfluss, da es nicht die stabile Phase oder das Verkehrskonzept verändert. Modul 3 verändert zwar ebenfalls nicht das Verkehrskonzept, aber ggf. das Fahrplankonzept der stabilen Phase. Deshalb ist der Einfluss des Ergebnisses von Modul 3 auf die Verbindungskonflikte sowie deren Lösungen in der stabilen Phase zu prüfen.

Da Modul 3 das Betriebskonzept nicht hinsichtlich betrieblicher Maßnahmen, die Laufweg und Takt betreffen, verändert und auch nicht das Verkehrskonzept anpasst, kommt es durch Modul 3 zu keiner Veränderung der Routen. Somit können lediglich die Widerstandsveränderung der Lösungen der Verbindungskonflikte und der „veränderten Verbindungen“ (siehe Kapitel 2.4.2) zu den Berechnungen aus Modul 2 abweichen. Auch können weitere veränderte Verbindungen auftreten. Bei einer Durchführung von Modul 5 nach Modul 4 sind daher die Widerstandsveränderungen der Verbindungen neu zu berechnen, bei denen es durch Modul 3 zu einer Änderung der Verbindung gekommen ist.

Für die Berechnung der Widerstandsveränderung der ungelösten Verbindungskonflikte (Berechnungsschritte 1 in Abbildung 6-2) sind neben der Menge der ungelösten Verbindungskonflikte Angaben zu Fahrgastgruppen, zu Fahrgastzahlen und der geschätzte Beginn der Rückführung in den Regelbetrieb (Aufhebung des SFP) erforderlich (siehe Brauner 2023, S. 203 f.). Falls keine aktuellen Informationen zu Fahrgastgruppen und Fahrgastzahlen bereit stehen, können die Angaben aus der Erstellung des SFP übernommen werden. Eine Abschätzung der Dauer der Störung ist nicht Inhalt dieser Arbeit und wird als bekannt angenommen (siehe Kapitel 3.2).

Für Berechnungsschritt 3 ist als weiterer Input ein Grenzwert für die Bewertung des Verkehrskonzepts anhand der Widerstandsveränderung anzugeben (siehe Abbildung 6-2). Der Grenzwert wird für die Erstellung von SFP vorgegeben und kann – der Anforderung nach Vermeidung manueller Inputs folgend – für die Adaption von SFP übernommen werden.

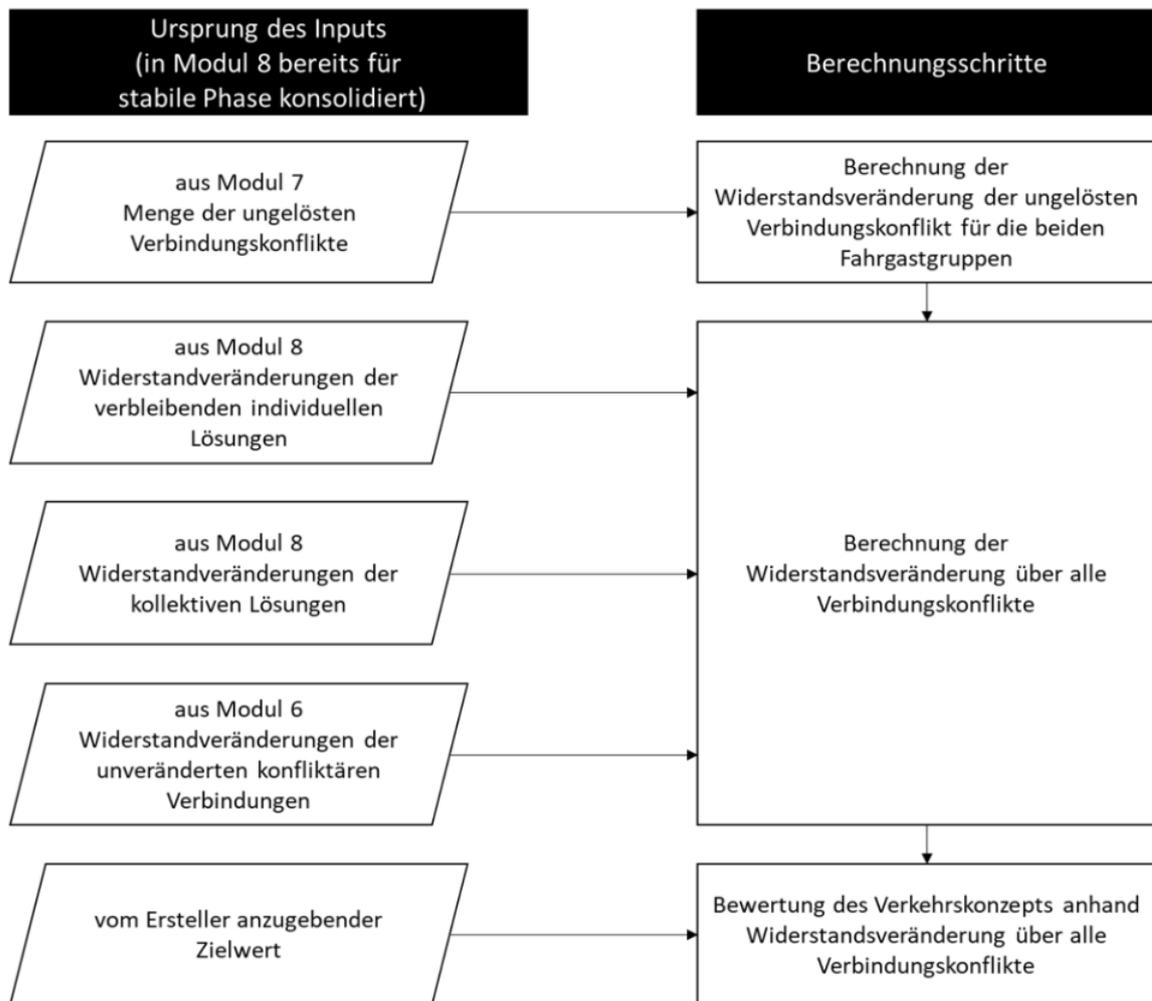


Abbildung 6-2: Input und Vorgehen des Moduls „Verkehrskonzeptbewertung“ aus Brauner (2023) (Abbildung aus Brauner 2023, S. 201; Modulnummer beziehen sich auf Module in Brauner (2023))

Durch die Vorgabe eines alternativen SFP (\hat{p}), welches in der aktuellen Infrastruktursituation anwendbar ist (beispielsweise durch Entfall von mehr Angebot), kann ein weiterer Grenzwert vorgegeben werden. Die durchschnittliche Widerstandsveränderung des ausgewählten alternativen SFP in der stabilen Phase ($\emptyset\Delta w_{\hat{p},stabil}$) ist kleiner als der Grenzwert für die Erstellung von SFP ($\emptyset\Delta w_{vorgeb}$), da das alternative SFP sonst kein gültiges SFP darstellen würde.

$$\emptyset\Delta w_{\hat{p},stabil} \leq \emptyset\Delta w_{vorgeb}$$

Ist die durchschnittliche Widerstandsveränderung des adaptierten SFP in der stabilen Phase ($\emptyset\Delta w_{p^*,stabil}$) größer als $\emptyset\Delta w_{\hat{p},stabil}$, sollte das alternative SFP ausgewählt werden. Als Grenzwert für die kundenorientierte Bewertung und somit für die maximal akzeptable Widerstandsveränderung der stabilen Phase dient daher $\emptyset\Delta w_{\hat{p},stabil}$ bzw. $\emptyset\Delta w_{vorgeb}$, wenn kein alternatives SFP vorhanden ist oder festgelegt wurde.

$$\emptyset\Delta w_{p^*,stabil} \leq \begin{cases} \emptyset\Delta w_{\hat{p},stabil} & \exists \hat{p} \\ \emptyset\Delta w_{vorgeb} & \nexists \hat{p} \end{cases}$$

Zusammenfassend sind für das Modul „Verkehrskonzeptbewertung“ alle erforderlichen Inputs vorhanden bzw. können aus der Planung des SFP übernommen werden.

Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“

In diesem Modul erfolgt eine kundenorientierte Bewertung der Einschwingphase. Durch eine Verknüpfung mit dem Ergebnis aus dem Modul „Verkehrskonzeptbewertung“ besteht eine vollständige kundenorientierte Bewertung des SFP (siehe Kapitel 2.4.2). Daher sind neben der durchschnittlichen Widerstandsveränderung aus dem Modul „Verkehrskonzeptbewertung“ Informationen über die Einschwingphase erforderlich.

Da im Ansatz von Brauner (2023) kein Fahrplan der Einschwingphase ermittelt wird, werden die erforderlichen Informationen aufbauend auf den Ergebnissen der Berechnung der Einschwingdauer abgeschätzt (siehe Brauner 2023, S. 210 ff.). Wenn Modul 5 nach Modul 2 aufgerufen wird, steht ebenfalls kein Fahrplan der Einschwingphase bereit. Analog zu Brauner (2023) müssen die erforderlichen Informationen zur Einschwingphase abgeschätzt werden.

Bei der verkehrlichen Bewertung nach Modul 4 kann der in Modul 4 erstellte Fahrplan der Einschwingphase verwendet werden. Somit muss nicht, wie im Ansatz von Brauner (2023) dargestellt, eine Abschätzung des Fahrplans der Einschwingphase vorgenommen werden. Dadurch kann ein genaueres Ergebnis der kundenorientierten Bewertung erwartet werden. Das Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“ ist daher für Modul 5 anzupassen, sodass auch eine kundenorientierte Bewertung auf Basis des Fahrplans der Einschwingphase möglich ist.

Als weitere Inputs sind für das Modul Verbindungskonflikte und deren Lösungen aus der stabilen Phase Angaben zu Fahrgastzahlen und ein Grenzwert der durchschnittlichen Widerstandsveränderung erforderlich. Analog zur Diskussion der Inputs für das Modul „Verkehrskonzeptbewertung“ sind die Inputs bereits vorhanden (Verbindungskonflikte und deren Lösungen aus der stabilen Phase aus Modul 2; Widerstandsveränderung von Verbindungen, bei denen es durch Modul 3 zu einer Änderung gekommen ist, sind neu zu berechnen) oder können aus der Planung des SFP übernommen werden.

Als Grenzwert für die durchschnittliche Widerstandsveränderung des SFP kann analog zur Diskussion des Moduls „Verkehrskonzeptbewertung“ die durchschnittliche Widerstandsveränderung eines ausgewählten alternativen SFP verwendet werden. Wenn kein alternatives SFP vorhanden ist oder festgelegt wurde, kann der Grenzwert für die Erstellung von SFP herangezogen werden.

Zu prüfen ist, ob die Nutzung des Fahrplans der Einschwingphase anstelle einer Abschätzung einen systematischen Einfluss auf die kundenorientierte Bewertung hat. Ist dies der Fall, ist ggf. der Grenzwert anzupassen bzw. ein anderer Grenzwert für die kundenorientierte Bewertung nach Modul 4 zu verwenden.

6.3.3 Zusammenfassung

Ziel dieses Kapitels war die Bestimmung des Aufbaus von Modul 5 und eine Prüfung, ob alle Inputs für die kundenorientierte Bewertung durch die beiden Module „Verkehrskonzeptbewertung“ und „kundenorientierte SFP-Bewertung“ von Brauner (2023) vorliegen.

Als Aufbau von Modul 5 wurde festgelegt, dass dieses aus zwei Submodulen besteht, die nacheinander durchgeführt werden (siehe Abbildung 6-1). Zunächst erfolgt in Modul 5.1 eine kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase durch das Modul

„Verkehrskonzeptbewertung“ von Brauner (2023). Anschließend wird in Modul 5.2 eine kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase und der Einschwingphase durch das Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“ von Brauner (2023) durchgeführt.

Alle erforderlichen Inputs für die Module sind bereits vorhanden (z. B. Verbindungskonflikte aus Modul 2) oder können aus der Planung des SFP übernommen werden (z. B. Grenzwert für die Bewertung des Verkehrskonzepts). Lediglich bei der Durchführung von Modul 5 nach Modul 4 sind die Widerstandsveränderungen der Verbindungen neu zu berechnen, bei denen es durch Modul 3 zu einer Änderung der Verbindung gekommen ist. Außerdem wird das Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“ dahingehend angepasst, dass die kundenorientierte Bewertung der Einschwingphase auf Basis des Fahrplans der Einschwingphase erfolgen kann.

Als Grenzwert für die durchschnittliche Widerstandsveränderung besteht neben dem Grenzwert für die Erstellung von SFP die Möglichkeit, ein alternatives SFP auszuwählen, dessen durchschnittliche Widerstandsveränderung ebenfalls als Grenzwert verwendet werden kann. Besteht ein alternatives SFP und ist dessen durchschnittliche Widerstandsveränderung kleiner als die des adaptierten SFP, sollte das alternative SFP angewendet werden.

Nachdem der Aufbau von Modul 5 bestimmt wurde und eine Verwendung der Module von Brauner (2023) möglich ist, erfolgt im nächsten Kapitel die Beschreibung von Modul 5.

6.4 Beschreibung von Modul 5

Für die kundenorientierte Bewertung des adaptierten SFP wurde in Kapitel 6.2 der bestehende Ansatz von Brauner (2023) ausgewählt. In Kapitel 6.3 wurde der Aufbau von Modul 5 bestimmt und geprüft, sodass alle Inputs für die beiden Module der kundenorientierten Bewertung von Brauner (2023) vorliegen. Außerdem wurde bestimmt, dass das Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“ modifiziert wird, sodass die kundenorientierte Bewertung der Einschwingphase auf Basis des Fahrplans der Einschwingphase erfolgt.

In diesem Kapitel werden die Submodule von Modul 5 beschrieben. Da die Module von Brauner (2023) bereits umfassend in der entsprechenden Arbeit beschrieben wurden, liegt der Fokus bei der Beschreibung von Modul 5 auf den Rückkopplungen im Zuge des iterativen Vorgehens (siehe Kapitel 3.4) von Modul 5 zu Modul 1 und Modul 2. In den Modulen, deren Ziel die Rückkopplungen sind, soll durch eine Anpassung der Bedingungen der Problemlösung der Output verändert werden, sodass bei einer erneuten Bewertung die Anforderungen an ein kundenorientiertes SFP eingehalten werden. Kapitel 6.4 endet mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse in Kapitel 6.4.4.

6.4.1 Modul 5.1: Kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase

In Modul 5.1 erfolgt eine kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase durch das Modul „Verkehrskonzeptbewertung“ von Brauner (2023). Der Ablauf des Moduls ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Als Inputs sind größtenteils Informationen aus Modul 2 erforderlich (siehe Kapitel 6.3.2). Bei der Durchführung von Modul 5.1 nach Modul 4 sind die Widerstandsveränderungen der Verbindungen neu zu berechnen, bei denen es durch Modul 3 zu einer Änderung der Verbindung gekommen ist.

Für die Bewertung des SFP wird eine durchschnittliche Widerstandsveränderung berechnet (siehe Kapitel 2.4.2), die mit der maximal akzeptablen Widerstandsveränderung verglichen wird (siehe Kapitel 6.3.2). Wird die maximal akzeptable Widerstandsveränderung nicht

eingehalten, ist nach dem iterativen Vorgehen (siehe Kapitel 3.4) eine Rückkopplung zur Überarbeitung des SFP anzustoßen.

6.4.2 Modul 5.2: Kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase und der Einschwingphase

In Modul 5.2 erfolgt eine kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase und der Einschwingphase durch das Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“ von Brauner (2023). Neben dem ursprünglichen Vorgehen im Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“, bei dem zur Berücksichtigung der Einschwingphase die zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikte in der Einschwingphase im Vergleich zur stabilen Phase ermittelt wurden (siehe Kapitel 2.4.2), soll auch eine Bewertung anhand des Fahrplans der Einschwingphase erfolgen (siehe Kapitel 6.3.2)

Abbildung 6-3 zeigt das angepasste Vorgehen im Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“, bei einer Durchführung von Modul 5 nach Modul 4. Die Ermittlung der zusätzlichen und veränderten Verbindungskonflikte erfolgt entsprechend dem Vorgehen im Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“ anhand der Verbindungskonflikterkennung von Brauner (2023). Dass eine Nutzung des Moduls „Verbindungskonflikterkennung“ von Brauner (2023) möglich ist, wurde in Kapitel 5.2.3 gezeigt. Das übrige Vorgehen des Moduls „kundenorientierte SFP-Bewertung“ bleibt unverändert. Für die stabile Phase wird wie von Brauner (2023) vorgesehen, die kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase (Modul 5.1) verwendet.

Das Ergebnis der kundenorientierten Bewertung ist wie auch in Modul 5.1 eine durchschnittliche Widerstandsveränderung. Diese muss wie in Modul 5.1 kleiner gleich der maximal akzeptablen Widerstandsveränderung sein. Wird die maximal akzeptable Widerstandsveränderung nicht eingehalten, ist nach dem iterativen Vorgehen (siehe Kapitel 3.4) eine Rückkopplung zur Überarbeitung des SFP erforderlich.

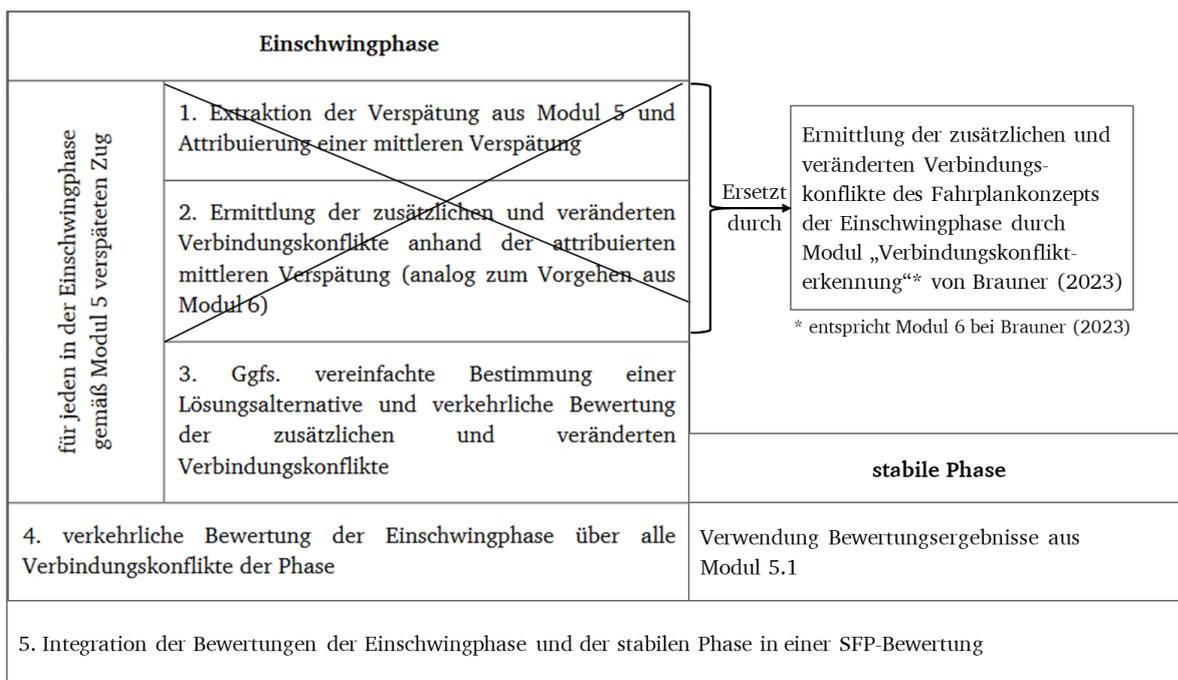


Abbildung 6-3: Angepasstes Vorgehen des Moduls „kundenorientierte SFP-Bewertung“ aus Brauner (2023) bei einer Durchführung von Modul 5 nach Modul 4 (Abbildung angelehnt an Brauner 2023, S. 211)

6.4.3 Rückkopplung von Modul 5

Bei den kundenorientierten Bewertungen in den Modulen 5.1 und 5.2 kann es zu einer Nicht-Einhaltung der maximal akzeptablen Widerstandsveränderung kommen. Ist dies der Fall, ist entsprechend des iterativen Vorgehens eine Überarbeitung des SFP anzustoßen (siehe Kapitel 3.4). Entsprechend der Vorgaben aus Kapitel 3.4 erfolgt eine Überarbeitung des SFP anhand einer alternativen Anpassung des Betriebskonzepts (Modul 1) oder des Verkehrskonzepts (Modul 2) durch das Einbringen weitere Bedingungen für die Problemlösung in den jeweiligen Modulen.

Bei einer Rückkopplung zu Modul 1 wird aufgrund der Änderung der Bedingungen der Problemlösung von Modul 1 ein alternatives Betriebskonzept bestimmt. Durch das Vorgehen von Modul 1 ist bei der Bestimmung eines alternativen Betriebskonzepts eine verkehrlich schlechtere Lösung von Teilproblem I zu erwarten (siehe Kapitel 3.6). Daher ist zunächst eine Anpassung des Verkehrskonzepts in Modul 2 anzustreben.

Da sowohl Modul 1 in Kapitel 4 als auch Modul 2 in Kapitel 5 bereits beschrieben wurden, erfolgt in diesem Kapitel außerdem die Diskussion der Auswirkung der Rückkopplungen auf die beiden Module.

Rückkopplung zu Modul 2

Die durchschnittliche Widerstandsveränderung kann reduziert werden, wenn alternative FGK mit einer geringeren durchschnittlichen Widerstandsveränderung ermittelt werden. Daher werden, beginnend für den FGK mit der höchsten durchschnittlichen Widerstandsveränderung, alternative FGK durch Modul 2.2 bestimmt. Den Anforderungen nach Zuverlässigkeit entsprechend, sollten nur für FGK, die nicht im ausgewählten SFP enthalten sind, neue FGK bestimmt werden.

Zur Ermittlung alternativer FGK werden analog zur Engpassauflösung in Modul 2.3 alternative Fahrgastströme bestimmt. Bei der Ermittlung von Fahrgastströmen in Modul 2.2 bestehen mehrere Stufen, beginnend mit der Bestimmung von FGK aus bestehenden SFP mit gleichem Startpunkt bis hin zur Ermittlung von Fahrgastströmen unter Nutzung aller möglicher Startpunkte (siehe Kapitel 5.4.3). Eventuell wurden für einen FGK bereits bei dessen Bestimmung oder zur Engpassauflösung Stufen zur Ermittlung der Fahrgastströme ausgeführt. Diese Stufen müssen nicht noch einmal ausgeführt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass durch Disponenten alternative Korridorendpunkte vorgegeben werden.

Durch die Änderung eines FGK kann eine in Modul 2.3 erfolgte Engpassauflösung eventuell obsolet sein. Dies ist der Fall, wenn die Änderung ein FGK betrifft, der Teil eines Engpasses war. Durch die Änderung des FGK könnten die Engpässe gar nicht erst auftreten. Daher sollten alle FGK, die aufgrund einer dieser Engpässe neu bestimmt wurden, erneut aus den bisher bestimmten Fahrgastströmen ausgewählt werden.

Wenn durch Rückkopplungen für alle FGK, die für eine Änderung in Betracht kommen, alle Stufen zur Bestimmung von Fahrgastströmen angewendet wurden, besteht keine weitere Möglichkeit, einen FGK mit einer geringeren durchschnittlichen Widerstandsveränderung zu ermitteln.

Zur weiteren Anpassung des Verkehrskonzepts besteht außerdem die von Brauner (2023) beschriebene Möglichkeit, Konfliktlösungsalternativen, die standardmäßig nicht zur Lösung

von Verbindungskonflikte genutzt werden, zu ermöglichen. Zu diesen Maßnahmen zählt u. a. die Bestellung alternativer Verkehre (siehe Brauner 2023, S. 169 ff.). Die Verwendung dieser Art der Maßnahmen kann aber ggf. nicht kurzfristig ermöglicht werden und sollte anlog zur Freigabe der Nutzung anderer Verkehrsmittel außerhalb des Verbunds (siehe Brauner 2023, S. 171) im Vorhinein (bei der Planung der SFP) bereits vorbereitet oder ansonsten ausgeschlossen werden. Auf Grund der Vielzahl der Bedingungen zur Nutzung dieser nicht-standardmäßigen Maßnahmen ist eine Bestätigung durch den Disponenten einzuholen.

Durch die Nutzung der Maßnahmen im Verkehrskonzept können ggf. Konfliktlösungsalternativen mit einer geringeren Widerstandsveränderung angeboten werden, wodurch auch die durchschnittliche Widerstandsveränderung des SFP reduziert wird. Die zusätzlichen Maßnahmen sind in Modul 2.1.5 bei der Lösung für Verbindungskonflikte im angepassten Betriebskonzept und in Modul 2.1.6 bei der Prüfung, ob „bessere“ Lösungen der bereits im ausgewählten SFP enthaltenen Verbindungskonflikte vorhanden sind, zu berücksichtigen.

Rückkopplung zu Modul 1

Neben der alternativen Anpassung des Verkehrskonzepts kann eine alternative Anpassung des Betriebskonzepts erfolgen. Ziel der Rückkopplung an Modul 1 ist es, dass das Betriebskonzept so angepasst wird, dass die Widerstandsveränderung reduziert und die maximal akzeptable Widerstandsveränderung eingehalten wird. Eine Reduzierung der Widerstandsveränderung wird erreicht, wenn weniger Verbindungskonflikte im Betriebskonzept enthalten sind oder wenn die Lösungen der Verbindungskonflikte eine geringere Widerstandsveränderung aufweisen.

Als Ansatzpunkt für die Rückkopplung dient das ausgewählte SFP, da dies einem ähnlichem Störungsszenario entspricht und die maximal akzeptable Widerstandserhöhung einhält. Für die Rückkopplung wird bestimmt, bei welchen Verbindungen es zu einer Erhöhung der Widerstandsveränderung bei der Anpassung des Betriebskonzepts gekommen ist. Eine Verbindung kann im adaptierten SFP im Vergleich zum ausgewählten SFP

- unverändert vorhanden sein
- verändert sein (niedrigere oder höhere Widerstandsveränderung)
- nicht mehr vorhanden sein.

Tabelle 6-1 zeigt die Auswirkungen der möglichen Änderungen von Verbindungen zwischen dem ausgewählten SFP und dem adaptierten SFP auf die Widerstandsveränderung.

Tabelle 6-1: Mögliche Änderungen der Verbindungen durch die Adaption und deren Auswirkungen auf die Widerstandsveränderung

Verbindungskonflikt der Verbindung		im adaptierten SFP		
		nicht vorhanden	gelöst	ungelöst
im ausgewählten SFP	nicht vorhanden	unverändert	schlechter	schlechter
	gelöst	besser	besser/ unverändert/ schlecht	schlechter
	ungelöst	besser	besser	unverändert

Eine unveränderte Verbindung weist keine Widerstandsveränderung auf. Ansonsten entspricht die Widerstandsveränderung der Differenz der Widerstandsveränderung zwischen ausgewählten und adaptierten SFP. Bei einem ungelösten Verbindungskonflikt kann für das ausgewählte SFP die durchschnittliche Widerstandsveränderung eines ungelösten Verbindungskonfliktes berechnet und verwendet werden (Brauner 2023, S. 203 f.).

Die Differenz der Widerstandsveränderung einer Verbindung zeigt an, ob diese sich aus verkehrlicher Sicht verschlechtert hat. Da eine Anpassung des Betriebskonzepts i. d. R. Auswirkungen auf verschiedene Verbindungen hat, wird durch die Rückkopplung nicht die Verbesserung einzelner Verbindungen angestrebt. Die Rückkopplung soll vielmehr eine allgemeine Vorgabe für die Anpassung des Betriebskonzepts darstellen und so die Widerstandsveränderung des gesamten SFP reduzieren. Die Anpassung des Betriebskonzepts sollte daher die Widerstandsveränderung möglichst vieler Verbindungen verbessern.

Für die alternative Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 ist eine Anpassung der Bedingungen der Problemlösung erforderlich. Dies kann durch die Vorgabe von Bedingungen für Linienrouten oder Mengen von Linienrouten erfolgen (siehe Kapitel 4.3.3). Dafür wird die Differenz der Widerstandsveränderung der einzelnen Verbindungen den Linienrouten zugeordnet.

Eine Verknüpfung zwischen Verbindungen und Linienrouten besteht dadurch, dass Verbindungen Züge von Linienrouten nutzen. Die Differenz der Widerstandsveränderung könnte den Linienrouten zugewiesen werden, die von den Verbindungen genutzt werden. Da die Verbindungen die Möglichkeiten des aktuellen Angebots widerspiegeln, könnte eine solche Zuordnung aber zu fehlerhaften Schlüssen führen. Zum Beispiel, wenn Verbindungen eine Linienroute nutzen, da eine andere Linienroute nicht besteht, durch die eine bessere Verbindung möglich wäre.

Da eine direkte Zuordnung zwischen Verbindungen und Linienrouten des anzupassenden Betriebskonzepts als nicht zielführend erscheint, wird die räumliche Verknüpfung über die Start- und Zielknoten der Verbindungen hergestellt. Durch diesen räumlichen Bezug kann bestimmt werden, in welchen Bereichen des S-Bahn-Netzes eine Verbesserung des Angebots erreicht werden sollte.

Um einen solchen Bereich des S-Bahn-Netzes zu identifizieren, wird die Differenz der Widerstandsveränderung den Start- und Zielknoten der Verbindung zugewiesen. Ausgenommen werden dabei Knoten, die in der aktuellen Infrastruktursituation nicht verfügbar sind. Als Rückkopplung dient die Bedingung, dass die Linienrouten oder Mengen von Linienrouten, die den Knoten mit der höchsten Differenz der Widerstandsveränderung bedienen, angepasst werden müssen.

Da, wie eingangs des Kapitels bereits erwähnt, durch das Vorgehen von Modul 1 bei der Bestimmung eines alternativen Betriebskonzepts eine verkehrlich schlechtere Lösung von Teilproblem I zu erwarten ist (siehe Kapitel 4.3.6), sollte zusätzlich die Möglichkeit bestehen, Input des Disponenten einzuholen. Dieser Input kann darin bestehen, dass Vorgaben von Linienrouten oder Mengen von Linienrouten für bestimmte Linien oder Bereiche des S-Bahn-Netzes gegeben werden. Auch ist es möglich, dass bestimmte Linienrouten oder Mengen von Linienrouten für die alternative Anpassung des Betriebskonzepts ausgeschlossen werden. Als Unterstützung zur Bestimmung der Rückmeldung des Disponenten kann eine Übersicht der

Differenzen der Widerstandsveränderung je Knoten dienen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, mit dem Input des Disponenten die Adaption des SFP erneut zu starten.

Ohne Input durch den Disponenten ist entsprechend dem iterativen Vorgang mithilfe eines Greedy-Algorithmus (siehe Kapitel 3.4) die Anpassung des Betriebskonzepts zunächst für den Knoten mit der größten Erhöhung der Widerstandsveränderung durchzuführen, da für diesen Knoten die größte Verbesserung der Widerstandsveränderung zu erwarten ist. Kann keine alternative Lösung in Modul 1 gefunden werden, ist mit dem Knoten mit der nächst niedrigeren Erhöhung der Widerstandsveränderung fortzufahren.

Ist die maximal akzeptable Widerstandsveränderung trotz ggf. erneutem Anpassen des Verkehrskonzepts und der Berücksichtigung der zusätzlichen Maßnahmen im Verkehrskonzepts weiterhin nicht erfüllt, ist der Knoten mit der dann höchsten Erhöhung der Widerstandsveränderung auszuwählen. Kann bei keinem Knoten mit einer höheren Widerstandsveränderung eine alternative Lösung in Modul 1 oder 2 gefunden werden, terminiert die Adaption des SFP ohne Lösung. Dadurch, dass bei jeder erneuten Durchführung von Modul 1 eine verkehrlich schlechtere Lösung erzeugt wird (siehe Kapitel 4.3.6), ist sichergestellt, dass der modulübergreifende iterative Prozess terminiert.

6.4.4 Zusammenfassung

Ziel von Kapitel 6.4 war die Beschreibung von Modul 5, der kundenorientierten Bewertung des adaptierten SFP. Die kundenorientierte Bewertung beruht auf den Modulen von Brauner (2023) mit geringen Modifikationen.

Modul 5 besteht aus zwei Submodulen (siehe auch Abbildung 6-1). In Modul 5.1 erfolgt eine kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase. Dazu wird das adaptierte SFP anhand des Moduls „Verkehrskonzeptbewertung“ von Brauner (2023) bewertet.

Modul 5.2 dient der kundenorientierten Bewertung des SFP anhand der Einschwingphase und ermöglicht durch eine Hinzunahme der Ergebnisse von Modul 5.1 eine phasenübergreifende kundenorientierte Bewertung des SFP. Modul 5.2 entspricht dem Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“ von Brauner (2023). Zusätzlich zur in Brauner (2023) vorgesehenen Abschätzung der erforderlichen Informationen zur Einschwingphase wurde das Modul angepasst, sodass auch eine kundenorientierte Bewertung anhand des Fahrplans der Einschwingphase möglich ist.

Wird die maximal akzeptable Widerstandsveränderung bei einer der kundenorientierten Bewertungen nicht eingehalten, erfolgt zunächst eine Rückkopplung an Modul 2 (Anpassung des Verkehrskonzepts). Dies umfasst die Möglichkeiten, alternative FGK zu bestimmen und Konfliktlösungsalternativen, die standardmäßig nicht zur Lösung von Verbindungskonflikten genutzt werden, zu nutzen (z. B. die Bestellung alternativer Verkehre). Ein Einsatz dieser nicht-standardmäßigen Maßnahmen ist aber zuvor durch den Disponenten zu bestätigen.

Falls durch die Rückkopplung zu Modul 2 weiterhin keine kundenorientierte Bewertung gegeben ist, erfolgt eine Rückkopplung an Modul 1 (Anpassung des Betriebskonzepts). Dazu wird die Differenz der Widerstandsveränderung der Verbindungen zwischen ausgewählten und adaptierten SFP bestimmt. Diese wird den Start- und Zielknoten der Verbindungen zugewiesen, sodass Bereiche des S-Bahn-Netzes identifiziert werden können, bei denen es durch die Anpassung des Betriebskonzepts zu einer Erhöhung der Widerstandsveränderung gekommen ist. Als Rückkopplung wird in Modul 1 die Bedingung eingefügt, dass für die Linienrouten oder

Mengen von Linienrouten, die den Knoten mit der höchsten Differenz der Widerstandsveränderung bedienen, angepasst werden müssen. Gleichzeitig sollte es durch den Disponenten die Möglichkeit geben, manuelle Vorgaben zur alternativen Anpassung in Modul 1 zu geben.

6.5 Zusammenfassung von Kapitel 6 und Diskussion

Ziel des Kapitels war die Entwicklung eines Algorithmus zur kundenorientierten Bewertung des adaptierten SFP nach Teilproblem II (Modul 2) und nach Teilproblem IV (Modul 4). Die entwickelten Algorithmen bilden Modul 5 der Systemarchitektur.

Für die kundenorientierte Bewertung des SFP wurde der Ansatz von Brauner (2023) ausgewählt. Dieser besteht aus zwei Modulen. Daher besteht auch Modul 5 aus zwei Submodulen, die nacheinander durchgeführt werden (siehe Abbildung 6-1). Zunächst erfolgt in Modul 5.1 eine kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase durch das Modul „Verkehrskonzeptbewertung“ von Brauner (2023). Anschließend wird in Modul 5.2 eine kundenorientierte Bewertung des SFP anhand der stabilen Phase und der Einschwingphase durch das Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“ von Brauner (2023) durchgeführt.

Für die Durchführung von Modul 5 nach Modul 4 sind die Widerstandsveränderungen der Verbindungen neu zu berechnen, bei denen es durch Modul 3 zu einer Änderung der Verbindung gekommen ist. Außerdem wurde das Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“ angepasst, sodass die kundenorientierte Bewertung der Einschwingphase auf Basis des Fahrplans der Einschwingphase erfolgen kann.

Da durch Modul 3 und Modul 4 keine betrieblichen Maßnahmen des Betriebskonzepts, die Laufweg und Takt betreffen, und auch das Verkehrskonzept nicht verändert werden, werden im Gegensatz zu Modul 1 und Modul 2 keine Routen verändert. Daher ist anzunehmen, dass die Auswirkung von Modul 3 und Modul 4 auf die kundenorientierte Bewertung im Vergleich zur Auswirkung von Modul 1 und Modul 2 gering ist. Somit kann ggf. eine weitere kundenorientierte Bewertung nach Modul 4 entfallen. Sind die Auswirkungen von Modul 3 und Modul 4 auf die kundenorientierte Bewertung nur gering, ist eine weitere Möglichkeit, dass eine kundenorientierte Bewertung nach Modul 4 nur erfolgt, wenn die verkehrliche Mindestqualität in der ersten kundenorientierten Bewertung nur knapp erreicht wurde.

Output von Modul 2 ist ein bewertetes SFP. Ist das Ergebnis der kundenorientierten Bewertung in Modul 5, dass die maximal akzeptable Widerstandsveränderung nicht eingehalten wird, erfolgt zunächst eine Rückkopplung an Modul 2 zur Anpassung des Verkehrskonzepts. Falls durch die Rückkopplung zu Modul 2 weiterhin keine kundenorientierte Bewertung gegeben ist, erfolgt eine Rückkopplung an Modul 1 zur Anpassung des Betriebskonzepts.

Wird durch die kundenorientierte Bewertung in Modul 5 die maximal akzeptable Widerstandsveränderung eingehalten, dann erfolgt, wenn Modul 5 nach Modul 2 aufgerufen wurde, die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase durch Modul 3. Wenn Modul 5 nach Modul 4 aufgerufen wurde, ist die Adaption des SFP abgeschlossen.

7 Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase

7.1 Einleitung

Die Adaption von SFP lässt sich in vier Teilprobleme und eine kundenorientierte Bewertung untergliedern (siehe Kapitel 3.4). In Kapitel 4 und 5 wurden die Teilprobleme I und II bearbeitet und in Kapitel 6 wurde die kundenorientierte Bewertung des SFP bestimmt. Das dritte Teilproblem ist die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit in der stabilen Phase (siehe Kapitel 3.4). Durch die Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 (siehe Kapitel 4) kann die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase (Anforderung siehe Kapitel 3.3) nicht mehr gegeben sein.

Bei der Anpassung des Betriebskonzepts (siehe Kapitel 4) erfolgt eine Prüfung der Kapazitätsauslastung der Infrastruktur, bei der die Einhaltung eines vorgegebenen Belegungsgrades geprüft wird. Die Einhaltung des Belegungsgrades ist notwendig, um die betriebliche Umsetzbarkeit des Fahrplankonzepts der stabilen Phase sicherzustellen, aber keine hinreichende Bedingung dafür. Belegungs-, Infrastrukturverfügbarkeits- oder Umlaufkonflikte können dazu führen, dass die stabile Phase nicht umsetzbar ist. Durch die Lösung der Konflikte wird das Fahrplankonzept der stabilen Phase spezifiziert und so die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase sichergestellt.

Ziel des Kapitels ist die Entwicklung eines Algorithmus zur Sicherstellung der Umsetzbarkeit des linienspezifischen Betriebskonzepts in der stabilen Phase. Gemäß Kapitel 3.4 entspricht dies der Entwicklung von Modul 3 der Systemarchitektur.

Der Input von Modul 3 besteht aus dem Betriebskonzept, das den Output von Modul 1 darstellt. Dieses Betriebskonzept kann entweder bzgl. linienscharfer betrieblicher Maßnahmen, die Laufweg und Takt betreffen, angepasst sein oder dem Betriebskonzept des ausgewählten SFP entsprechen, wenn das Betriebskonzept in Modul 1 nicht angepasst wurde. Im Weiteren wird für beide Fälle einheitlich der Begriff „angepasstes Betriebskonzept“ verwendet, um zu verdeutlichen, dass auf den Input aus Modul 1 Bezug genommen wird. Als weitere Inputs dienen der Fahrplan des Regelbetriebs, die Verteilung der Züge zu Beginn der Störung (z. B. Anzahl der Züge in den jeweiligen Seiten der Störung) sowie die aktuelle Infrastruktursituation.

In Modul 3 erfolgt die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase. Die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase kann zu zwei möglichen Ergebnissen führen:

- In Modul 3 konnte ein Fahrplankonzept für die stabile Phase bestimmt werden.
- In Modul 3 konnte kein Fahrplankonzept für die stabile Phase bestimmt werden.

Konnte ein Fahrplankonzept für die stabile Phase bestimmt werden, ist der Output von Modul 3 das Betriebskonzept aus Modul 1, das ggf. zusätzlich hinsichtlich linienscharfer betrieblicher Maßnahmen, die nicht Laufweg und Takt betreffen, angepasst ist.

Konnte kein umsetzbares Fahrplankonzept bestimmt werden, erfolgt eine Rückkopplung zu Modul 1. Durch die Rückkopplung sind die Anforderungen an die Lösung so zu verändern, dass in Modul 1 eine Lösung erzeugt wird, mit der in Modul 3 ein Fahrplankonzept für die stabile Phase bestimmt werden kann.

Der Aufbau von Kapitel 7 folgt dem grundsätzlichen Aufbau der Hauptkapitel gemäß Kapitel 3.5. Zunächst wird in Kapitel 7.2 die Methode zur Lösung von Teilproblem III ausgewählt. Als Grundlage für die Auswahl der Methode dient die Problembeschreibung von Teilproblem III. Die ausgewählte Methode ist gleichzeitig Grundlage für Modul 3. Erforderliche Modifikationen der Methode für eine Anwendung in Modul 3 werden ebenfalls in Kapitel 7.2 bestimmt. In Kapitel 7.3 erfolgt die Herleitung und Auswahl von Ansätzen für die zuvor bestimmten erforderlichen Modifikationen. In Kapitel 7.4 wird Modul 3 unter Beachtung der in Kapitel 7.2 ausgewählten Methode und den in Kapitel 7.3 bestimmten Modifikationen der Methode beschrieben. Kapitel 7 endet mit der Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 7.5.

7.2 Methode zur Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit in der stabilen Phase

Ziel des Kapitels ist die Auswahl der Methode zur Lösung von Teilproblem III. Die Methode soll das Betriebskonzept anpassen, sodass die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase gesichert ist. Grundlagen für die Auswahl der Methode bilden die Anforderungen aus Kapitel 3.3, wobei die für dieses Kapitel relevanten Anforderungen in Kapitel 3.4 bestimmt wurden. Anhand der ausgewählten Methode ergeben sich erforderliche Modifikationen zur Anwendung in Modul 3 (Kapitel 7.3) und die ausgewählte Methode bildet den Ausgangspunkt für die Entwicklung von Modul 3 (Kapitel 7.4).

Zur Auswahl einer Methode wird zunächst Teilproblem III beschrieben (Kapitel 7.2.1). Danach werden mögliche Methoden anhand der relevanten Anforderungen aus Kapitel 3.3 diskutiert und eine Methode ausgewählt (Kapitel 7.2.2). Anschließend werden erforderliche Modifikationen der Methode für die Anwendung auf einen periodischen Fahrplan bestimmt (Kapitel 7.2.3). Abschließend kann aufbauend auf der Methode und den erforderlichen Modifikationen die Vorgehensweise zur Entwicklung des Algorithmus zur Sicherstellung der Umsetzbarkeit des linienspezifischen Betriebskonzepts in der stabilen Phase festgelegt werden (Kapitel 7.2.4).

7.2.1 Problembeschreibung

Zur Auswahl der Methode erfolgt zunächst eine Beschreibung von Teilproblem III. Dafür wird das Problem zunächst formuliert. Anschließend werden die Bedingungen an die Problemlösung sowie Problemkomplexität und Problemgröße beschrieben.

Problemformulierung

Ergebnis von Teilproblem I (Output von Modul 1) ist das Betriebskonzept BK_p^* . BK_p^* stellt eine Menge von betrieblichen Maßnahmen dar, die ein periodisches Fahrplankonzept für die stabile Phase vorgeben. Für Teilproblem III ist zu prüfen, ob dieses periodische Fahrplankonzept in der aktuellen Infrastruktursituation G' umsetzbar ist.

Ist dies nicht der Fall, ist BK_p^* anzupassen, sodass das periodische Fahrplankonzept in G' umsetzbar ist. In Teilproblem III wird BK_p^* nur hinsichtlich linienscharfer betrieblicher Maßnahmen, die nicht Laufweg und Takt betreffen, angepasst (siehe Kapitel 3.4).

Das Teilproblem kann auch als Anpassung eines periodischen Fahrplans formuliert werden. Bei dieser Sichtweise ist der periodische Fahrplan, der sich aus den betrieblichen Maßnahmen aus BK_p^* ergibt, so anzupassen, dass ein periodischer Fahrplan entsteht, der in der aktuellen

Infrastruktursituation G' umsetzbar ist. Dabei sind die erforderlichen Änderungen der betrieblichen Maßnahmen – und damit die Anpassung von BK_p^* – aus der Änderung des periodischen Fahrplankonzepts herzuleiten.

Innerhalb des Kernbereichs verkehren nur Züge des S-Bahn-Systems. Auf Mischverkehrsstrecken außerhalb des Kernbereichs können auch Konflikte mit Zügen anderer EVU bestehen. Entsprechend den Anforderungen sollen Konflikte mit Zügen anderer EVU vermieden werden (siehe Kapitel 3.3). Aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit betrieblicher Daten (siehe Kapitel 3.2) können Konflikte mit anderen EVU auch nicht vollständig erkannt und gelöst werden. Daher können nur Konflikte zwischen S-Bahn-Zügen berücksichtigt werden.

Bedingungen an die Problemlösung

Bei der Anpassung von BK_p^* sind die Anforderungen 1.A und 2.A bis 2.C aus Kapitel 3.3 sowie die in Tabelle 3-5 festgelegten Anforderungen aus 1.B zu berücksichtigen.

Für die Anforderung eines stabilen Betriebs ist nach der Aufteilung in Kapitel 3.4 Konfliktfreiheit herzustellen bzgl.

- Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten,
- Belegungskonflikten und
- Umlaufkonflikten.

Für Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte als eine Art von Umlaufkonflikten ist nur eine Machbarkeitsprüfung der Lösung durchzuführen (siehe Kapitel 3.4). Bei der Herstellung der Konfliktfreiheit sind Zuschläge und Pufferzeiten entsprechend Kapitel 3.4 zu berücksichtigen.

Weiterhin besteht an die Lösung des Teilproblems die Anforderung, dass möglichst wenige Anpassungen des Betriebskonzepts und damit des periodischen Fahrplankonzepts erfolgen sollen.

Bei der Anpassung des Betriebskonzepts ist außerdem die Auswirkung auf die Bewertung des Verkehrskonzepts zu berücksichtigen (siehe Kapitel 3.4). Analog zu Teilproblem I ergibt sich aus der verkehrlichen Bewertung des Verkehrskonzepts sowohl eine Nebenbedingung (verkehrliche Mindestqualität) als auch ein Optimierungsziel (Maximierung der verkehrlichen Bewertung des Verkehrskonzepts) (siehe Kapitel 4.2.1).

Problemkomplexität und Problemgröße

Mit dem durch die betrieblichen Maßnahmen des Betriebskonzepts vorgegebenen Fahrplankonzepts besteht bereits ein periodisches Fahrplankonzept, das aber ggf. Konflikte enthält. Es ist somit ein periodisches Fahrplankonzept vorhanden, das angepasst werden kann. Eine Neuplanung eines periodischen Fahrplankonzepts ist somit nicht erforderlich.

Für die Planung eines periodischen Fahrplans auf Basis eines Periodic Event Scheduling Problem konnte gezeigt werden, dass dieses Problem np-vollständig ist (Serafini und Ukovich 1989). Da bei nicht periodischen Fahrplänen sowohl Planung als auch Anpassung np-vollständige Probleme sind (Brucker 2007), wird angenommen, dass auch die Anpassung von periodischen Fahrplänen np-vollständig ist.

Die Problemgröße umfasst unter einer räumlichen Betrachtungsweise das gesamte S-Bahn-Netz, da Konflikte im gesamten S-Bahn-Netz auftreten können. Für die Infrastrukturmodellierung gilt, dass diese eine Erkennung der drei Konfliktarten ermöglichen muss.

Zeitlich betrachtet ist einerseits durch die Periodizität des Fahrplankonzepts die zeitliche Ausdehnung des Fahrplans mit der Dauer der Taktzeit relativ gering. Andererseits besteht eine periodische Randbedingung, d. h. Fahrlagen können über den zeitlichen Rand hinaus miteinander verknüpft sein.

7.2.2 Methodendiskussion

Nachdem Teilproblem III beschrieben wurde, können darauf aufbauend Methoden zur Lösung des Problems diskutiert werden. In der Literatur existieren bereits Ansätze,

- die sich mit der Anpassung von periodischen Fahrplänen befassen (siehe Kapitel 2.5.2) und
- die Funktionsfähigkeit eines Betriebskonzepts prüfen (siehe Kapitel 2.4.2).

Die bestehenden Ansätze werden zunächst hinsichtlich ihrer Eignung zur Lösung des Teilproblems anhand der zu erfüllenden Anforderungen diskutiert.

Bestehende Ansätze zur Anpassung von periodischen Fahrplänen

Die Ansätze von Van Aken et al. (2017b) und Looij (2017) sowie Masing et al. (2022) formulieren das Problem als Periodic Event Scheduling Problem und lösen es mit exakten Methoden (siehe Kapitel 2.5.2). Um das Problem mit einer exakten Methode zu lösen, erfolgt in den Ansätzen eine Reduktion der Problemkomplexität und teilweise auch eine Festlegung von laufzeitbezogenen Abbruchbedingungen (siehe Kapitel 2.5.2).

Der Problembeschreibung des Teilproblems am nächsten kommt der Ansatz von Masing et al. (2022) (siehe Kapitel 2.5.2). Auch in dem Ansatz von Masing et al. (2022) dient ein angepasster Liniennetzplan als Input. Der Liniennetzplan wurde an eine größere Abweichung der Infrastruktur (z. B. aufgrund einer Baumaßnahme) angepasst. Dies kann auch als Anwendung eines (angepassten) Betriebskonzepts verstanden werden.

Die berücksichtigten betrieblichen Maßnahmen (zeitliche Verschiebung, alternativer Fahrweg im Knoten) zur Anpassung des periodischen Fahrplans liegen innerhalb der Vorgaben aus Kapitel 3.4. Eine Reduktion der Problemkomplexität erfolgt im Ansatz von Masing et al. (2022), in dem nur eine komplette Sperrung eines Teils des S-Bahn-Netzes betrachtet wird und nicht mehrere Infrastruktureinschränkungen, wie in der aktuellen Infrastruktursituation G' , möglich sind. Außerdem wird der Einsatz betrieblicher Maßnahmen auf die nähere Umgebung der Sperrung beschränkt. Die Fahrlagen außerhalb dieses Bereichs sind als fixe Randbedingung nicht veränderbar.

Der von Masing et al. (2022) vorgesehene Anwendungsfall ist die Fahrplananpassung während der Betriebsplanung und nicht die Störungsdisposition. Die bereitgestellten Berechnungsergebnisse lassen erwarten, dass die Anforderung an eine schnelle Lösungsbereitstellung durch den Ansatz nicht erfüllt werden kann. Dazu kommt, dass die Anforderung nach Nachvollziehbarkeit der Adaption durch die Methode nicht direkt erfüllt wird, da kein direkter Zusammenhang zwischen den verletzten Anforderungen des periodischen Fahrplans und dem

durch das exakte Verfahren angepassten periodischen Fahrplan besteht (Nakamura et al. 2011, S. 2).

Da die weiteren Ansätze zur Anpassung von periodischen Fahrplänen ebenfalls exakte Methoden verwenden und zusätzlich größere Abweichungen zu Teilproblem III als beim Ansatz von Masing et al. (2022) bestehen, ist kein besseres Ergebnis bzgl. der diskutierten Anforderungen für eine Anwendung der weiteren Ansätze zu erwarten.

Bestehende Ansätze zur Prüfung der Funktionsfähigkeit eines Betriebskonzepts

In den Arbeiten von Brauner und Oetting (2019) und Brauner (2023) wurde ein Ansatz (weiter)entwickelt, der für ein gegebenes Betriebskonzept prüft, ob dieses einen periodischen Fahrplan der stabilen Phase ermöglicht. Der Kern des Ansatzes ist in beiden Arbeiten gleich (siehe Kapitel 2.4.2): durch analytische und konstruktive Methoden wird der Belegungsgrad von kritischen Infrastrukturelementen im periodischen Fahrplan der stabilen Phase berechnet und gegen einen Grenzwert geprüft. Außerdem wird geprüft, ob es bei Umleitungen zu Umlaufkonflikten kommt. Eine Lösung der erkannten Konflikte erfolgt nicht.

Die Anforderungen nach Nachvollziehbarkeit der Adaption wurde bei der Erstellung des Ansatzes berücksichtigt und es kann beispielsweise erkannt werden, an welchem Knoten ein Fahrplan der stabilen Phase ein Kapazitätskriterium nicht einhalten kann. Auch erfüllt eine Nutzung des Ansatzes die Anforderungen nach Kontinuität (siehe Kapitel 3.3), da es sich um bestehende Ansätze der SFP-basierten Störungsdisposition handelt.

Eine Erkennung oder Lösung von Infrastrukturverfügbarkeits-, Belegungs- und Umlaufkonflikten, wie in Kapitel 3.4 gefordert, erfolgt nicht. Eine Aussage über die verkehrliche Qualität unter Einbeziehung des Verkehrskonzepts erfolgt durch den Ansatz nicht (Brauner 2023, S. 80), da das Verkehrskonzept in dem Ansatz von Brauner (2023) erst in einem späteren Schritt erstellt wird. Hinsichtlich der verkehrlichen Qualität werden lediglich die Anzahl der entfallenden Halte und der Verspätungsabbau bei Wenden durch planmäßige Wartezeiten berücksichtigt. Die Anforderung nach Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Bewertung des Verkehrskonzepts wird somit nicht erfüllt. Eine Aussage über die betriebliche Qualität erfolgt nur über die Grenzwerte im Belegungsgrad und hat daher nur eine eingeschränkte Aussagekraft (Brauner 2023, S.80).

Ergebnis der Diskussion der beiden Ansätze

Sowohl die Ansätze zur Anpassung von periodischen Fahrplänen als auch die Ansätze zur Prüfung der Funktionsfähigkeit eines Betriebskonzepts, erfüllen die bestehenden Anforderungen nur teilweise. Eine Nutzung bestehender Ansätze wird daher nicht weiterverfolgt, sondern es wird ein neuer Ansatz entwickelt. Für diesen ist zunächst eine geeignete Methode auszuwählen.

Aufgrund der gleichen zentralen Anforderungen nach einer schnellen Lösungsbereitstellung und an die Nachvollziehbarkeit der Adaption kann analog zur Auswahl der Methode zur Lösung von Teilproblem I in Kapitel 4.2.2, darauf geschlossen werden, dass die Verwendung einer Heuristik zur Lösung der Anforderungen geeignet ist. Dies unterstützt auch die zuvor durchgeführte Analyse der bestehenden Ansätze. Ansätze, die ein zu Teilproblem III ähnliches Problem lösen und eine exakte Methode verwenden, erfüllen die Anforderungen nicht zufriedenstellend. Daher wird keine exakte Methode zur Lösung des Problems, sondern ein heuristischer Ansatz gewählt.

Je mehr problemspezifisches Wissen in einer Heuristik verwendet wird, desto besser ist das zu erwartende Ergebnis des Algorithmus (Weis et al. 2009, S. 34). Da problemspezifisches Wissen zur Eingrenzung und Strukturierung des Suchraums und/oder zur Lenkung der Heuristik genutzt werden kann (zum Beispiel die Erkennung und Lösung von Konflikten), sollte dieses verwendet werden.

Mit dem periodischen Fahrplan des regulären Betriebs ist eine Ausgangslösung gegeben, die für die Lösung von Teilproblem III im Sinne einer Verbesserungsheuristik angepasst werden kann. Dagegen würde bei einer Konstruktionsheuristik ein Fahrplan neu erstellt werden. Die Anforderung nach einer nachvollziehbaren Adaption wird bei einer Anpassung der Ausgangslösung besser erfüllt, da ein Zusammenhang zwischen der Ausgangslösung, den verletzten Bedingungen und der Anpassung der Lösung hergestellt werden kann. Daher sollte es sich bei der Heuristik um eine Verbesserungsheuristik handeln.

Entsprechend der Anforderung nach Kompatibilität sollten außerdem bestehende Ansätze der Störungsdisposition und der Fahrplananpassung verknüpft werden können. Als Verbesserungsheuristiken für die Anpassung von nicht-periodischen Fahrplänen, die die relevanten Anforderungen „Nachvollziehbarkeit der Adaption“ und „schnelle Lösungsbereitstellung“ erfüllen, bestehen lokale Suchen in Form von KE/KL-Heuristiken (siehe Kapitel 2.2.2). Daher wird zur Lösung von Teilproblem III eine KE/KL-Heuristik ausgewählt.

7.2.3 Erforderliche Modifikation der KE/KL-Heuristik für die Anwendung auf ein periodisches Fahrplankonzept

Als Methode für die Lösung von Teilproblem III wurde im vorangehenden Kapitel eine KE/KL-Heuristik ausgewählt. KE/KL-Heuristiken wurden, soweit bekannt, bisher nicht für die Anpassung von periodischen Fahrplänen genutzt. Im Weiteren sollen daher erforderliche Modifikationen für die Anwendung einer KE/KL-Heuristik auf die Anpassung von periodischen Fahrplankonzepten bestimmt werden.

KE/KL-Heuristiken lösen Konflikte in der zeitlichen Reihenfolge des Auftretens der Konflikte (siehe Kapitel 2.2.2), d. h. die Reihung der Konflikte in der Konfliktliste folgt einem zeitlichen Kriterium. Dadurch wird, zusammen mit der Einschränkung, dass eine KLA keine Folgekonflikte erzeugen darf, die zeitlich vor dem Erstkonflikt liegen, für nicht-periodische Fahrpläne die Terminierung der KE/KL-Heuristik sichergestellt (siehe Kapitel 2.2.2). Diese Einschränkung der KLA reduziert die erwartete Güte der Lösung und ist ein Kompromiss für den Zielkonflikt zwischen der erwarteten Güte der Lösung und der Terminierung der Suche, der aus der Problemkomplexität resultiert (siehe Kapitel 2.2.1).

Da das Fahrplankonzept der stabilen Phase periodisch ist und da aufgrund der unbekanntem Dauer der Einschwingphase auch der Startzeitpunkt der stabilen Phase unbekannt ist, können Konflikte nicht eindeutig in eine zeitliche Reihenfolge gebracht werden. Auch ist die oben angegebene Einschränkung der KLA (eine KLA darf keine Folgekonflikte erzeugen, die zeitlich vor dem Erstkonflikt liegen) nicht anwendbar. Eine KE/KL-Heuristik muss daher für die Anwendung auf periodische Fahrpläne angepasst werden.

Abbildung 7-1 zeigt ein Beispiel der unterschiedlichen initialen Konfliktlisten bei verschiedenen Startzeitpunkten einer KE/KL-Heuristik. Durch die Implementierung der Konfliktlösungen während der Abarbeitung der Konfliktliste, kann der resultierende Fahrplan von der Wahl des

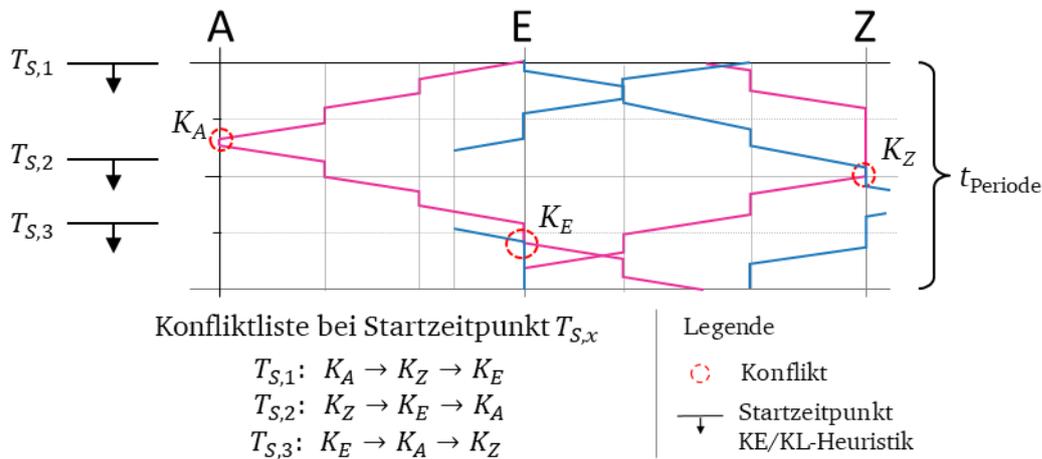


Abbildung 7-1: Zeit-Wege-Diagramm mit unterschiedlichen initialen Konfliktlisten bei verschiedenen Startzeitpunkten einer KE/KL-Heuristik

Startzeitpunkts abhängig sein. Ein eindeutiger Startzeitpunkt ist bei einem periodischen Fahrplan nicht gegeben.

Nach Anwendung einer KE/KL-Heuristik können im konfliktfreien Fahrplan betrieblich nicht optimale Konfliktlösungen (obsoleter Konfliktlösungen) verbleiben (siehe Kapitel 2.4.3). Im konfliktfreien Fahrplan sollten obsoleter Konfliktlösungen nicht vorkommen (siehe Kapitel 2.4.3). Anders als in der Disposition, die durch die Beschränkung der Fahrplananpassung auf einen Zeithorizont und die Nicht-Veränderbarkeit bereits umgesetzter Entscheidungen charakterisiert ist, können obsoleter Konfliktlösungen bei der Anpassung des periodischen Fahrplankonzepts der stabilen Phase umfassender adressiert werden. Die Änderung bzw. das Entfernen obsoleter Konfliktlösungen stellt eine Optimierung der durch die KE/KL-Heuristik erzeugten Lösung dar.

Bei der Änderung einer Konfliktlösung kann es zu Schleifen kommen (Beispiel in Chiang et al. 1998, S. 304 ff.). Diese Schleifen gefährden die Terminierung des Algorithmus und sind durch zusätzliche Mechanismen zu verhindern.

Beim Entfernen obsoleter Konfliktlösungen ist somit – wie bei der zeitlichen Reihenfolge der Konflikte – der Zielkonflikt zwischen der Terminierung der KE/KL-Heuristik und der Güte der Lösung zu berücksichtigen. Aufgrund des Zielkonflikts sollen nur die obsoleter Konfliktlösungen entfernt werden, die eine deutliche Verbesserung des Ergebnisses erwarten lassen. Da das Entfernen von Konfliktlösungen im Gegensatz zur Änderung einer Konfliktlösung die Anforderung nach möglichst wenigen Maßnahmen unterstützt, wird nur das Entfernen obsoleter Konfliktlösungen und nicht die Anpassung von obsoleter Konfliktlösungen geprüft.

Bei der Anpassung des periodischen Fahrplankonzepts bestehen ggf. betriebliche Maßnahmen aus dem Betriebskonzept des ausgewählten SFP, die durch Anpassungen in Modul 1 obsolet geworden sind. (Beispielweise ist ein alternativer Fahrweg im Knoten vorgesehen, durch eine Anpassung in Modul 1 verkehrt in diesem Knoten aber keine andere Linie mehr, sodass ein alternativer Fahrweg nicht erforderlich ist.) Die Anforderungen „Erforderlichkeit“ und „Zuverlässigkeit“ sprechen dafür, dass obsoleter Maßnahmen, die bereits im Betriebskonzept des ausgewählten SFP enthalten sind, beibehalten werden.

Argumente für eine Entfernung dieser obsoleter Konfliktlösungen sind der negative Einfluss auf die Güte der Lösung und die Anforderung nach wenigen Maßnahmen. Außerdem werden in

Modul 3 nur betriebliche Maßnahmen, die nicht Laufweg und Takt betreffen, berücksichtigt, und der Einfluss dieser betrieblichen Maßnahme auf die Anforderungen der Zuverlässigkeit kann als gering eingeschätzt werden. Zusätzlich könnten obsoletere Maßnahmen von Dritten (z. B. Fahrdienstleitern) erkannt werden. Durch nicht abgesprochenes Entfernen von obsoleten Konfliktlösungen könnte es so zu unklaren Situationen in der Disposition oder Kundenkommunikation kommen. Unter Berücksichtigung aller Argumente sollen auch betriebliche Maßnahmen aus dem Betriebskonzept des ausgewählten SFP hinsichtlich obsoletter Konfliktlösungen geprüft und diese ggf. entfernt werden.

Zusammenfassend wurde bestimmt, dass für die Anwendung einer KE/KL-Heuristik zur Lösung von Teilproblem III eine Anpassung an die Besonderheiten von periodischen Fahrplänen erforderlich ist. Als erforderliche Modifikationen wurden eine Anpassung der KE/KL-Heuristik hinsichtlich dem Nicht-Vorhandensein einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge und das Entfernen obsoletter Konfliktlösungen identifiziert.

7.2.4 Vorgehensweise

Für die Entwicklung der Algorithmen zur Sicherstellung der Umsetzbarkeit des linienspezifischen Betriebskonzepts in der stabilen Phase wurde mit einer KE/KL-Heuristik die Methode zur Lösung von Teilproblem III ausgewählt. Bevor aufbauend auf dieser Methode die Entwicklung der Algorithmen für Modul 3 erfolgt, wird in diesem Kapitel mit der Vorgehensweise der Aufbau des weiteren Kapitels 7 festgelegt.

In Kapitel 7.3 werden zunächst die in Kapitel 7.2.3 identifizierten erforderlichen Modifikationen der KE/KL-Heuristik für die Anwendung auf ein periodisches Fahrplankonzept bestimmt. Da bestehende Ansätze zum Entfernen obsoletter Konfliktlösungen auf der zeitlichen Reihenfolge der Konflikte aufbauen (siehe Chiang et al. 1998, Crespo 2020), wird zunächst eine Modifikation der KE/KL-Heuristik bzgl. des Nicht-Vorhandenseins einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge der Konflikte aufgrund des periodischen Charakters ausgewählt. Anschließend ist ein Ansatz zum Entfernen von obsoleten Konfliktlösungen zu bestimmen.

In Kapitel 7.4 wird Modul 3 beschrieben. Modul 3 basiert auf der KE/KL-Heuristik mit den in Kapitel 7.3 bestimmten Modifikationen zur Anwendung auf ein periodisches Fahrplankonzept. Da die beiden Modifikationen der KE/KL-Heuristik den Zielkonflikt zwischen Terminierung und Gütern der Lösung betreffen, wird in Kapitel 7.4 gesondert auf die Terminierung von Modul 3 eingegangen. Entsprechend der Systemarchitektur besteht eine Rückkopplung von Modul 3 an Modul 1 (siehe Kapitel 3.4). Diese Rückkopplung wird ebenfalls in Modul 7.4 festgelegt.

7.3 Modifikation der KE/KL-Heuristik

In Kapitel 7.2 wurde als Methode zur Erkennung und Lösung von Konflikten in der stabilen Phase eines Betriebskonzepts eine KE/KL-Heuristik ausgewählt. Außerdem wurden zwei erforderliche Modifikationen einer KE/KL-Heuristik für die Anwendung auf einen periodischen Fahrplan bestimmt. Die Modifikationen betreffen:

- das Nicht-Vorhandensein einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge und
- das Entfernen obsoletter Konfliktlösungen.

Ziel des Kapitels ist die Bestimmung der Modifikationen der KE/KL-Heuristik. Grundlagen für die Bestimmung der Modifikationen der KE/KL-Heuristik bilden die Anforderungen aus

Kapitel 3.3. Die Modifikation der KE/KL-Heuristik fließt in den KE/KL-Algorithmus zur Entwicklung von Modul 3 ein (Kapitel 7.4).

Entsprechend der Vorgehensweise aus Kapitel 7.2.4 wird zunächst eine Modifikation der KE/KL-Heuristik aufgrund der nicht-eindeutigen zeitlichen Reihenfolge der Konflikte bestimmt. Dafür werden folgende Schritte durchgeführt

1. Herleitung möglicher Alternativen
2. Diskussion der Alternativen
3. Auswahl einer der Alternativen

Anschließend wird ein Ansatz zum Entfernen obsoleter Konfliktlösungen ebenfalls durch ein Durchlaufen der drei Schritte bestimmt.

7.3.1 Herleitung von Alternativen für das Problem des Nicht-Vorhandenseins einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge von Konflikten

Die Herleitung der Modifikation der KE/KL-Heuristik erfolgt anhand der identifizierten generischen Eigenschaften aus Kapitel 2.6:

- Suchraum
- Zielfunktion
- Suchparameter
- Operatoren

Im Weiteren wird für die vier generischen Eigenschaften und deren Kombination diskutiert, ob eine Veränderung dieser eine Lösung für das Problem des Nicht-Vorhandenseins einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge von Konflikten darstellt.

Suchraum

Wie in Kapitel 7.2 dargelegt, kann die bisherige Lösung des Zielkonflikts (Güte der Lösung/Terminierung) basierend auf der eindeutigen zeitlichen Reihenfolge der Konflikte aufgrund des periodischen Fahrplans nicht angewendet werden. Wird der Suchraum, also der periodische Fahrplan, so verändert, dass dieser nicht mehr periodisch ist, kann die bisherige Herangehensweise beibehalten werden.

Für die Überführung in einen nicht-periodischen Fahrplan muss in dem periodischen Fahrplan ein Startzeitpunkt bestimmt werden. Der nicht-periodische Fahrplan hat anschließend eine Dauer entsprechend der Periode des periodischen Fahrplans. Das Vorgehen entspricht der Festlegung einer zeitlichen Reihenfolge der Konflikte. Somit ist ein Ansatz zur Modifikation der KE/KL-Heuristik die Umwandlung des periodischen Fahrplans in einen nicht-periodischen Fahrplan.

Kombiniert werden kann dieser Ansatz mit der Durchführung mehrerer Durchläufe der KE/KL-Heuristik. Durch unterschiedliche Startzeitpunkte ändert sich die Reihenfolge der Konflikte und damit der Suchraum. Dadurch kann es zu unterschiedlichen Lösungen durch die KE/KL-Heuristik mit unterschiedlicher Güte kommen. Die Durchführung mehrerer Durchläufe erhöht die Dauer der Lösungsbereitstellung.

Zielfunktion

Da es sich bei einer KE/KL-Heuristik um eine lokale Suchstrategie handelt, bei der Konflikte in einer bestimmten Reihenfolge gelöst werden, besteht keine globale Zielfunktion (siehe Kapitel 2.2.2). Somit ist auch keine Veränderung der Zielfunktion möglich.

Bei KE/KL-Heuristiken können aber Bewertungsfunktionen bestehen, die für die Lösung der einzelnen Konflikte verwendet werden. Eine Veränderung dieser Bewertungsfunktion während der Durchführung der KE/KL-Heuristik hat aber keine Auswirkung auf die Reihenfolge der Lösung der Konflikte.

Die Veränderung der Zielfunktion wird nicht weiterverfolgt.

Suchparameter

Durch den periodischen Fahrplan sind zwei Konflikte zeitlich „bidirektional“ miteinander verbunden, d. h. die zeitliche Reihung in der Konfliktliste ist nicht mehr eindeutig. Ein Ansatz kann daher sein, eine nicht-zeitliche Reihung der Konflikte anzuwenden.

Bei der Erstellung von Fahrplänen besteht bereits der Ansatz, dass als weiteres Kriterium zur Reihung der Konflikte die Prioritäten der am Konflikt beteiligten Züge verwendet werden (asynchrone KE/KL-Heuristik z. B. Kuckelberg und Wendler 2008).

Neben der Priorität der beteiligten Züge könnten weitere Eigenschaften von Konflikten zur Reihung verwendet werden. Weitere Eigenschaften von Konflikten sind (EBW-Buch, S. 241):

- Konfliktort
- Konfliktart
- Schwere
- Eigenschaften der beteiligten Züge (z. B. Prioritäten)

In der Diskussion der Modifikationen der KE/KL-Heuristik werden daher alternative Eigenschaften von Konflikten hinsichtlich der Eignung als Kriterium zur Reihung der Konflikte diskutiert.

Operatoren

In Kapitel 3.4 sind die betrieblichen Maßnahmen der KE/KL-Heuristik vorgegeben. Außerdem hat eine Änderung der Operatoren analog zur Änderung der Bewertungsfunktion keinen Einfluss auf die Reihenfolge zur Lösung der Konflikte. Daher wird eine Veränderung des Operators nicht weiterverfolgt.

Kombination

Da die Veränderung der Zielfunktion und die Veränderung der Operatoren nicht weiterverfolgt werden, wird die Kombination der Veränderung von Suchraum und Suchparameter diskutiert.

Ein weiterer Ansatz könnte sich aus der Verknüpfung der Veränderung des Suchraums und der Veränderung der Suchparameter ergeben. Der Suchraum wird durch die zeitlichen und räumlichen Vorgaben begrenzt (siehe Kapitel 7.2.1). Ansätze, die sich durch eine Veränderung der zeitlichen Vorgaben ergeben, wurden bereits diskutiert. Die räumlichen Vorgaben (das S-Bahn-Netz) sind als fix anzusehen (z. B. ist eine Änderung der Topologie nicht möglich). Der Konfliktort wurde bei der Diskussion der Suchparameter bereits als ein alternatives Kriterium

zur Reihung der Konflikte bestimmt. Ein weiterer Ansatz durch die Verknüpfung der Veränderung des Suchraums und der Veränderung der Suchparameter konnte nicht identifiziert werden.

Zusammenfassend wurden als mögliche Modifikationen bestimmt:

1. Umwandlung des periodischen Fahrplans in einen nicht-periodischen Fahrplan und
2. alternatives Kriterium zur zeitlichen Reihung der Konflikte.

Im Weiteren werden die hergeleiteten möglichen Modifikationen anhand der Anforderungen an die Lösung von Teilproblem III diskutiert.

7.3.2 Diskussion der Alternativen für das Problem des Nicht-Vorhandenseins einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge von Konflikten

In der Diskussion der Alternativen für das Problem des Nicht-Vorhandenseins einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge von Konflikten wird für die zuvor hergeleiteten möglichen Modifikationen der KE/KL-Heuristik zunächst die Umsetzung der Ansätze dargestellt. Darauf aufbauend werden die Ansätze anhand der relevanten Anforderungen und dem Zielkonflikt zwischen Terminierung und erwarteter Güte der Lösung diskutiert.

Die möglichen Ansätze zur Modifikation der KE/KL-Heuristik, die im Weiteren diskutiert werden, sind (siehe Kapitel 7.3.1):

1. Umwandlung des periodischen Fahrplans in einen nicht periodischen Fahrplan
2. alternatives Kriterium zur Reihung der Konflikte.

Da beide Ansätze die Grundprinzipien der Konflikterkennung und Konfliktlösung beibehalten, kann die Diskussion der Güte der Lösung durch zwei problembezogene Anforderungen konkretisiert werden.

Die Sicherstellung der Terminierung, der aufgrund der Problemkomplexität eine besondere Bedeutung zukommt, erfordert eine Einschränkung der Berücksichtigung der Folgekonflikte der KE/KL-Heuristik (siehe Kapitel 2.2.2). Diese Einschränkung geht i. d. R. mit einer negativen Auswirkung auf die Güte der Lösung einher. Um die negativen Auswirkungen auf die Güte möglichst gering zu halten, sollten die gewählten Einschränkungen der berücksichtigten Folgekonflikte idealerweise mit der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten und/oder die Schwere der Folgekonflikte gekoppelt sein.

Hat ein Kriterium zur Reihung der Konflikte nur wenige Ausprägungen, kann die Hinzunahme eines weiteren Kriteriums die Güte der Lösung durch eine Lockerung der Einschränkungen der KLA erhöhen. Gleichzeitig gilt, dass je mehr Einschränkungen für die Folgekonflikte der KLA bestehen, desto geringer ist die zu erwartende Güte der Lösung. Eine weitere Anforderung ist somit, dass bei der Anwendung eines Kriteriums möglichst geringe Einschränkungen für die Folgekonflikte der KLA bestehen sollen. Außerdem sollte bei der Kombination von Kriterien ein Mehrwert gegenüber der Nutzung eines der Kriterien (oder einer Teilmenge) bestehen.

Ein Beispiel für die Nutzung mehrerer Kriterien ist die asynchrone Fahrplananpassung, bei der neben der zeitlichen Reihenfolge zur Reduzierung der Problemkomplexität eine Priorität basierend z. B. auf der Zugattung angewendet wird.

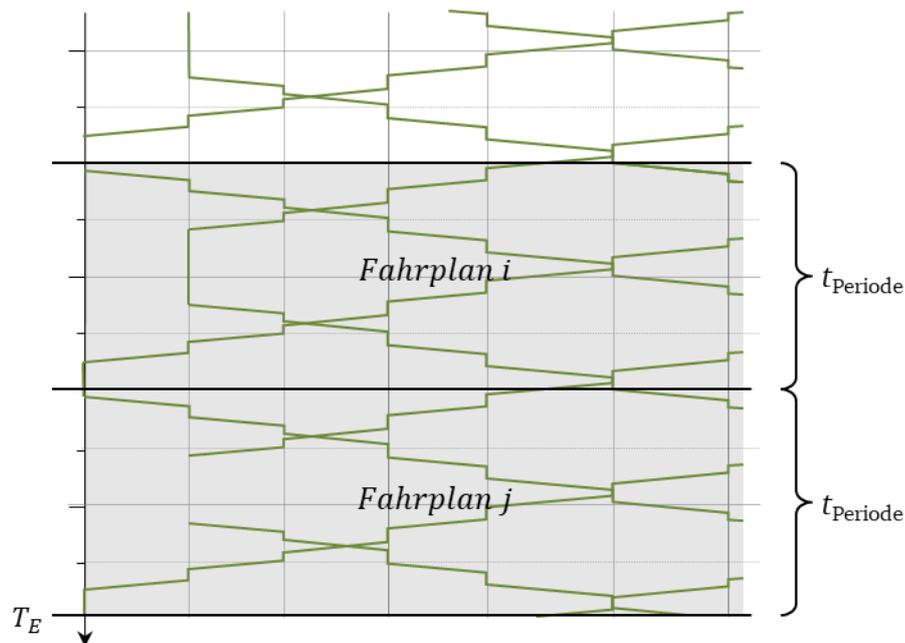


Abbildung 7-2: Zeit-Wege-Diagramm mit Ergebnis der KE/KL-Heuristik und Endzeitpunkt der KE/KL-Heuristik (T_E)

Nachdem im weiteren Verlauf des Kapitels die möglichen Modifikationen diskutiert wurden, wird anschließend eine der Modifikationen ausgewählt (Kapitel 7.3.3).

Umwandlung des periodischen Fahrplans in einen nicht-periodischen Fahrplan

Für die Umwandlung eines periodischen Fahrplans in einen nicht-periodischen Fahrplan ist ein Startzeitpunkt zu bestimmen. Dies kann erfolgen durch

- die Bestimmung eines zeitlich ersten Konflikts (nicht mit dem Begriff „Erstkonflikt“ zu verwechseln; siehe Kapitel 2.2.1) oder
- die Festlegung eines bestimmten Zeitpunkts als Startzeitpunkt.

Außerdem kann der nicht-periodische Fahrplan aus mehr als einem Zyklus des periodischen Fahrplans bestehen. Daher ist zusätzlich zum Startzeitpunkt auch das Ende des nicht-periodischen Fahrplans festzulegen. Der nicht-periodische Fahrplan kann enden nach

- einer bestimmten Anzahl von Zyklen (fixer Endzeitpunkt) oder
- dynamisch, sobald keine wesentlichen Änderungen in einem Zyklus auftreten (dynamischer Endzeitpunkt).

Ein dynamisches Ende bedeutet, dass die KE/KL-Heuristik den Zyklus so lange durchläuft, bis Fahrplan j in einem Zeitraum, dessen Länge die Periodendauer t_{Periode} ist, ungefähr dem Fahrplan i des gleichlangen, direkt davor angrenzenden Zeitraums entspricht (siehe Abbildung 7-2). Der Endzeitpunkt der KE/KL-Heuristik (T_E) und somit auch der Endzeitpunkt des nicht-periodischen Fahrplans entspricht dem Endzeitpunkt von Fahrplan j ($T_{E,j}$). Somit gilt:

$$\begin{aligned} & \{ \text{Fahrplan } j \mid T_{E,j} = T_E \wedge t_{\text{Fahrplan}} = t_{\text{Periode}} \} \\ & \approx \{ \text{Fahrplan } i \mid T_{E,i} = T_E - t_{\text{Periode}} \wedge t_{\text{Fahrplan}} = t_{\text{Periode}} \} \end{aligned}$$

Der Fahrplan j ist das Ergebnis der KE/KL-Heuristik. Durch den Vergleich der Ausgangslage (periodischer Fahrplan mit Konflikten) und dem Fahrplan des letzten Zeitraums sind die

erforderlichen betrieblichen Maßnahmen zu identifizieren (z. B. eine zeitliche Verschiebung in einem Knoten).

Als Terminierungskriterium bei der Nutzung eines dynamischen Endzeitpunkts wird geprüft, ob eine wesentliche Änderung des Fahrplans im letzten Zeitraum erfolgt ist. Als eine wesentliche Änderung kann die Implementierung einer KLA oder das Entfernen einer Konfliktlösung angesehen werden. Wenn im letzten Zeitraum keine KLA implementiert wurde oder keine Konfliktlösung entfernt wurde, dann kann kein Konflikt in diesem Zeitraum bestehen. Somit ist das Ergebnis der KE/KL-Heuristik bei Terminierung konfliktfrei.

Nachdem die mögliche Umsetzung der Ansätze dargestellt wurde, erfolgt darauf aufbauend die Diskussion der Ansätze anhand der relevanten Anforderungen und dem Zielkonflikt.

Besteht der nicht-periodische Fahrplan aus mehreren Zyklen, können durch das Auftreten und Lösen von Folgekonflikten die identifizierten betrieblichen Maßnahmen nicht ohne weitere Aufbereitung (z. B. durch eine KE/KL-Historie) den in der Ausgangslage vorhandenen Konflikten zugeordnet werden. Die Anforderung an die Nachvollziehbarkeit ist somit nur bedingt gegeben.

Durch das mehrmalige Durchlaufen des Zyklus können parallel nicht notwendige Maßnahmen in den Durchläufen erkannt und entfernt werden (gefordertes Entfernen obsoleter Konfliktlösungen; siehe Kapitel 7.2.3).

Eine eindeutige Reihung der Konflikte allein mit dem Kriterium „Zeitpunkt“ ist nicht möglich, wenn der Zeitpunkt zweier Konflikte gleich ist. Diese Problematik besteht auch bei der Anwendung von KE/KL-Heuristiken auf nicht-periodische Fahrpläne und die dort verwendeten Lösungen können übernommen werden.

Für die Diskussion wird anhand des Zielkonflikts zunächst die Terminierung und die Güte der Lösung bei fixem Endzeitpunkt betrachtet.

Die Terminierung des Algorithmus wird, wie bei einer KE/KL-Heuristik üblich, durch die Vorgabe eines Startzeitpunkts, die zeitliche Reihenfolge und die Einschränkung, dass eine Konfliktlösung keine Folgekonflikte zeitlich vor dem Erstkonflikt erzeugen darf, sichergestellt.

Hinsichtlich der Güte der Lösung bei fixem Endzeitpunkt wird durch die Bedingungen, dass eine Konfliktlösung keine Folgekonflikte zeitlich vor dem Erstkonflikt erzeugen darf, der Zeitraum, in dem Folgekonflikte für eine KLA zulässig sind, durch den fixen Endzeitpunkt zunehmend kleiner. Dies schränkt die KLA vor allem für Konflikte gegen Ende des nicht-periodischen Fahrplans ein. Eine Kopplung mit der Wahrscheinlichkeit zum Auftreten von Folgekonflikten besteht dabei nicht. Abbildung 7-3 zeigt ein Beispiel für die Einschränkung der KLA. Die in der Abbildung gezeigte KLA ist nicht möglich, da Folgekonflikte zeitlich vor dem Erstkonflikt entstehen.

Auch für den dynamischen Endzeitpunkt wird die Terminierung und die Güte der Lösung diskutiert. Bei einem dynamischen Endzeitpunkt kann es zu langen Berechnungsdauern oder (Endlos)Schleifen (ggf. über mehrere Zyklen) kommen. Damit trotz Endlosschleifen eine Lösung bereitgestellt werden kann, sollten diese erkannt werden können.

Da (Endlos)Schleifen über eine Vielzahl von Zyklen laufen können, ist dennoch zusätzlich eine fixe Abbruchbedingung erforderlich. Dazu kann zu einem fixen Endzeitpunkt übergegangen

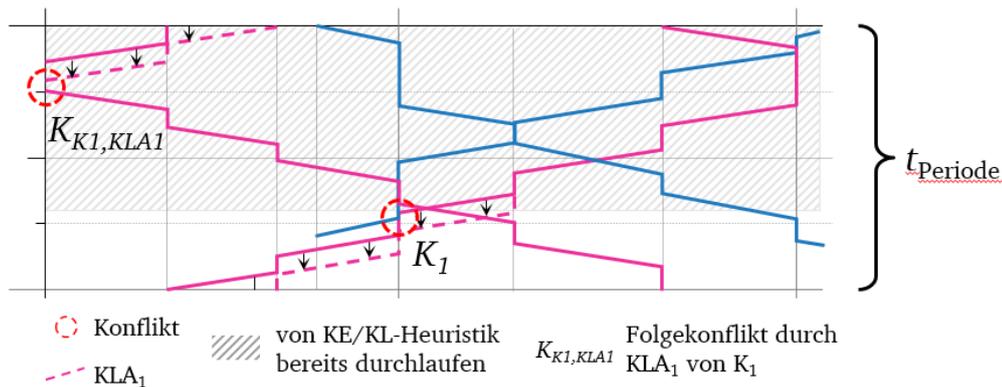


Abbildung 7-3: Einschränkung einer KLA in einem periodischen Fahrplan bei einer synchronen Reihung der Konflikte in der Konfliktliste

werden. Durch einen Übergang zu einem fixen Endzeitpunkt erfolgt kein direkter Abbruch der KE/KL-Heuristik und es besteht die Möglichkeit, dennoch eine konfliktfreie Lösung zu erhalten. Der Übergang kann beispielsweise nach einer fest vorgeschriebenen Zeitdauer oder einer vorgegebenen Verbesserung zwischen zwei Zyklen erfolgen.

Bei der Güte der Lösung entfällt für den dynamischen Endzeitpunkt die Einschränkung der KLA durch den fixen Endzeitpunkt.

Sowohl bei einem dynamischen als auch bei einem festen Endzeitpunkt hat die Wahl des Startzeitpunkts einen Einfluss auf die Güte der Lösung. Der Startzeitpunkt stellt somit einen weiteren Einflussfaktor für die Güte der Lösung dar. Eine mögliche Erweiterung des Ansatzes besteht darin, den nicht-periodischen Fahrplan mit verschiedenen Startzeitpunkten zu durchlaufen.

Alternatives Kriterium zur Reihung der Konflikte in der Konfliktliste

Als alternative Kriterien zur Reihung der Konflikte werden geprüft (siehe Kapitel 7.3.1):

- Konfliktort
- Konfliktart
- Konfliktschwere
- Eigenschaften der beteiligten Züge (z. B. Prioritäten)

Weiterhin kann eine zufällige Reihung der Konflikte erfolgen und die Reihung kann auf mehreren Kriterien basieren. Die Eignung der verschiedenen Kriterien zur Reihung der Konflikte wird im Weiteren diskutiert. Mögliche Kombinationen von Kriterien werden bei der Auswahl eines Kriteriums in Kapitel 7.3.3 berücksichtigt.

Konfliktort (Räumliche Reihung)

Bei der Nutzung des Konfliktorts als Kriterium zur Reihung werden Konflikte nach einer räumlichen vorgegebenen Reihenfolge gelöst. Eine solche Reihung erfolgt beispielsweise bei der Erstellung von SFP durch die Anwendung von sogenannten Störfalltrichtern (siehe Kapitel 2.4.1).

Die Reihung der Konflikte kann ausgehend von einem Startpunkt entsprechend der Topologie des Netzes erfolgen. Die KE/KL-Heuristik löst die Konflikte in Reihenfolge der angrenzenden

Kanten und Knoten. Somit ergibt sich eine durch die Topologie vorgegebene Reihenfolge der Knoten und Kanten, in denen ein Konflikt gelöst wird.

Das Beispiel aus Abbildung 7-1 umfasst drei Konflikte $\{K_A, K_E, K_Z\}$ für die Strecke A – Z. Die Reihung der Konflikte anhand des Kriteriums „Konfliktzeit“ führt zur Reihenfolge: K_A, K_Z, K_E . Eine Reihung der Konflikte anhand des Kriteriums „Konfliktort“ mit dem Startknoten A führt zur Reihenfolge: K_A, K_E, K_Z .

Für die Reihung der Konflikte können auch weitere Kriterien der Knoten und Kanten berücksichtigt werden, für die Konflikte prioritär gelöst werden, z. B. (SFP-)Wendebahnhöfe oder Einfädelungen. Durch weitere Kriterien kann die Topologie ein nachgeordnetes Kriterium für die Reihung der Konflikte werden.

Mit der Einschränkung, dass eine Konfliktlösung keine Folgekonflikte in Knoten und Kanten erzeugen darf, die im Suchraum bereits betrachtet wurden, ist eine Terminierung sichergestellt. Diese Einschränkung schränkt gleichzeitig die KLA vor allem für Konflikte gegen Ende der räumlichen Reihenfolge ein, da der Raum, in dem Folgekonflikte zulässig sind, zunehmend kleiner wird.

Die Wahl des Startpunkts und weiterer Kriterien können Auswirkungen auf die Güte der Lösung haben. Einen positiven Einfluss auf die Güte kann es haben, wenn eine Wendemöglichkeit als Startpunkt ausgewählt wird. Dadurch bildet i. d. R. auch eine Wendemöglichkeit den Endpunkt der Reihung. Der in der Wendemöglichkeit vorhandene Wendepuffer bietet die Möglichkeit von zeitlicher Konfliktlösung (bzw. verringert die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Folgekonflikten räumlich vor dem Erstkonflikt).

Ein Vorteil des Kriteriums ist, dass eine Fokussierung auf „kritische Punkte“ möglich ist, z. B. Wendebahnhöfe. Für diese Punkte kann somit schnell erkannt werden, ob eine Lösung möglich ist.

Eine eindeutige Reihung der Konflikte alleine mit dem Kriterium „Konfliktort“ ist nicht immer möglich (z. B., wenn der Konfliktort zweier Konflikte gleich ist oder ggf. auch, wenn das Netzwerk verzweigt ist).

Konfliktart

In Kapitel 3.4 wurde festgelegt, dass drei verschiedene Konfliktarten berücksichtigt werden. Das Kriterium hat somit nur drei Ausprägungen (Infrastrukturverfügbarkeits-, Belegungs- und Umlaufkonflikt; bzw. vier, wenn Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte gesondert betrachtet werden).

Für die Reihung der Konflikte ist eine Reihung der Konfliktarten vorzugeben. Die Konflikte werden dann in der Reihenfolge entsprechend Ihrer Konfliktart gelöst (z. B. zunächst alle Infrastrukturverfügbarkeits-, dann alle Belegungs- und abschließend alle Umlaufkonflikte).

Umlaufkonflikte kommen nur an Wendebahnhöfen oder Bahnhöfen mit Übergang vor. Diese Konfliktart ist somit eng verbunden mit dem Konfliktort.

Eine Terminierung der KE/KL-Heuristik mit dem Kriterium „Konfliktart“ ist sichergestellt, wenn keine Folgekonflikte der gleichen oder bereits behandelten Konfliktart zugelassen werden. Das folgende Beispiel verdeutlicht diese Bedingungen. Sieht die Reihung vor, zunächst Belegungs- und anschließend Umlaufkonflikte zu bearbeiten, dann dürfen bei der Lösung von Belegungs-

konflikten als Folgekonflikte keine Belegungskonflikte erzeugt werden. Bei der Lösung der Umlaufkonflikte dürfen als Folgekonflikte keine Umlauf- (gleiche Konfliktart) und auch keine Belegungskonflikte (bereits behandelte Konfliktart) erzeugt werden. Somit dürfen keine Folgekonflikte bei der Lösung von Umlaufkonflikten erzeugt werden.

Diese Einschränkung hat auch Einfluss auf die Güte der Lösung. Außerdem ist anzunehmen, dass eine getrennte Betrachtung der Konfliktarten keine Lösung (mit höherer Güte) ermöglicht, da KLA oftmals Belegungs- oder Umlaufkonflikte als Folgekonflikte aufweisen. Der negative Einfluss auf die Güte wird auch durch die Anforderung nach integrierter Berücksichtigung von Fahrplan und Fahrzeugumlaufplan (siehe Kapitel 3.4) deutlicher, der durch eine Trennung der Konfliktarten nicht entsprochen wird.

Aufgrund der wenigen Ausprägungen des Kriteriums ist davon auszugehen, dass eine eindeutige Reihung der Konflikte ohne weitere Kriterien nicht möglich ist. Durch die Kombination mit einem zweiten Kriterium kann die Einschränkung der KLA gelockert und eine eindeutige Reihung hergestellt werden.

Schwere der Konflikte

Die Schwere des Konflikts beschreibt die Auswirkung der Konfliktlösung auf die beteiligten Züge sowie ggf. weitere Züge durch Folgekonflikte (siehe Kapitel 2.2.1). Die Reihung der Konflikte kann absteigend nach ihrer Schwere erfolgen.

Für die Terminierung ist eine Modifizierung der Einschränkung der KLA erforderlich, z. B. die Bedingung, dass die Folgekonflikte eine geringere Schwere haben müssen als der Erstkonflikt. Da sich die Schwere eines Konflikts durch die Implementierung von Konfliktlösungen anderer Konflikte ändern kann, ist eine Terminierung durch die zuvor genannte Bedingung nicht sichergestellt.

Durch die Einschränkung, dass Folgekonflikte eine geringere Schwere aufweisen müssen, besteht eine Einschränkung der KLA vor allem für Konflikte mit geringer Schwere. Eine Verknüpfung mit der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten und die Schwere von Folgekonflikten besteht, wenn die Folgekonflikte in die Berechnung der Schwere einfließen und somit die Wahrscheinlichkeit für Auftreten und Schwere von Folgekonflikten bei Konflikten mit geringer Schwere kleiner ist.

Bei einer Reihung der Konflikte ausschließlich anhand der Schwere des Konflikts ist die Terminierung gesondert sicherzustellen.

Eigenschaften der beteiligten Züge

Da nur Konflikte zwischen S-Bahn-Zügen berücksichtigt (siehe Kapitel 7.2.1) und die Zugcharakteristika der S-Bahn-Züge als gleich angenommen werden (siehe Kapitel 3.2), bestehen Unterschiede zwischen den an Konflikten beteiligten Zügen nur bzgl.

- der Linienzuordnung und
- der aktuellen Fahrtrichtung (z. B. in Richtung Kernbereich oder in Richtung Randbereich).

Die beiden Eigenschaften werden im Weiteren bzgl. ihrer Eignung als Kriterium zur Reihung der Konflikte diskutiert.

Die **Linienzuordnung** eines Fahrzeugs hat vor allem eine verkehrliche Bedeutung. Den Linien kann daher anhand einer verkehrlichen Eigenschaft eine Priorität zugeordnet werden. Eine verkehrliche Eigenschaft ist z. B. die Erschließungsfunktion (siehe Kapitel 2.4.2). Die Zuordnung einer verkehrlichen Priorität hat Parallelen zur Zugpriorität bei asynchronen KE/KL-Heuristiken.

Bei der Nutzung der Linienzuordnung als Kriterium ist ein Konflikt durch die Linien der am Konflikt beteiligten Züge gekennzeichnet. Abbildung 7-4 zeigt ein Beispiel für eine Reihung der Konflikte, bei der Linie S1 eine höhere Priorität als Linie S2 aufweist.

Da die Anzahl der Linien relativ gering ist, kann ein Kriterium auf Basis der Linienzuordnung nur wenige Ausprägungen haben. Dazu kommt, dass durch den Taktverkehr und der damit vorgegebenen Reihung der Züge hinsichtlich ihrer Linienzuordnung, die Wahrscheinlichkeit für die Kombination der Linien der an einem Konflikt beteiligten Züge in der stabilen Phase nicht zufällig ist. Die Anzahl der potenziellen Kombinationen von Linien konfliktärer Züge ist daher gering.

Eine Terminierung kann durch die Bedingung sichergestellt werden, dass die Folgekonflikte von KLA keine Züge mit Linien der gleichen oder einer höheren Priorität beinhalten dürfen. Diese Einschränkung der KLA ist nicht verknüpft mit dem Auftreten von Folgekonflikten, wie durch die Anforderung zu Beginn dieses Kapitels gefordert. Die Einschränkungen der KLA betrifft vor allem Züge mit einer geringen verkehrlichen Priorität.

Aufgrund der geringen Anzahl an Ausprägungen des Kriteriums ist eine eindeutige Reihung der Konflikte ohne weitere Kriterien nicht möglich.

Als Ausprägung für die **Fahrrichtungen** können besondere Punkte eines Laufwegs, wie z. B. Wendebahnhöfe, Einfädelungen und deren Lage im Netz (z. B. im Kernbereich oder im Netzast) herangezogen werden. Ausprägungen der Fahrrichtung sind dann beispielsweise „Fahrt in Richtung des im SFP festgelegten Wendebahnhofs im Kernnetz“ oder „Fahrt in Richtung regulärer Wendebahnhof im Netzast“.

Da im Kernbereich eine hohe Auslastung zu erwarten ist (siehe Kapitel 2.4.1), ist anzunehmen, dass in regulären Wendebahnhöfen im Randbereich höhere Wendepuffer bestehen. Somit hat es Auswirkungen auf die Wahrscheinlichkeit von Folgekonflikten, ob ein Zug in Richtung

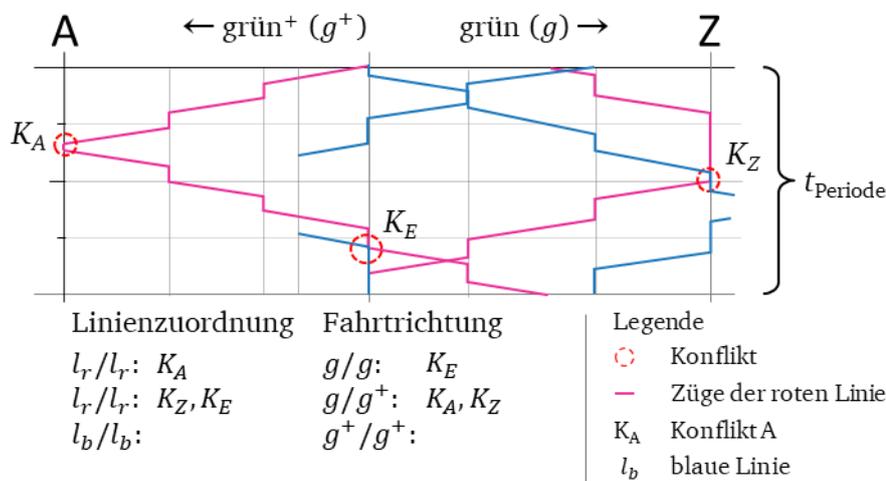


Abbildung 7-4: Zeit-Wege-Diagramm mit Reihung von Konflikten anhand der Linienzuordnung bzw. der Fahrrichtung der am Konflikt beteiligten Züge

Kernbereich fährt oder in Richtung eines regulären Wendebahnhofs. Werden diese bei der Bestimmung der Ausprägungen berücksichtigt, wird der Anforderung, dass Einschränkungen mit der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Folgekonflikten gekoppelt sind, entsprochen.

Ein Ansatz zur Berücksichtigung der Fahrtrichtung besteht mit der Kategorisierung von Zügen in die Kategorien „grün“ und „grün+“ (Kapitel 2.4.3). Die Kategorie „grün“ entspricht einer Fahrt in Richtung der Störung und „grün+“ einer Fahrt von der Störung weg. Züge der gelben und roten Kategorie werden entweder in der Einschwingphase zu Zügen der grünen Kategorie (da diese durch betriebliche Maßnahmen wieder auf dem vorgesehenen Laufweg verkehren oder abgestellt werden) oder stehen aufgrund der Störung nicht zur Verfügung.

Bei Zwei-Zug-Konflikten sind drei Kombinationen an Fahrtrichtungen bei Konflikten möglich; das Kriterium hat somit nur drei Ausprägungen. Ein Konflikt mit zwei Zügen, die in den Kernbereich einfahren, hat relativ zu einem Konflikt, bei dem ein Zug aus dem Kernbereich hinausfährt, eine höhere Wahrscheinlichkeit auf Folgekonflikte. Sortiert nach der Wahrscheinlichkeit der Folgekonflikte von hoch bis gering sind die Ausprägungen somit: „grün/grün“, „grün/grün+“ und „grün+/grün+“. Abbildung 7-4 zeigt ein Beispiel für die Reihung von Konflikten entsprechend der Kategorisierung von Zügen in den Kategorien „grün“ und „grün+“.

Durch das Kriterium „Fahrtrichtung“ ist die Terminierung sichergestellt, wenn Folgekonflikte der gleichen Ausprägung und der bereits behandelten Ausprägungen nicht zugelassen werden. Bezüglich der Güte der Lösung besteht eine Verknüpfung der Einschränkungen der KLA zur Wahrscheinlichkeit von Folgekonflikten, wenn die Möglichkeit umgesetzt wird, dass die Reihung der Konflikte absteigend nach der Wahrscheinlichkeit für Folgekonflikte erfolgt.

Aufgrund der geringen Anzahl an Ausprägungen des Kriteriums ist eine eindeutige Reihung der Konflikte ohne weitere Kriterien nicht möglich.

Zufällige Reihung

Eine weitere Möglichkeit ist eine zufällige Reihung der Konflikte.

Durch eine zufällige Reihung ist die Terminierung der Suche nicht sichergestellt. Außerdem ist eine zufällige Reihung nicht problembezogen und hat keine Verknüpfung mit dem Auftreten von Folgekonflikten. Ein weiteres Kriterium für eine eindeutige Reihung ist bei einer zufälligen Reihung nicht erforderlich.

Eine zufällige Reihung ist aufgrund der nicht sichergestellten Terminierung und des negativen Einflusses auf die Güte der Lösung zu vermeiden. Eine zufällige Reihung wird daher nicht weiter als alleiniges Kriterium diskutiert. Eine zufällige Reihung kann aber angewendet werden, wenn ein Kriterium zu keiner eindeutigen Reihung führt (z. B. Kriterium Ort: zwei Konflikte am gleichen Ort).

7.3.3 Auswahl einer Alternative zur Reihung von Konflikten in der Konfliktliste von KE/KL-Heuristiken

In der Diskussion (Kapitel 7.2.2) wurden die zuvor hergeleiteten Modifikationen der KE/KL-Heuristik bzgl. der Eignung als Ersatz für die nicht-eindeutige zeitliche Reihenfolge der

Konflikte bei der Anwendung der KE/KL-Heuristik auf das periodische Fahrplankonzept der stabilen Phase diskutiert. Die beiden diskutierten Modifikationen sind:

1. Umwandlung des periodischen Fahrplans in einen nicht periodischen Fahrplan
2. alternatives Kriterium zur Reihung der Konflikte

Im Folgenden wird eine Modifikation der KE/KL-Heuristik für die Lösung des Zielkonflikts anhand der diskutierten Anforderungen ausgewählt. Die ausgewählte Modifikation der KE/KL-Heuristik fließt anschließend in den KE/KL-Algorithmus für die Anpassung des Fahrplankonzepts der stabilen Phase ein (Kapitel 7.4).

Die in Kapitel 7.3.2 diskutierten Alternativen zur Reihung von Konflikten sind:

- Zeitpunkt (mit Veränderung des Suchraums) mit fixem Endzeitpunkt
- Zeitpunkt (mit Veränderung des Suchraums) mit dynamischem Endzeitpunkt
- Konfliktort
- Konfliktart
- Linienzuordnung
- Fahrtrichtung
- Schwere der Konflikte
- zufällige Reihung

Durch die Modifizierung der Beschränkung der KLA kann bei allen Kriterien außer der Schwere der Konflikte und einer zufälligen Reihung eine Terminierung sichergestellt werden. Daher werden die beiden Kriterien („Schwere“ und „zufällige Reihung“) nicht als eigenständiges Kriterium weiterverfolgt.

Für die Kriterien „Konfliktart“, „Linienzuordnung“ und „Fahrtrichtung“ existieren nur wenige Ausprägungen (drei Konfliktarten, Anzahl der Linien bzw. Kombinationen der Fahrtrichtungen der am Konflikt beteiligten Züge). Um eine deutliche Einschränkung der KLA zu vermeiden, ist für die drei Kriterien deshalb die Einbeziehung mindestens eines weiteren Kriteriums erforderlich.

Die Kriterien „Konfliktart“ und „Linienzuordnung“ haben außerdem keine Kopplung mit der Wahrscheinlichkeit auf Folgekonflikte. Daher werden die beiden Kriterien („Konfliktart“ und „Linienzuordnung“) nicht weiterverfolgt.

Aufgrund der strikten Einschränkung der KLA durch die geringe Anzahl an Ausprägungen des Kriteriums „Fahrtrichtung“ ist die Kombination mit einem weiteren Kriterium erforderlich. Durch den räumlichen Bezug der Fahrtrichtung bietet sich der Konfliktort als zweites Kriterium an. Durch die Einbeziehung des Kriteriums „Fahrtrichtung“ und damit der Wahrscheinlichkeit auf Folgekonflikte besteht ein Mehrwert im Vergleich zur alleinigen Nutzung des Kriteriums „Konfliktort“.

Die erforderlichen Beschränkungen der KLA sind in den Alternativen unterschiedlich strikt, was sich unterschiedlich auf die Verringerung der erwarteten Güte der Lösung auswirkt. Die Kriterien „Zeitpunkt“ und „Konfliktort“ haben einen großen Wertebereich (Ausprägungen) sodass bei einem periodischen Fahrplan erst gegen Ende des Wertebereichs (Zeitpunkt: zeitliches Ende eines Zyklus; Konfliktort: räumliches „Ende“ der gewählten Reihenfolge der Knoten und Kanten) eine deutliche Einschränkung der KLA erfolgt. Durch die Einbeziehung einer Veränderung des Suchraums bei dem Kriterium „Zeitpunkt“ – dem mehrmaligen

Durchlauf des Zyklus – reduziert sich die Einschränkung der KLA, da der Endzeitpunkt zeitlich verschoben und somit der Wertebereich ausgeweitet wird. Bei Nutzung eines „Zeitpunkts mit Veränderung des Suchraums“ entfällt somit im Gegensatz zu den Kriterien „Zeitpunkt ohne Veränderung des Suchraums“ und „Konfliktort“ die deutliche Einschränkung von KLA am Ende der Konfliktliste; dafür muss zur Sicherstellung der Terminierung auf ein fixes Kriterium zurückgegriffen werden.

Durch eine Veränderung des Suchraums anhand des mehrmaligen Durchlaufens des Zyklus besteht ein Anknüpfungspunkt für die Erkennung und das Entfernen obsoleter Konfliktlösungen. Außerdem ist zu erwarten, dass die Beibehaltung der zeitlichen Reihung die Verknüpfung von bestehenden Ansätzen von KE/KL-Heuristiken unterstützt, wie durch die Anforderung nach Kompatibilität gefordert. Daher wird das Kriterium „Zeitpunkt mit dynamischem Endzeitpunkt“ als Modifikation ausgewählt.

Zusammenfassend wurden zwei Kriterien zur Reihung von Konflikten als geeignet identifiziert:

- Kriterium „Fahrtrichtung“ mit Sekundärkriterium „Konfliktort“
- Kriterium „Zeitpunkt mit dynamischem Endzeitpunkt“

Das Kriterium „Zeitpunkt mit dynamischem Endzeitpunkt“ wird ausgewählt, da durch die geringe Einschränkung der KLA eine höhere Güte erwartet und die zeitliche Reihung der Konflikte beibehalten wird, wodurch ggf. bestehende Ansätze zum Entfernen obsoleter Konfliktlösungen angewendet werden können und die Anforderung nach Kompatibilität unterstützt wird.

7.3.4 Entfernung obsoleter Konfliktlösungen

In Kapitel 7.2.3 wurde bestimmt, dass die KE/KL-Heuristiken für die Anwendung auf periodische Fahrpläne modifiziert werden können, um obsoletere Konfliktlösungen zu entfernen. Dazu werden bestehende Ansätze zum Entfernen obsoleter Konfliktlösungen in KE/KL-Heuristiken anhand der relevanten Anforderungen diskutiert und ein Ansatz ausgewählt.

Für die Erkennung und das Entfernen von obsoleten Konfliktlösungen bestehen bereits Ansätze in der Literatur (siehe Kapitel 2.4.3):

- Integration der Erkennung und dem Entfernen obsoleter Konfliktlösungen in die KE/KL-Heuristik (Chiang et al. 1998)
- Erkennung und Entfernen obsoleter Konfliktlösungen im Anschluss der Fahrplanerstellung durch eine Verbesserungsheuristik (Crespo 2020)

Im Weiteren werden zunächst die Ansätze kurz beschrieben, um darauf aufbauend die Eignung der Ansätze zu diskutieren.

Chiang et al. (1998) integriert die Erkennung und das Entfernen von obsoleten Konfliktlösungen in eine synchrone KE/KL-Heuristik (siehe auch Kapitel 2.4.3). Durch Backtracking werden die bestehenden Konfliktlösungen geprüft und obsoletere Konfliktlösungen entfernt. Das Backtracking basiert auf der zeitlichen Reihung der Konflikte und der regelbasierten Auswahl der elementaren Konfliktlösungen. Die KE/KL-Heuristik, in die der Ansatz von Chiang et al. (1998) integriert werden soll, muss deshalb beide Eigenschaften aufweisen oder der Ansatz von Chiang et al. (1998) muss modifiziert werden.

Crespo (2020) nutzt eine Verbesserungsheuristik, die das Ergebnis der KE/KL-Heuristik auf obsoletere Konfliktlösungen prüft. Die Verbesserungsheuristik selbst entspricht ebenfalls einer KE/KL-Heuristik (siehe Kapitel 2.4.3). Für jede Konfliktlösung wird geprüft, ob ein Entfernen der obsoleten Konfliktlösung und die Lösung dadurch entstehender Folgekonflikte einen Nutzen gegenüber der Beibehaltung der obsoleten Konfliktlösung hat. Durch die Verbesserungsheuristik wird der Fahrplan im Ansatz von Crespo 2020 einmalig durchlaufen.

Die Bewertung des Entfernens der obsoleten Konfliktlösung (im Vergleich zu einem Beibehalten) erfolgt analog der Bewertung von KLA bei der Lösung von Konflikten (siehe Crespo 2020, S.456 ff.). Dadurch können auch obsoletere Konfliktlösungen identifiziert werden, die durch eine alternative Konfliktlösung gelöst werden sollten. Um die Anpassungen des Fahrplans zu begrenzen, wird die Reihenfolge der Züge bei der Anpassung von Konfliktlösung beibehalten (Crespo 2020, S. 461).

Ein Entfernen von obsoleten Konfliktlösungen erfolgt bei Crespo (2020) nur, wenn das Entfernen eine positive Auswirkung auf den Fahrplan erwarten lässt. Eine solche Prüfung der Auswirkungen des Entfernens von obsoleten Konfliktlösungen erfolgt bei dem Ansatz von Chiang et al. (1998) nicht.

Durch die Anpassungen des Fahrplans im Ansatz von Crespo (2020) können neue obsoletere Konfliktlösungen entstehen, die im Fahrplan verbleiben, da die Verbesserungsheuristik nur einmalig angewendet wird. Im Ansatz von Chiang et al. (1998) erfolgt eine Prüfung nach jeder Implementierung einer Konfliktlösung.

Durch das „Zurückspringen“ besteht die Gefahr durch Schleifen beim Entfernen von obsoleten Konfliktlösungen (Chiang et al. 1998, S. 304 ff.). Dies begegnen Chiang et al. (1998) durch eine „History List“. Durch das „Zurückspringen“ und dem ggf. erforderlichen „Durchlaufen“ von Schleifen kann es dennoch zu einer Verlängerung der Lösungsbereitstellung kommen.

Der Ansatz der „History List“ basiert auf der regelbasierten Auswahl der elementaren Konfliktlösungen und damit darauf, dass für einen Konflikt unabhängig von der Betriebssituation eine KLA ausgewählt wird. Entfällt die regelbasierte Auswahl und erfolgt dagegen z. B. eine Bewertung der KLA anhand der Änderung der Betriebssituation, können für den gleichen Konflikt bei verschiedenen Betriebssituationen unterschiedliche KLA ausgewählt werden. Der Ansatz der „History List“ ist damit nicht mehr zielführend einsetzbar.

Da durch die Veränderung des Suchraums, das Fahrplankonzept mehrmals von der KE/KL-Heuristik durchlaufen wird, ist für eine Integration in die KE/KL-Heuristik kein zusätzliches „Zurückspringen“ erforderlich, da durch das mehrmalige Durchlaufen des Zyklus des Fahrplankonzepts bereits ein „Zurückspringen“ gegeben ist. Gleichzeitig entspricht das erneute Durchlaufen des kompletten Fahrplans dem Ansatz von Crespo (2020). Daher kann für die Modifikationen der KE/KL-Heuristik, die Verbesserungsheuristik des Ansatzes von Crespo (2020) verwendet werden.

Zusammenfassend wird das Entfernen obsoletter Konfliktlösungen, wie von Chiang et al. (1998) vorgesehen, in die KE/KL-Heuristik zur Erkennung und Lösung von Konflikten integriert. Der Integration erfolgt aber auf der Basis des Ansatzes von Crespo (2020), da dieser nicht auf einer regelbasierten Auswahl der elementaren Konfliktlösungen beruht und somit ohne weitere Anpassung verwendet werden kann. Für das Entfernen obsoletter Konfliktlösungen erfolgt somit eine Verknüpfung der beiden Ansätze.

7.3.5 Zusammenfassung

Ziel des Kapitels war die Auswahl von Modifikationen der KE/KL-Heuristik, die aufgrund der Anwendung der KE/KL-Heuristik auf das periodische Fahrplankonzept der stabilen Phase und dem damit verbundenen Nicht-Vorhandenseins einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge erforderlich sind. Als mögliche Modifikationen der KE/KL-Heuristik wurden zwei Modifikationen als geeignet bestimmt:

- Kriterium „Fahrtrichtung“ mit Sekundärkriterium „Konfliktort“
- Ansatz „Zeitpunkt mit dynamischem Endzeitpunkt“

Als Modifikationen der KE/KL-Heuristik wurde der Ansatz „Zeitpunkt mit dynamischem Endzeitpunkt“ ausgewählt. Dies umfasst eine Beibehaltung der zeitlichen Reihung der Konflikte zusammen mit einem mehrmaligen Durchlaufen des Fahrplankonzepts der stabilen Phase. Für das Entfernen von obsoleten Konfliktlösungen wurde eine Kombination der beiden bestehenden Ansätze von Chiang et al. (1998) und Crespo (2020) gewählt.

Die in diesem Kapitel ausgewählte Modifikation der KE/KL-Heuristik fließt in den KE/KL-Algorithmus ein (Kapitel 7.4).

7.4 Beschreibung Modul 3

In Kapitel 7.2 wurde als Methode für die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase (Teilproblem III) eine KE/KL-Heuristik ausgewählt. Anschließend wurden in Kapitel 7.3 erforderliche Modifikationen der KE/KL-Heuristik, die sich bei der Anwendung einer KE/KL-Heuristik auf einen periodischen Fahrplan ergeben, bestimmt. In diesem Kapitel wird die KE/KL-Heuristik mit der ausgewählten Modifikation beschrieben.

Um der Anforderung nach Kompatibilität zu entsprechen, wird als Grundlage für Modul 3 die von Crespo et al. (2023) beschriebene generische KE/KL-Heuristik verwendet, die für den Einsatz in einer Echtzeit Fahrplananpassung vorgesehen ist. Dadurch besteht in einer Implementierung die Möglichkeit, verschiedene bestehende KE/KL-Heuristiken für Modul 3 zu verwenden.

Die Modifikation der KE/KL-Heuristik erfolgt, indem die festgelegten Modifikationen auf die generische KE/KL-Heuristik übertragen werden. Zunächst wird der Aufbau von Modul 3 bestimmt. Dies erfolgt durch die Anwendung der in Kapitel 7.3 ausgewählten Modifikation auf die von Crespo et al. (2023) beschriebenen Module einer generischen KE/KL-Heuristik. Danach werden die Submodule von Modul 3 unter Beachtung des zuvor festgelegten Aufbaus beschrieben.

Da die Modifikation den Zielkonflikt zwischen Terminierung der KE/KL-Heuristik und Güte der Lösung betrifft und die Terminierung eine Anforderung an den Algorithmus ist (siehe Kapitel 3.3), wird gesondert auf die Terminierung der KE/KL-Heuristik eingegangen. Außerdem wird die Rückkopplung von Modul 3 an Modul 1 festgelegt, die aufgrund des iterativen Vorgehens (siehe Kapitel 3.4) erforderlich ist, wenn keine Lösung von Teilproblem III in Modul 3 bestimmt werden kann.

7.4.1 Aufbau von Modul 3

Für die Bestimmung des Aufbaus von Modul 3 wird zunächst analysiert, welche Module der generischen KE/KL-Heuristik bei der Anwendung auf ein periodisches Fahrplankonzept angepasst werden müssen. Die generische KE/KL-Heuristik besteht aus folgenden Modulen (siehe Kapitel 2.2):

- Prognose
- Konflikterkennung
- Konfliktlösung
- Bewertung

Prognose

Das Prognose-Modul (siehe Kapitel 2.2) erstellt anhand von Echtzeitdaten ein Modell der aktuellen Betriebssituation und dient der Ermittlung der betrieblichen Auswirkungen der KLA. Da die KE/KL-Heuristik das Fahrplankonzept der stabilen Phase betrachtet, besteht keine aktuelle Betriebssituation, die prognostiziert werden kann. Das Fahrplankonzept der stabilen Phase ist daher allein durch die linienspezifischen Maßnahmen des Betriebskonzepts vorgegeben. Das Prognose-Modul ist daher lediglich für die Ermittlung der betrieblichen Auswirkungen der KLA erforderlich.

Konflikterkennung

Die Konflikterkennung besteht aus zwei Modulen: der Erkennung von Konflikten und der Erstellung einer Konfliktliste (siehe Kapitel 2.2). Da ein periodischer Fahrplan den gleichen betrieblichen Regelungen wie einem nicht periodischen Fahrplan unterliegt, besteht für die Konflikterkennung kein Unterschied zwischen der Anpassung eines periodischen Fahrplankonzepts und der Echtzeit Fahrplananpassung. Das Modul zur Erkennung von Konflikten kann somit übernommen werden.

Bei der Erstellung der Konfliktliste besteht das bei der Diskussion der Methode aufgezeigte Problem, dass keine eindeutige zeitliche Reihung der Konflikte möglich ist (siehe Kapitel 7.2). Da die ausgewählte Modifikation der KE/KL-Heuristik aber weiterhin das zeitliche Kriterium zur Reihung der Konflikte vorsieht (siehe Kapitel 7.3), kann das zweite Modul zur Erstellung einer Konfliktliste ebenfalls übernommen werden.

Zusätzlich zur Konflikterkennung sind auch obsoletere Konfliktlösungen im Fahrplankonzept der stabilen Phase zu bestimmen. In der Konflikterkennung wird deshalb die Erkennung der relevanten Konflikte (siehe Kapitel 3.4) sowie obsoleter Konfliktlösungen behandelt. Außerdem ist der zeitliche Horizont der Konflikterkennung zu bestimmen.

Konfliktlösung

Die Konfliktlösung besteht aus drei Modulen: der Analyse der Konfliktsituation, der Bestimmung der geeignetsten elementaren Konfliktlösungen und die Entwicklung der KLA (siehe Kapitel 2.2). Analog zur Konflikterkennung können aufgrund der gleichen betrieblichen Regelungen die drei Module für die Anpassung des periodischen Fahrplans übernommen werden.

Zusätzlich zur Lösung von Konflikten werden obsoletere Konfliktlösungen entfernt. Von Crespo (2020) wird übernommen, dass vor einem Entfernen von obsoleten Konfliktlösungen die

Auswirkung des Entfernens geprüft wird. Das Entfernen der obsoleten Konfliktlösungen und die Veränderung der obsoleten Konfliktlösungen werden analog der Lösung von Konflikten als KLA aufgefasst.

Input für die Bestimmung der geeignetsten elementaren Konfliktlösungen sind die zu berücksichtigenden elementaren Konfliktlösungen (siehe Kapitel 2.2.1). Als elementare Konfliktlösungen relevant für die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase sind linienscharfe Maßnahmen, die nicht Laufweg und Takt betreffen (siehe Kapitel 3.4).

Bewertung

Die Bewertung der KLA ist das abschließende Modul in der KE/KL-Heuristik (siehe Kapitel 2.2). Eine Bewertung der KLA ist für die Lösung von Konflikten und für das Entfernen von obsoletter Konfliktlösung erforderlich. Zur Bewertung von KLA sind passende Kriterien auszuwählen. Entsprechend den Anforderungen (siehe Kapitel 3.3) sollten kundenorientierte Kriterien in die Bewertung einfließen.

Zusammenfassend ergibt sich aus der Analyse der generischen KE/KL-Heuristik für Modul 3 der in Abbildung 7-5 dargestellte Aufbau mit folgenden Modulen:

- Modul 3.1 „Prognose“
- Modul 3.2 „Konflikterkennung“
- Modul 3.3 „Konfliktlösung“
- Modul 3.4 „Bewertung der KLA“

Nachdem der Aufbau von Modul 3 bestimmt wurde, werden die vier Submodule beschrieben. Da bei der Prognose (Modul 3.1) keine Modifikation erforderlich ist, werden in den Kapiteln 7.4.2 bis 7.4.4 nur die Module 3.2 bis 3.4 beschrieben. Durch die Nutzung eines generischen Aufbaus können bestehende Ansätze und Module aus der Literatur entsprechend der Anforderung nach Kompatibilität (ggf. mit einigen Modifikationen) genutzt werden. Daher wird bei der Beschreibung der Module der Fokus auf Besonderheiten bei der Anwendung auf ein periodisches Fahrplankonzept und innerhalb der Störungsdisposition gesetzt.

7.4.2 Modul 3.2: Konflikterkennung

Modul 3.2 dient der Erkennung von Konflikten und obsoleten Konfliktlösungen. Für die Erkennung von Konflikten werden die relevanten Konfliktarten diskutiert (siehe Kapitel 2.2.1). Außerdem ist für das Modul der Konflikterkennung die Erstellung der Konfliktliste und der Horizont der Konflikterkennung zu bestimmen.

Erkennung von Konflikten

Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte auf Laufwegebene wurden bereits in Kapitel 4 erkannt und gelöst. Im Fahrplankonzept der stabilen Phase können aber Infrastrukturelemente der Knoten und Kanten nicht verfügbar sein. Aufgrund der Nutzung des Ansatzes einer generischen KE/KL-Heuristik können bestehende Ansätze zur Identifikation von Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten verwendet werden (siehe Kapitel 2; allgemeingültige Beschreibung z. B. von Oetting 2023, S. 239 ff.).

Für die Erkennung von **Belegungskonflikten** besteht eine Vielzahl von Ansätzen zur Konflikterkennung in der Literatur (siehe Kapitel 2; allgemeingültige Beschreibung z. B. von Oetting 2023, S. 239 ff.), die angewendet werden können.

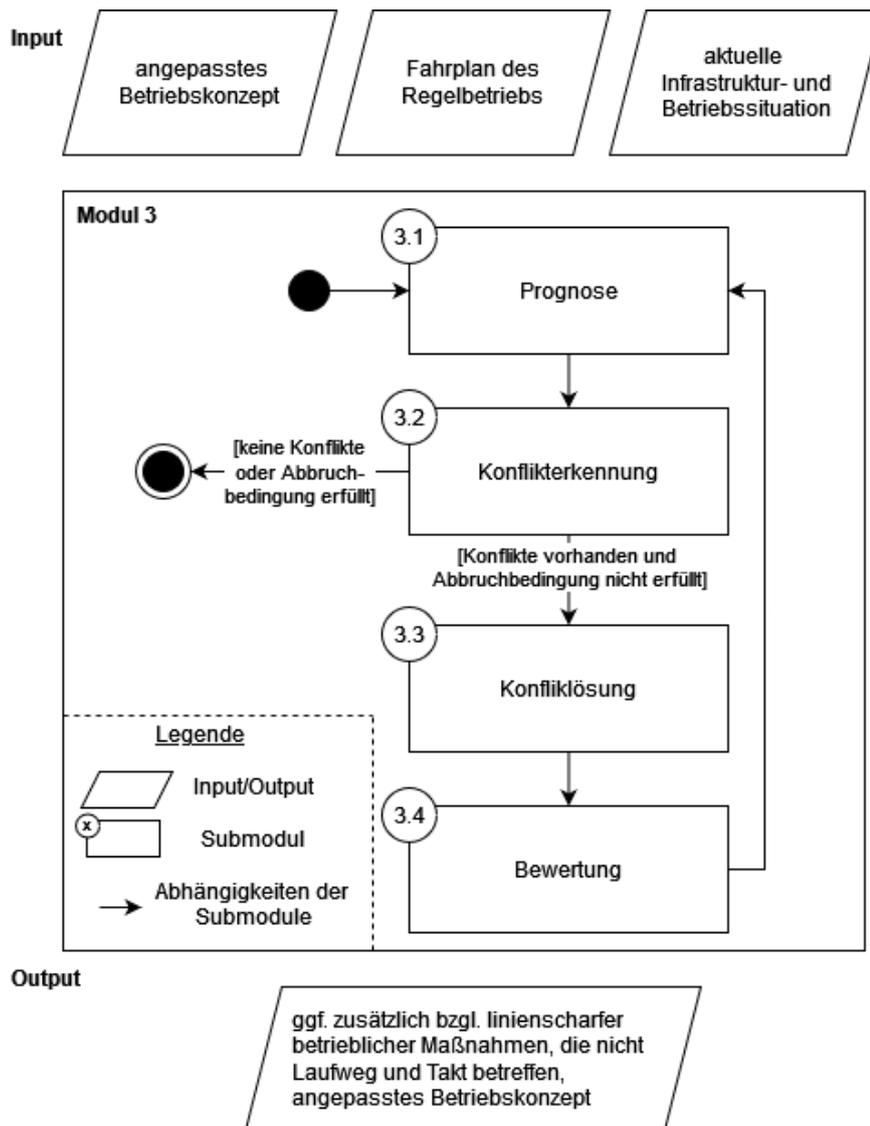


Abbildung 7-5: Aufbau von Modul 3

Für die Erkennung von **Umlaufkonflikten** bestehen ebenfalls bereits Ansätze zur Konflikterkennung (siehe Kapitel 2; allgemeingültige Beschreibung z. B. von Oetting 2023, S. 239 ff.). Es ergeben sich einige Besonderheiten bei der Anwendung auf ein periodisches Fahrplankonzept, die im Folgenden erläutert werden.

Nach Kapitel 3.2 wird ein vereinfachter Umlaufplan angenommen. Als Ausgangslage der Umlaufplanung wird angenommen, dass bei Wendungen an Wendebahnhöfen in den Außenästen die Folgeleistung bekannt ist und bei nicht-regulären Wendebahnhöfen im Kernbereich die zeitlich nächste Abfahrt der gleichen bzw. korrespondierenden Linie als Folgeleistung vorgesehen ist.

Umlaufkonflikte bestehen, wenn die Wendezeit bzw. Übergangszeit zwischen zwei Leistungen nicht der Mindestwendezeit bzw. Mindestübergangszeit entspricht (Oetting 2023, S. 239 ff.). Nach den Anforderungen, dass eine stabile Phase ermöglicht werden soll und der Betrieb der stabilen Phase möglichst stabil sein soll (siehe Kapitel 3.3), sollte die Mindestwendezeit bzw. Mindestübergangszeit neben der technisch möglichen Mindestwendezeit bzw. Mindestübergangszeit zusätzlich eine Pufferzeit enthalten. Dies sollte auch für Wendungen

innerhalb des Kernbereichs gelten, auch wenn dieser Bereich besonders kapazitätskritisch ist (siehe Kapitel 2.4.1).

Eine Art von Umlaufkonflikten sind Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte, die bei einem Mangel oder Überschuss an Fahrzeugen bestehen (siehe Kapitel 2. 4.3). Ein Ansatz zur Erkennung von Fahrzeugverfügbarkeitskonflikten beschreibt Crespo (2020, S. 249 ff.). Für Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte ist die Anzahl der vorhandenen Züge mit der Anzahl der erforderlichen Züge zu vergleichen (Crespo 2020, S. 251).

Die Anzahl der vorhandenen Züge ergibt sich aus der Anzahl der Züge, die sich in der aktuellen Betriebssituation auf der Seite der Störung befinden. Die Anzahl der erforderlichen Züge wird aus den Umlaufzeiten der Linienrouten unter Berücksichtigung von Verknüpfungen der Umläufe zwischen Linienrouten der gleichen Linie oder anderen Linien berechnet.

Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte sind beim Start der KE/KL-Heuristik zu prüfen. Im weiteren Verlauf der Heuristik können Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte z. B. durch eine Verlängerung der Beförderungszeit und damit der Umlaufzeit entstehen. Ein Fahrzeugverfügbarkeitskonflikt tritt dabei nicht direkt durch die Verlängerung der Beförderungszeit ein, sondern die zeitliche Verschiebung erzeugt zunächst einen Umlaufkonflikt als Folgekonflikt. Die Lösung des Umlaufkonflikts kann dann einen Fahrzeugverfügbarkeitskonflikt auslösen. Daher ist bei der Lösung von Umlaufkonflikten (auch bei der Berechnung der Schwere der Folgekonflikte) zu prüfen, ob ein Fahrzeugverfügbarkeitskonflikt erzeugt wird.

Erkennung obsoleter Konfliktlösungen

Für die Erkennung obsoleter Konfliktlösungen ist zu prüfen, ob bei dem Entfernen der Konfliktlösung der ursprünglich zu lösende Konflikt erneut auftritt (siehe Kapitel 7.2.3). Um keinen Eingriff in die Lösungen von Teilproblem I zu erzeugen, sind für Modul 3 als obsoleter Konfliktlösungen nur die elementaren Konfliktlösungen, die in Modul 3 als betriebliche Maßnahmen angewendet (siehe Kapitel 3.4) werden, zu prüfen. Die Erkennung von obsoleten Konfliktlösungen der elementaren Konfliktlösungen „zeitliche Verschiebung“ und „alternativer Fahrweg“ werden von Crespo (2020) beschrieben.

Erstellung der Konfliktliste und Horizont der Konflikterkennung

Aufgrund der Beibehaltung der zeitlichen Reihung der Konflikte (siehe Kapitel 7.3), entspricht die Sortierung der Konfliktliste der Sortierung in einer synchronen KE/KL-Heuristik. Zusätzlich zu den Konflikten sind die identifizierten obsoleten Konfliktlösungen in die Konfliktliste aufzunehmen. Im Ansatz von Crespo (2020) erfolgt die Reihung der obsoleten Konfliktlösungen analog zur zeitlichen Reihung der Konflikte. Für den integrierten Ansatz von Konfliktlösung und Entfernen obsoleter Konfliktlösungen wird daher eine gemeinsame chronologische Konfliktliste erstellt.

In der Konfliktliste befinden sich nur Einträge, die innerhalb des zeitlichen Horizonts der Konflikterkennung liegen. Die Einträge in der Konfliktliste werden auch dafür genutzt, die Auswirkungen der Implementierung von KLA auf das Fahrplankonzept bzgl. möglicher Folgekonflikte zu bewerten (Crespo et al. 2023, S. 10 f.). Durch den periodischen Charakter des Fahrplankonzepts befinden sich Konflikte mehrfach in der Konfliktliste, wenn die Länge des zeitlichen Horizonts größer ist als die Periodendauer (Taktzeit) des Fahrplankonzepts.

Für die Bestimmung der Auswirkungen einer KLA auf das Fahrplankonzept hat ein Horizont größer als die Periodendauer keinen zusätzlichen Nutzen. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass die Länge des zeitlichen Horizonts einen deutlichen Einfluss auf die Dauer der Lösungsbereitstellung der KE/KL-Heuristik hat. Die Länge des zeitlichen Horizonts sollte daher in Abhängigkeit zur Verfügung stehenden Rechenleistung und der Anforderungen an die Dauer der Lösungsfindung einen Wert kleiner gleich der Periodendauer haben.

Für die zeitliche Reihung der Konflikte in der Konfliktliste ist ein Zeitstempel für jeden Konflikt erforderlich. Da für einen periodischen Fahrplan kein Zeitstempel anhand einer Uhrzeit ermittelt werden kann, kann zur Reihung der Konflikte über alle Zyklen hinweg der zeitliche Abstand zum Beginn des ersten Zyklus genutzt werden. Somit kann es zu keiner Wiederholung von „Uhrzeiten“ kommen und eine eindeutige Reihung wird ermöglicht.

7.4.3 Modul 3.3: Konfliktlösung

Modul 3.3 dient der Lösung der Konflikte und dem Entfernen obsoleter Konfliktlösungen. Für die Lösung der drei relevanten Konfliktarten besteht bereits eine allgemeingültige Beschreibung in der Literatur (Oetting 2023, S. 256 ff.). Zuschlüsse sollen nicht für die Konfliktlösungen genutzt werden (siehe Kapitel 7.2.1).

Da die betrieblichen Maßnahmen zur Lösung von Fahrzeugverfügbarkeitskonflikten teilweise erst in der Einschwingphase implementiert werden (siehe Kapitel 3.4), wird im Weiteren auf die Besonderheiten bei der Lösung von Fahrzeugverfügbarkeitskonflikten eingegangen.

Zur Lösung von Fahrzeugverfügbarkeitskonflikten bestehen zwei Möglichkeiten:

1. Anzahl der vorhandenen Züge verändern
2. Anzahl der erforderlichen Züge verändern

Eine Änderung der Anzahl der vorhandenen Züge kann durch zugspezifische betriebliche Maßnahmen erfolgen (z. B. Abstellung eines Zuges zur Reduzierung der Zuganzahl). Da zugspezifische Maßnahmen erst in der Einschwingphase implementiert werden (Modul 4), ist, wie in Kapitel 3.4 festgelegt, bei der Lösung eines Fahrzeugverfügbarkeitskonflikts in Modul 3 nur zu prüfen, ob die Konfliktlösung möglich ist. Zur Lösung von Fahrzeugverfügbarkeitskonflikten mit zugspezifischen Konflikten dürfen nur die elementaren Konfliktlösungen geprüft werden, die auch von Modul 4 unterstützt werden.

Eine Änderung der Anzahl der erforderlichen Züge kann einerseits über die Änderungen der Umlaufplanung erfolgen (z. B. durch eine überschlagende Wende oder die Verknüpfung der Umläufe innerhalb einer Linie oder mit einer anderen Linie); andererseits über eine Änderung von Umlaufzeit durch betriebliche Maßnahmen (z. B. eine zeitliche Verschiebung).

In der Praxis ist bei dem Übergang vom Regelbetrieb zum gestörten Betrieb i. d. R. die Zuganzahl durch zugspezifische betriebliche Maßnahmen zu reduzieren (Ghaemi und Goverde 2015, S. 2 ff.). Ein höherer Bedarf an Fahrzeugen in der stabilen Phase kann daher zu einer Reduzierung der erforderlichen zugspezifischen betrieblichen Maßnahmen in der Einschwingphase führen und somit eventuell zu einer reduzierten Einschwingdauer beitragen. Der Bedarf an Fahrzeugen sollte aber nicht die Anzahl der vorhandenen Züge übersteigen, wenn dieser Fahrzeugmangel wiederum durch zugspezifische betriebliche Maßnahmen, die die Einschwingdauer erhöhen können, gelöst werden muss.

Bei gleichbleibenden Regelfahr und -haltezeiten (bestehende Vorgabe siehe Kapitel 3.2) und unter Einhaltung des fahrplanunabhängigen Kapazitätskriteriums, kann durch mehr Fahrzeuge i. d. R. ein stabilerer Betrieb gewährleistet werden, da die planmäßigen Warte- und Synchronisationszeiten größer werden und für den Abbau von Verspätungen genutzt werden können. Ein Fahrzeugüberschuss sollte daher zunächst durch Maßnahmen zur Erhöhung der Anzahl der erforderlichen Züge gelöst werden. Ein Fahrzeugmangel sollte durch Maßnahmen zur Reduzierung der Anzahl der erforderlichen Züge gelöst werden. Zusammenfassend sollten zugspezifische betrieblichen Maßnahmen möglichst vermieden werden.

Zusätzlich zur Lösung von Konflikten werden obsoletere Konfliktlösungen entfernt. Beim Entfernen von obsoleten Konflikten wird entsprechend der Vorgaben aus Kapitel 3.1 auf die Prüfung von KLA anderer elementarer Konfliktlösungen verzichtet und lediglich KLA der gleichen elementaren Konfliktlösungen geprüft. Die Analyse und Bestimmung von KLA für ein Entfernen von obsoleten Konfliktlösungen wird von Crespo (2020, S. 462 ff.) für die elementaren Konfliktlösungen „zeitliche Verschiebung“ und „alternativer Fahrweg“ beschrieben.

Durch das mehrmalige Durchlaufen des Zyklus des Fahrplankonzepts durch die KE/KL-Heuristik und dem Auftreten und Lösen von Folgekonflikten besteht ggf. kein Zusammenhang mehr zwischen den in der Ausgangslage vorhandenen Konflikten und der Konfliktlösung des resultierenden Fahrplankonzepts. Der Anforderung nach Nachvollziehbarkeit entsprechend ist daher z. B. eine KE-KL-Historie zu speichern und für die Nutzung durch die Disponenten aufzubereiten. Diese KE-KL-Historie kann ggf. auch für die Erkennung von Schleifen bei der Durchführung der KE/KL-Heuristik genutzt werden.

7.4.4 Modul 3.4: Bewertung

Modul 3.4 bewertet die KLA zur Lösung eines Konflikts bzw. zum Entfernen einer obsoleten Konfliktlösung. Entsprechend den Anforderungen (siehe Kapitel 3.3) sollten kundenorientierte Kriterien in die Bewertung einfließen. Die Auswahl der Kriterien wird in diesem Kapitel bestimmt.

In die Bewertung für SFP von Brauner (2023), die für die Bewertung in Modul 5 übernommen wurde (siehe Kapitel 5.2), bestehen sechs Widerstandsveränderungen (siehe Kapitel 2.4.2):

- Veränderung der Fahrdauer (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
- Veränderung der Aufenthalts- und Umstiegsqualität

Entsprechend der Anforderung, die Widerstandsveränderung möglichst gering zu halten, sollte daher zur Auswahl der KLA die von der KLA verursachten Widerstandsveränderungen bewertet werden. Da die Bewertung der KLA auf Basis der Betriebssituation und nicht auf Basis von Reiseketten erfolgt und da die betrieblichen Maßnahmen zur Lösung von Konflikten in Modul 3 begrenzt sind (siehe Kapitel 3.4), sind ggf. nicht alle sechs Widerstandsveränderungen relevant. Die sechs Widerstandsveränderungen werden daher im Weiteren auf ihre Relevanz geprüft.

Direkt durch die KLA kann sich die Fahrzeit ändern, wenn sich die Differenz zwischen regulär geplanten und im Fahrplankonzept vorgesehener An- und Abfahrtszeiten ändert. Indirekter Einfluss auf die Fahrzeit kann auch die Auswirkung der KLA auf die Betriebssituation (Generieren von Folgekonflikten; Lösen weiterer bestehender Konflikte) haben, da weitere Konfliktlösungen für Folgekonflikte bestehen können. Die Lösung der Folgekonflikte kann zu zusätzlichen Veränderungen der Differenz zwischen regulär geplanten und im Fahrplankonzept vorgesehener An- und Abfahrtszeiten führen.

Auf die Veränderung der Wartezeit am Bahnsteig hat der Takt der Verbindung Einfluss. Der zeitliche Abstand von Zügen einer Linie sollte daher möglichst gleichmäßig sein. Weicht der Abstand zwischen zwei Zügen einer Linie durch eine Konfliktlösung vom Takt der Linie ab, sollte dies mit einem Malus bewertet werden. Der Malus kann beispielsweise anhand der Widerstandsveränderung der Fahrgäste durch eine zusätzliche Wartezeit aufgrund der Abweichung vom Takt ermittelt werden.

Eine Änderung des Bahnhofsgleises wird durch die von Brauner (2023) vorgegebenen Widerstandsveränderungen nur durch die Anzahl und Dauer der Umstiege und damit abhängig von der Reisekette berücksichtigt. Auf die Dauer von Umstiegen kann eine Änderung des Bahnhofsgleises sowohl positive als auch negative Auswirkung haben. Da eine Änderung des regulären (bzw. des im Betriebskonzept des ausgewählten SFP enthaltenen) Bahnsteiggleises eine Änderung der gewohnten Mobilitätsverhalten (Anforderung siehe Kapitel 3.3) darstellt, sollte diese Änderung der Betriebssituation ebenfalls bewertet werden.

Die weiteren drei von Brauner (2023) berücksichtigten Widerstandsveränderungen (Veränderung der Anzahl der Umstiege, Veränderung der Zugangs- und Abgangszeiten zu/von Haltestellen durch Fußwege, Veränderung der Aufenthalts- und Umstiegsqualität) können ohne die Einbeziehung der Reiseketten nicht über die Veränderung der Betriebssituation bewertet werden.

Neben der Anforderung, die Widerstandsveränderung möglichst gering zu halten, besteht auch die Anforderung nach geringen Auswirkungen auf das weitere Netz. Daher sollten in Mischverkehrsstrecken zeitliche und räumliche Verschiebungen im Vergleich zum Regelbetrieb vermieden werden und ggf. eine zusätzliche Gewichtung erhalten. Dies ist in das Bewertungskriterium der Differenz zwischen regulär geplanten und im Fahrplankonzept vorgesehener An- und Abfahrtszeiten z. B. durch eine unterschiedliche Gewichtung der zeitlichen Verschiebung zu berücksichtigen.

Zusammenfassend ergeben sich damit vier erforderliche Bewertungskriterien:

- Differenz zwischen regulär geplanten und im Fahrplankonzept vorgesehener An- und Abfahrtszeiten
- Abweichungen des zeitlichen Abstandes von zwei Zügen einer Linie zum im Liniennetzplan vorgesehenen Takt
- Änderung zu regulären (bzw. des im Betriebskonzept des ausgewählten SFP enthaltenen) Bahnsteiggleises
- Änderung in der Betriebssituation (Generierung von Folgekonflikten und Lösung von weiteren Konflikten durch die KLA)

Für alle vier Bewertungskriterien sowie die Verknüpfung von Bewertungskriterien in KE/KL-Heuristiken bestehen Ansätze in der Literatur (siehe Kapitel 2.4.3).

7.4.5 Terminierung

Für die Terminierung der KE/KL-Heuristik ist sicherzustellen, dass ein Terminierungskriterium eintritt. Das Erreichen eines Terminierungskriteriums kann durch Endlosschleifen bei der Durchführung der KE/KL-Heuristik verhindert werden. Daher werden in diesem Kapitel die Terminierungskriterien der KE/KL-Heuristik bestimmt und die Gefahr von Endlosschleifen bei der Durchführung der KE/KL-Heuristik diskutiert.

Terminierungskriterien

Durch die Integration des Entfernens obsoleter Konfliktlösungen in die KE/KL-Heuristik (siehe Kapitel 7.3.4) sollte die KE/KL-Heuristik Konflikte und obsoletere Konfliktlösungen bei der Terminierung berücksichtigen. Da ein konfliktfreier Fahrplan obsoletere Konfliktlösungen enthalten kann, ist die Konfliktfreiheit als Terminierungskriterium der KE/KL-Heuristik nicht ausreichend. Die Nutzung eines kombinierten Terminierungskriteriums aus Konfliktfreiheit und Nicht-Vorhandensein von obsoleten Konfliktlösungen ist ebenfalls nicht zielführend, da obsoletere Konfliktlösungen nicht zwingend entfernt werden müssen und obsoletere Konfliktlösungen, deren Entfernen keine Verbesserung des Fahrplankonzepts erwarten lässt, nicht entfernt werden.

Im Gegensatz zu obsoleten Konfliktlösungen werden erkannte Konflikte immer durch eine Konfliktlösung gelöst (oder die Konfliktfreiheit des Fahrplankonzepts ist nicht herstellbar). Als ein Terminierungskriterium wird daher festgelegt, dass die KE/KL-Heuristik den Zyklus so lange durchläuft, bis für das Fahrplankonzept in einem Zeitraum, deren Länge die Periodendauer ist, keine KLA implementiert oder keine obsoletere Konfliktlösung entfernt wurde (siehe auch Ausführung zum Endzeitpunkt in Kapitel 7.3.2).

Außerdem bricht die KE/KL-Heuristik ab, wenn ein Konflikt nicht gelöst werden kann oder das zeitliche Abbruchkriterium eintritt (in Kapitel 7.3.2). Wurde beim Eintritt des zeitlichen Abbruchkriteriums zuvor bereits ein konfliktfreies Fahrplankonzept gefunden, es aber aufgrund des Entfernens von Konfliktlösungen zu keiner Terminierung kam, dann wird eines der konfliktfreien Fahrplankonzepte als Lösung verwendet. Ansonsten wird bei einem Abbruch der KE/KL-Heuristik entsprechend der Systemarchitektur eine Rückkopplung zu Modul 1 angestoßen (siehe Kapitel 3.4).

Endlosschleifen

Chiang et al. (1998) beschreiben die Gefahr von Endlosschleifen durch das „Zurückspringen“ zur Lösung obsoleten Konfliktlösungen. Ein „Zurückspringen“ ist ebenfalls durch das mehrmalige Durchlaufen des Zyklus des Fahrplankonzepts gegeben. Wie in Kapitel 7.3.4 beschrieben, kann der Ansatz der History-Liste von Chiang et al. (1998) nicht übernommen werden, da die generische KE/KL-Heuristik auf einer Bewertung der KLA anhand deren Auswirkung auf die Betriebssituation erfolgt und nicht durch eine regelbasierte Auswahl der elementaren Konfliktlösungen.

Eine Endlosschleife entsteht, wenn die Betriebssituation in einem Zyklus identisch ist mit der Betriebssituation eines vorherigen Zyklus. Um Schleifen bei der Durchführung von Modul 3 zu verhindern, muss daher die Betriebssituation berücksichtigt werden. Am Anfang jedes Zyklus ist deshalb die Betriebssituation des Zyklus zu speichern und zu prüfen, ob diese identisch mit einem vorhergehenden Zyklus ist. Zur Auflösung des Zyklus ist eine andere KLA für den ersten Konflikt zu wählen. Für den Fall, dass die Endlosschleife weiterhin besteht, ist wiederum eine

andere KLA zu wählen. Besteht keine weitere KLA, dann ist entsprechend für den nächsten Konflikt in der Endlosschleife eine alternative KLA auszuwählen.

Da für die Erkennung einer Endlosschleife alle Zustände der Endlosschleife (die Zustände entsprechen den Betriebssituationen der Zyklen) einmal durchlaufen werden müssen, können bei Endlosschleife mit vielen Zuständen die Anforderungen an die Dauer der Lösungsbereitstellung ggf. nicht eingehalten werden. Daher sollte eine fixe zeitliche Abbruchbedingung, wie in Kapitel 7.3 gefordert, bestehen. Außerdem sollte der Speicherbedarf der Zyklen bei der Festlegung der fixen Abbruchbedingung berücksichtigt werden.

Wenn während der Durchführung der KE/KL-Heuristik ein konfliktfreier Zyklus besteht, ist eine Lösung vorhanden. Besteht in diesem konfliktfreien Zyklus eine obsoleete Konfliktlösung, terminiert die KE/KL-Heuristik aber nicht, da durch das Entfernen der obsoleten Konfliktlösung weitere (bessere) Lösungen gefunden werden könnten.

Zusammenfassend terminiert die KE/KL-Heuristik und damit Modul 3, wenn

- ein konfliktfreier Zyklus ohne obsoleete Konfliktlösung besteht oder
- für einen Konflikt keine Konfliktlösung besteht oder
- das zeitliche Abbruchkriterium erfüllt wird.

Die möglichen Terminierungen der KE/KL-Heuristik sind in Abbildung 7-6 dargestellt. Wurde während der Durchführung von Modul 3 bereits ein konfliktfreier Zyklus bestimmt, besteht unabhängig vom Grund der Terminierung eine Lösung. Bei einem Abbruch von Modul 3 ohne Lösung erfolgt eine Rückkopplung zu Modul 1 (siehe Kapitel 3.4).

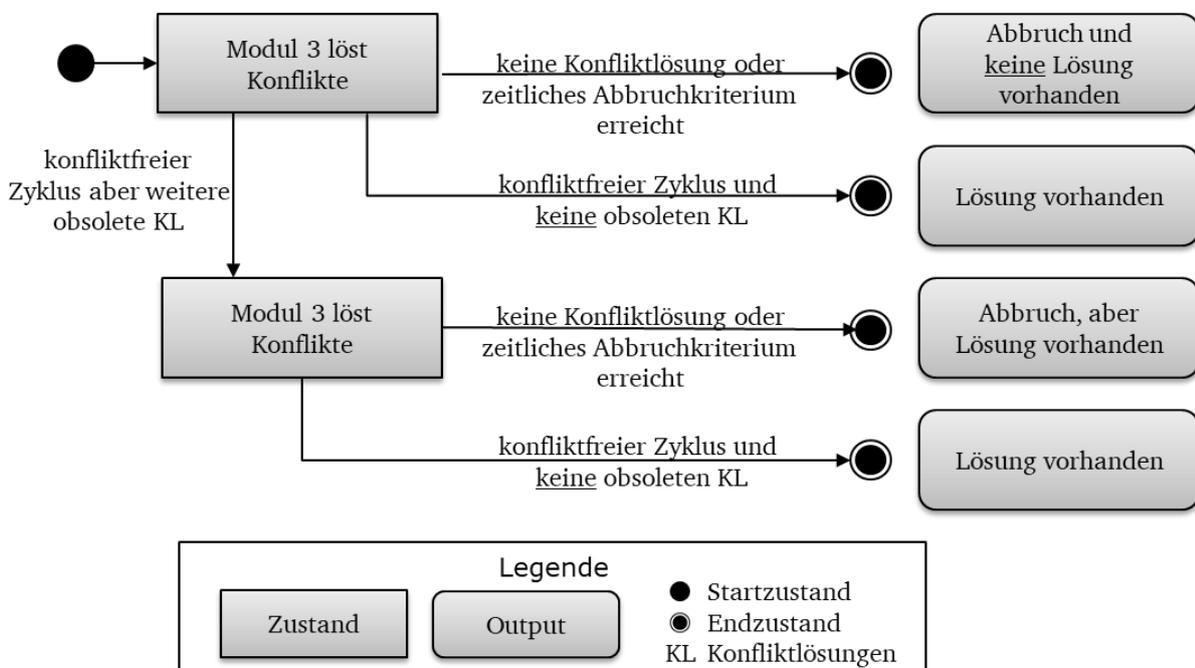


Abbildung 7-6: Mögliche Terminierungen der KE/KL-Heuristik von Modul 3 mit jeweiligem Output

7.4.6 Rückkopplung von Modul 3

Wenn die KE/KL-Heuristik ohne eine Lösung terminiert, erfolgt nach dem iterativen Vorgehen (siehe Kapitel 3.4) eine Rückkopplung an Modul 1. Ziel der Rückkopplung ist es, dass in Modul 1 eine alternative Lösung gefunden wird, die auch in Modul 3 zu einer Lösung führt.

Unterschieden werden kann bei der Rückkopplung, ob der Abbruch zustande kam, weil (siehe Abbildung 7-6)

- ein Konflikt nicht gelöst werden kann oder
- das zeitliche Abbruchkriterium eintrat.

Wenn ein Konflikt nicht gelöst werden kann, kann weiter die Art der nicht-gelösten Konflikte unterschieden werden.

Ein nicht lösbarer **Infrastrukturverfügbarkeitskonflikt** kann nicht auftreten, da in Modul 1 geprüft wird, ob jeder Laufweg durch mindestens einen Fahrweg umsetzbar ist.

Ein nicht lösbarer **Umlaufkonflikt** kann nur in Form eines nicht lösbaren Fahrzeugverfügbarkeitskonflikts auftreten, da ansonsten Umlaufkonflikte durch eine zeitliche Verschiebung der Abfahrt der nächsten Leistung gelöst werden können. Ein nicht lösbarer Fahrzeugverfügbarkeitskonflikt besteht aufgrund eines Fahrzeugüberschusses oder Fahrzeugmangels, der nicht gelöst werden kann. Da die Fahrzeuge für alle Linien eingesetzt werden können (siehe Kapitel 3.2), ist der nicht gelöste Fahrzeugbedarf allen Linienrouten der Seite der Störung zuzuordnen und nicht nur den Linienrouten des (letzten) nicht-lösbaren Fahrzeugverfügbarkeitskonflikts. Somit sollten nicht zwangsweise die Linienrouten des (letzten) nicht lösbaren Fahrzeugverfügbarkeitskonflikts geändert werden, sondern eine alternative Lösung unter Einbeziehung aller Linienrouten der Seite der Störung gefunden werden.

In Modul 1 wird deshalb als Bedingung ergänzt, dass eine alternative Lösung in der Seite der Störung gefunden wird. Dies entspricht einer Bedingung an den Liniennetzplan (siehe Kapitel 4.3.3).

Auch für **Belegungskonflikte** kann, wenn sich keine zwei Züge ohne Ausweichmöglichkeit gegenüberstehen, durch eine zeitliche Verschiebung stets eine KLA bestimmt werden. Die Einhaltung des fahrplanunabhängigen Kapazitätskriteriums aus Modul 1 reduziert außerdem die Wahrscheinlichkeit, dass es zu Stauwirkungen für Infrastrukturelemente kommt. Da bei der Anwendung des fahrplanunabhängigen Kapazitätskriteriums pauschale Zeiten z. B. für die Wendezeiten verwendet werden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass es bei der Anwendung der KE/KL-Heuristik zu Stauwirkungen kommt. Solche Stauwirkungen und auch Deadlocks können zu Endlosschleifen in der KE/KL-Heuristik führen.

In dem Fall, dass der hohe Kapazitätsverbrauch durch die Lösung von Umlaufkonflikten mit hohen zeitlichen Verschiebungen zustande kommt, könnte auch ein weiteres Fahrzeug zu einer Lösung führen. Dafür kann auch eine andere Linie der gleichen Seite der Störung angepasst werden. Ein strikteres fahrplanunabhängiges Kapazitätskriterium setzt dafür nicht die richtigen Signale, da es nur Linien mit den betroffenen Infrastrukturelementen zu einer Verlagerung oder Reduzierung des Angebots anregt. Daher ist in diesem Fall, wie bei Umlaufkonflikten, zunächst zu prüfen, ob weitere betriebliche Maßnahmen zur Reduzierung des Fahrzeugbedarfs

implementiert werden können oder ansonsten an Modul 1 als Bedingung an den Liniennetzplan zurückzumelden ist, dass eine alternative Lösung in der Seite der Störung zu finden ist.

Wenn das zeitliche Abbruchkriterium eintrat, kann anhand der in dem letzten Zyklus enthaltenen Konflikte abgeschätzt werden, auf welcher Seite der Störung keine Lösung gefunden werden konnte. In Modul 1 sollte dann für diese Seite eine alternative Lösung erzeugt werden.

Dadurch, dass bei jeder erneuten Durchführung von Modul 1 eine verkehrlich schlechtere Lösung erzeugt wird (siehe Kapitel 4.3.6), ist sichergestellt, dass der modulübergreifende iterative Prozess terminiert. Vor einer Rückkopplung an Modul 1 kann alternativ auch eine Rückmeldung durch einen Disponenten eingeholt werden. Dieser kann z. B. für einen Umlaufkonflikt weitere Lösungsmöglichkeiten wie die Wende auf eine nicht korrespondierende Linie vorgeben. Aufgrund der Anforderung nach Vermeidung manueller Inputs (siehe Kapitel 3.3) wird diese Integration nicht weiter vertieft.

7.4.7 Zusammenfassung

Ziel des Kapitels war die Beschreibung der KE/KL-Heuristik aus Modul 3 auf Basis der in Kapitel 7.3 ausgewählten Modifikation. Anhand einer generischen KE/KL-Heuristik (Crespo et al. 2023) wurde festgelegt, dass vier Submodule für Modul 3 erforderlich sind (siehe auch Abbildung 7-5).

Modul 3.1 ist für die Prognose der betrieblichen Auswirkungen der KLA erforderlich. Durch das Modul 3.2 wird das Fahrplankonzept auf die in Kapitel 3.4 festgelegten Konfliktarten und obsoletere Konfliktlösungen geprüft. Für die erkannten Konflikte werden im Modul der Konfliktlösung (Modul 3.3) aus den elementaren Konfliktlösungen KLA bestimmt. Für die obsoleteren Konfliktlösungen bilden das Entfernen und ggf. eine Änderung der Konfliktlösungen die KLA. In Modul 3.4 werden die KLA anhand von vier Kriterien bewertet und die bestbewertete KLA ausgewählt.

Außerdem wurden Terminierungskriterien und ein Ansatz zur Erkennung und Auflösung von Endlosschleifen, die durch das mehrmalige Durchlaufen des Fahrplankonzepts entstehen können, festgelegt.

Terminiert Modul 3 ohne eine Lösung, erfolgt eine Rückkopplung an Modul 1. In Modul 1 wird dafür eine Bedingung an den Liniennetzplan ergänzt, die eine alternative Lösung in der Seite der Störung fordert, in der in Modul 3 keine Lösung gefunden wurde.

7.5 Zusammenfassung von Kapitel 7 und Diskussion

Ziel des Kapitels war die Entwicklung eines Algorithmus zur Sicherstellung der Umsetzbarkeit des linienspezifischen Betriebskonzepts in der stabilen Phase und damit die Beschreibung von Modul 3. In Modul 3 wird Teilproblem III gelöst und damit die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase sichergestellt.

Als Methode zur Lösung von Teilproblem III wurde eine KE/KL-Heuristik ausgewählt. Aufgrund der Anwendung der KE/KL-Heuristik auf das periodische Fahrplankonzept der stabilen Phase sind Modifikationen der KE/KL-Heuristik erforderlich. Die Modifikationen betreffen das Nicht-Vorhandensein einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge und das Entfernen obsoleter Konfliktlösungen.

Als mögliche Modifikationen der KE/KL-Heuristik aufgrund des Nicht-Vorhandenseins einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge wurden zwei geeignete Modifikationen bestimmt:

- Kriterium „Fahrtrichtung“ mit Sekundärkriterium „Konfliktort“
- Kriterium „Zeitpunkt mit dynamischem Endzeitpunkt“.

Für die Modifikation ausgewählt wurde der Ansatz „Zeitpunkt mit dynamischem Endzeitpunkt“. Dies umfasst eine Beibehaltung der zeitlichen Reihung der Konflikte zusammen mit einem mehrmaligen Durchlaufen des Fahrplankonzepts der stabilen Phase. Eine KE/KL-Heuristik, basierend auf den Kriterien „Fahrtrichtung“ und „Konfliktort“, scheint ebenfalls eine Möglichkeit zur Reihung der Konflikte zu sein. Bislang gibt es zu KE/KL-Heuristiken mit zeitunabhängigen Kriterien, soweit bekannt, noch keine Ansätze, sodass dazu weitere Forschung erfolgen sollte.

Für das Entfernen von obsoleten Konfliktlösungen wurde eine Kombination der beiden bestehenden Ansätze von Chiang et al. (1998) und Crespo (2020) gewählt. Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Erkennung bzw. Verhinderung von Schleifen. Der gewählte Ansatz könnte durch einen problemspezifischeren Ansatz, der ähnlich zu Chiang et al. (1998) die Abhängigkeiten der Konfliktlösungen untereinander berücksichtigt, ersetzt werden. Dadurch könnte der Zeit- und Speicherbedarf der KE/KL-Heuristik reduziert werden. Auch sollte eine Erweiterung auf nicht optimale Konfliktlösungen geprüft werden und die Berücksichtigung weiterer elementarer Konfliktlösungen ermöglicht werden.

Da das Entfernen von obsoleten Konfliktlösungen für die Echtzeit-Fahrplananpassung weniger relevant ist, hat das Problem bisher nur wenig Beachtung gefunden. Dennoch könnten weitere Erkenntnisse, durch die z. B. die Reduzierung von obsoleten Konfliktlösungen in der Bewertung von KLA berücksichtigt wird, auch dazu beitragen, die Echtzeit-Fahrplananpassung mittels KE/KL-Heuristiken zu verbessern.

Damit Modul 3 möglichst kompatibel für verschiedene KE/KL-Heuristiken ist, wurden die identifizierten Modifikationen in eine generische KE/KL-Heuristik (Crespo et al. 2023) integriert. Außerdem wurden die Module der generischen KE/KL-Heuristik hinsichtlich der Anwendung auf einen periodischen Fahrplan diskutiert. Das resultierende Modul 3 besteht aus den vier Modulen:

- Prognose (Modul 3.1)
- Konflikterkennung (Modul 3.2)
- Konfliktlösung (Modul 3.3)
- Bewertung (Modul 3.4)

Kann für Modul 3 keine Lösung bestimmt werden, erfolgt eine Rückkopplung an Modul 1. Könnte die Umsetzbarkeit des linienspezifischen Betriebskonzepts in die stabile Phase durch Modul 3 sichergestellt werden, folgt als Nächstes die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der Einschwingphase.

8 Sicherstellung der Einschwingfähigkeit

8.1 Einleitung

Die Adaption von SFP lässt sich in vier Teilprobleme und eine kundenorientierte Bewertung untergliedern (siehe Kapitel 3.4). In den vorangegangenen Kapiteln 4, 5 und 7 wurden die Teilprobleme I bis III bearbeitet. Außerdem wurde in Kapitel 6 die kundenorientierten Bewertungen des SFP bestimmt. In diesem Kapitel wird Teilproblem IV, die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der Einschwingphase, behandelt (siehe Kapitel 3.4).

Die Einschwingphase stellt den Übergang zwischen der aktuellen Betriebsituation und dem periodischen Fahrplankonzept der stabilen Phase dar (siehe Kapitel 2.4.1). Durch die Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 (siehe Kapitel 4) und/oder durch die Anpassung des Fahrplankonzepts der stabilen Phase in Modul 3 kann die betriebliche Umsetzbarkeit der Einschwingphase (Anforderung siehe Kapitel 3.3) nicht mehr gegeben sein. Auch kann die aktuelle Betriebsituation dazu führen, dass das Betriebskonzept nicht umsetzbar ist.

In den bisher durchlaufenen Modulen wurde sichergestellt, dass das Betriebskonzept auf der aktuellen Infrastruktursituation umsetzbar ist und dass das vom Betriebskonzept vorgegebene Fahrplankonzept der stabilen Phase betrieblich umsetzbar ist. Beides sind zwar notwendige Voraussetzungen, um eine Einschwingphase zu realisieren, aber keine hinreichende Bedingung, dass ein Einschwingen betrieblich umsetzbar oder in der vorgegebenen Einschwingdauer möglich ist.

Um die betriebliche Umsetzbarkeit in der Einschwingphase sicherzustellen ist, entsprechend den Vorgaben aus Kapitel 3, ein Fahrplan der Einschwingphase zu erstellen. Zur Erstellung des Fahrplans werden die auftretenden Konflikte beim Übergang von der aktuellen Betriebsituation zum Fahrplankonzept der stabilen Phase durch zugspezifische Maßnahmen gelöst (siehe Kapitel 3.4). Der resultierende Fahrplan der Einschwingphase kann in der kundenorientierten Bewertung des SFP (siehe Kapitel 6) berücksichtigt werden.

Ziel des Kapitels ist die Entwicklung eines Algorithmus zur Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der Einschwingphase. Gemäß Kapitel 3.4 entspricht dies der Entwicklung von Modul 4 der Systemarchitektur.

Der Input von Modul 4 ist das angepasste Betriebskonzept mit umsetzbarem Fahrplankonzept der stabilen Phase (Output Modul 3) sowie die aktuelle Infrastruktur- und Betriebsituation. Ggf. hat in Modul 1 und Modul 4 kein Bedarf für eine Anpassung des Betriebskonzepts bestanden. Um – analog zu Modul 3 – zu verdeutlichen, dass auf den Output von Modul 3 Bezug genommen wird, wird im Weiteren stets der Begriff des „angepassten Betriebskonzepts“ verwendet.

In Modul 4 erfolgt die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der Einschwingphase. Die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der Einschwingphase kann zu zwei möglichen Ergebnissen führen:

1. In Modul 4 konnte ein Fahrplan der Einschwingphase bestimmt werden.
2. In Modul 4 konnte kein Fahrplan der Einschwingphase bestimmt werden.

Konnte ein Fahrplan der Einschwingphase bestimmt werden, ist dieser der Output von Modul 4. Konnte kein Fahrplan der Einschwingphase bestimmt werden, ist entsprechend dem iterativen

Prozess (Kapitel 3.4) eine Rückkopplung zu Modul 3 bzw. zu Modul 1 vorzunehmen. Dort sind die Anforderungen an die Lösung so zu verändern, dass in den Modulen eine Lösung erzeugt wird, mit der in Modul 4 ein Fahrplan der Einschwingphase bestimmt werden kann.

Der Aufbau von Kapitel 8 folgt dem grundsätzlichen Aufbau der Hauptkapitel gemäß Kapitel 3.5. Zunächst wird in Kapitel 8.2 die Methode zur Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der Einschwingphase ausgewählt. Dafür erfolgt eine Problembeschreibung von Teilproblem IV. Aufbauend auf dieser werden verschiedene Methoden zur Lösung des Teilproblems diskutiert und eine Methode ausgewählt. Die ausgewählte Methode bildet die Grundlage für Modul 4.

Modifikationen, die für die Anwendung der ausgewählten Methode auf Teilproblem IV erforderlich sind, werden in Kapitel 8.3 diskutiert und ausgewählt. In Kapitel 8.4 erfolgt die Beschreibung von Modul 4 unter Beachtung der ausgewählten Methode und der erforderlichen Modifikationen. In Kapitel 8.5 werden die Ergebnisse von Kapitel 8 zusammengefasst und diskutiert.

8.2 Methode zur Sicherstellung der Einschwingfähigkeit

Ziel dieses Kapitels ist es, die Methode zur Lösung des Teilproblems IV auszuwählen. Anhand der Methode soll ein Fahrplan für die Einschwingphase bestimmt werden. Dieser Fahrplan der Einschwingphase soll ausgehend von der aktuellen Betriebsituation zu einem Betrieb überleiten, wie er im Fahrplankonzept der stabilen Phase vorgesehen ist. Grundlagen für die Auswahl der Methode bilden die Anforderungen aus Kapitel 3.3.

Zur Auswahl einer Methode wird zunächst Teilproblem IV beschrieben (Kapitel 8.2.1). Sodann werden mögliche Methoden anhand der in Kapitel 3.4 als relevant für Modul 4 festgelegten Anforderungen diskutiert und eine Methode ausgewählt (Kapitel 8.2.2). Anschließend kann aufbauend auf der Methode die Vorgehensweise zur Entwicklung des Algorithmus zur Sicherstellung der Einschwingfähigkeit entwickelt werden (Kapitel 8.2.3).

8.2.1 Problembeschreibung

Zur Auswahl der Methode erfolgt zunächst eine Beschreibung von Teilproblem IV. Dafür wird das Problem zunächst formuliert. Anschließend werden die Bedingungen an die Problemlösung sowie Problemkomplexität und Problemgröße beschrieben.

Problemformulierung

Output von Modul 3 (siehe Kapitel 7) ist eine Menge von betrieblichen Maßnahmen (BK_p^*), die das (angepasste) Betriebskonzept bilden. BK_p^* definieren neben dem Liniennetzplan ein periodisches Fahrplankonzept für die stabile Phase.

Teilproblem IV ist die Sicherstellung der Einschwingfähigkeit des SFP. Für Teilproblem IV ist somit zu prüfen, ob ein Fahrplan besteht, der die aktuelle Betriebsituation B' unter Berücksichtigung der aktuellen Infrastruktursituation G' in das periodische Fahrplankonzept der stabilen Phase überführt. Teilproblem IV kann somit auch als Erstellung eines Fahrplans der Einschwingphase verstanden werden.

Der Fahrplan der Einschwingphase entsteht durch Anwendung zugbezogener, elementarer betrieblicher Maßnahmen (siehe Kapitel 3.4) auf den Fahrplan des Regelbetriebs. Anders als in Modul 3 bestehen keine Einschränkungen der betrieblichen Maßnahmen, sodass auch

Maßnahmen, die Laufweg oder Takt der Linienroute betreffen, angewendet werden können (siehe Kapitel 3.4).

Bedingungen an die Problemlösung

Für die Erstellung des Fahrplans der Einschwingphase sind die Anforderungen 1.A und 2.A bis 2.C aus Kapitel 3.3 sowie die in Tabelle 3-5 festgelegten Anforderungen aus 1.B zu berücksichtigen.

Wie auch bei Teilproblem III ist eine Anforderung die Konfliktfreiheit. Für die Anforderung eines stabilen Betriebs in der Einschwingphase ist nach der Aufteilung in Kapitel 3.4 Konfliktfreiheit herzustellen bzgl.

- Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten,
- Belegungskonflikten und
- Umlaufkonflikten.

Bei der Herstellung der Konfliktfreiheit sind Zuschläge und Pufferzeiten entsprechend Kapitel 3.4 zu berücksichtigen.

Außerdem soll bei der Anpassung des Betriebskonzepts die Auswirkung auf die Bewertung des Verkehrskonzepts berücksichtigt werden (siehe Kapitel 3.4). Analog zu Teilproblem I ergibt sich aus der verkehrlichen Bewertung des Verkehrskonzepts sowohl eine Nebenbedingung (verkehrliche Mindestqualität) als auch ein Optimierungsziel (Maximierung der verkehrlichen Bewertung des Verkehrskonzepts) (siehe Kapitel 4.2.1).

In der kundenorientierten Bewertung des SFP in Modul 5 fließt der Fahrplan der Einschwingphase ein (siehe Kapitel 3.4). Somit werden mögliche negative verkehrliche Auswirkungen einer langen Einschwingphase über die Widerstandsveränderung der Einschwingphase berücksichtigt. Eine zusätzliche kundenorientierte Bewertung der Dauer der Einschwingdauer erfolgt daher nicht.

Aufgrund der Berücksichtigung der Einschwingdauer in der verkehrlichen Bewertung ist im Weiteren zu diskutieren, ob die Einschwingdauer als eigenständige Anforderung obsolet ist. Die Einschwingphase ist durch einen inkonstanten Fahrplan charakterisiert (siehe Kapitel 2.4.1). Ein solcher Fahrplan kann daher deutlich unterschiedliche Verbindungen für eine Relation bieten und entspricht somit nicht der Anforderung nach „Nachvollziehbarkeit“. Der inkonstante Fahrplan entspricht auch nicht dem gewohnten Mobilitätsverhalten der Kunden und erschwert zusätzlich die Ressourcenplanung der Disponenten. Eine lange Einschwingphase steht somit der Anforderung „Zuverlässigkeit“ entgegen. Daher wird die Einschwingdauer als Kriterium beibehalten. Dies entspricht auch der Anforderung nach Kontinuität, da die Einschwingdauer auch bei bestehenden Ansätzen zur Planung von SFP berücksichtigt wird (siehe Kapitel 2.4.2).

Somit ergibt sich eine weitere Randbedingung aus der Anforderung, dass eine maximale Einschwingdauer eingehalten werden soll. Als Grenzwert für die Einschwingdauer kann bei Bedarf ein absoluter Grenzwert und/oder ein relativer Grenzwert, beispielsweise mit Bezug zur geschätzten Dauer der Störung, angewendet werden. Die Einschwingdauer ist auch ein Optimierungsziel, da die Einschwingphase möglichst kurz sein soll (siehe Kapitel 3.3).

Problemkomplexität und Problemgröße

Ausgangslage des Fahrplans der Einschwingphase ist die aktuelle Betriebssituation B' . Eine weitere Randbedingung ist das Fahrplankonzept der stabilen Phase, da der Fahrplan der Einschwingphase den Übergang zu diesem darstellen soll. Da entsprechend der gefundenen Literatur bei der Planung von SFP kein Fahrplan der Einschwingphase erstellt wird (Kapitel 2.4), besteht keine Ausgangslösung für die Lösung von Teilproblem IV.

Sowohl bei der Fahrplananpassung als auch der Anpassung der Umlaufplanung handelt es sich um NP-schwere Probleme (Brucker 2007; Budai et al. 2010). Da Teilproblem IV – entsprechend der Anforderung nach einer integrierten Berücksichtigung von Fahrplan und Fahrzeugumlaufplan – einer Fahrplananpassung mit Berücksichtigung der Umlaufplanung entspricht, ist anzunehmen, dass auch Teilproblem IV NP-schwer ist. Eine umfassende Analyse des Teilproblems findet sich in Crespo (2020).

Analog zu Teilproblem III umfasst die Problemgröße räumlich betrachtet das gesamte S-Bahn-Netz, da Konflikte im gesamten S-Bahn-Netz auftreten können. Die Infrastrukturmodellierung muss eine Erkennung der drei Konfliktarten ermöglichen. Zeitlich betrachtet beginnt die Einschwingphase mit dem Ausrufen des SFP und endet mit dem Erreichen des Fahrplankonzepts der stabilen Phase (siehe Kapitel 2.4.1).

8.2.2 Methodendiskussion

Nachdem Teilproblem IV beschrieben wurde, werden darauf aufbauend Methoden zur Lösung des Problems diskutiert. Analog zu Teilproblem III ist aufgrund der Komplexität des Problems zusammen mit der Anforderung nach einer schnellen Lösungsbereitstellung davon auszugehen, dass sich exakte Methoden nur eingeschränkt zur Lösung des Teilproblems eignen (siehe Kapitel 7.2.2).

In der Literatur existieren heuristische Ansätze,

- die prüfen, ob ein gegebenes Betriebskonzept einen Fahrplan der Einschwingphase ermöglicht (siehe Kapitel 2.4.2) und
- die sich mit der Erstellung von Fahrplänen der Einschwingphase befassen (siehe Kapitel 2.4.3).

Ein heuristischer Ansatz, der prüft, ob ein gegebenes Betriebskonzept einen Fahrplan der Einschwingphase ermöglicht, wird in den Arbeiten von Chu et al. (2012), Brauner und Oetting (2019) und Brauner (2023) angewendet. Die Arbeiten bauen teilweise aufeinander auf, sodass der Kern des Ansatzes in den drei Arbeiten gleich ist (siehe Kapitel 2.4.2). Unter Anwendung von konstruktiven und analytischen Methoden wird geprüft, ob ein Fahrplan der Einschwingphase existieren kann. Die Einschwingdauer wird ausgehend vom periodischen Fahrplan des regulären Betriebs bestimmt.

Da der Anwendungsfall der Arbeiten die Planung ist, kann keine konkrete Betriebssituation berücksichtigt werden. Stattdessen prüft Brauner (2023) zwei Ausschlusskriterien („Dauer der Abstellung oder Umleitung“ und „kontinuierliche (oder zu lange andauernde) Überlastung eines Netzelements“; Brauner (2023, S. 112); siehe auch Kapitel 2.4.2). Anders als in Kapitel 3.4 gefordert, wird durch den Ansatz keine Konfliktfreiheit hergestellt. Aus diesen beiden Gründen (keine Berücksichtigung der aktuellen Betriebssituation und keine Herstellung von Konfliktfreiheit) wird der Ansatz nicht übernommen.

Heuristische Ansätze, die sich mit der Erstellung von Fahrplänen der Einschwingphase befassen, wurden von Nakamura et al. (2011) und Crespo (2020) entwickelt.

Die für die Auswahl der Methode relevanten Anforderungen „Nachvollziehbarkeit der Adaption“ und „schnelle Lösungsbereitstellung“ werden in beiden Ansätzen berücksichtigt. Auch sind beide Ansätze modular aufgebaut, sodass einzelne Funktionen in andere Systeme integriert werden können. Beide Ansätze berücksichtigen keine Einschwingdauer, diese kann aber anhand des erstellten Fahrplans der Einschwingphase abgeschätzt werden. Verkehrliche Kriterien liegen nicht im Fokus der beiden Arbeiten und werden nur indirekt über betriebliche Kriterien berücksichtigt. Die geforderte Berücksichtigung der Auswirkung auf die Bewertung des Verkehrskonzepts wird daher nur bedingt entsprochen.

Das behandelte Problem von Crespo (2020) entspricht im Hinblick auf die berücksichtigten betrieblichen Maßnahmen des SFP und auch hinsichtlich der betrieblichen Maßnahmen zur Erstellung des Fahrplans eher Teilproblem IV als das behandelte Problem von Nakamura et al. (2011).

Da der Ansatz von Crespo (2020) die erforderlichen Anforderungen erfüllt und eine größere Ähnlichkeit zu Teilproblem IV aufweist, wird der Ansatz von Crespo (2020) als Methode zur Lösung des Teilproblems ausgewählt. Aufgrund der nur indirekt vorhandenen Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Bewertung des Verkehrskonzepts ist bei der Anwendung des Ansatzes zu prüfen, inwieweit verkehrliche Kriterien zu integrieren sind. Da der Ansatz die Einschwingdauer bisher nicht berücksichtigt, ist weiterhin eine Prüfung der Einschwingdauer zu integrieren.

8.2.3 Vorgehensweise

Für die Entwicklung der Algorithmen zur Sicherstellung der Umsetzbarkeit der Einschwingphase wurde mit dem Ansatz von Crespo (2020) die Methode zur Lösung von Teilproblem IV in Modul 4 ausgewählt. Bevor auf dieser Methode aufbauend die Entwicklung der Algorithmen von Modul 4 erfolgt, wird in diesem Kapitel mit der Vorgehensweise der Aufbau des weiteren Kapitels 8 festgelegt.

Der Ansatz von Crespo (2020) ist modular aufgebaut. In Kapitel 8.3 wird ausgehend von den Modulen des Ansatzes von Crespo (2020) hergeleitet, welche Module des Ansatzes für Modul 4 übernommen werden und ob ggf. Modifikationen an den übernommenen Modulen erforderlich sind.

In Kapitel 8.4 wird Modul 4 unter Beachtung der in Kapitel 8.3 identifizierten Module des Ansatzes von Crespo (2020) und deren Modifikationen beschrieben. Die Integration des Ansatzes von Crespo (2020) umfasst auch die Einbindung in den iterativen Prozess der Adaption von SFP (siehe Kapitel 3.4). Daher liegen die Schwerpunkte bei der Beschreibung von Modul 4 auf der Terminierung des Algorithmus und auf den Rückkopplungen bei Terminierung von Modul 4 ohne gültige Lösung im Rahmen des iterativen Prozesses.

8.3 Modifikation der Methode zur Sicherstellung der Einschwingfähigkeit

In Kapitel 8.2 wurde als Methode zur Sicherstellung der Umsetzbarkeit der Einschwingphase der Ansatz von Crespo (2020) ausgewählt. Bevor anschließend Modul 4 in Kapitel 8.4 beschrieben wird, wird in diesem Kapitel 8.3 für alle Module des Ansatzes von Crespo (2020) (siehe Abbildung 2-6) diskutiert, ob

- diese in das Modul 4 übernommen werden und
- ggf. Modifikationen an den übernommenen Modulen erforderlich sind.

Anschließend werden die erforderlichen Modifikationen entwickelt.

Die ersten beiden Module des Ansatzes von Crespo (2020) sind keine funktionalen Einheiten des Ansatzes, sondern enthalten die Inputs des Ansatzes. Die Infrastruktursituation und die aktuelle Betriebssituation aus dem **Modul „Input“** entsprechen den in Kapitel 3.1 festgelegten Inputs. Für die weiteren Inputs ist folgende Modifikation vorzunehmen: statt dem Betriebskonzept des ausgewählten SFP ist als weiterer Input das Betriebskonzept aus Modul 3 zu verwenden.

Weitere Inputs des Ansatzes von Crespo (2020) sind die elementaren Konfliktlösungen des **Moduls „Elementare Konfliktlösungen“**. In Modul 3 wird im Zuge der Identifizierung von Fahrzeugverfügbarkeitskonflikten geprüft, ob die erforderliche Anzahl von Zügen mit der vorhandenen Anzahl von Zügen übereinstimmt (siehe Kapitel 7.4.2). Ist für die Lösung eines identifizierten Fahrzeugverfügbarkeitskonflikts die Lösung durch eine zugspezifische betriebliche Maßnahme erforderlich, kann in Modul 3 keine Implementierung dieser Maßnahmen erfolgen (siehe Kapitel 7.4.3). Daher wird in Modul 3 lediglich geprüft, ob die Voraussetzungen dafür gegeben sind, dass der Konflikt durch eine KLA mit zugspezifischer betrieblicher Maßnahme gelöst werden kann. Die Auswahl und Implementierung der zugspezifischen betrieblichen Maßnahmen erfolgt in Modul 4 (siehe Kapitel 3.4).

Für die elementaren Konfliktlösungen in Modul 4 ist zu beachten, dass eine Konsistenz besteht zwischen den zugspezifischen elementaren Konfliktlösungen, die in Modul 3 zur Lösung von Fahrzeugverfügbarkeitskonflikten geprüft werden und den Maßnahmen, die in Modul 4 für die Erstellung des Fahrplans der Einschwingphase berücksichtigt werden. Die zugspezifischen betrieblichen Maßnahmen für Modul 3 und Modul 4 müssen daher übereinstimmen.

Die im **Modul „Anwendung des SFP“** durchgeführte Anwendung des SFP erfolgt teilweise schon in den vorherigen Modulen 1 und 3. Die Identifizierung der Infrastrukturelemente, die von den linienspezifischen Maßnahmen genutzt werden, ist bereits bei der Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 erforderlich. Auch die Ermittlung des Einflusses der Störung und des angepassten Betriebskonzepts auf die Züge der aktuellen Betriebssituation findet teilweise bereits in Modul 3 für die Bestimmung der Anzahl der vorhandenen Züge statt (siehe Kapitel 7.4.2).

In dem **Modul „Identifizierung und Klassifizierung von linienspezifischen Konflikten“** werden Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte und Erreichbarkeitskonflikte identifiziert und anhand der elementaren Konfliktlösungen, die zur Lösung eines Konflikts angewendet werden können, klassifiziert. Eine Identifizierung von Fahrzeugverfügbarkeitskonflikten erfolgt ebenfalls in Modul 3 (siehe Kapitel 7). Wird in Modul 3 ebenfalls der Ansatz von Crespo (2020) zur Identifizierung und Klassifizierung von Fahrzeugverfügbarkeitskonflikten genutzt, können die

dort generierten Informationen zu den Fahrzeugverfügbarkeitskonflikten für Modul 4 verwendet werden.

Die Identifizierung und Klassifizierung der Erreichbarkeitskonflikte bedürfen keiner Modifikation. Insgesamt bedarf das Modul „Identifizierung und Klassifizierung von linienspezifischen Konflikten“ keiner Anpassung, ist aber mit der Bearbeitung von Fahrzeugverfügbarkeitskonflikten in Modul 3 zu verknüpfen.

Zur Lösung der linienspezifischen Konflikte werden im **Modul „Generierung von zugspezifischen Konfliktlösungsalternativen (PVSCS) in einem leeren Netzwerk“** zugspezifische Konfliktlösungsalternativen (PVSCS) generiert. Bei der Generierung der PVSCS wird sichergestellt, dass der Zug der PVSCS nach der Wende im Linienast pünktlich ist (Crespo 2020, S. 307 ff.). Die Dauer bis zum Ende der PVSCS entspricht somit der Einschwingdauer des Zuges. Die maximale Dauer, bis ein Zug mit einer PVSCS pünktlich ist bzw. seine Abstellung erreicht, entspricht somit ungefähr der maximalen Umlaufzeit im Netz.

Da die Einhaltung der maximalen Einschwingdauer eine harte Anforderung ist (siehe Kapitel 3.3), darf eine PVSCS die maximale Einschwingdauer nicht überschreiten. Bei der betrieblichen Verifizierung der PVSCS ist daher für jede PVSCS zu überprüfen, ob diese die maximale Einschwingdauer überschreitet. Ist dies der Fall, sind entweder weitere betriebliche Maßnahmen für die PVSCS zu implementieren (z. B. eine alternative Wende) oder die PVSCS ist zu verwerfen. Die Generierung der PVSCS muss daher angepasst werden, sodass die PVSCS die maximale Einschwingdauer nicht überschreiten.

Aus den PVSCS entwickelt das **Modul „Auswahl eines PVSCS für jeden Zug und Kombination der ausgewählten PVSCS“** PVSCS-Kombinationen. Zur Entwicklung der PVSCS-Kombinationen kommt ein genetischer Algorithmus zum Einsatz. Zur Herstellung der Konfliktfreiheit innerhalb der PVSCS-Kombinationen wird auf das Modul **„KE/KL-Heuristik für Belegungs-, Infrastruktur-, Umlauf- und Servicekonflikte“** zurückgegriffen.

Bei der Herstellung der Konfliktfreiheit der PVSCS-Kombinationen kann durch die Implementierung von Konfliktlösungen die Dauer einer PVSCS verlängert werden. PVSCS-Kombinationen, bei denen die maximale Einschwingdauer überschritten wird, erfüllen die Anforderungen an die Einschwingdauer nicht und sind somit ungültig. Die Entwicklung der PVSCS muss daher angepasst werden, sodass sichergestellt ist, dass gültige PVSCS-Kombinationen erzeugt werden.

Möglichkeiten zur Integration der Einschwingdauer sind:

- a) Die KE/KL-Heuristik des Moduls „KE/KL-Heuristik für Belegungs-, Infrastruktur-, Umlauf- und Servicekonflikte“ wird abgebrochen, sobald eine PVSCS-Kombination die maximale Einschwingdauer überschreitet.
- b) Die Einschwingdauer wird in die bestehende Bewertung der PVSCS-Kombination des genetischen Algorithmus integriert.
- c) Die Einschwingdauer wird als weiteres Kriterium zur Auswahl der PVSCS verwendet.

Die Möglichkeiten zur Integration der Einschwingdauer sind auch in Abbildung 8-1 dargestellt.

Möglichkeit a stellt eine harte Bedingung dar und ermöglicht keine Verbesserungen der PVSCS-Kombinationen in den weiteren Schritten des genetischen Algorithmus. Für Möglichkeit b ist ein Ansatz zur Integration der Einschwingdauer in die bisherige Bewertungsfunktion

erforderlich. In der Literatur konnte kein Ansatz gefunden werden, in dem die Einschwingdauer mit anderen betrieblichen Kriterien kombiniert wird. Die Entwicklung einer solchen Bewertung liegt nicht im Rahmen dieser Arbeit.

Bei Möglichkeit c erfolgt die Auswahl der PVSCS-Kombinationen für die nächste Generation sowohl anhand der bestehenden Bewertung als auch der Einschwingdauer. Umgesetzt werden kann dies z. B. dadurch, dass die nächste Generation zu gleichen Teilen anhand der bestehenden Bewertungen und der Einschwingdauer ausgewählt wird. Da erwartet wird, dass Möglichkeit a für die Entwicklung von guten Lösungen durch den genetischen Algorithmus hinderlich ist und Möglichkeit b nicht im Umfang dieser Arbeit liegt, wird Möglichkeit c für die Integration der Einschwingdauer ausgewählt.

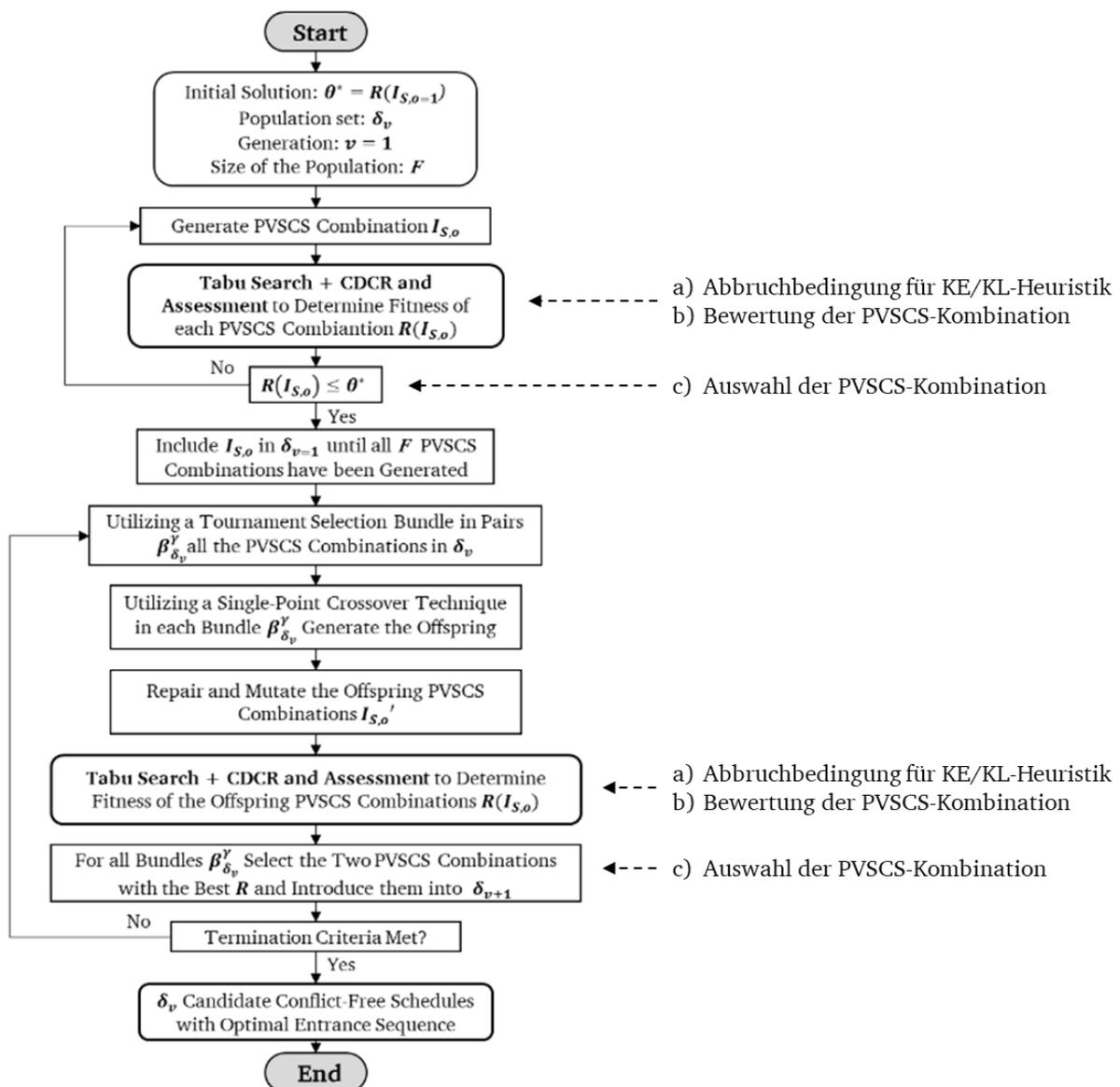


Abbildung 8-1: Mögliche Modifikation des genetischen Algorithmus zur Entwicklung der PVSCS-Kombinationen im Modul „Auswahl eines PVSCS für jeden Zug und Kombination der ausgewählten PVSCS“ des Ansatzes von Crespo (2020) (Abbildung basierend auf Abbildung 10.10 von Crespo 2020, S. 342)

Das **Modul „Bewertungen“** umfasst sowohl die Bewertung der KLA der KE/KL-Heuristik als auch die Bewertung des durch die KE/KL-Heuristik erzeugten Fahrplans (der PVSCS-Kombination). Entsprechend der Anforderung nach einer kundenorientierten Bewertung sollten die Bewertungskriterien die in der kundenorientierten Bewertung aus Modul 2 einbezogenen Widerstandsveränderungen adressieren (siehe Kapitel 8.2.2).

Für die Bewertung von KLA auf Basis der kundenorientierten Bewertung aus Modul 2 wurden für Modul 3 folgende Bewertungskriterien bestimmt (siehe Kapitel 7.4.4):

- Differenz zwischen regulär geplanter und im Fahrplan vorgesehener An- und Abfahrtszeiten
- Abweichungen des zeitlichen Abstandes von zwei Zügen einer Linie zum im Liniennetzplan vorgesehenen Takt
- Änderung zu regulären (bzw. des im Betriebskonzept des ausgewählten SFP enthaltenen) Bahnsteiggleises
- Änderung in der Betriebssituation (Generierung von Folgekonflikten und Lösung von weiteren Konflikten durch die KLA)

Von den sechs Bewertungskriterien des Moduls „Bewertungen“ (Verspätungen; erwartete Auswirkungen auf die weitere Betriebssituation (Folgekonflikte); Änderung der Bahnsteiggleise; (Teil)Ausfälle; Änderung der Wendebahnhöfe; Abweichung der Fahrzeugstandorte am Ende des Betriebstages) stimmen drei Bewertungskriterien (Verspätungen; erwartete Auswirkungen auf die weitere Betriebssituation (Folgekonflikte); Änderung der Bahnsteiggleise) mit den Bewertungskriterien für Modul 3 überein. Für die übrigen Bewertungskriterien (Ausfälle; Änderung der Wendebahnhöfe; Abweichung der Fahrzeugstandorte am Ende des Betriebstages) ist zu prüfen, ob diese ebenfalls einen Bezug zur Widerstandsveränderung haben oder durch andere Bewertungskriterien ersetzt werden sollten bzw. entfallen.

Das Bewertungskriterium „Ausfall“ aus dem Modul „Bewertungen“ hat einen Bezug zu Widerstandsveränderungen, da die zusätzliche Wartezeit der Passagiere die nächste Leistung als Bewertungsgröße dient. Das Kriterium „Ausfall“ hat damit eine hohe Ähnlichkeit zu der Bewertung der Abweichungen des zeitlichen Abstandes von zwei Zügen einer Linie in Modul 3 (siehe Kapitel 7.4.4). Entsprechend der Anforderung nach „Nachvollziehbarkeit“ sollte nur eins der beiden Bewertungskriterien sowohl in Modul 3 als auch in Modul 4 verwendet werden. Somit wird allen vier Bewertungskriterien aus Modul 3 entsprochen.

Das Bewertungskriterium „Änderung der Wendebahnhöfe“ berücksichtigt die Änderung des Kapazitätsverbrauchs in den Wendebahnhöfen (siehe Crespo 2020, S. 432 ff.) und das Bewertungskriterium „Abweichung der Fahrzeugstandorte am Ende des Betriebstages“ berücksichtigt die Änderung der Umlaufplanung (siehe Crespo 2020, S. 441 ff.). Die beiden Bewertungskriterien haben somit einen überwiegenden betrieblichen Bezug, können aber zu betrieblich besseren Lösungen führen und somit auch zu einer kundenorientierten Lösung. Die beiden Bewertungskriterien sollten somit übernommen werden.

Das letzte Modul des Ansatzes von Crespo (2020) ist das **Modul „Entfernung nicht erforderlicher Maßnahme aus den konfliktfreien Fahrplänen (PVSCS-Kombinationen) und Auswahl einer der untersuchten Fahrpläne“**, in der eine KE/KL-Heuristik zur Entfernung obsoleter Maßnahmen angewendet wird. Der Einsatz der KE/KL-Heuristik bedarf keiner Modifikation.

Zusammenfassend ist für den Einsatz des Ansatzes von Crespo (2020) im Modul 4 als Modifikation die Ergänzung der Prüfung der maximalen Einschwingdauer des Fahrplans in der Generierung der PVSCS und der Entwicklung der PVSCS-Kombinationen erforderlich. Außerdem sollte eine Angleichung der Bewertungskriterien des Moduls „Bewertung“ zu den Bewertungskriterien von Modul 3 erfolgen. Synergien bestehen mit Modul 3 und der Erkennung und Prüfung der Lösung für Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte.

8.4 Beschreibung von Modul 4

In Kapitel 8.2 wurde als Methode zur Sicherstellung der Einschwingfähigkeit (Teilproblem IV) der bestehende Ansatz von Crespo (2020) ausgewählt. Für die Anwendung des Ansatzes zur Lösung von Teilproblem IV sind an einigen Modulen Modifikationen erforderlich (siehe Kapitel 8.3). Modul 4 entspricht daher dem Ansatz von Crespo (2020) mit den in Kapitel 8.3 beschriebenen Modifikationen. Für eine detaillierte Beschreibung des Ansatzes wird auf Crespo (2020) verwiesen. Eine Zusammenfassung des Ansatzes von Crespo (2020) findet sich in Kapitel 2.4.3.

Um eine Terminierung der Adaption des SFP zu erreichen, muss Modul 4 sicher terminieren. Außerdem ist bei einer Terminierung ohne gültige Lösung eine Rückkopplung von Modul 4 zu Modul 1 bzw. Modul 3 vorgesehen (siehe Kapitel 3.4). Auch für den durch Modul 4 angestoßene iterative Prozess der Adaption des SFP ist eine modulübergreifende Terminierung sicherzustellen.

Im Weiteren werden deshalb die Terminierung von Modul 4 (Kapitel 8.4.1) und die Rückkopplungen bei Terminierung von Modul 4 ohne gültige Lösung bestimmt. Außerdem wird die modulübergreifende Terminierung des durch Modul 4 angestoßenen iterativen Prozesses (Kapitel 8.4.2) geprüft.

8.4.1 Terminierung von Modul 4

Für die Terminierung von Modul 4 (und damit dem Ansatz von Crespo (2020)) ist sicherzustellen, dass ein Terminierungskriterium eingehalten werden kann. Durch Endlosschleifen kann ein Erreichen eines Terminierungskriteriums verhindert werden. Daher werden in diesem Kapitel die Terminierung und die Gefahr von Endlosschleifen bei der Anwendung von Modul 4 diskutiert.

In der Kombination der PVSCS durch den genetischen Algorithmus, als auch der damit verknüpften Tabu-Suche, bestehen Abbruchkriterien, sodass eine Terminierung des Ansatzes von Crespo (2020) sichergestellt ist. Das Aufkommen und Verhindern von Endlosschleifen in der KE/KL-Heuristik wird im Ansatz von Crespo (2020) nicht behandelt, da dort nicht von einem periodischen Charakter des Fahrplans der stabilen Phase ausgegangen wird. Der betrachtete Fahrplan bei Crespo (2020) weist mit dem Betriebsende ein festes Ende auf. Daher ist die Terminierung der synchronen KE/KL-Heuristik sichergestellt. Durch den periodischen Charakter des Fahrplankonzepts der stabilen Phase besteht ein solches Ende nicht und es kann deshalb nicht ausgeschlossen werden, dass es durch die Erzeugung von Folgekonflikten zu Endlosschleifen in der KE/KL-Heuristik kommt.

Bei der Anwendung der KE/KL-Heuristik besteht somit das gleiche Problem wie bei der Terminierung einer KE/KL-Heuristiken bei der Nutzung eines dynamischen Endzeitpunktes (siehe Kapitel 7.3.2). Eine Terminierung der KE/KL-Heuristik des Moduls „KE/KL-Heuristik für Belegungs-, Infrastruktur-, Umlauf- und Servicekonflikte“ von Crespo (2020) kann ebenfalls

durch einen Übergang zu einem fixen Endzeitpunkt nach einer fest vorgeschriebenen Zeitdauer oder einer vorgegebenen Verbesserung zwischen zwei Zyklen erfolgen (siehe Kapitel 7.3.2). Somit wird ein Verharren in einer (Endlos)Schleife unterbunden und die Dauer der Durchführung von Modul 4 begrenzt.

Output des Ansatzes von Crespo (2020) ist ein Fahrplan, der aus einer Menge von Fahrplänen ausgewählt wurde (siehe Kapitel 2.4.3). Wurde in Modul 1 und Modul 3 das Betriebskonzept des ausgewählten SFP nicht angepasst, dann endet die Adaption des SFP nach Modul 4. Ansonsten erfolgt eine weitere kundenorientierte Bewertung in Modul 5.

Sind alle durch den Ansatz von Crespo (2020) generierten Fahrpläne entweder nicht konfliktfrei oder überschreiten die vorgegebene maximale Einschwingdauer, hat Modul 4 keine gültige Lösung für Teilproblem IV erzeugt. In diesem Fall ist der iterative Prozess (siehe Kapitel 3.4) zur erneuten Anpassung der Lösungen der bisherigen Teilprobleme anzustoßen. Die möglichen Terminierungen von Modul 4 sind in Abbildung 8-2 dargestellt.

8.4.2 Rückkopplungen von Modul 4

Wenn Modul 4 ohne gültige Lösung terminiert, ist der iterative Prozess entsprechend Kapitel 3.4 anzustoßen. Ziel der Rückkopplungen ist es, dass in den bisherigen Teilproblemen eine alternative Lösung gefunden wird, die auch in Modul 4 zu einer gültigen Lösung führt. Beim Auslösen der Rückkopplung kann unterschieden werden, ob keine Lösung gültig ist, weil (siehe Abbildung 8-2) kein konfliktfreier Fahrplan oder kein Fahrplan ohne Überschreitung der Einschwingdauer generiert werden konnte. Abschließend wird die modulübergreifende Terminierung des durch Modul 4 angestoßenen iterativen Prozesses diskutiert.

Wenn kein konfliktfreier Fahrplan generiert werden konnte, kann unterschieden werden, welche Art von Konflikt nicht gelöst werden konnte. In dem Ansatz von Crespo (2020) werden sechs Konfliktarten berücksichtigt.

Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte können entweder ein Fahrzeugüberschuss oder ein Fahrzeugmangel sein. Ein Fahrzeugmangel kann stets durch den Ausfall von Leistungen gelöst werden. Demgegenüber kann es vorkommen, dass ein Fahrzeugüberschuss nicht gelöst werden

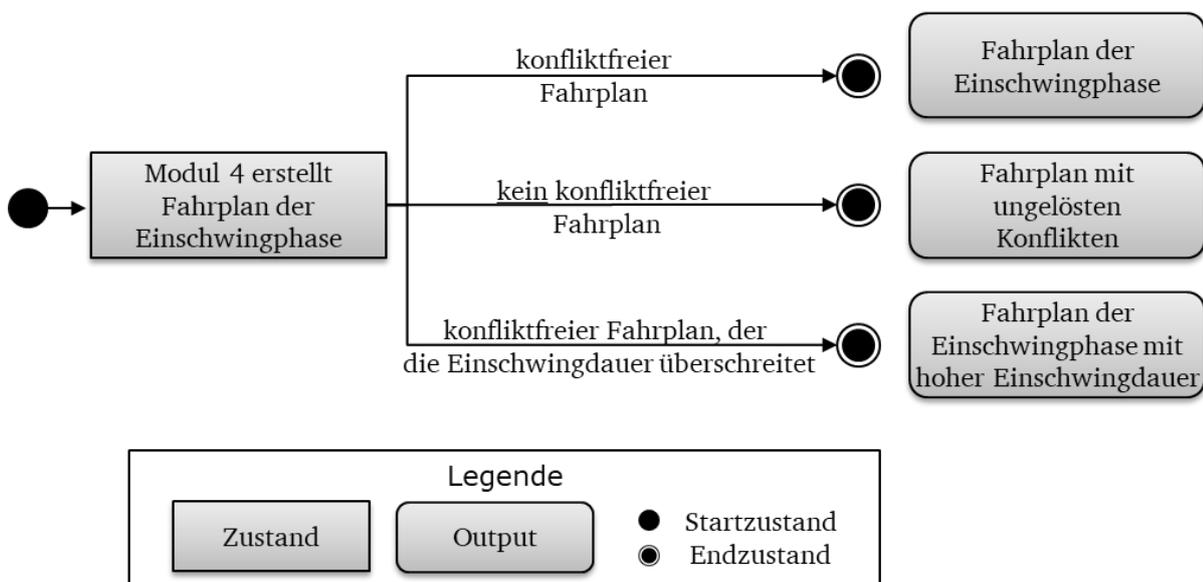


Abbildung 8-2: Mögliche Terminierungen von Modul 3 mit jeweiligem Output

kann, da die elementaren Konfliktlösungen zur Lösung eines Fahrzeugüberschusses nicht umsetzbar sind (Ausgleich mit der korrespondierenden Linie, Abstellen, Überführung von Fahrzeugen auf eine andere Seite der Störung, Vereinen von Zügen). Da ein Fahrzeugüberschuss auch dadurch entstehen kann, dass z. B. die Kapazitäten der Abstellung bereits voll sind, ist der ungelöste Fahrzeugüberschuss nicht allein der Linie des (letzten) nicht lösbaren Fahrzeugverfügbarkeitskonflikts zuzuordnen, sondern der gesamten Seite der Störung. Somit sollte nicht zwangsweise die Linie des (letzten) nicht-lösbaren Fahrzeugverfügbarkeitskonflikts geändert werden, sondern eine alternative Lösung unter Einbeziehung aller Linien der Seite der Störung.

Ein **Erreichbarkeitskonflikt** kann stets durch den Ausfall der Leistung gelöst werden und ein Erreichbarkeitskonflikt kann somit nicht dazu führen, dass kein konfliktfreier Fahrplan generiert werden konnte.

In dem Ansatz von Crespo (2020) werden die Züge der aktuellen Betriebssituation u. a. hinsichtlich ihrer Möglichkeit, ihre Endstation zu erreichen, kategorisiert (siehe Kapitel 2.4.3). Daher steckt bereits in der Kategorie des Zuges die Information, ob es zu nicht-lösbaren **Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten** kommt. Züge mit nicht lösbaren Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten werden von dem Ansatz von Crespo (2020) nicht weiter berücksichtigt und sind manuell zu disponieren. Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte können somit nicht dazu führen, dass durch den Ansatz von Crespo (2020) kein konfliktfreier Fahrplan generiert werden konnte.

Ein nicht-lösbarer **Umlaufkonflikt** kann nicht auftreten, da Umlaufkonflikte durch eine zeitliche Verschiebung der Abfahrt oder eines Ausfalls der nächsten Leistung gelöst werden können. Es ist deshalb nicht zu erwarten, dass aufgrund eines Umlaufkonfliktes kein konfliktfreier Fahrplan generiert werden kann.

Belegungskonflikte sind i. d. R. durch eine zeitliche Verschiebung lösbar. Nur bei Deadlocks kann kein konfliktfreier Fahrplan generiert werden. Analog zu Modul 3 ist in diesem Fall eine alternative Lösung in der Seite der Störung zu finden (siehe Kapitel 7.4.6).

Servicekonflikte werden durch die Übertragung der Wartezeit der Fahrgäste auf eine spätere Leistung gelöst. Eine Übertragung der Wartezeit, ggf. bis in die stabile Phase oder nach Ende der Störung, ist stets möglich. Servicekonflikte können somit nicht dazu führen, dass kein konfliktfreier Fahrplan generiert werden kann.

Zusammenfassend wird davon ausgegangen, dass i. d. R. ein nicht-lösbarer Fahrzeugverfügbarkeitskonflikt (durch einen Fahrzeugüberschuss) oder ein nicht-lösbarer Belegungskonflikt dazu führt, dass es durch einen ungelösten Konflikt zu keiner gültigen Lösung von Teilproblem IV kommt. Ebenfalls zu keiner gültigen Lösung kann es kommen, wenn kein Fahrplan ohne Überschreitung der Einschwingdauer generiert werden konnte (siehe Kapitel 8.4.1).

Nachdem die möglichen Gründe einer ungültigen Lösung erörtert wurden, sind darauf aufbauend die Rückkopplungen von Modul 4 zu bestimmen. Kann kein gültiger Fahrplan in Modul 4 generiert werden, besteht die Möglichkeit einer Rückkopplung zu (siehe Kapitel 3.4)

- Modul 3, um ein alternatives Fahrplankonzept der stabilen Phase zu bestimmen oder zu
- Modul 1, um ein alternatives Betriebskonzept zu bestimmen.

In Modul 3 wird eine KE/KL-Heuristik verwendet, um sicherzustellen, dass das Fahrplankonzept der stabilen Phase betrieblich umsetzbar ist. Um ein alternatives Fahrplankonzept durch die KE/KL-Heuristik zu erstellen, kann

- a) ein alternativer Startpunkt der KE/KL-Heuristik im periodischen Fahrplankonzept ausgewählt werden, sodass ein anderer Konflikt bei Start der KE/KL-Heuristik den ersten Eintrag der Konfliktliste bildet,
- b) ein Parameter der KE/KL-Heuristik (z. B. in der Bewertungsfunktion) geändert werden oder
- c) in der Durchführung der KE/KL-Heuristik für mindestens einen Konflikt eine andere KLA gewählt werden (z. B. für den ersten Konflikt die zweitbeste KLA).

Da bei der Durchführung der KE/KL-Heuristik immer die bestbewertete KLA gewählt wird, ist bei der Auswahl einer anderen KLA (Möglichkeit c) zu erwarten, dass das resultierende Fahrplankonzept der stabilen Phase eine schlechtere Bewertung aufweist. Aufgrund der komplexen betrieblichen Verknüpfungen, die bei der Bewertung einer KLA nicht vollständig berücksichtigt werden können, ergibt sich aber nicht notwendigerweise eine schlechtere Bewertung. Die Auswirkungen der Wahl einer anderen KLA auf das resultierende Fahrplankonzept der stabilen Phase wird als gering eingeschätzt.

Bei den Parametern der KE/KL-Heuristik ist davon auszugehen, dass diese so gewählt wurden, dass die Anforderung an die Dauer der Lösungsbereitstellung und Güte der Lösung erfüllt werden. Eine Änderung der Parameter (Möglichkeit b) geht somit entweder mit einer Erhöhung der Zeit für die Lösungsbereitstellung oder der Erwartung eines schlechteren Ergebnisses einher.

Bei der Nutzung eines alternativen Startpunktes (Möglichkeit a) bleiben die Parameter (im Gegensatz zu Möglichkeit b) und Regeln (im Gegensatz zu Möglichkeit c) der KE/KL-Heuristik erhalten, weshalb die Anforderung an Dauer der Lösungsbereitstellung und Güte der Lösung erfüllt werden. Analog zur Möglichkeit c wird aber ebenfalls eine geringe Änderung des resultierenden Fahrplankonzepts der stabilen Phase erwartet.

Da keine der drei Möglichkeiten der Rückkopplung an Modul 3 den Anforderungen entspricht oder keine signifikante Änderung der Ausgangssituation von Modul 4 erwarten lässt, erfolgt nur eine Rückkopplung an Modul 1.

Eine Rückkopplung an Modul 1 kann, analog zur Rückkopplung von Modul 3 (siehe Kapitel 7.4.6), die Ergänzung einer Bedingung an den Liniennetzplan in Modul 1 umfassen. Diese Bedingung gibt vor, dass eine alternative Lösung in der Seite der Störung gefunden wird, in der es zu keiner gültigen Lösung in Modul 4 kommt. Wie in Kapitel 7.4.6 beschrieben, ist durch die Ausgestaltung von Modul 1 sichergestellt, dass der durch Modul 4 angestoßene iterative Prozess der Adaption des SFP modulübergreifend terminiert.

Zusammenfassend können ein nicht-lösbarer Fahrzeugverfügbarkeitskonflikt (durch einen Fahrzeugminderbedarf), ein nicht-lösbarer Belegungskonflikt und eine Überschreitung der Einschwingdauer dazu führen, dass es zu keiner gültigen Lösung von Teilproblem IV kommt. In diesem Fall erfolgt eine Rückkopplung an Modul 1.

8.5 Zusammenfassung von Kapitel 8 und Diskussion

Ziel des Kapitels war die Entwicklung eines Algorithmus zur Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der Einschwingphase. Dies entspricht der Entwicklung von Modul 4 der Systemarchitektur.

Für die Entwicklung des Algorithmus wurde der Ansatz von Crespo (2020) als Methode zur Lösung von Teilproblem IV ausgewählt. Zur Anwendung des Ansatzes in Moduls 4 wurden einige Module des Ansatzes von Crespo (2020) modifiziert. Die Generierung der PVSCS und die Entwicklung der PVSCS-Kombinationen wurden um eine Prüfung der maximalen Einschwingdauer des Fahrplans ergänzt. Außerdem erfolgte eine Angleichung der Bewertungskriterien des Moduls „Bewertung“ zu den Bewertungskriterien von Modul 3. Weiterhin bestehen Synergien mit Modul 3 für die Erkennung und Prüfung der Lösung für Fahrzeugverfügbarkeitskonflikte.

Eine Rückkopplung von Modul 4 erfolgt, wenn ein nicht-lösbarer Fahrzeugverfügbarkeitskonflikt (durch einen Fahrzeugminderbedarf), ein nicht-lösbarer Belegungskonflikt oder eine Überschreitung der Einschwingdauer dazu führen, dass keine Lösung von Teilproblem IV gefunden wurde. In diesem Fall erfolgt eine Rückkopplung an Modul 1, die die Bedingung umfasst, dass eine alternative Lösung in der Seite der Störung gefunden wird. Wenn in Modul 4 eine Lösung und damit ein Fahrplan der Einschwingphase gefunden wurde, erfolgt eine kundenorientierte Bewertung des SFP in Modul 5 (siehe Kapitel 6).

Die Einschwingdauer als fixes betriebliches Kriterium zur Bewertung des Fahrplans der Einschwingphase bildet die von der Einschwingphase ausgehenden negativen Effekte nicht immer adäquat ab. So hat ein in Richtung Wendebahnhof des Netzastes verkehrender Zug, der die Pünktlichkeitsgrenze nur geringfügig überschreitet, i. d. R. nur geringe verkehrliche und betriebliche Auswirkungen. Der Fahrplan der Einschwingphase sollte daher durch andere betriebliche oder verkehrliche Kriterien bewertet werden oder es sollte eine integrierte Bewertung von Einschwingphase und stabiler Phase erfolgen.

Mit der Beschreibung von Modul 4 in diesem Kapitel sind alle Module der Systemarchitektur bestimmt worden. Im nächsten Kapitel erfolgt eine Demonstration der entwickelten Algorithmen anhand eines Anwendungsbeispiels.

9 Anwendungsbeispiel

9.1 Einleitung

Ziel des Kapitels ist, die in dieser Arbeit entwickelte Adaption von SFP zu veranschaulichen. Dafür erfolgt eine exemplarische Anwendung der Module der Adaption von SFP. Für die Anwendung wird das Beispiel des S-Bahn-Netzes "Rhein-Main" aus Steinbach und Crespo (2021) aufgegriffen und erweitert. Die Beschreibung des Szenarios wurde mit wenigen Änderungen aus Steinbach und Crespo (2021, S. 16 f.) übernommen und übersetzt. Da Modul 2, Modul 4 und Modul 5 auf den Ansätzen von Brauner (2023) und Crespo (2020) aufbauen, liegt der Fokus in der Anwendung von Modul 1 (Kapitel 9.2) und Modul 3 (Kapitel 9.3). In Kapitel 9.4 werden die Ergebnisse des Kapitels abschließend zusammengefasst.

Das Anwendungsbeispiel konzentriert sich auf fünf Stationen (A bis E und Z), die von neun Linien (Linie 1 bis Linie 9) bedient werden (siehe Abbildung 9-1). Die Station A ist ein zentraler Umsteigepunkt und bildet ein Ende der zentralen Stammstrecke des S-Bahn-Netzes (Knoten Z ist Teil dieser Stammstrecke).

Station A besteht aus zwei Knoten, die sich auf unterschiedlichen Ebenen befinden. Die Infrastruktur im Knoten A2 ist in Abbildung 9-3 dargestellt. Die Kanten A1 – B und A1 – D werden im Regelbetrieb der S-Bahn nicht genutzt.

Bei der betrachteten Störung steht die Verbindung zwischen A und Z nicht zur Verfügung, wodurch das S-Bahn-Netz in zwei Seiten geteilt wird. Außerdem sei Gleis 104 im Knoten A2 und Kante D – A1 aufgrund von Wartungsarbeiten ebenfalls nicht verfügbar. Bestehende SFP des S-Bahn-Netzes sehen nur die Verfügbarkeit oder vollständige Nicht-Verfügbarkeit von Knoten A2 vor.

Das Störungsszenario des ausgewählten SFP ist eine vollständige Sperrung zwischen den Knoten A und Z. Das ausgewählte SFP ist in Abbildung 9-1 als SFP I dargestellt. Das Betriebskonzept von SFP I sieht als betriebliche Maßnahmen das vorzeitige Wenden der Linien 3, 4, 8 und 9 in Knoten A2 vor. In SFP I ist jedem Gleis in A2 eine Linie zugeordnet, sodass auf jedem der vier Gleise in A2 zwei Züge (pro Stunde) vorzeitig wenden. Zusätzlich sieht SFP I die Umleitung der Linie 6 in den Knoten A1 und das vorzeitige Wenden der Linie 5 im Knoten E vor.

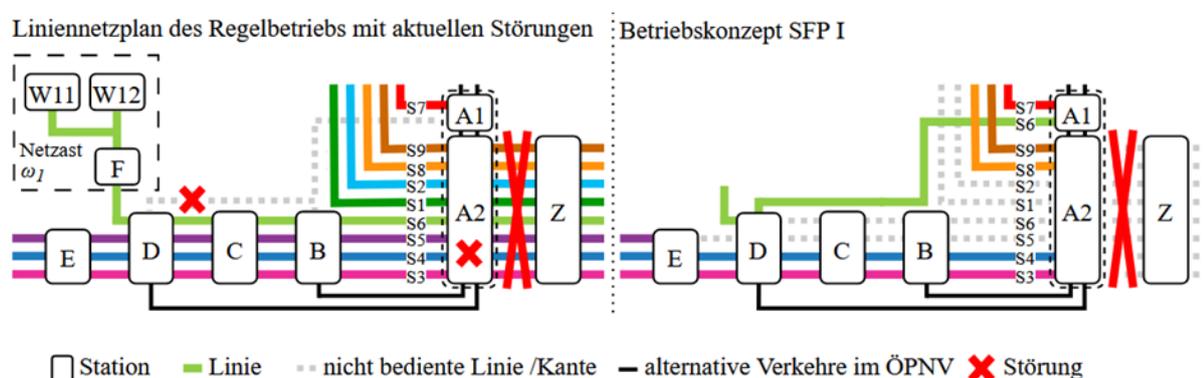


Abbildung 9-1: Ausschnitt des Liniennetzplans des S-Bahn-Netzes (Abbildung aufbauend auf Abbildung 5 von Steinbach und Crespo 2021, S. 18)

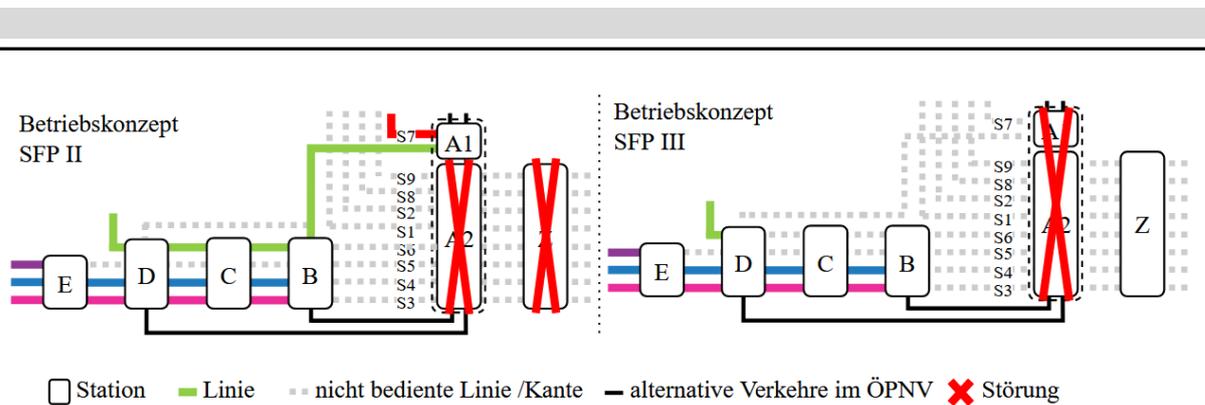


Abbildung 9-2: Betriebskonzepte von SFP II und SFP III

Da die Linie 6 im Netzast ω_1 eine Gabelung aufweist und die beiden Wendebahnhöfe W11 und W12 bedient, bestehen zwei Linienrouten der Linie 6 ($lr_{6,W11-D-A1}$ und $lr_{6,W12-D-A1}$) (siehe Abbildung 9-1).

Als weitere bestehende SFP sind in Abbildung 9-2 SFP II und SFP III dargestellt, die aus dem normierten Dispositionsmanagement (Transportleitung Regio Hessen 2016) entnommen sind. Als betriebliche Maßnahmen sind in SFP II vorgesehen:

- vorzeitige Wenden der Linien 3 und 4 in Knoten B
- vorzeitige Wenden der Linie 5 in Knoten E
- vorzeitige Wenden der Linie 6 in Knoten A1 mit Bedienung der Kante B – A1
- vorzeitige Wenden der Linien 8 und 9 außerhalb des betrachteten Netzabschnitts

Für den betrachteten Netzabschnitt unterscheidet sich SFP III von SFP II dadurch, dass für

- Linie 6 eine vorzeitige Wende in Knoten D und für
- Linie 7 eine vorzeitige Wende außerhalb des betrachteten Netzabschnitts vorgesehen ist.

9.2 Modul 1: Anpassung des Betriebskonzepts

Modul 1 besteht aus den vier Submodulen (siehe Kapitel 4.4):

- Modul 1.1: Prüfung der Funktionsfähigkeit
- Modul 1.2: Erzeugung von Betriebskonzepten
- Modul 1.3: Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte
- Modul 1.4: Prüfung der Abbruchbedingung und Auswahl der erzeugten Betriebskonzepte

Die Submodule 1.2, 1.3 und 1.4 werden iterativ durchlaufen, bis die Abbruchbedingung in Modul 1.4 erfüllt ist (siehe Abbildung 4-25). Für das Anwendungsbeispiel wird der initiale Iterationsschritt bei Beginn der Adaption und zusätzlich das Modul „Bestimmung der elementaren betrieblichen Maßnahmen“ dargestellt.

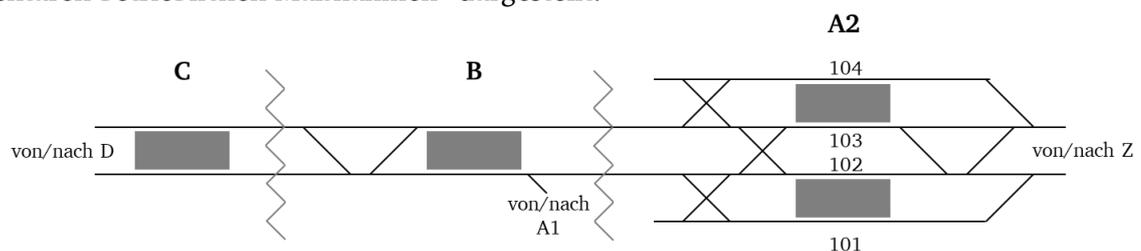


Abbildung 9-3: Gleisplan der Knoten A2 - D

9.2.1 Bestimmung der elementaren betrieblichen Maßnahmen

Ziel des Moduls ist die Bestimmung der elementaren betrieblichen Maßnahmen. Die ebM werden aus betrieblichen Maßnahmen der bestehenden SFP bestimmt. Als Beispiel werden die ebM der Linie 6 bestimmt.

Abbildung 9-4 zeigt für Linie 6 die angewendeten betrieblichen Maßnahmen aller bestehender SFP. Aus den betrieblichen Maßnahmen lassen sich die folgenden ebM „alternative Wende“ für Linie 6 bestimmen:

- Wende von D kommend in A1 mit
 - Ausfall der Knoten und Kanten nach B und
 - Bedienung der Kante B – A1
- Wende von F kommend in A1 mit
 - Ausfall der Knoten und Kanten nach D und
 - Bedienung der Kante D – A1
- Wende von F kommend in D mit
 - Ausfall der Knoten und Kanten nach D
- Wende aus dem Netzzast ω_1 kommend in F mit
 - Ausfall der Knoten und Kanten nach F

Die Bestimmung von ebM anderer Linien ergeben unter Berücksichtigung der bestehenden SFP, dass auch Wenden in A2 und B möglich sind. Es wird angenommen, dass diese ebM auch für die Linie 6 angewendet werden können. Somit bestehen zwei weitere ebM für Linie 6:

- Wende von B kommend in A2 mit
 - Ausfall der Knoten und Kanten nach A2
- Wende von D kommend in B mit
 - Ausfall der Knoten und Kanten nach B

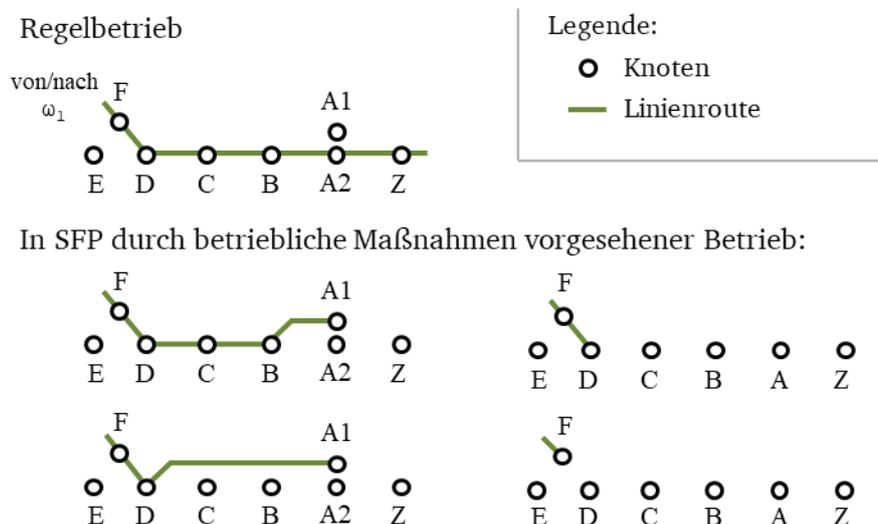


Abbildung 9-4: Angewendete betriebliche Maßnahmen des bestehenden SFP für Linie 6

9.2.2 Modul 1.1: Prüfung der Funktionsfähigkeit (Modul 1.0 und Modul 1.1)

In Modul 1.1 erfolgt die Prüfung der Funktionsfähigkeit des Betriebskonzepts des ausgewählten SFP. In den drei Funktionen von Modul 1.1 werden die Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“, „Kapazitätsverbrauch“ und „Liniennetzplan“ geprüft. Da das Betriebskonzept des ausgewählten SFP keine Bedingungen vom Typ „Liniennetzplan“ verletzt, erfolgt bei der initialen Anwendung von Modul 1.1 lediglich eine Prüfung der anderen beiden Bedingungen.

Funktion: Bestimmung verletzter Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“

Input der Funktion ist das Betriebskonzept des ausgewählten SFP und die aktuelle Infrastruktursituation (u. a. Nicht-Verfügbarkeit von Gleis 104 in Knoten A2).

Für die Linienrouten der Linien 3, 4, 8 und 9 ist Gleis 104 in Knoten A2 nicht verfügbar. Daher ist zu prüfen, ob innerhalb des Knotens oder unter Einbeziehung der benachbarten Knoten alternative Fahrwege bestehen. In Knoten A2 bestehen weiterhin Fahrwege in beide Richtungen zwischen den Streckengleisen, die einen Verkehrshalt in A2 ermöglichen (siehe Abbildung 9-3). Somit bestehen keine verletzten Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ für die Linienrouten der Linien 3, 4, 8 und 9.

Für die Linienrouten der Linie 6 ist die Kante D – A1 nicht verfügbar (siehe Kapitel 9.1).

Output der Funktion ist eine verletzte Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ der Linienrouten der Linie 6 für die Kante D – A1.

Funktion: Bestimmung verletzter Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“

Wie in der vorherigen Funktion, sind der Input das Betriebskonzept des ausgewählten SFP und die aktuelle Infrastruktursituation (u. a. Nicht-Verfügbarkeit von Gleis 104 in Knoten A2).

In Knoten A2 ist Gleis 104 nicht verfügbar, daher wird dieser Knoten auf eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ hin untersucht. Durch die Sperrung von Gleis 104 ist es nicht mehr möglich, dass auf jedem der vier Gleise zwei Züge wenden. Für die Berechnung des Kapazitätskriteriums sind die Belegungszeiten der zwei Züge der Linienroute auf die verbleibenden Gleise aufzuteilen. Unter der Annahme, dass die Belegungszeiten der Züge für die verbleibenden Gleise gleich ist und auch nicht von der Linienzugehörigkeit abhängig ist, kann mit einer Verteilung von drei, drei und zwei Zügen der geringste Belegungsgrad erreicht werden. Für eine beispielhafte Anwendung des Ansatzes zur Berechnung des Belegungsgrades wird auf Brauner (2023) verwiesen. Es wird angenommen, dass das Kapazitätskriterium nicht eingehalten wird.

Output der Funktion ist daher eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ für die Linienrouten der Linien 3, 4, 8 und 9 in Knoten A2.

Die (Mengen von) Linienrouten, die zu den verletzten Bedingungen führen, werden in die Tabu-Liste aufgenommen. Dies sind die Menge von Linienrouten in Knoten A2 und die Linienrouten der Linie 6, die die Kante D – A1 enthalten. Die Linienrouten der Linie 6 müssen nicht zwingend in die Tabu-Liste aufgenommen werden, da sichergestellt ist, dass keine alternativen (Mengen von) Linienrouten mit verletzten Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ erzeugt werden (siehe Kapitel 4.4.4).

9.2.3 Modul 1.2: Erzeugung von Betriebskonzepten

Modul 1.2 besteht aus sechs Funktionen, die im Weiteren beispielhaft auf das Betriebskonzept des ausgewählten SFP (bk) angewendet werden:

- Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten
- Erzeugung von alternativen Linienrouten
- Zusammenfassung von Linienrouten
- Bewertung alternativer Linienrouten
- Erzeugung von Betriebskonzepten durch Ersetzung von Linienrouten
- Erzeugung von Betriebskonzepten mit alternativen Mengen von Linienrouten

Funktion: Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten

Die in Modul 1.1 bestimmte Menge von verletzten Bedingungen für bk enthält folgende Elemente:

- verletzte Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ der Linienrouten der Linie 6 für die Kante D – A1
- verletzte Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ für die Linienrouten der Linien 3, 4, 8 und 9 in Knoten A2

In der Funktion „Bestimmung der zu ersetzenden Linienrouten“ werden, wenn Linienrouten mit verletzten Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ bestehen, diese für den Iterationsschritt als zu ersetzende Linienrouten ausgewählt. Daher besteht die Menge der zu ersetzenden Linienrouten von bk $LR_{bk,er}$ im ersten Iterationsschritt nur aus den Linienrouten der Linie 6.

Die Menge von verletzten Bedingungen und damit der Output der Funktion ist: $LR_{bk,er} = \{lr_{6,W11-D-A1}, lr_{6,W12-D-A1}\}$.

Funktion: Erzeugung von alternativen Linienrouten

Die Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ ist in drei Abschnitte unterteilt, wobei die drei Abschnitte nacheinander für jede zu ersetzende Linienroute durchlaufen werden. Die drei Abschnitte werden zunächst für $lr_{6,W11-D-A1}$ durchlaufen.

Der erste Abschnitt der Funktion ist die Anwendung von ebM „Änderung des Laufwegs (Umleitung)“. Abschnitt 1 besteht aus einer Schleife, in der die ebM auf eine verletzte Bedingung der Linienroute angewendet werden. Bei der Anwendung der Schleife können als „Zwischenprodukte“ prä-alternative Linienrouten entstehen, die weiterhin verletzte Bedingungen aufweisen. Für diese können in weiteren Iterationen weitere ebM angewendet werden (siehe Kapitel 4.4.4). Im ersten Durchgang der Schleife dient $lr_{6,W11-D-A1}$ mit der verletzten Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ für die Kante D – A1 als „prä-alternative“ Linienroute $lr_{pa,1}$.

Da die Knoten und Kanten der verletzten Bedingungen nicht auf dem regulären Laufweg der Linie liegen (siehe Abbildung 9-1), wird die ebM der Wende in A1 verworfen. Die dadurch entstehende Linienroute entspricht somit wieder dem regulären Laufweg der Linie ($lr_{6,r}$). Die zuvor nicht bedienten Knoten und Kanten der Linienroute werden auf verletzte Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ geprüft. Dabei wird die eigentliche Störung zwischen den

Knoten A2 und Z als verletzte Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ identifiziert. Die erzeugte Linienroute ist somit eine prä-alternative Linienroute ($lr_{pa,2}$) und die erste Iteration der Schleife endet.

Mit $lr_{pa,2}$ wird eine weitere Iteration der Schleife von Abschnitt 1 durchgeführt. Zur Erzeugung alternativer Linienrouten, ausgehend von $lr_{pa,2}$, werden alle ebM „Umleitung“ der Linie 6 betrachtet, die die Knoten und Kanten zwischen den Knoten A2 und Z in der Negativliste enthalten. Da keine solche Umleitung für die Linie 6 (siehe Kapitel 9.2.1) und auch keine weitere prä-alternative Linienroute besteht, endet der erste Abschnitt ohne die Erzeugung einer alternativen Linienroute.

Der nächste Abschnitt der Funktion zur Erzeugung von alternativen Linienrouten ist die Anwendung von ebM „Änderung des Laufwegs (alternative Wende)“. Dafür wird erneut der reguläre Laufweg von $lr_{6,W11-D-A1}$ bestimmt. Dies entspricht $lr_{6,r}$ mit der verletzten Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ zwischen den Knoten A2 und Z. Anschließend können ebM „alternative Wende“ angewendet werden.

Von W2 kommend besteht keine ebM „alternative Wende“, bei der die Kanten der verletzten Bedingung zwischen den Knoten A2 und Z entfallen. Somit besteht keine alternative Linienroute für diese Seite der Störung.

Von W11 kommend bestehen ebM „alternative Wendungen“, die zu einem Entfall der Kante mit der verletzten Bedingung führen, für die Wendebahnhöfe A2, B, D und F (siehe Kapitel 9.2.1). Der Wendebahnhof, der möglichst nah an der Störung liegt, ist A2. Die Nutzung von Wendebahnhof A2 von W11 kommend ergibt $lr_{6,W11-A2}$. Zur Übersichtlichkeit wird in diesem Beispiel nur $lr_{6,W11-A2}$ und keine weitere aus einer ebM „alternative Wendungen“ resultierende alternative Linienroute in die Menge der alternativen Linienrouten von $lr_{6,W11-D-A1}$ aufgenommen.

Zusätzlich bestehen zwei ebM, die eine Wende in A1 vorsehen und neu bediente Knoten und Kanten enthalten. Da die ebM mit Wende in A1 und Bedienung der Kante D – A1 bereits in $lr_{6,W11-D-A1}$ enthalten war, wird diese ebM nicht erneut angewendet. Außerdem ist die Kante D – A1 nicht verfügbar. Als weitere alternative Linienroute mit Wende in A1 besteht somit nur $lr_{6,W11-B-A1}$.

Da für $lr_{6,r}$ keine weiteren verletzten Bedingungen und auch keine prä-alternativen Linienrouten aus dem ersten Abschnitt bestehen, endet die Erzeugung von alternativen Linienrouten im zweiten Abschnitt.

Im zweiten Teil des zweiten Abschnitts werden die bisher erzeugten alternativen Linienrouten auf Bedingung K4 vom Typ „Konsistente Linien“ geprüft. Da die beiden alternativen Linienrouten einen Netzast bedienen, endet Abschnitt 2 ohne, dass eine alternative Linienroute verworfen wird.

Der letzte Abschnitt der Funktion zur Erzeugung von alternativen Linienrouten ist die Anwendung von ebM „Änderung der Taktzeit“. Da keine der alternativen Linienrouten von $lr_{6,W11-D-A1}$ eine zuvor für $lr_{6,W11-D-A1}$ identifizierte verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ oder „Liniennetzplan“ aufweist, werden keine weiteren alternativen Linienrouten erzeugt. Zuletzt wird in die Menge der alternativen Linienrouten ein Element (\emptyset) aufgenommen, das den Ausfall der zu ersetzenden Linienroute vorsieht.

Als weitere zu ersetzende Linienroute besteht $lr_{6,W12-D-A1}$. Da sich $lr_{6,W12-D-A1}$ von $lr_{6,W11-D-A1}$ nur hinsichtlich des Wendebahnhofs im Netzast unterscheidet, führen die drei Abschnitte für $lr_{6,W12-D-A1}$ – analog wie für $lr_{6,W11-D-A1}$ – zu den beiden alternativen Linienrouten $lr_{6,W12-B-A1}$ und $lr_{6,W12-A2}$ sowie einem Ausfall der zu ersetzenden Linienroute.

Funktion: Zusammenfassung von Linienrouten

Damit es bei der Ersetzung zu keinen Inkonsistenzen innerhalb der Linien kommen kann, fasst die Funktion „Zusammenfassung von Linienrouten“ zu ersetzende Linienrouten und/oder alternative Linienrouten zusammen. Input der Funktion ist die Menge von zu ersetzenden Linienrouten von bk ($LR_{bk,er}$) und die Menge von alternativen Linienrouten ($LR_{a,y}$):

- $LR_{bk,er} = \{lr_{6,W11-D-A1}, lr_{6,W12-D-A1}\}$
- $LR_{a,y} = \{lr_{6,W11-B-A1}, lr_{6,W11-A2}, \emptyset\}$ für $y = lr_{6,W11-D-A1}$
- $LR_{a,y} = \{lr_{6,W12-B-A1}, lr_{6,W12-A2}, \emptyset\}$ für $y = lr_{6,W12-D-A1}$

Da für die beiden zu ersetzenden Linienrouten der Linie 6 ein gemeinsamer Laufwegabschnitt zwischen zwei alternativen Linienrouten besteht (z. B. $lr_{6,W11-B-A1}$ und $lr_{6,W12-B-A1}$), werden diese als ein Element von $LR_{bk,er}$ zusammengefasst ($LR_{6,er}$). $LR_{bk,er}$ enthält keine weiteren Elemente und auch in bk bestehen keine weiteren Linienrouten der Linie 6, sodass keine weitere Zusammenfassung für $LR_{bk,er}$ stattfindet. Ergebnis des ersten Teils der Funktion ist:

- $LR_{bk,er} = \{LR_{6,er}\}$ mit $LR_{6,er} = \{lr_{6,W11-D-A1}, lr_{6,W12-D-A1}\}$
- $LR_{a,y} = \{lr_{6,W11-B-A1}, lr_{6,W11-A2}, lr_{6,W12-B-A1}, lr_{6,W12-A2}, \emptyset\}$ für $y = LR_{6,er}$

Im zweiten Teil der Funktion werden alternative Linienrouten zusammengefasst. Dafür werden die alternativen Linienrouten kombiniert und die Kombinationen hinsichtlich der Bedingungen K2, K3 und K5 vom Typ „Konsistente Linien“ sowie der Tabu-Liste geprüft. Entsprechend Bedingung K3 darf keine Verzweigung der Linie in Knoten D erfolgen. Dies erfüllen nur die einzelnen alternativen Linienrouten (die jeweils in Kombination mit \emptyset stehen; zur Übersicht wird im Weiteren statt z. B. $\{lr_{6,W11-B-A1}, \emptyset, W12\}$ nur $lr_{6,W11-B-A1}$ verwendet), die Kombinationen aus zwei alternativen Linienrouten mit gleicher ebM und der Ausfall der Linienrouten. Diese sieben Elemente bilden die Menge von alternativen Linienrouten für $LR_{6,er}$.

Output der Funktion ist somit:

- $LR_{bk,er} = \{LR_{6,er}\}$ mit $LR_{6,er} = \{lr_{6,W11-D-A1}, lr_{6,W12-D-A1}\}$
- $LR_{a,y} = \{LR_{6,W1-B-A1}, LR_{6,W1-A2}, lr_{6,W11-B-A1}, lr_{6,W12-B-A1}, lr_{6,W11-A2}, lr_{6,W12-A2}, \emptyset\}$ für $y = LR_{6,er}$ mit
 - $LR_{6,W1-B-A1} = \{lr_{6,W11-B-A1}, lr_{6,W12-B-A1}\}$
 - $LR_{6,W1-A2} = \{lr_{6,W11-A2}, lr_{6,W12-A2}\}$

Funktion: Bewertung der alternativen Linienrouten

Für die Ersetzung werden die alternativen Linienrouten von $LR_{6,er}$ bewertet. Es bestehen insgesamt 13 Kriterien für die Bewertung (siehe Kapitel 4.3.4). Die Bewertung der alternativen Linienrouten für den betrachteten Netzabschnitt (siehe Abbildung 9-1) ist in Tabelle 9-1 dargestellt.

Für das erste Kriterium (H[1]) sind die bedienten Verkehrsknoten, die für die Erfüllung der Erschließungsfunktion relevant sind, zu betrachten. Die zu ersetzenden Linienrouten haben

eine Qualitätsfunktion zur Erschließung von Knoten A. Dieser Knoten wird in allen alternativen Linienrouten weiterhin bedient, daher ist der Wert des ersten Kriteriums eins.

Für die FGK des Netzasts wird angenommen, dass ein FGK in D und zwei FGK in A starten. Beide Knoten werden von allen alternativen Linienrouten weiterhin bedient, daher ist die Anzahl der weiterhin umsetzbaren Fahrgastkorridore jeweils drei (H[2]).

Als nächstes wird die Anzahl der bedienten Verkehrsknoten je Wertigkeit betrachtet. Die Anzahl der Verkehrsknoten, die auch im Betriebskonzept des ausgewählten SFP von der Linienroute bedient werden (H[3]), beträgt im betrachteten Netzabschnitt zwei Verkehrsknoten bei $lr_{6,W11-B-A1}$ und $lr_{6,W12-B-A1}$ (A1 und D). Bei $lr_{6,W11-A2}$ und $lr_{6,W12-A2}$ wird nur Knoten D weiterhin wie im Betriebskonzept des ausgewählten SFP bedient, da Knoten A2 statt A1 bedient wird.

Außerhalb des betrachteten Netzabschnitts ist es bei der Erzeugung der alternativen Linienrouten zu keinen Änderungen gekommen. Da angenommen wird, dass Linienrouten mit der Wendestation W11 mehr Verkehrsknoten im Netzast bedienen als Linienrouten mit der Wendestation W12, werden $lr_{6,W11-B-A1}$ und $lr_{6,W11-A2}$ für H[3] höher bewertet als $lr_{6,W12-B-A1}$ und $lr_{6,W12-A2}$.

Da A2 aber im regulären Betrieb der Linie bedient wird (siehe Abbildung 9-1), ist die Anzahl der Verkehrsknoten, die im regulären Betrieb der Linie bedient werden (H[4]), für $lr_{6,W11-A2}$ und $lr_{6,W12-A2}$ mit vier Verkehrsknoten (A2, B, C, D) um einen Verkehrsknoten höher als für $lr_{6,W11-B-A1}$ und $lr_{6,W12-B-A1}$.

Keine der beiden Linienrouten bedient weitere Verkehrsknoten (H[5]).

Die Bewertungen von H[1] und H[2] für $LR_{6,W1-B-A1}$ und $LR_{6,W1-A2}$ entsprechen den Bewertungen der vier anderen alternativen Linienrouten. Für H[3], H[4] und H[5] sind die Werte der jeweiligen Elemente von $LR_{6,W1-B-A1}$ und $LR_{6,W1-A2}$ zu addieren.

Die Bewertungskriterien H[6] bis H[10] können aus den Werten von H[1] bis H[5] in Verbindung mit den Taktzeiten der Linienrouten berechnet werden. Da $LR_{6,W1-B-A1}$ und $LR_{6,W1-A2}$ jeweils zwei Linienrouten vereinen, bestehen für diese mehr Bedingungen je Stunde. Da bereits eine Entscheidung der Reihung der alternativen Linienrouten mit den Kriterien H[1] – H[6] möglich ist, werden die Kriterien H[7] bis H[12] nicht betrachtet.

Output der Funktion sind die bewerteten alternativen Linienrouten (siehe Tabelle 9-1).

Funktion: Erzeugung von Betriebskonzepten durch Ersetzung von Linienrouten

In der letzten Funktion von Operator 1 werden Betriebskonzepte erzeugt, in dem die zu ersetzenden Linienrouten durch alternative Linienrouten ersetzt werden.

Für die Ersetzung wird zunächst ein Array erstellt, dessen Anzahl von Dimensionen der Anzahl der Elemente in der Menge von zu ersetzenden Linienrouten entspricht. Da in der Menge von zu ersetzenden Linienrouten nur $LR_{6,er}$ enthalten ist, weist der Array nur eine Dimension auf und entspricht somit einem Vektor. Die Anzahl der Elemente des Vektors entsprechen der Anzahl der Elemente der Menge von alternativen Linienrouten ($LR_{a,y}$) von $LR_{6,er}$ oder $n_{er,max}$, wenn $n_{er,max} < |LR_{a,y}|$. Unter der Annahme $n_{er,max} > |LR_{a,y}|$ hat der Vektor sieben Elemente.

Tabelle 9-1: Bewertung der alternativen Linienrouten für den betrachteten Netzabschnitt

	H				
	1	2	3	4	5
$LR_{6,W1-B-A1}$	1	3	4	6	0
$LR_{6,W1-A2}$	1	3	2	8	0
$lr_{6,W11-B-A1}$	1	3	2	3	0
$lr_{6,W12-B-A1}$	1	3	2	3	0
$lr_{6,W11-A2}$	1	3	1	4	0
$lr_{6,W12-A2}$	1	3	1	4	0
\emptyset	0	0	0	0	0

Für jedes der sieben Elemente des Vektors wird ein Betriebskonzept erzeugt, indem für bk die Linienrouten aus $LR_{6,er}$ mit jeweils einem Element aus $LR_{a,y}$ ersetzt wird. Die Elemente aus $LR_{a,y}$ werden dabei absteigend ihrer Bewertung verwendet, wobei die Elemente des Arrays hierarchisch von H[1] bis H[12] betrachtet werden (siehe Tabelle 9-1). Die dadurch erzeugten Betriebskonzepte bilden die Menge von erzeugten Betriebskonzepten.

Die erzeugten Betriebskonzepte erhalten weiterhin die Mengen von Linienrouten, die zur verletzten Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ in Knoten A2 führen. Da die erzeugten Betriebskonzepte nur anhand von Linienrouten, die in diesem Iterationsschritt geändert werden, zu prüfen sind, werden die erzeugten Betriebskonzepte nicht verworfen. Für die in diesem Iterationsschritt geänderten Linienrouten bestehen keine Einträge in der Tabu-Liste.

Funktion: Erzeugung von Betriebskonzepten mit alternativen Mengen von Linienrouten

Neben der Erzeugung von alternativen Linienrouten für die Ersetzung von $lr_{6,W11-D-A1}$ und $lr_{6,W12-D-A1}$ werden in der Funktion „Bestimmung von alternativen Mengen von Linienrouten“ Betriebskonzepte durch die Ersetzung mit Mengen von Linienrouten erzeugt. Als Quelle dienen in vorherigen Iterationsschritten erzeugte Betriebskonzepte sowie Betriebskonzepte von bestehenden SFP.

Für dieses Anwendungsbeispiel werden SFP II und SFP III als bestehende SFP betrachtet. Zur Bestimmung von alternativen Mengen von Linienrouten wird geprüft, ob die beiden SFP Mengen von Linienrouten enthalten, die den gleichen Netzast ω_1 wie $lr_{6,W11-D-A1}$ oder $lr_{6,W12-D-A1}$ bedienen. ω_1 beginnt mit der Kante, die D und den nächsten Knoten in Richtung W11 bzw. W12 verbindet (siehe Abbildung 9-1).

Für SFP II bedienen $lr_{6,W11-B-A1}$ und $lr_{6,W12-B-A1}$ den Netzast ω_1 (siehe Abbildung 9-1). Zusammen mit den Linienrouten der Linien 3, 4 und 5 aus SFP II ergibt sich die alternative Menge von Linienrouten $LR_{S3-6,SFPII}$. Diese Menge ersetzt – angewendet auf bk – nicht nur $lr_{6,W11-D-A1}$ und $lr_{6,W12-D-A1}$, sondern die Menge von Linienrouten der Linien 3, 4, 5 und 6 aus SFP I ($LR_{S3-6,SFPI}$). $LR_{S3-6,SFPI}$ ist somit eine zu ersetzende Menge von Linienrouten. Anzumerken ist, dass die Linienrouten der Linie S5 mit den gleichen Linienrouten ersetzt werden.

Für SFP III bedient die alternative Menge von Linienrouten $LR_{S3-6,SFP_{III}}$ den Netzast ω_1 (siehe Abbildung 9-2). In $LR_{S3-6,SFP_{III}}$ sind für die Linie 6 die Linienrouten $lr_{6,W11-D}$ und $lr_{6,W12-D}$ enthalten. Die zu ersetzende Menge von Linienrouten aus bk für $LR_{S3-6,SFP_{III}}$ ist ebenfalls $LR_{S3-6,SFP_{I}}$.

Für die Erzeugung eines Betriebskonzepts ersetzen $LR_{S3-6,SFP_{II}}$ bzw. $LR_{S3-6,SFP_{III}}$ in bk die Linienrouten aus $LR_{S3-6,SFP_{I}}$. Ergebnis der Funktion sind zwei weitere erzeugte Betriebskonzepte. Diese werden in die Menge der erzeugten Betriebskonzepte aufgenommen.

Zusammenfassend sind die erzeugten Betriebskonzepte von Modul 1.2:

- bk^*_1 u. a. mit $lr_{6,W11-B-A1}$ und $lr_{6,W12-B-A1}$
- bk^*_2 u. a. mit $lr_{6,W11-A2}$ und $lr_{6,W12-A2}$
- bk^*_3 u. a. mit $lr_{6,W11-B-A1}$
- bk^*_4 u. a. mit $lr_{6,W11-B-A1}$
- bk^*_5 u. a. mit $lr_{6,W12-A2}$
- bk^*_6 u. a. mit $lr_{6,W11-A2}$
- bk^*_7 u. a. mit $LR_{S3-6,SFP_{II}}$ mit u. a. $lr_{6,W11-B-A1}$ und $lr_{6,W12-B-A1}$
- bk^*_8 u. a. mit $LR_{S3-6,SFP_{III}}$ mit u. a. $lr_{6,W11-D}$ und $lr_{6,W12-D}$
- bk^*_9 ohne Linienrouten der Linie 6

9.2.4 Modul 1.3: Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte (Modul 1.3)

Bei der Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte werden die neun in Modul 1.3 erzeugten Betriebskonzepte hinsichtlich Funktionsfähigkeit geprüft sowie kundenorientiert bewertet.

Zunächst erfolgt die Prüfung der Funktionsfähigkeit. Dies erfolgt durch die drei Funktionen zur Bestimmung der verletzten Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“, „Infrastrukturverfügbarkeit“ und „Liniennetzplan“ in Modul 1.1. Im Zuge dessen wird auch die Tabu-Liste aktualisiert.

Da die Linienroute der Linie 6 mit der verletzten Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ zwischen den Knoten D und A1 ersetzt wurde, weist keines der erzeugten Betriebskonzepte eine verletzte Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ auf. Da die Stammstrecke nicht weniger und andere Strecken nicht stärker bedient werden, wird auch keine Bedingung vom Typ „Liniennetzplan“ verletzt.

Für verletzte Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ gilt:

- In bk^*_1 bis bk^*_6 und bk^*_9 besteht weiterhin die verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ in Knoten A2 (siehe Kapitel 9.2.2), da A2 nicht entlastet wurde. In bk^*_2 , bk^*_5 und bk^*_6 soll mit Linie 6 eine weitere Linie in A2 wenden.
- Für bk^*_7 und bk^*_8 ist keine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ zu erwarten, da der Betrieb der Planung eines SFP entspricht und keine Knoten oder Kanten mit eingeschränkter Verfügbarkeit bedient werden.

Da keine verletzten Bedingungen vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ bestehen, bildet die Anzahl der Knoten und Kanten, die eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ aufweisen, den Teil der Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte hinsichtlich der Funktionsfähigkeit.

Für den verkehrlichen Teil der Bewertung werden die Verbindungskonflikte bestimmt und durch eine reduzierte Konfliktlösung gelöst. Dafür werden Ansätze von Brauner (2023) genutzt, die bereits ausführlich dargestellt wurden (siehe Brauner 2023, S. 216 ff.). Die Veränderungen der Verbindungen zwischen den erzeugten Betriebskonzepten und bk werden pauschal mit den durchschnittlichen Widerstandsveränderungen je gelöstem bzw. ungelöstem Verbindungskonflikt bewertet. Die resultierende kundenorientierte Bewertung der erzeugten Betriebskonzepte erfolgt durch Aufsummieren aller Veränderungen der Verbindungen. Somit besteht für jedes erzeugte Betriebskonzept eine Bewertung hinsichtlich Funktionsfähigkeit sowie eine kundenorientierte Bewertung.

9.2.5 Modul 1.4: Prüfung der Abbruchbedingung und Auswahl der erzeugten Betriebskonzepte

Im letzten Submodul von Modul 1 wird geprüft, ob die Abbruchbedingung der Heuristik innerhalb von Modul 1 erfüllt wird.

Für einen Abbruch von Modul 1 müssen funktionsfähige Betriebskonzepte vorliegen. Daher werden zunächst funktionsfähige Betriebskonzepte aus den erzeugten Betriebskonzepten identifiziert. Für den betrachteten Netzabschnitt weisen bk^*_7 und bk^*_8 keine verletzte Bedingung auf. Daher werden diese beiden Betriebskonzepte in die Menge der funktionsfähigen Betriebskonzepte aufgenommen.

Modul 1 würde nun terminieren, wenn bk^*_1 bis bk^*_6 und bk^*_9 eine schlechtere kundenorientierte Bewertung als bk^*_7 und bk^*_8 aufweisen. Dies ist aufgrund des geringeren Angebots in bk^*_7 und bk^*_8 nicht zu erwarten.

Da Modul 1 nicht terminiert, wird im weiteren Ablauf von Modul 1.4 der nächste Iterationsschritt von Modul 1 vorbereitet. Dafür werden zunächst alle erzeugten Betriebskonzepte, die eine schlechtere kundenorientierte Bewertung haben als das funktionsfähige Betriebskonzept mit der besten kundenorientierten Bewertung, gelöscht. Da anzunehmen ist, dass die kundenorientierten Bewertungen von bk^*_1 bis bk^*_6 besser sind als die kundenorientierten Bewertungen von bk^*_7 und bk^*_8 , werden diese nicht gelöscht. Ggf. erfolgt eine Löschung von bk^*_9 , da durch den Entfall der Linie 6 eine schlechte kundenorientierte Bewertung zu erwarten ist.

Kundenorientierte Betriebskonzepte werden auch gelöscht, wenn die Anzahl der verbleibenden erzeugten Betriebskonzepte die maximale Anzahl der im nächsten Iterationsschritt zu untersuchenden Betriebskonzepte ($n_{BK,max}$) übersteigt. Da die bk^*_1 bis bk^*_6 die gleiche Bewertung hinsichtlich der Funktionsfähigkeit haben, kann – falls erforderlich – eine Auswahl anhand der kundenorientierten Bewertung erfolgen.

Output von Modul 1.4 für den nächsten Iterationsschritt ist die Mengen von anzupassenden Betriebskonzepten.

Nach Abschluss der Iteration liefert Modul 1 als Output ein angepasstes Betriebskonzept. Da bereits funktionsfähige Betriebskonzepte bestimmt wurden, ist für das Anwendungsbeispiel sichergestellt, dass Modul 1 nicht ohne Output endet.

9.3 Modul 3: Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase

Durch die Anwendung einer KE/KL-Heuristik soll in Modul 3 geprüft werden, ob ein Fahrplankonzept der stabilen Phase machbar ist. Für Modul 3 wurde keine vollständige KE/KL-Heuristik entwickelt. Stattdessen wurde beschrieben, welche Anpassungen einer KE/KL-Heuristik erforderlich sind, damit diese auf einen periodischen Fahrplan angewendet werden kann. Daher wird für das Anwendungsbeispiel eine generische KE/KL-Heuristik verwendet (z. B. Crespo et al. 2023). Für die Konfliktlösung sind in Modul 3 nur betriebliche Maßnahmen, die nicht Laufweg oder Takt der Linie ändern, vorgesehen. Für die Bewertung der Konfliktlösungsalternativen werden Folgekonflikte des ersten Levels betrachtet.

Für das Anwendungsbeispiel wird das in Kapitel 9.1 eingeführte Beispiel verwendet und die Ergebnisse aus Kapitel 9.2 weitergeführt. Als Mindestzugfolgezeit für die aufkommenden Fälle wird ein Wert von 3 Minuten angenommen. Als funktionsfähiges Betriebskonzept aus Modul 1 wird bk^*_7 mit $LR_{S3-6,SFP II}$ für Modul 3 verwendet.

Für den betrachteten Netzabschnitt gibt Betriebskonzept bk^*_7 die folgenden linienspezifischen betrieblichen Maßnahmen vor (siehe SFP II Abbildung 9-2):

- Wende der Linien 3 und 4 in Knoten B
- Wende der Linie 5 in Knoten E
- Wende der Linie 6 in Knoten A1 unter Nutzung der Kante A1 – B

Als Fahrplan des Regelbetriebs wurde der Taktfahrplan des Fahrplanjahres 2023 für die Hauptverkehrszeit verwendet (RMV 2023). Für die Fahrzeit der Kante A1 – B wurde die gleiche Fahrzeit wie für A2 – B angenommen. Für den Abschnitt D bis A1 ergibt sich somit für eine Periode der in Abbildung 9-5 dargestellte Fahrplan für die Linien 3 (rot), 4 (blau) und 6 (grün). Da es sich um einen periodischen Fahrplan handelt, wurden die Zugnummern angepasst, sodass ein Bezug zur Periode des Fahrplans, in dem die Zugnummer vorkommt, erkennbar ist.

Für die Züge der Linie 6 ist eine Wende in A1 unter Einhaltung der von Chu (2014, S. 103 f.) vorgeschlagenen Wendezeit für Wenden in SFP ($t_{SFPWende}$) von 9 Minuten möglich. Entsprechend der Topologie des Fahrstraßenknoten von B in Richtung A1 (siehe Abbildung 9-3) müssen die Züge der Linie 6 für beide Richtungen in Knoten B auf Gleis 201 halten. Es wird angenommen, dass es im Fahrstraßenknoten von B in Richtung C zu keinen Belegungskonflikten der Züge der Linie 6 kommt.

Für die Linie 3 und Linie 4 bestehen keine Vorgaben bzgl. der zu nutzenden Gleise in B in bk^*_7 . Angenommen wird, dass die Züge auf die Leistungen der gleichen Linie wenden sollen. Diese Verknüpfung der Wenden ist durch einen schwarzen Pfeil mit Strichlinie dargestellt (siehe Abbildung 9-5).

Bei der Analyse des periodischen Fahrplans durch eine KE/KL-Heuristik ist der erste Konflikt (K_1) ein Umlaufkonflikt von Zug 1X301 und 1X302 in B, da mit 2 Minuten Wendezeit $t_{SFPWende}$ nicht eingehalten wird. Außerdem sind Ende und Start der beiden Leistungen in B auf unterschiedlichen Gleisen. Der Umlaufkonflikt von 1X401 und 1X402 in B (K_2) liegt zeitlich nach K_1 , da der Zubringer zeitlich vor dem Startzeitpunkt der KE/KL-Heuristik liegt.

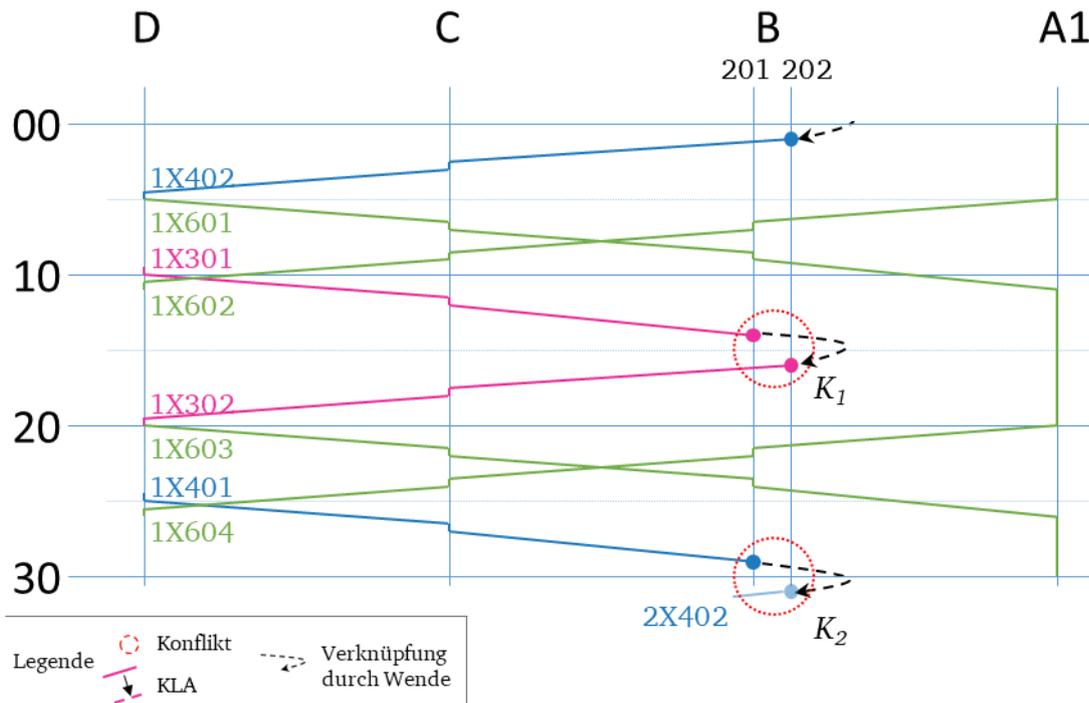


Abbildung 9-5: Periodischer Fahrplan durch Anwendung der betrieblichen Maßnahmen aus bk^*8 auf den Taktfahrplan des Fahrplanjahres 2023

Zur Lösung von K_1 werden zwei KLA näher betrachtet:

- $KLA_{K1,1}$ (siehe Abbildung 9-6)
 - alternativer Fahrweg für 1X301 auf Gleis 202 in B und
 - zeitliche Verschiebung von 1X302 um 7 Minuten, um $t_{SFPWende}$ einzuhalten
 - Für $KLA_{K1,1}$ besteht ein Folgekonflikt ($K_{K1,KLA1,1}$) zwischen 1X302 und 1X604 in B, welcher durch eine weitere zeitliche Verschiebung von 1X302 um 2 Minuten lösbar ist.
- $KLA_{K1,2}$ (siehe Abbildung 9-7)
 - Änderung der Verknüpfung der Umläufe der korrespondierenden Linien in B, sodass XX301 und XX402 sowie XX401 und XX302 miteinander verknüpft sind und
 - alternativer Fahrweg für 1X301 auf Gleis 202 in B
 - Für $KLA_{K1,2}$ besteht ein Folgekonflikt ($K_{K1,KLA2,1}$) zwischen 1X301 und 1X302 in B, welcher durch
 - eine zeitliche Verschiebung von 1X301 oder durch
 - einen alternativen Fahrweg für 1X302 auf Gleis 201 in B lösbar ist.
Durch den alternativen Fahrweg wird auch K_2 gelöst.

Da $KLA_{K1,2}$ und dessen Folgekonflikt durch alternative Fahrwege und eine Änderung der Verknüpfung der Umläufe gelöst werden kann, wird erwartet, dass $KLA_{K1,2}$ eine bessere Bewertung aufweist als $KLA_{K1,1}$. Daher wird $KLA_{K1,2}$ implementiert und für den Folgekonflikt von $KLA_{K1,2}$ wird 1X302 in B auf Gleis 201 verschoben (siehe Abbildung 9-8). Der Umlaufkonflikt von 1X302 in B wird nicht betrachtet, da durch die Änderung der Verknüpfung der Umläufe der Zubringer zeitlich vor dem Startzeitpunkt der KE/KL-Heuristik liegt.

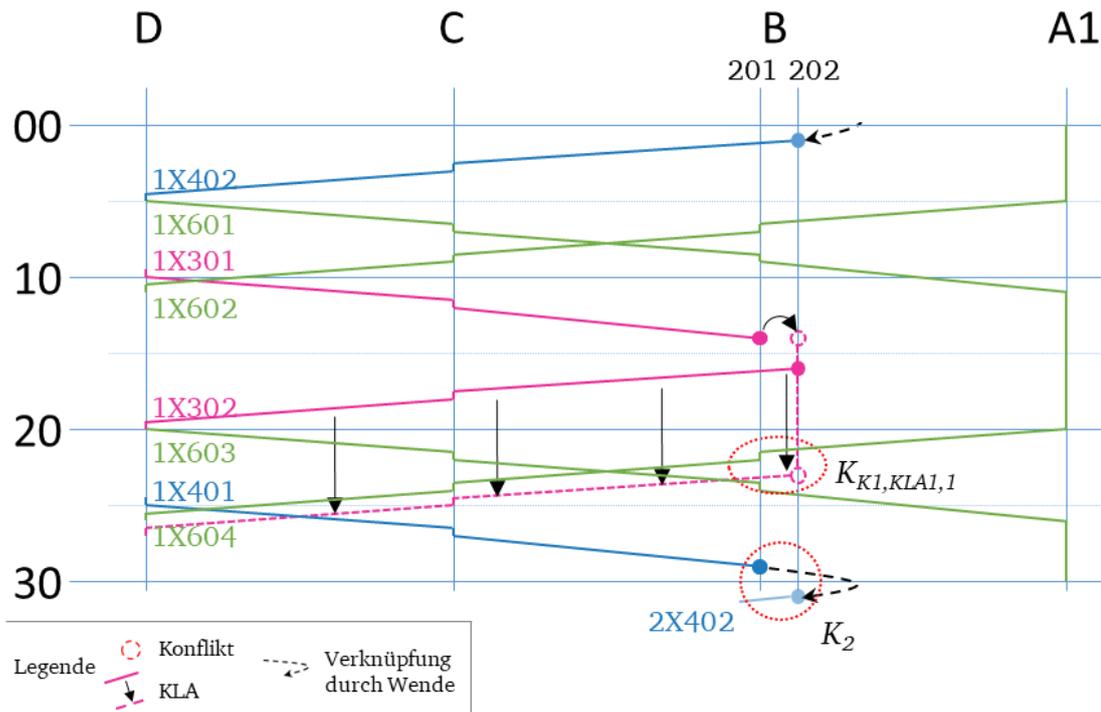


Abbildung 9-6: Konfliktlösungsalternative 1 zur Lösung von Konflikt K_1 ($KLA_{K1,1}$)

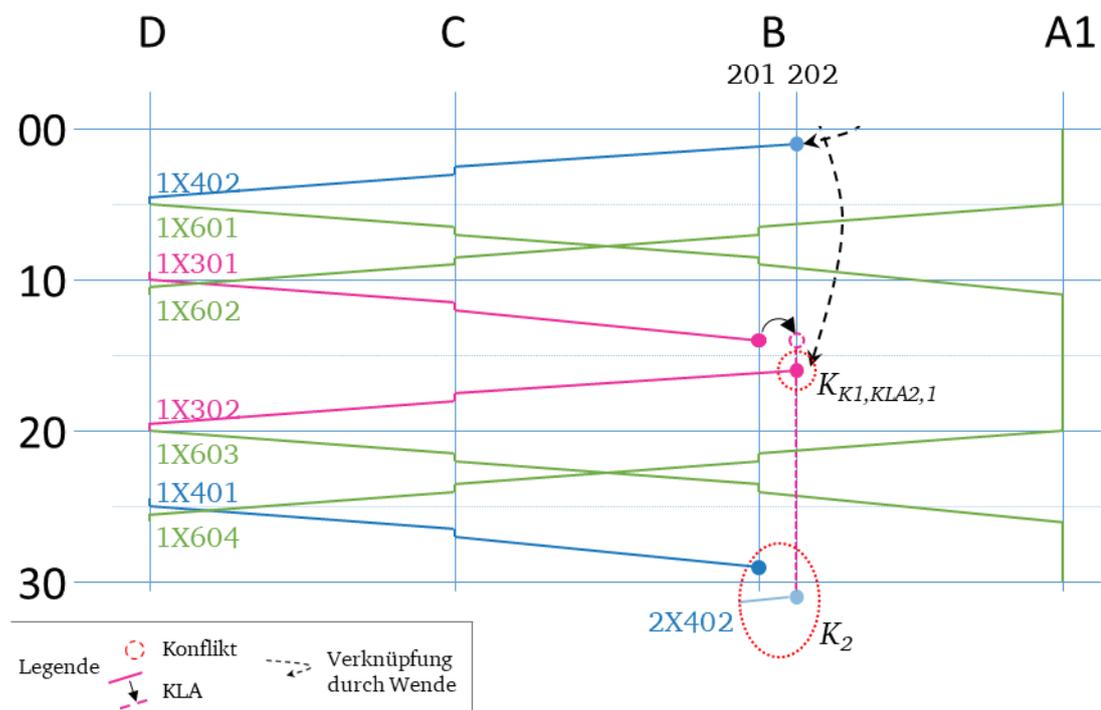


Abbildung 9-7: Konfliktlösungsalternative 2 zur Lösung von Konflikt K_1 ($KLA_{K1,2}$)

Nach der Lösung von K_1 und K_2 sind die zeitlich nächsten Konflikte Belegungskonflikte durch die Wende 1X402/2X302 mit 2X602 (K_3) bzw. mit 2X601 (K_4) (siehe Abbildung 9-8).

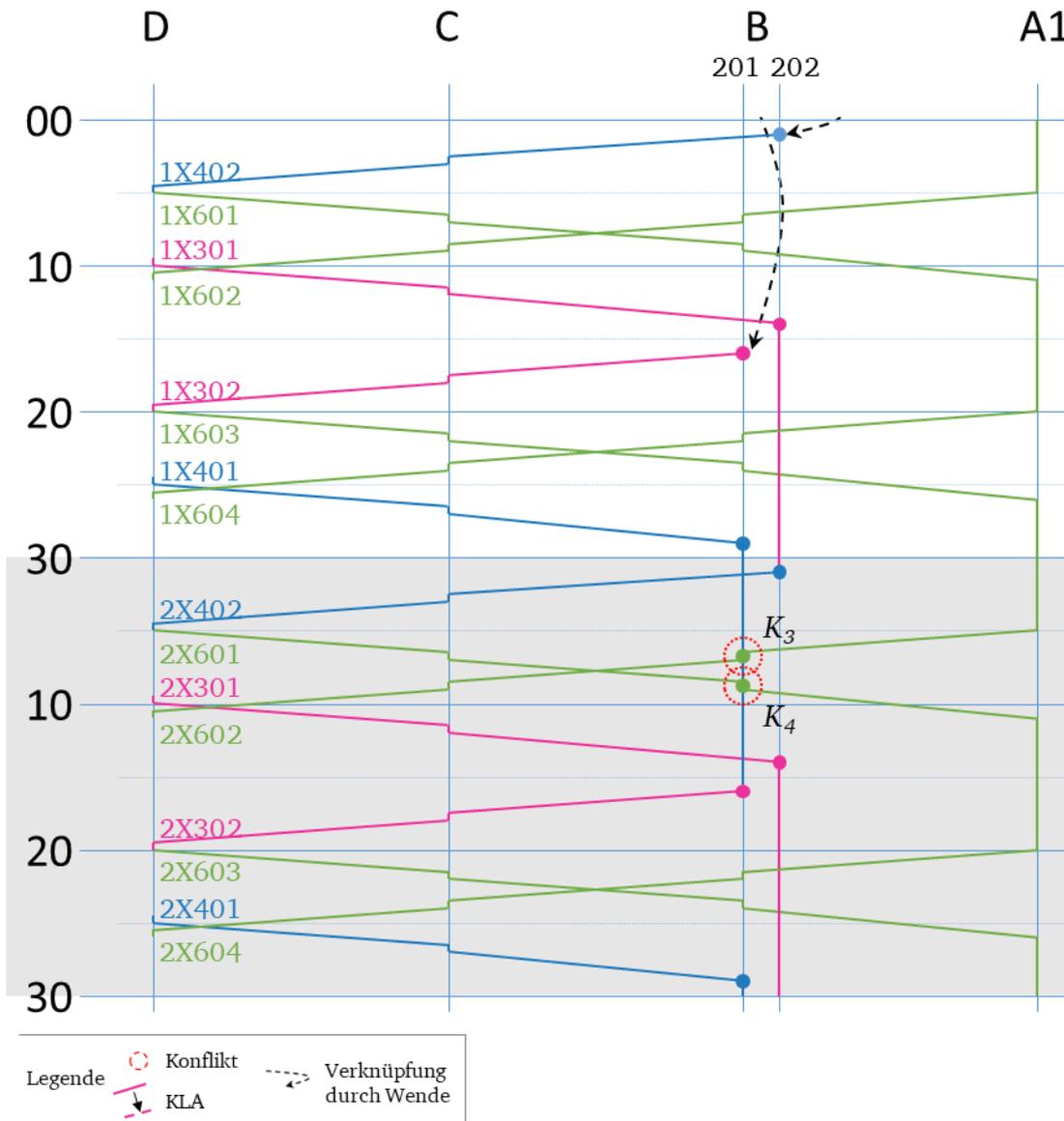


Abbildung 9-8: Periodischer Fahrplan nach der Lösung von K_1 und K_2

Die Konfliktlösungsalternativen zur Lösung beider Konflikte sind eingeschränkt, da durch die Topologie kein räumliches Verschieben von 2X602 oder 2X601 möglich ist. Somit verbleiben folgende Konfliktlösungsalternativen:

- $KLA_{K3,1}$ (siehe Abbildung 9-9)
 - räumliche Verschiebung der Wende 1X402/2X302 auf Gleis 202
 - Mit $KLA_{K3,1}$ ist gleichzeitig K_4 gelöst.
 - Für $KLA_{K3,1}$ bestehen zwei Folgekonflikte zwischen der Wende 1X402/2X302 und 2X402 ($K_{K3,KLA1,1}$) bzw. 2X301 ($K_{K3,KLA1,2}$) in B, welche durch eine
 - zeitliche Verschiebung von 1X401 um 5 Minuten und eine
 - zeitliche Verschiebung von 2X301 um 5 Minuten lösbar sind.
- $KLA_{K3,2}$ (siehe Abbildung 9-10)
 - zeitliche Verschiebung von 1X401 um 10 Minuten
 - Für $KLA_{K3,2}$ bestehen zwei Folgekonflikte:
 - ein Belegungskonflikt mit 2X601 ($K_{K3,KLA2,1}$), der einer räumlichen Ausdehnung von Konflikt K_4 entspricht
 - ein Umlaufkonflikt in der Wende 1X402/2X302, da $t_{SFPWende}$ nicht mehr eingehalten wird ($K_{K3,KLA2,2}$)
 - Für beide Folgekonflikte sind weitere zeitliche Verschiebungen von insgesamt 5 Minuten erforderlich. Dabei ist auch ein Reihenfolgentausch von 1X401 hinter 2X601 möglich. Dieser muss aber bereits in D erfolgen (siehe Abbildung 9-3).
- $KLA_{K3,3}$ (siehe Abbildung 9-11)
 - zeitliche Verschiebung von 2X602 um 11 Minuten
 - Für $KLA_{K3,3}$ besteht ein Folgekonflikt von 2X602 mit 2X601 in A ($K_{K3,KLA3,1}$), der durch eine zeitliche Verschiebung von weiteren 11 Minuten lösbar ist.

Da $KLA_{K3,1}$ und dessen Folgekonflikte durch alternative Fahrwege und eine zeitliche Verschiebung von nur 10 Minuten gelöst werden können, wird erwartet, dass $KLA_{K3,1}$ eine bessere Bewertung aufweist als die übrigen beiden Konfliktlösungsalternativen. Daher wird $KLA_{K3,1}$ implementiert und zur Lösung der Folgekonflikte von $KLA_{K3,1}$ werden 1X401 und 2X301 zeitlich verschoben (siehe Abbildung 9-12).

Nach der Implementierung dieser Konfliktlösungen bestehen keine weiteren Konflikte im periodischen Fahrplan. Die KE/KL-Heuristik endet, sobald in einem zeitlichen Abschnitt, der der doppelten Periodendauer entspricht, keine Änderung des periodischen Fahrplans stattfindet. Ergebnis von Modul 3 ist ein Fahrplankonzept der stabilen Phase. Das Fahrplankonzept entspricht dem Fahrplan des Zeitraums mit der Länge $t_{periode}$ vor dem Ende der KE/KL-Heuristik (siehe Abbildung 9-12).

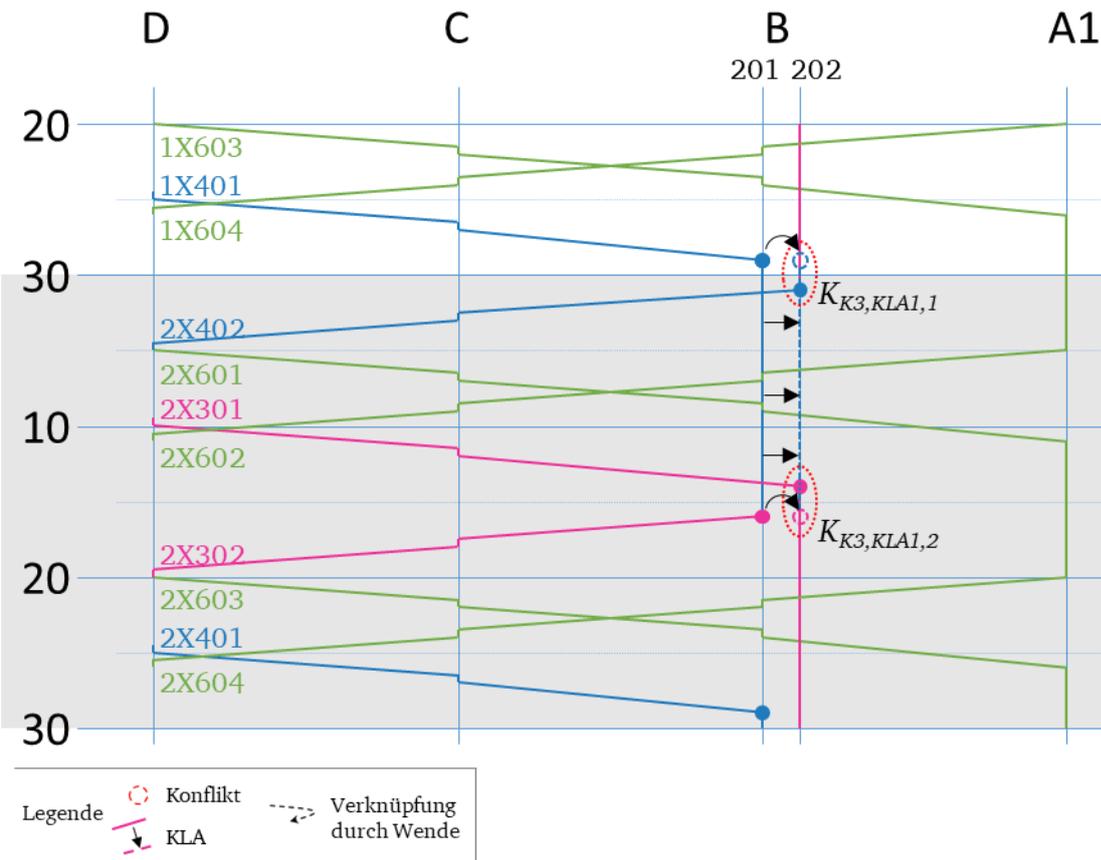


Abbildung 9-9: Konfliktlösungsalternative 1 zur Lösung von Konflikt K_3 ($KLA_{K3,1}$)

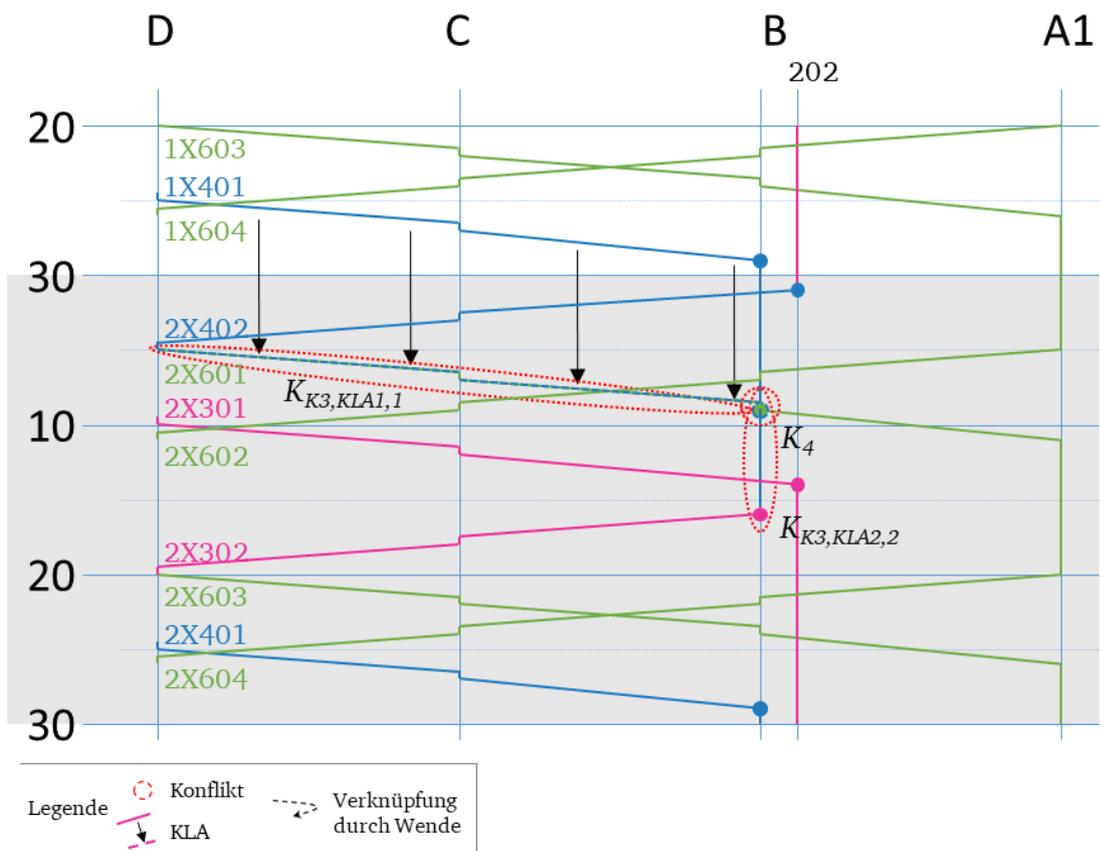


Abbildung 9-10: Konfliktlösungsalternative 2 zur Lösung von Konflikt K_3 ($KLA_{K3,2}$)

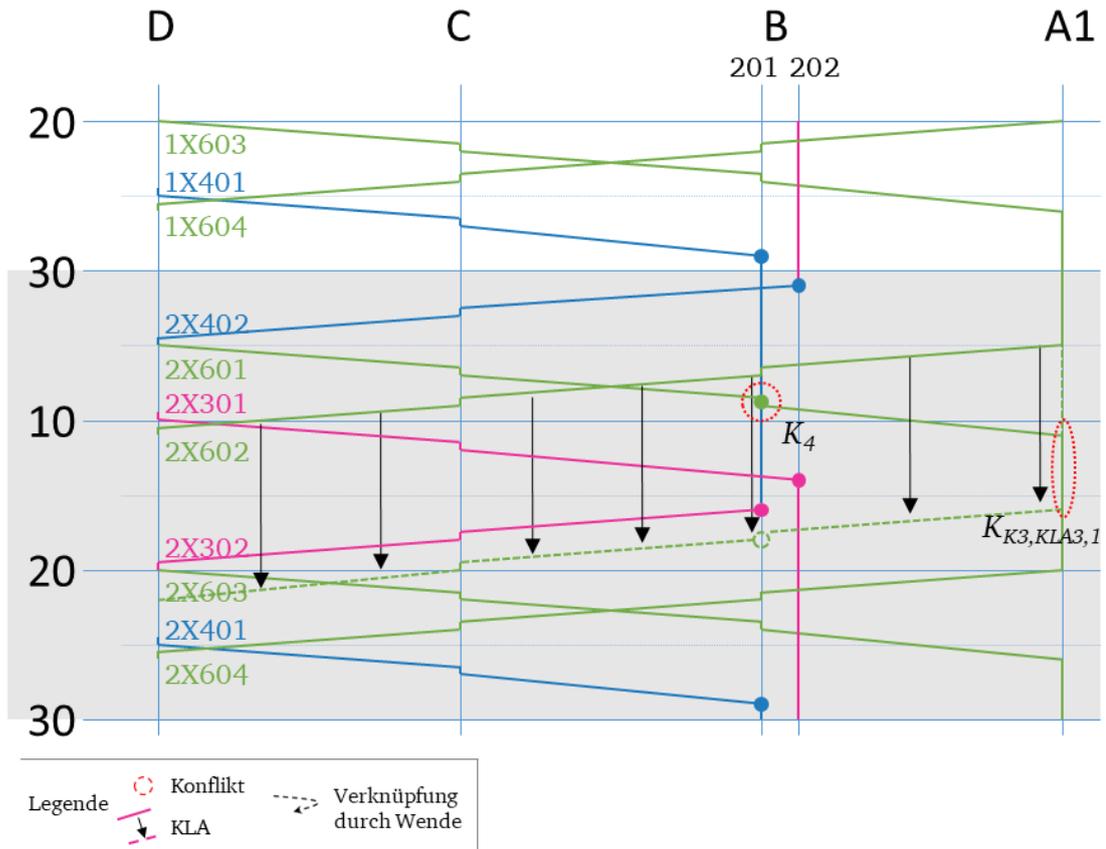


Abbildung 9-11: Konfliktlösungsalternative 3 zur Lösung von Konflikt K_3 ($KLA_{K3,3}$)

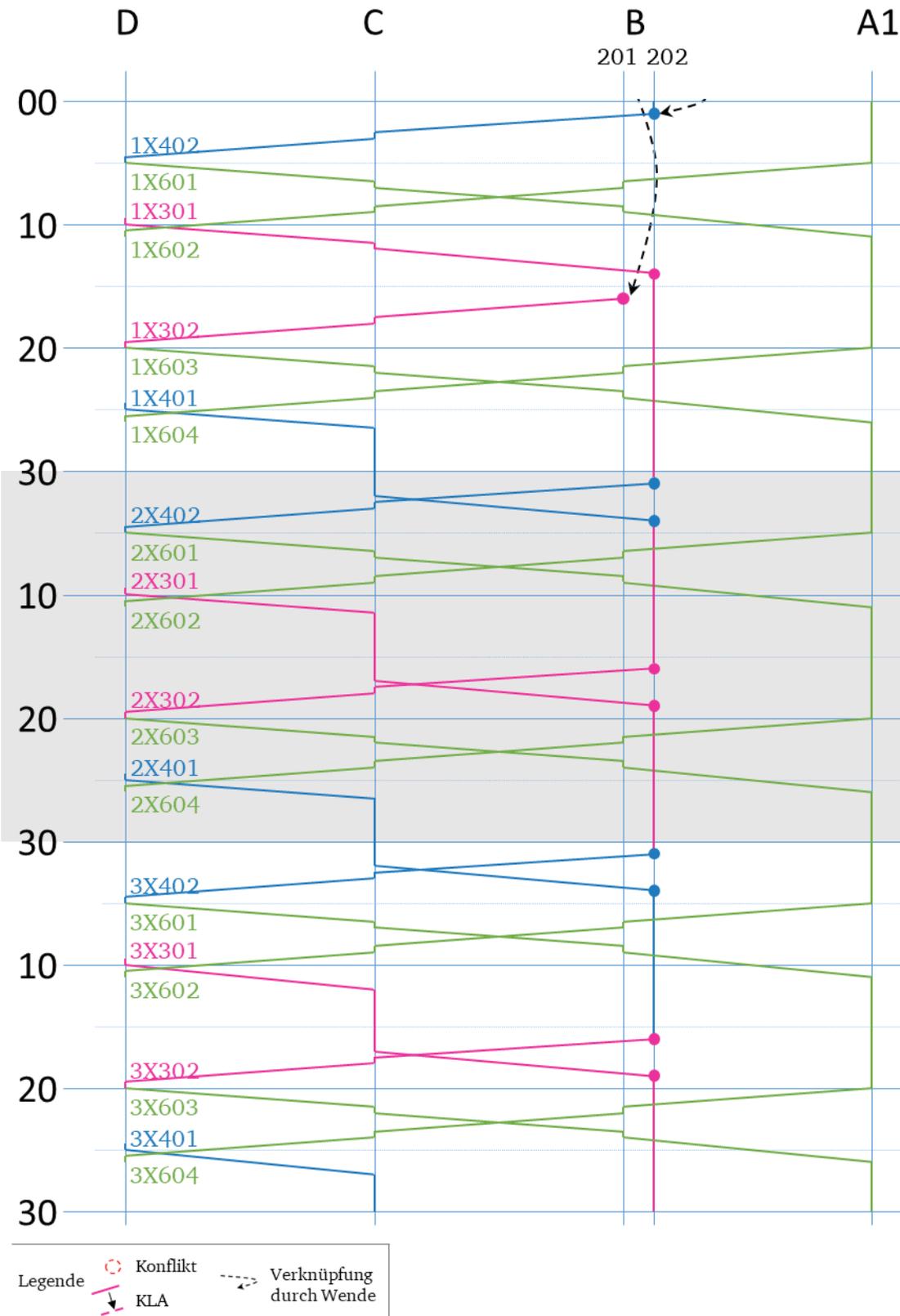


Abbildung 9-12: Periodischer Fahrplan nach der Lösung von K_3 und K_4

9.4 Zusammenfassung

Ziel des Kapitels war, die Eignung der in dieser Arbeit entwickelten Adaption von SFP aufzuzeigen. Dafür wurden die entwickelten Module exemplarisch auf ein praxisnahes Beispiel des S-Bahn-Netzes "Rhein-Main" angewendet. Der Fokus lag dabei auf Modul 1 und Modul 3.

Für Modul 1 wurde der initiale Iterationsschritt zur Anpassung des Betriebskonzepts dargestellt. Dabei wurde durch die vier Submodule ein Störfallprogramm unter Annahme zweier zusätzlicher Abweichungen in der Infrastruktur (Sperrung eines Bahnsteiggleises und einer im Regelbetrieb nicht genutzten Strecke) angepasst. Bereits im initialen Iterationsschritt konnten zwei angepasste Betriebskonzepte erstellt werden, die im betrachteten Netzabschnitt die Bedingungen an die Funktionsfähigkeit erfüllen.

Als Input für Modul 3 diente eines der beiden funktionsfähigen Betriebskonzepte, die im ersten Iterationsschritt von Modul 1 bestimmt wurden. Die Demonstration der Anwendung einer KE/KL-Heuristik auf einen periodischen Fahrplan erfolgte anhand des Fahrplans des bereits zuvor betrachteten Netzabschnittes. Durch die KE/KL-Heuristik konnte ein konfliktfreies Fahrplankonzept der stabilen Phase bestimmt werden.

Insgesamt konnte durch das Anwendungsbeispiel ein Einblick in die Funktionsweise der Module gegeben werden. Die volle Komplexität der Praxis konnte im Rahmen des Kapitels aber nicht abgedeckt werden.

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und der Nutzen der Arbeit aufgezeigt. Außerdem werden Anknüpfungspunkte für weitere Arbeiten gegeben.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Ergebnis

Ziel der Arbeit war die Entwicklung von Algorithmen zur Adaption von SFP anhand infrastruktureller und betrieblicher Einflussgrößen zum Zeitpunkt der Störung. Damit soll eine Forschungslücke im Bereich der Störungsdisposition geschlossen werden. Die Algorithmen sollen für eine Verwendung in einem Tool zur (teil)automatisierten Unterstützung von Disponenten bei der Adaption von SFP geeignet sein.

Für die Adaption des SFP wurden vier Teilprobleme identifiziert. Das erste Teilproblem ist die Anpassung des Betriebskonzepts hinsichtlich der linienscharfen betrieblichen Maßnahmen, die Laufweg und Takt betreffen. Außerdem ist eine Anpassung des Verkehrskonzepts erforderlich. Ein weiteres Teilproblem ist die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase. Das vierte Teilproblem ist die Sicherstellung der Einschwingfähigkeit. Neben den vier Teilproblemen ist auch eine kundenorientierte Bewertung des adaptierten SFP erforderlich.

Die Lösung der vier Teilprobleme sowie die kundenorientierte Bewertung erfolgt in fünf Modulen (siehe Abbildung 3-2).

Für Modul 1 und somit für die Lösung von Teilproblem I, der Anpassung des Betriebskonzepts, wurde als Methode eine Heuristik ausgewählt. Bei der Heuristik handelt es sich um eine Verbesserungsheuristik, die durch zwei Operatoren Betriebskonzepte anpasst. Die Operatoren sehen die Änderung einzelner Linienrouten (Operator 1) und die Änderung von Mengen von Linienrouten (Operator 2) vor.

Bei der Anpassung des Betriebskonzepts wird geprüft, ob nur verfügbare Knoten und Kanten verwendet werden, der Kapazitätsverbrauch einen fahrbaren Fahrplan erwarten lässt, konsistente Linien entstehen und betriebliche Vorgaben an den Liniennetzplan eingehalten werden. Durch eine Tabu-Liste wird sichergestellt, dass die Operatoren keine Betriebskonzepte erzeugen, für die anhand des Verlaufs der Anpassung geschlossen werden kann, dass sie nicht funktionsfähig sind.

Die Tabu-Liste führt dazu, dass im Laufe der Durchführung der Heuristik das Angebot der erzeugten Betriebskonzepte abnimmt. Die Heuristik endet, sobald erwartet wird, dass durch eine weitere Anwendung der Operatoren keine Betriebskonzepte mit einer besseren kundenorientierten Bewertung erzeugt werden können.

Besteht ein angepasstes Betriebskonzept, erfolgt in Modul 2 die Anpassung des Verkehrskonzepts (Teilproblem II). Anhand der Auswirkungen der Anpassung des Betriebskonzepts auf das Verkehrskonzept wurde bestimmt, dass für die Lösung von Teilproblem II eine Lösung von Verbindungskonflikten und eine Bestimmung von FGK erforderlich ist. Als Methode zur Lösung von Verbindungskonflikten wurde die Erzeugung von KLA ausgewählt. Die Erzeugung von KLA erfolgt durch den Ansatz von Brauner (2023), der hinsichtlich einer automatischen Bestimmung von Korridorendpunkten ergänzt wurde. Für die Bestimmung von FGK wurde ein zweistufiger Ansatz ausgewählt, der zunächst die Bestimmung von FGK aus bestehenden SFP und ggf. anschließend die Erzeugung und Auswahl von Fahrgastströmen vorsieht. Zuletzt findet eine Engpassermittlung und -auflösung statt.

Nach Teilproblem II (Modul 2) und Teilproblem IV (Modul 4) erfolgt eine kundenorientierte Bewertung des adaptierten SFP. Für die kundenorientierte Bewertung des SFP wurde der

Ansatz von Brauner (2023) ausgewählt. Dieser besteht aus zwei Modulen. Daher besteht auch Modul 5 aus zwei Submodulen, die nacheinander durchgeführt werden. Für die Durchführung von Modul 5 nach Modul 4 sind die Widerstandsveränderungen der Verbindungen neu zu berechnen, bei denen es durch Modul 3 zu einer Änderung der Verbindung gekommen ist. Außerdem wurde das Modul „kundenorientierte SFP-Bewertung“ angepasst, sodass die kundenorientierte Bewertung der Einschwingphase auf Basis des Fahrplans der Einschwingphase erfolgen kann.

Output von Modul 5 ist ein bewertetes SFP. Ist das Ergebnis der kundenorientierten Bewertung in Modul 5, dass die maximal akzeptable Widerstandsveränderung nicht eingehalten wird, erfolgt zunächst eine Rückkopplung an Modul 2 zur Anpassung des Verkehrskonzepts. Falls durch die Rückkopplung zu Modul 2 weiterhin keine zufriedenstellende kundenorientierte Bewertung gegeben ist, erfolgt eine Rückkopplung an Modul 1 zur Anpassung des Betriebskonzepts.

Wird durch die kundenorientierte Bewertung in Modul 5 die maximal akzeptable Widerstandsveränderung eingehalten, dann erfolgt, wenn Modul 5 nach Modul 2 aufgerufen wurde, die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase durch Modul 3. Wenn Modul 5 nach Modul 4 aufgerufen und die kundenorientierte Bewertung eingehalten wird, ist die Adaption des SFP abgeschlossen.

Teilproblem III ist die Sicherstellung der Umsetzbarkeit des linienspezifischen Betriebskonzepts in der stabilen Phase (Modul 3). Als Methode zur Lösung von Teilproblem III wurde eine KE/KL-Heuristik ausgewählt. Aufgrund der Anwendung der KE/KL-Heuristik auf das periodische Fahrplankonzept der stabilen Phase sind Modifikationen bzgl. des Nicht-Vorhandensein einer eindeutigen zeitlichen Reihenfolge und für das Entfernen obsoleter Konfliktlösungen erforderlich.

Für die KE/KL-Heuristik wird die zeitliche Reihung der Konflikte beibehalten und es ist ein mehrmaliges Durchlaufen des Fahrplankonzepts der stabilen Phase möglich. Die KE/KL-Heuristik terminiert, sobald eine Periode ohne Änderungen durchlaufen wird. Für das Entfernen von obsoleten Konfliktlösungen wurde eine Kombination der beiden bestehenden Ansätze von Chiang et al. (1998) und Crespo (2020) gewählt. Die Entfernung von obsoleten Konfliktlösungen läuft parallel zur Lösung der Konflikte.

Das letzte Teilproblem (IV) ist die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der Einschwingphase. Dies entspricht Modul 4 der Systemarchitektur. Als Methode zur Lösung von Teilproblem IV wurde der Ansatz von Crespo (2020) ausgewählt. Zur Anwendung des Ansatzes in Moduls 4 wurden einige Module des Ansatzes modifiziert. So wurde die Generierung der PVSCS und die Entwicklung der PVSCS-Kombinationen um eine Prüfung der maximalen Einschwingdauer des Fahrplans ergänzt. Außerdem erfolgte eine Angleichung der Bewertungskriterien des Moduls „Bewertung“ zu den Bewertungskriterien von Modul 3.

Kann für Modul 3 oder Modul 4 keine Lösung bestimmt werden, erfolgt eine Rückkopplung an Modul 1. Wenn – wie bereits zuvor beschrieben – Modul 5 nach Modul 4 aufgerufen wurde und die maximal akzeptable Widerstandsveränderung eingehalten ist, ist die Adaption des SFP abgeschlossen und es besteht ein adaptiertes SFP. Dieses ist entsprechend dem nächsten Schritt im Einsatz von SFP zu konkretisieren. Dazu besteht bereits der Fahrplan der Einschwingphase aus Modul 4.

10.2 Diskussion

In Kapitel 3.3 wurden Anforderungen an die Adaption von SFP hergeleitet. Die Anforderungen sind unterteilt nach

- Anforderungen an ein SFP (Output der Adaption),
- Anforderungen an die Durchführung der Adaption (Input und Durchführung) und
- Anforderungen an die Systemarchitektur.

Die Anforderungen wurden bei der Bestimmung der Systemarchitektur, der Auswahl der Methoden und der Entwicklung der Algorithmen berücksichtigt. In Tabelle 10-1 wird die Erfüllung der Anforderungen durch die entwickelten Algorithmen zur Adaption von SFP diskutiert.

Tabelle 10-1: Diskussion der Anforderungen

Anforderung	Typ	Berücksichtigt durch
Anforderungen an ein SFP		
1.A. SFP		
aufeinander abgestimmt	hart	Die Anpassung des Verkehrskonzepts erfolgt nach der Anpassung des Betriebskonzepts und baut auf diesem auf. Für die Anpassung des Verkehrskonzepts wird geprüft, welche Auswirkungen die Anpassung des Betriebskonzepts auf das Verkehrskonzept hat. Wird durch die Anpassung des Verkehrskonzepts die maximal akzeptable Widerstandsveränderung nicht eingehalten, erfolgt eine Rückkopplung zunächst zur Anpassung des Verkehrskonzepts und, falls erforderlich, zusätzlich zur Anpassung des Betriebskonzepts.
wenige Maßnahmen	weich	Die Bestimmung der ebM basiert auf den bestehenden SFP und erfolgt vorab. Die bestimmten ebM können durch die Disponenten geprüft und ergänzt werden.
Umsetzbarkeit (technisch und rechtlich)	hart	Die Bestimmung der ebM basiert auf den bestehenden SFP, daher sollten die ebM bereits umsetzbar sein. Da die Bestimmung vorab erfolgt, können die bestimmten ebM unter Nutzung z. B. der Validierungen aus Brauner (2023) geprüft werden. Dadurch kann sichergestellt werden, dass nur umsetzbare ebM angewendet werden.
logische Konsistenz	hart	Die Konsistenz der Linien wird bei der Anpassung des Betriebskonzepts sichergestellt. Für die Generierung und Bündelung der verkehrlichen Maßnahmen wird der Ansatz von Brauner (2023) genutzt, der die Anforderung nach logischer Konsistenz erfüllt (Brauner 2023, S. 241).

1.B. Betriebskonzept		
Phasen der Anwendung eines SFP		
Einschwingfähigkeit/ Konkretisierbarkeit	hart	Die Einschwingfähigkeit wird in Modul 4 sichergestellt.
betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase	hart	Die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase wird in Modul 3 sichergestellt.
stabiler Betrieb in der Einschwingphase	weich	In Modul 1 wird durch ein fahrplanunabhängiges Kapazitätskriterium geprüft, dass der Kapazitätsverbrauch einen stabilen Betrieb ermöglicht. Für das Fahrplankonzept der stabilen Phase und den Fahrplan der Einschwingphase wird außerdem die Konfliktfreiheit hergestellt. Eine weitere Bewertung der Stabilität des Fahrplankonzepts der stabilen Phase oder der Einschwingphase erfolgt nicht. Diesbezüglich könnte eine Erweiterung des Ansatzes z. B. analog Looij 2017 erfolgen.
stabiler Betrieb in der stabilen Phase	weich	
Rückführbarkeit	ohne	nicht relevant
kurze Ausschwingphase	ohne	nicht relevant
geringe Auswirkungen auf weiteres Netz	weich	Bei der Bewertung der KLA in den KE/KL-Heuristiken in Modul 3 und 4 wird vorgesehen, dass zeitliche und räumliche Verschiebungen, die eine Mischverkehrsstrecke betreffen, eine zusätzliche Gewichtung erhalten und somit vermieden werden sollen (siehe Kapitel 7.4.4).
angemessene Dauer der Einschwingphase	hart	Der in Modul 4 verwendete Ansatz von Crespo (2020) wurde modifiziert, sodass die Dauer der Einschwingphase als weiteres Kriterium bei der Erstellung des Fahrplans der stabilen Phase verwendet wird.
kurze Einschwingphase	weich	
Liniennetz und Takte der Linien		
kein Pendelverkehr	hart	Bei der Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 werden Pendelverkehre durch die Bedingungen für konsistente Linien ausgeschlossen. Bestehen für ein S-Bahn-System weitere oder andere Kriterien für Pendelverkehr, können diese durch eine Anpassung der Bedingungen für konsistente Linien integriert werden. Auch besteht über die permanente Tabu-Liste die Möglichkeit, Pendelverkehre auszuschließen.

gültige Linienplanung	hart	Bei der Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 werden die Anforderungen an eine gültige Linienplanung über die Bedingungen an den Liniennetzplan sichergestellt. Durch eine Anpassung der Bedingungen können spezifische Anforderungen der S-Bahn-Systeme berücksichtigt werden.
Bedienung Netzäste	weich	Bei der Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 wird durch die Bedingungen für konsistente Linien eine Bedienung der Netzäste sichergestellt.
Bedienung Stammstrecke	hart	Bei der Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 werden die beiden Anforderungen über die Bedingungen an den Liniennetzplan sichergestellt. Durch eine Anpassung der Bedingungen können spezifische Anforderungen der S-Bahn-Systeme berücksichtigt werden.
Vorgaben max. Zuganzahl	hart	Bei der Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 werden die beiden Anforderungen über die Bedingungen an den Liniennetzplan sichergestellt. Durch eine Anpassung der Bedingungen können spezifische Anforderungen der S-Bahn-Systeme berücksichtigt werden.
1.C. Verkehrskonzept		
Zielerreichung	weich	Für die durch die Anpassung des Betriebskonzepts entstehenden Verbindungskonflikte erfolgt eine KE/KL. Auch für ungelöste Verbindungskonflikte aus dem ausgewählten SFP wird geprüft, ob durch die Anpassung des Betriebskonzepts eine Lösung möglich ist.
Beförderungskapazität	hart	Für das Verkehrskonzept findet eine Engpassermittlung und -auflösung statt.
Grenzwert Widerstands- veränderung	hart	Bei der kundenorientierten Bewertung in Modul 5 wird geprüft, ob die durchschnittliche Widerstandsveränderung des adaptierten SFP den vorgegebenen Grenzwert der verkehrlichen Mindestqualität einhält.
geringe Widerstands- veränderung	weich	Die Heuristik zur Anpassung des Betriebskonzepts weist durch die beiden Operatoren eine geringe Diversifizierung auf. Dadurch soll die Anpassung von Betriebs- und Verkehrskonzept und so auch die Änderung des gewohnten Mobilitätsverhalten möglichst gering sein. Außerdem werden bei der Anpassung des Verkehrskonzepts bevorzugt verkehrliche Maßnahmen aus bestehenden SFP verwendet.
Gewohnheit	weich	Bei der Anpassung des Verkehrskonzepts wird der Ansatz von Brauner (2023) verwendet, der auch bereits bei der Erstellung des Verkehrskonzepts verwendet werden kann. Außerdem werden bei der Anpassung des Verkehrskonzepts bevorzugt verkehrliche Maßnahmen aus bestehenden SFP verwendet.
Nachvollzieh- barkeit Fahrgast	weich	Bei der Anpassung des Verkehrskonzepts wird der Ansatz von Brauner (2023) verwendet, der auch bereits bei der Erstellung des Verkehrskonzepts verwendet werden kann. Außerdem werden bei der Anpassung des Verkehrskonzepts bevorzugt verkehrliche Maßnahmen aus bestehenden SFP verwendet.
kostenneutral	hart	Bei der Anpassung des Verkehrskonzepts wird der Ansatz von Brauner (2023) verwendet, „der verkehrliche Maßnahmen mit zusätzlichen Kosten für den Fahrgast aus[schließt]“ (Brauner 2023, S. 242).

Vollständigkeit	hart	Bei der Anpassung des Verkehrskonzepts wird der Ansatz von Brauner (2023) verwendet, der jeden Verbindungskonflikt (gelöst oder ungelöst) in das Verkehrskonzept aufnimmt (Brauner 2023, S. 243).
Anforderungen an die Durchführung der Adaption		
2.A Übergeordnet		
allgemeingültig	hart	Die Adaption und die dafür erforderlichen Inputs sind nicht auf ein S-Bahn-System oder ein Störungsszenario bezogen. Auch können durch die Bedingungen der Anpassung des Betriebskonzepts S-Bahn-System spezifische Anforderungen berücksichtigt werden. Bei der Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase wird von einem periodischen Fahrplankonzept ausgegangen, es können aber auch nicht-periodische Fahrplankonzepte berücksichtigt werden. Dadurch ist auch eine Verwendung außerhalb von S-Bahn-Systemen möglich.
Berücksichtigung von aktueller Infrastruktursituation	hart	Die aktuelle Infrastruktursituation wird bei der Anpassung des Betriebskonzepts und der Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit von stabiler Phase und Einschwingphase berücksichtigt.
Berücksichtigung der aktuellen Betriebssituation	hart	Die aktuelle Betriebssituation wird bei der Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit von stabiler Phase und Einschwingphase berücksichtigt. Durch Rückkopplungen wird die aktuelle Betriebssituation auch bei der Anpassung des Betriebskonzepts berücksichtigt. Bei der Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 werden keine Bedingungen, die sich auf die aktuelle Betriebssituation beziehen, berücksichtigt. Hier bestände die Möglichkeit, eine weitere Bedingung aufzunehmen, bei der der abgeschätzte Fahrzeugbedarf von Seiten der Störung mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge abgeglichen wird. Eine Herausforderung dabei ist, Rückschlüsse aus der Verletzung einer solchen Bedingung auf die weitere Anpassung des Betriebskonzepts zu ziehen.

Terminiertheit	hart	<p>In Modul 1 wird eine Terminierung sichergestellt, indem durch die Tabu-Liste das Angebot der Betriebskonzepte tendenziell abnimmt. Gleichzeitig ist ein Betriebskonzept mit dem Ausfall aller Linien funktionsfähig, sodass Modul 1 stets terminiert (unter der Voraussetzung, dass für alle Linien die ebM „Ausfall“ besteht).</p> <p>Wurde in den Modulen ein bestehender Ansatz verwendet, wurde geprüft, ob dieser eine Terminierung sicherstellt. Für die KE/KL-Heuristik in Modul 3 wurden Abbruchkriterien bestimmt.</p> <p>Der modulübergreifende iterative Prozess sieht entweder eine Rückkopplung an Modul 1 (Terminierung sichergestellt, siehe oben) oder an Modul 2 vor. Die Rückkopplung an Modul 2 ist nach der Anpassung eines Verkehrskonzepts nur einmal vorgesehen, sodass keine Endlosschleife entstehen kann.</p>
schnelle Lösungsbereitstellung	hart	<p>Um eine schnelle Lösungsbereitstellung zu ermöglichen, wurde das Problem in Teilprobleme aufgeteilt und zur Lösung der Teilprobleme werden Heuristiken verwendet.</p> <p>Für die Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 bestehen Parameter, mit denen die Anzahl der generierten Betriebskonzepte und somit auch die Dauer der Lösungsbereitstellung gesteuert werden kann.</p> <p>Aussagen zur tatsächlichen Dauer der Lösungsbereitstellung können nicht gegeben werden, da die Implementierung nicht Bestandteil dieser Arbeit war.</p>
kundenorientierte Bewertung	hart	<p>Eine kundenorientierte Bewertung erfolgt in Modul 5.</p>
Qualitätseinordnung	weich	<p>Für das adaptierte SFP besteht eine durchschnittliche Widerstandsveränderung, die zur Einordnung der Qualität verwendet werden kann.</p> <p>In betrieblicher Hinsicht ist keine Qualitätseinordnung vorgesehen. Eine solche könnte aber basierend auf dem Fahrplankonzept der stabilen Phase und/oder dem Fahrplan der Einschwingphase erfolgen.</p>

2.B. Input		
Vermeidung von manuellem Input	weich	<p>Auf manuelle Inputs wird zurückgegriffen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ggf. bei der Bestätigung von automatisch bestimmten alternativen Korridorendpunkten (siehe Kapitel 5.4.3). • wenn bei der automatischen Bestimmung alternativer Korridorendpunkte keine Lösung gefunden wurde (siehe Kapitel 5.4.3). • wenn eine Auflösung aller Engpässe nicht erreicht wird (siehe Kapitel 5.4.4). • wenn bei der Rückkopplung von Modul 5 zu Modul 2 alternative Korridorendpunkte vorgegeben werden sollen (siehe Kapitel 6.4.3). • wenn nicht-standardmäßige Maßnahmen (z. B. ein Busnotverkehr) zur Anpassung des Verkehrskonzepts angewendet werden sollen (siehe Kapitel 6.4.3). <p>Möglich ist auch die Einholung von Rückmeldungen durch den Disponenten vor Rückkopplung. Eine Integration dieser Möglichkeit wurde aber nicht weiter vertieft.</p>
Verfügbarkeit Input	hart	Bei den entwickelten Algorithmen und den verwendeten Ansätzen wurde darauf geachtet, dass alle Inputs entsprechend Kapitel 3.2 verfügbar sind.
2.C. Durchführung		
Bezug zur Disposition		
Nachvollziehbarkeit der Adaption	hart	Durch die Aufteilung des Problems in Teilprobleme und die Verwendung von KE/KL-Heuristiken können die Anpassungen nachvollzogen werden. Für einen Einsatz in der Praxis sollte geprüft werden, inwiefern eine Aufbereitung der Berechnungsschritte die Nachvollziehbarkeit durch die Disponenten weiter unterstützen kann.
Kompatibilität mit Arbeitsabläufen	hart	Das Prinzip der verwendeten KE/KL-Heuristiken entspricht der Arbeitsweise von Disponenten (siehe Kapitel 2.2).
Kontinuität	weich	<p>Die Adaption nutzt die bestehenden Ansätze aus der SFP-basierten Störungsdisposition von Brauner und Oetting (2019), Crespo (2020) und Brauner (2023).</p> <p>Die Ansätze wurden u. a. bzgl. der Verwendung eines Fahrplans der Einschwingphase für die kundenorientierte Bewertung (Brauner 2023) oder der Berücksichtigung der Dauer der Einschwingphase als Kriterium für die Erzeugung des Fahrplans der Einschwingphase (Crespo 2020) weiterentwickelt.</p>

		Auch könnten weitere Algorithmen aus der Adaption des SFP in bestehenden Ansätzen verwendet werden. Zum Beispiel könnte das Modul zur Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase auch für eine Validierung der Planung von SFP verwendet werden.
Automatisierung	weich	siehe Diskussion der Anforderung „Vermeidung von manuellem Input“
Anpassbarkeit	weich	<p>Vorgaben können durch die Ergänzung bzw. Änderung der Bedingungen für funktionsfähige Betriebskonzepte in Modul 1 berücksichtigt werden. Auch können die ebM vorgegeben und durch die permanente Tabu-Liste ungewünschte Laufwege ausgeschlossen werden.</p> <p>Bei der Anpassung des Verkehrskonzepts können durch die Vorgabe oder manuelle Festlegung der Korridorendpunkte verkehrliche Maßnahmen vorgegeben werden.</p> <p>In Modul 3 können bestehende KE/KL-Heuristiken genutzt und die erforderlichen elementaren Konfliktlösungen verwendet werden.</p> <p>Durch die Verwendung von KE/KL-Heuristiken können Rückmeldungen zu den Ursachen und der Auswahl der gewählten Anpassungen gegeben werden. Die Ausgestaltung einer solchen Rückmeldung lag nicht im Fokus dieser Arbeit.</p> <p>Auch können ganze Module oder Submodule ausgetauscht werden. So können auch andere Ansätze zur Lösung der Teilprobleme verwendet werden.</p>
integrierte Berücksichtigung von Fahrplan und Fahrzeugumlaufplan	weich	<p>Bei der Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit von stabiler Phase und Einschwingphase werden Umlaufkonflikte berücksichtigt.</p> <p>Bei der Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 werden keine Bedingungen, die sich auf die Fahrzeugumlaufplanung beziehen, berücksichtigt. Eine mögliche Erweiterung dazu wird bei der Diskussion der Anforderung „Berücksichtigung der aktuellen Betriebssituation“ vorgeschlagen.</p>
Bezug zu Betriebs- und Verkehrskonzept		
Erforderlichkeit	hart	In Modul 1 wird zunächst die Funktionsfähigkeit des Betriebskonzepts des ausgewählten SFP geprüft. Ist anschließend auch die betriebliche Umsetzbarkeit der stabilen Phase in Modul 3 und die Einschwingfähigkeit in Modul 4 gegeben, erfolgt für das ausgewählte SFP keine Adaption.
Nutzung bestehender Verkehrskonzepte	weich	Bei der Anpassung des Verkehrskonzepts werden bevorzugt verkehrliche Maßnahmen aus bestehenden SFP verwendet.

Berücksichtigung von Einschwingphase und stabiler Phase	hart	Einschwingphase und stabile Phase werden in Modul 3 bzw. Modul 4 berücksichtigt.
Zuverlässigkeit	weich	Die Heuristik zur Anpassung des Betriebskonzepts weist durch die beiden Operatoren eine geringe Diversifizierung auf. Dadurch soll die Anpassung von Betriebs- und Verkehrskonzept gering sein. Bei der Bewertung und Auswahl der Alternativen in Operator 1 wird die Veränderung gegenüber dem Betriebskonzept des ausgewählten SFP und dem Regelbetrieb berücksichtigt. Bei der Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit von stabiler Phase und Einschwingphase werden die KLA hinsichtlich ihrer zeitlichen und räumlichen Abweichung vom Fahrplan des Regelbetriebs bewertet.
Bezug zu Maßnahmen		
einheitliche Reaktion	weich	Da keine stochastische Entscheidungsfindung erfolgt, kann eine einheitliche Reaktion bei der Adaption von SFP sichergestellt werden.
Nutzung gleicher Maßnahmen	weich	Die Bestimmung der ebM basiert auf den bestehenden SFP.
Anforderungen an die Durchführung der Adaption		
Modularität	-	Die entwickelten Algorithmen zur Adaption von SFP sind in fünf Module unterteilt, die wiederum in Submodule gegliedert sind. Eine Kopplung zwischen den Modulen ist durch den modul-übergreifenden Prozess gegeben. Durch diesen werden aber nicht die Funktionen der Module verändert, sondern weitere Bedingungen oder die Nutzung weiterer Maßnahmen vorgegeben.
Kompatibilität	-	Die Kompatibilität wird durch die Modularität und die Nutzung von Betriebs- und Verkehrskonzept sowie Fahrplan(konzepten) als Schnittstelle zwischen den Modulen ermöglicht.
Wiederverwendbarkeit	-	Die Module sind funktional unabhängig (siehe Modularität) und nach problemspezifischen Funktionen getrennt. So kann beispielsweise die Sicherstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit der stabilen Phase auch für die Planung von SFP verwendet werden.

Die Ausführungen in Tabelle 10-1 zeigen, dass die entwickelten Algorithmen zur Adaption von SFP die Anforderungen weitgehend erfüllen. Aufgezeigt wurden auch Bedarfe für die Weiterentwicklung der Algorithmen. Diese ergänzen die in den Diskussionen der Hauptkapitel aufgezeigten Forschungsbedarfe.

Bei der Diskussion der Algorithmen sind auch die in Kapitel 3.2 erfolgten inhaltlichen Abgrenzungen zu berücksichtigen. Eine wesentliche Abgrenzung ist der Fokus auf infrastrukturelle und betriebliche Einflussgrößen. Verkehrliche Einflussgrößen können die Adaption eines SFP nicht auslösen. Sollten auch verkehrliche Einflussgrößen berücksichtigt werden (z. B. Ausfälle oder Überlastungen in einem U-Bahn-System), kann dies durch eine Modifikation der Anpassung des Verkehrskonzepts in Modul 2 erfolgen.

Bisher werden in Modul 2 nur die Auswirkungen der Anpassungen des Betriebskonzepts auf das Verkehrskonzept geprüft. Erfolgt keine Anpassung des Betriebskonzepts, bleibt das Verkehrskonzept unverändert. Daher wird Modul 2 nur nach einer Anpassung des Betriebskonzepts in Modul 1 aufgerufen.

Sollen bei der Adaption des SFP auch verkehrliche Einflussgrößen berücksichtigt werden, ist Modul 2 auch aufzurufen, wenn in Modul 1 keine Anpassung erfolgt. Die sich daraus ergebenden Änderungen sind im Zustandsdiagramm in Abbildung 10-1 dargestellt. In Abbildung 10-1 ist im Vergleich zu Abbildung 3-3 auch berücksichtigt, dass keine Rückkopplung von Modul 2 an Modul 1 (siehe Kapitel 5.4.1) sowie von Modul 4 nach 3 (siehe Kapitel 8.4.2) vorgesehen ist.

Insgesamt wurde mit der Entwicklung der Algorithmen zur Adaption von SFP ein Beitrag zur Automatisierung und zur Unterstützung der Disponenten bei der vorgeplanten Störungsdisposition geleistet. Dieser Beitrag umfasst die automatisierte

- Anpassung des Liniennetzplans auf die aktuelle Infrastruktursituation,
- Anpassung eines Verkehrskonzepts auf ein verändertes Betriebskonzept,
- fahrplanbezogene Sicherstellung der stabilen Phase eines Betriebskonzepts und
- Adaption und kundenorientierte Bewertung eines SFP für dessen Anwendung.

10.3 Ausblick

Zur Nutzung der Algorithmen für die Adaption von SFP in der Störungsdisposition sind diese in ein Tool zu implementieren. Da die Algorithmen auf weiteren Ansätzen aufbauen, sollte kein eigenständiges Tool, sondern eine Einbettung in ein „Störfallmanagement-System“ erfolgen. Mit einem solchen System kann sowohl die Planung als auch die Anwendung von SFP abgedeckt werden.

Dadurch kann nicht nur Entwicklungsaufwand eingespart werden, weil Funktionen sowohl für die Planung als auch die Anwendung von SFP genutzt werden können, sondern es können auch Synergien zwischen Planung und Anwendung genutzt werden. So können Erkenntnisse bei der Anwendung von betrieblichen Maßnahmen für die (Weiter)Entwicklung von SFP genutzt werden. Die Adaption von SFP kann profitieren, wenn betriebliche Maßnahmen bei der Planung von SFP als (nicht) geeignet erkannt werden und entsprechend bei der Adaption berücksichtigt werden können.

Außerdem kann durch ein Störfallmanagement-System darauf hingearbeitet werden, dass die (adaptierten) SFP weiter harmonisieren und somit die Reaktion auf Störungen für die Fahrgäste weiter vereinheitlicht wird. Dazu könnte beitragen, dass statt Lösungen für das gesamte Netz modulare Teillösungen entwickelt werden, die bei einer Störung eine auf die aktuelle Infrastruktur- und Betriebssituation angepasste Lösung ermöglichen. Auch weitere Funktionen, wie die Auswahl von SFP, könnten in ein Störfallmanagement-System integriert werden.

Änderungen zu Abb. 3-3:

- rot entfallene Rückkopplungen;
- Wenn verkehrliche Einflussgrößen berücksichtigt werden sind
- blaue Elemente zu ergänzen und
- gelbe Elemente entfallen.

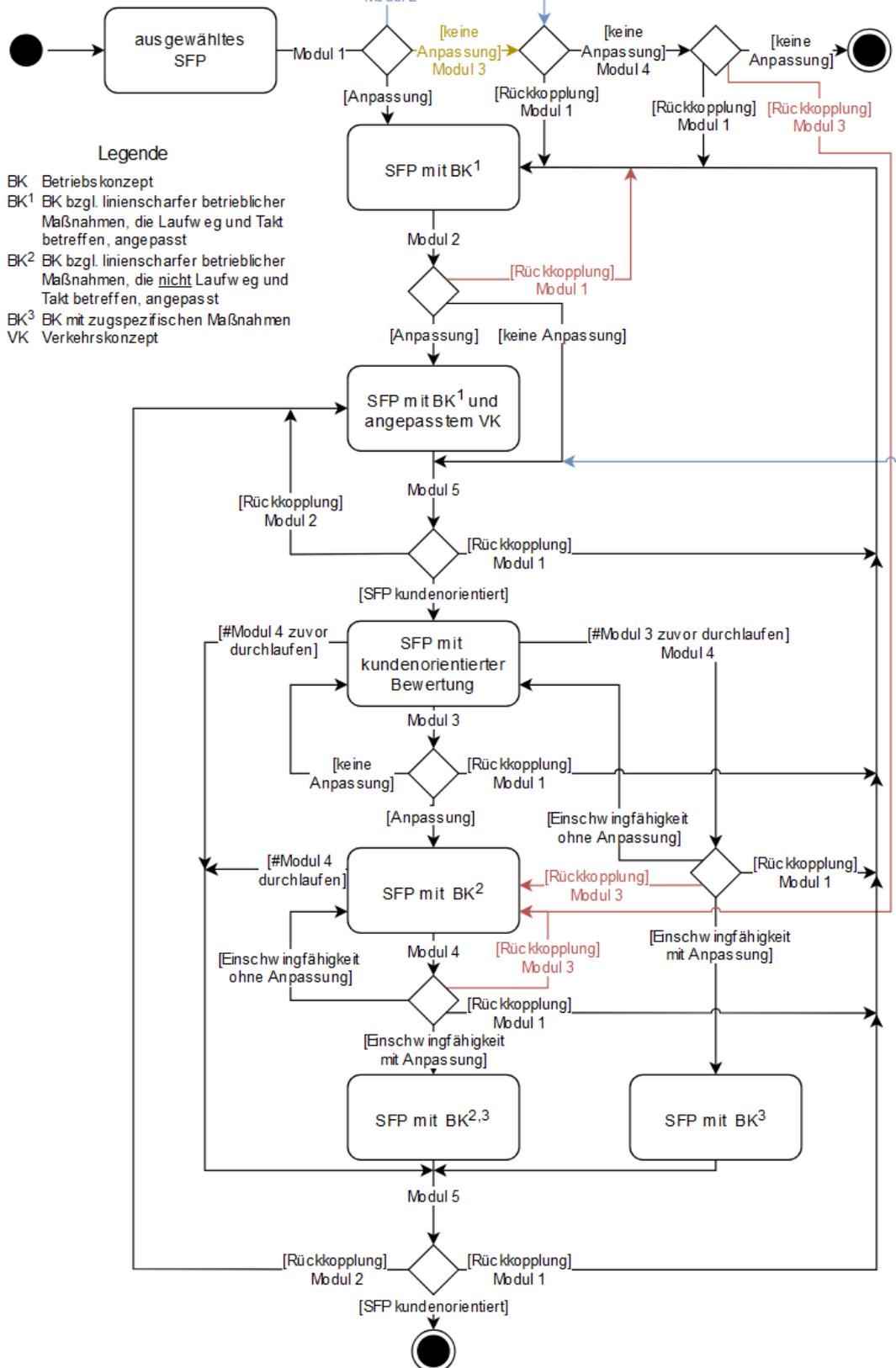


Abbildung 10-1: Resultierendes UML-Zustandsdiagramm von Betriebs- und Verkehrskonzept während der Adaption eines SFP mit erforderlichen Änderungen für die Berücksichtigung von verkehrlichen Einflussgrößen

Ein weiterer Schritt zur Verbesserung der Störungsdisposition kann die Integration von SFP und somit auch die Adaption von SFP in Capacity Traffic Management System (CTMS) sein. CTMS sehen eine integrierte Planung und Steuerung des Betriebs vor und zeichnen sich durch die Integration betriebsrelevanter Daten sowie die Harmonisierung und Optimierung betriebsrelevanter Prozesse aus (siehe z. B. Messerli 2019, Küpper 2023).

Durch eine Integration von SFP in CTMS können die betrieblichen und verkehrlichen Vorteile von SFP genutzt werden. So könnte vor allem die Reduzierung der Komplexität der Anpassung der betrieblichen Planungen bei Auftreten einer Störung, aber auch eine koordinierte und über Störungen hinweg konsistente Lenkung von Reisenden, genutzt werden. Gleichzeitig können die in einem CTMS gebündelten Daten z. B. für die Umlaufplanung für die Adaption von SFP genutzt werden.

Als weiterer Ausblick sollte eine fahrgast-zentrierte Störungsdisposition nicht an den Grenzen des S-Bahn-Systems enden. Verkehrskonzepte von SFP enthalten bereits intermodale Maßnahmen. Zur Unterstützung der in Kapitel 10.2 aufgezeigten Berücksichtigung verkehrlicher Einflussgrößen sollte eine intermodal abgestimmte Reaktion auf Störungen ermöglicht werden. Dadurch könnten zum Beispiel Daten zur Verfügbarkeit und Auslastung innerhalb der Verkehrssysteme für eine intermodale Reisendenlenkung genutzt werden.

Dadurch kann die Mobilität der Fahrgäste während einer Störung möglichst gut aufrechterhalten und so der Schutz vor Funktionskrisen des Verkehrssystems erhöht werden. Dies führt nicht nur zu einer Stärkung des Verkehrsträgers Schiene, sondern des ÖPNV insgesamt.

Literaturverzeichnis

- Bešinović, Nikola; Cacchiani, Valentina; Dollevoet, Twan; Goverde, Rob M. P.; Huisman, Dennis; Kidd, Martin P. et al. (2015): Integrated Decision Support Tools for Disruption Management. In: RailTokyo 2015. 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA). Tokyo, Japan, 23. - 26.03.2015. IAROR.
- Bešinović, Nikola; Quaglietta, Egidio; Goverde, Rob (2014): Supporting tools for automated timetable planning. In: C. A. Brebbia, N. Tomii, P. Tzieropoulos und J. M. Mera (Hg.): Computers in Railways XIV, Bd. 135. Southampton, S. 565–576.
- Bešinović, Nikola; Wang, Yihui; Zhu, Songwei; Quaglietta, Egidio; Tang, Tao; Goverde, Rob M. P. (2019): Integrated train and passenger disruption management for urban railway lines. In: 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). Auckland, New Zealand: IEEE, S. 3182–3187.
- Bešinović, Nikola; Wang, Yihui; Zhu, Songwei; Quaglietta, Egidio; Tang, Tao; Goverde, Rob M. P. (2022): A Matheuristic for the Integrated Disruption Management of Traffic, Passengers and Stations in Urban Railway Lines. In: *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.* 23 (8), S. 10380–10394. DOI: 10.1109/TITS.2021.3093570.
- Birattari, Mauro; Paquete, Luis; Stützle, Thomas (2003): Classification of Metaheuristics and Design of Experiments for the Analysis of Components.
- Blum, Christian; Roli, Andrea (2003): Metaheuristics in combinatorial optimization. In: *ACM Comput. Surv.* 35 (3), S. 268–308. DOI: 10.1145/937503.937505.
- Brauner, Anna-Katharina (2019a): Automated Evaluation of pre-planned Operating Concepts for Disruptions in Commuter Railway Transport. In: *Transportation Research Procedia* 37, S. 19–26. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.161.
- Brauner, Anna-Katharina (2019b): Kundenorientierte Störfallprogramme erstellen und bewerten. In: *V+T Verkehr und Technik* (2), S. 43–45.
- Brauner, Anna-Katharina (2023): Algorithmen zur (teil-)automatisierten betrieblichen und verkehrlichen Bewertung von Störfallprogrammen. Dissertation. TU Darmstadt. Online verfügbar unter <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/23651/>.
- Brauner, Anna-Katharina; Oetting, Andreas (2019): Pre-planned Disruption Management in Commuter Railway Transportation: Algorithms for (partial) Automation of passenger-oriented Design and Evaluation. In: RailNorrköping 2019. 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA). Norrköping, Sweden, 17.-20.06.2019. IAROR.
- Brucker, Peter (2007): Scheduling Algorithms. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Brucker, Peter; Heitmann, Silvia; Knust, Sigrid (2002): Scheduling railway traffic at a construction site. In: *OR Spectrum* 24 (1), S. 19–30. DOI: 10.1007/s291-002-8198-0.
- Bucher, Alexander; Dietrich, Jürgen R. (2022): Unterstützung der Disposition durch ein Traffic Management System. In: *Der Eisenbahningenieur (EI)* 73 (11), S. 16–18.

-
- Budai, Gabriella; Maróti, Gábor; Dekker, Rommert; Huisman, Dennis; Kroon, Leo (2010): Rescheduling in passenger railways: the rolling stock rebalancing problem. In: *J Sched* 13 (3), S. 281–297. DOI: 10.1007/s10951-009-0133-9.
- Cacchiani, Valentina; Toth, Paolo (2012): Nominal and robust train timetabling problems. In: *European Journal of Operational Research* 219 (3), S. 727–737. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.11.003.
- Cadarso, Luis; Marín, Ángel; Maróti, Gábor (2013): Recovery of disruptions in rapid transit networks. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 53, S. 15–33. DOI: 10.1016/j.tre.2013.01.013.
- Caimi, Gabrio; Fuchsberger, Martin; Laumanns, Marco; Lüthi, Marco (2012): A model predictive control approach for discrete-time rescheduling in complex central railway station areas. In: *Computers & Operations Research* 39 (11), S. 2578–2593. DOI: 10.1016/j.cor.2012.01.003.
- Chiang, Teweï; Hau, HaiYen; Ming Chiang, Hwan; Yun Kob, Su; Ho Hsieh, Chao (1998): Knowledge-based system for railway scheduling. In: *Data & Knowledge Engineering* 27 (3), S. 289–312. DOI: 10.1016/S0169-023X(97)00040-2.
- Chu, Friederike (2014): Beurteilung von Störfallprogrammen anhand ihres Einschwingverhaltens - am Beispiel des Schienenpersonennahverkehrs. Dissertation. TU Darmstadt. Online verfügbar unter <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4146/>.
- Chu, Friederike; Fornauf, Leif; Böhme, Aline; Wolters, Achim (2012): Methode zur Erarbeitung von Störfallprogrammen. In: *Deine Bahn* (7), S. 44–48.
- Chu, Friederike; Oetting, Andreas (2013a): Modeling capacity consumption considering disruption program characteristics and the transition phase to steady operations during disruptions. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 3 (3), S. 54–67.
- Chu, Friederike; Oetting, Andreas (2013b): Quantifying Infrastructure Capacity Consumption while Transitioning to Steady Operations during Disruptions in Passenger Rail Transport. In: RailCopenhagen 2013. 5th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA). Copenhagen, Denmark, 13. - 15.05.2013. IAROR.
- Corman, Francesco; D'Ariano, Andrea; Hansen, Ingo A. (2010): Disruption handling in large railway networks. In: *Computers in Railways XII* 114, S. 629–640. DOI: 10.2495/CR100581.
- Crespo, Arturo (2020): Dynamic and Intermodal Disruption-Management for Commuter Railway Networks. Dissertation. TU Darmstadt. Online verfügbar unter <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/11662/>
- Crespo, Arturo; Steinbach, Cedric; Chai, Shanqing; Oetting, Andreas (2023): Towards a Generic Heuristic Approach for the Real-Time and Automatic Schedule Adjustment. In: RailBelgrade 2023. 10th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA). Belgrad, Serbia, 25. - 28.04.2023. IAROR.

-
- D'Ariano, Andrea; Pacciarelli, Dario; Pranzo, Marco (2007): A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network. In: *European Journal of Operational Research* 183 (2), S. 643–657. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.10.034.
- D'Ariano, Andrea (2008): Improving Real-Time Train Dispatching: Models, Algorithms and Applications. Delft, The Netherlands. Netherlands TRAIL Research School (TRAIL thesis series, T2008/6).
- DB Ril 420.0207, 08.07.2019: Zusammenarbeit mit Eisenbahnverkehrsunternehmen; Dispositionskonzepte vorbereiten und anwenden. DB Netz AG. Online verfügbar unter https://www.dbinfrago.com/web/schiennetz/netzzugang-und-regulierung/regelwerke/betrieblich-technisch_regelwerke/betrieblich_technisches_regelwerk-12596092, zuletzt geprüft am 03.04.2024.
- DB Ril 420.0201, 11.12.2021: Zusammenarbeit mit Eisenbahnverkehrsunternehmen - Zugdisposition durchführen. DB Netz AG. Online verfügbar unter https://www.dbinfrago.com/web/schiennetz/netzzugang-und-regulierung/regelwerke/betrieblich-technisch_regelwerke/betrieblich_technisches_regelwerk-12596092, zuletzt geprüft am 03.04.2024.
- DB Ril 405.0102, 01.10.2022: Fahrwegkapazität - Begriffe. DB Netz AG.
- DB Ril 405.0104, 01.10.2022: Fahrwegkapazität - Kenngrößen und Qualitätsmaßstäbe Darstellung der wichtigsten Bewertungsgrundlagen. DB Netz AG.
- DB Regio AG (2013): Leitfaden zur Erstellung von Störfallprogrammen. 2. Aufl.
- DB Ril 615.0601, 01.08.2020: Leitstelle plus DB Regio - Störfallprogramme anwenden. DB Regio AG.
- Dekker, Mark; van Lieshout, Rolf; Ball, Robin; Bouman, Paul; Dekker, Stefan; Dijkstra, Henk et al. (2018): A Next Step in Disruption Management: Combining Operations Research and Complexity Science (EI2018-25). Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/1765/109054>.
- Dekker, Mark M.; Van Lieshout, Rolf N.; Ball, Robin C.; Bouman, Paul C.; Dekker, Stefan C.; Dijkstra, Henk A. et al. (2022): A next step in disruption management: combining operations research and complexity science. In: *Public Transport* 14 (1), S. 5–26. DOI: 10.1007/s12469-021-00261-5.
- Dobritz, Robert; Weidmann, Ulrich (2012): Auswirkungen schwerer Störungen auf Bahnnetze. In: *ZEVrail – Glasers Annalen* 136 (6+7), S. 212–225.
- Fay, Alexander (2000): Wissensbasierte Dispositionsunterstützung. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 49 (11), S. 740–744.
- Fekete, Alexander (2018): Relevanzbewertungsbefähigung und Ohnmachtserfahrung: Infrastruktur, Wissen und Zeitkritikalität. In: Jens Ivo Engels und Alfred Nordmann (Hg.): Was heißt Kritikalität? Zu einem Schlüsselbegriff der Debatte um kritische Infrastrukturen. Bielefeld: Transcript Verlag, S. 155–178.

-
- Fekete, Sandor P.; Kroeller, Alexander; Lorek, Martin; Pfetsch, Marc (2011): Disruption Management with Rescheduling of Trips and Vehicle Circulations. DOI: 10.48550/arXiv.1101.2123.
- Ghaemi, Nadjla (2018): Short-turning trains during full blockages in railway disruption management. TRAIL Research School.
- Ghaemi, Nadjla; Cats, Oded; Goverde, Rob M. P. (2017a): A microscopic model for optimal train short-turnings during complete blockages. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 105, S. 423–437. DOI: 10.1016/j.trb.2017.10.002.
- Ghaemi, Nadjla; Cats, Oded; Goverde, Rob M. P. (2017b): Railway disruption management challenges and possible solution directions. In: *Public Transport* 9 (1), S. 343–364. DOI: 10.1007/s12469-017-0157-z.
- Ghaemi, Nadjla; Cats, Oded; Goverde, Rob M. P. (2018): Macroscopic multiple-station short-turning model in case of complete railway blockages. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 89, S. 113–132. DOI: 10.1016/j.trc.2018.02.006.
- Ghaemi, Nadjla; Goverde, Rob M. P. (2015): Review of railway disruption management practice and literature. In: RailTokyo 2015. 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA). Tokyo, Japan, 23. - 26.03.2015. IAROR.
- Ghaemi, Nadjla; Goverde, Rob M.P.; Cats, Oded (2016): Railway disruption timetable: Short-turnings in case of complete blockage. In: 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Birmingham, United Kingdom, 23.08.2016 - 25.08.2016: IEEE, S. 210–218.
- Ghaemi, Nadjla; Zilko, Aurelius A.; Yan, Fei; Kurowicka, Dorota; Cats, Oded; Goverde, Rob M. P. (2018): Impact of railway disruption predictions and rescheduling on passenger delays, S. 1–23.
- Groth, Julie Jespersen (2009): Decision Support for the Rolling Stock Dispatcher. Technical University of Denmark. DTU Compute PHD.
- Groth, Julie Jespersen; Potthoff, Daniel; Clausen, Jens; Huisman, Dennis; Kroon, Leo; Maróti, Gábor; Nielsen, Morten Nyhave (2009): Disruption Management in Passenger Railway Transportation. In: R. K. Ahuja, R. H. Möhring und C. D. Zaroliagis (Hg.): *Robust and Online Large-Scale Optimization*, Bd. 5868. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 399–421. Online verfügbar unter http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-05465-5_18, zuletzt geprüft am 19.10.2021.
- Heller, Simon; Schaer, Thorsten (2004): DisKon – Disposition und Konfliktlösungsmanagement der DB AG. In: *Der Eisenbahningenieur (EI)* 55 (9), S. 102–122.
- Hüftle, Mike (2007): Heuristiken. In: *OptiV – Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr - Langfassung der Ergebnisse des gleichnamigen Projekts*. FGSV. Köln.
- ISO/IEC 25010:2023, 2023: Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Product quality model —.

-
- Jacobs, Jürgen (2003): Rechnerunterstützte Konfliktermittlung und Entscheidungsunterstützung bei der Disposition des Zuglaufs. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Fakultät für Bauingenieurwesen. Online verfügbar unter http://publications.rwth-aachen.de/record/58834/files/Jacobs_%20Juergen.pdf, zuletzt geprüft am 19.12.2018.
- Kleinberg, Jon; Tardos, Éva (2006): Algorithm design. 1. ed. Boston, Mass. Pearson/Addison-Wesley.
- Kronsbein, Ulrich; Hinke, Erik (2007): Betriebszentralen bei der DB - Erfahrungen und Anforderungen an die weitere Entwicklung/Operations control centres at Deutsche Bahn: Experience, requirements and further developments. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 56 (3).
- Küpper, Michael (2023): Das Capacity & Traffic Management System für die Digitale Schiene. In: *Der Eisenbahningenieur (EI)* 74 (10), S. 60–64.
- Looij, Patrick (2017): Adjusting train routing in case of planned infrastructure maintenance. Masterarbeit. TU Delft. Online verfügbar unter <http://resolver.tudelft.nl/uuid:96ae098d-5708-45c4-9270-c76f728d104e>.
- Louwerse, Ilse; Huisman, Dennis (2014): Adjusting a railway timetable in case of partial or complete blockades. In: *European Journal of Operational Research* 235 (3), S. 583–593. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.12.020.
- Mascis, Alessandro; Pacciarelli, Dario (2002): Job-shop scheduling with blocking and no-wait constraints. In: *European Journal of Operational Research* 143 (3), S. 498–517. DOI: 10.1016/S0377-2217(01)00338-1.
- Masing, Berenike; Lindner, Niels; Liebchen, Christian (2022): Periodic Timetabling with Integrated Track Choice for Railway Construction Sites. In: ZIB-Report (22-26). Online verfügbar unter <https://opus4.kobv.de/opus4-zib/frontdoor/index/index/docId/8862>, zuletzt geprüft am 15.04.2024.
- Messerli, Martin (2019): Mit smartrail 4.0 die Bahn im Griff - auch in Zukunft. Scientific Railway Signalling Symposium (SRSS). TU Darmstadt. Darmstadt, 26.06.2019.
- Missikoff, Michele (1998): An Object-oriented Approach to an Information and Decision Support System for Railway Traffic Control. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 11 (1), S. 25–40. DOI: 10.1016/S0952-1976(97)00058-4.
- Molina, Daniel; Poyatos, Javier; Del Ser, Javier; García, Salvador; Hussain, Amir; Herrera, Francisco (2020): Comprehensive Taxonomies of Nature- and Bio-inspired Optimization: Inspiration Versus Algorithmic Behavior, Critical Analysis Recommendations. In: *Cogn Comput* 12 (5), S. 897–939. DOI: 10.1007/s12559-020-09730-8.
- Nakamura, Tatsuya; Hirai, Chikara; Nishioka, Yasuki (2011): A practical train rescheduling algorithm using three predetermined factors. In: RailRome 2011. 4th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA). Rome, Italy, 16. - 18.02.2011. IAROR.

-
- Narayanaswami, Sundaravalli; Rangaraj, Narayan (2011): Scheduling and Rescheduling of Railway Operations: A Review and Expository Analysis. In: *Technol. Oper. Manag* 2 (2), S. 102–122. DOI: 10.1007/s13727-012-0006-x.
- Nielsen, Lars Kjær; Kroon, Leo; Maróti, Gábor (2012): A rolling horizon approach for disruption management of railway rolling stock. In: *European Journal of Operational Research* 220 (2), S. 496–509. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.01.037.
- Nießen, Nils (2023): Methoden für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen. In: Nils Nießen und Andreas Oetting (Hg.): *Planungs- und Betriebsmanagement für das System Bahn*. 1. Auflage. Berlin: Bahn Fachverlag (DB-Fachbuch), S. 270–305.
- Nießen, Nils; Kogel, Bastian; Kuckelberg, Alexander (2016): Konfliktlösungsstrategien bei der Disposition im Eisenbahnwesen/Conflict resolution strategies in railway sector material planning. In: *Der Eisenbahningenieur (EI)* 67 (3).
- Oetting, Andreas (2023a): Kapazitätsmanagement. Unter Mitarbeit von Arturo Crespo. In: Nils Nießen und Andreas Oetting (Hg.): *Planungs- und Betriebsmanagement für das System Bahn*. 1. Auflage. Berlin: Bahn Fachverlag (DB-Fachbuch), S. 230–270.
- Oetting, Andreas (2023b): Trassenkonstruktion. Unter Mitarbeit von Arturo Crespo. In: Nils Nießen und Andreas Oetting (Hg.): *Planungs- und Betriebsmanagement für das System Bahn*. 1. Auflage. Berlin: Bahn Fachverlag (DB-Fachbuch), S. 174–230.
- Oetting, Andreas; Chu, Friederike (2013): Disruption Programs in Passenger Rail Transport - Ensuring Steady Operations During Disruptions. In: 13th World Congress on Transportation Research. Rio de Janeiro, Brasil, Juli 2013.
- Oetting, Andreas; Rittner, Michael; Fey, Sebastian (2013): Synchronal algorithms for determination and evaluation of conflict resolution scenarios for real-time rescheduling. In: RailCopenhagen 2013. 5th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA). Copenhagen, Denmark, 13. - 15.05.2013. IAROR.
- Oetting, Andreas; Weidner, Tibor; Glienicke, Jan (2011): Automatic Rescheduling for Planning Processes. In: RailRome 2011. 4th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA). Rome, Italy, 16. - 18.02.2011. IAROR.
- Opitz, Jens (2009): Automatische Erzeugung und Optimierung von Taktfahrplänen in Schienenverkehrsnetzen. Wiesbaden. Gabler (SpringerLink Bücher).
- Pachl, Jörn (2022): Systemtechnik des Schienenverkehrs. Wiesbaden. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Peeters, Leon; Kroon, Leo (2001): A Cycle Based Optimization Model for the Cyclic Railway Timetabling Problem. In: Stefan Voß und Joachim R. Daduna (Hg.): *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 275–296.
- Peeters, Leon Willem Petrus (2003): Cyclic railway timetable optimization. Zugl.: Rotterdam, Erasmus Univ., Diss., 2003. Rotterdam. Erasmus Research Inst. of Management (TRAIL thesis series, 3003,5).

-
- Pellegrini, Paola; Marlière, Grégory; Rodriguez, Joaquin (2014): Optimal train routing and scheduling for managing traffic perturbations in complex junctions. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 59, S. 58–80. DOI: 10.1016/j.trb.2013.10.013.
- Pferdmenges, S.; Schaefer, H. (1995): Automatische Konflikterkennung und wissensbasierte Konfliktlösung in der Streckendisposition/Automatic conflict recognition and knowledge-based conflict resolution in route setting. In: *Signal + Draht* 87 (5).
- Ping, Li; Axin, Nie; Limin, Jia; Fuzhang, Wang (2001): Study on intelligent train dispatching. In: ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585). Oakland, CA, USA, 25-29 Aug. 2001: IEEE, S. 949–953.
- Potthoff, Daniel; Huisman, Dennis; Desaulniers, Guy (2010): Column Generation with Dynamic Duty Selection for Railway Crew Rescheduling. In: *Transportation Science* 44 (4), S. 493–505. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/25769516>, zuletzt geprüft am 09.01.2024.
- Rey, Georges; Elk, Thomas; Neuhäuser, René (2007): Störfallmanagement der S-Bahn München und Vorschläge für den Infrastrukturausbau. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 56 (11).
- RMV (2023): Linienfahrpläne der Linien S3/S4 und S6 ab 11.12.22 bis 09.12.23. Rhein-Main-Verkehrsverbund. Online verfügbar unter <https://www.rmv.de/c/de/fahrplan/fahrplaene/linienfahrplaene>, zuletzt geprüft am 15.02.2024.
- Rodriguez, Joaquín (2007): A constraint programming model for real-time train scheduling at junctions. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 41 (2), S. 231–245. DOI: 10.1016/j.trb.2006.02.006.
- Russell, Stuart J.; Norvig, Peter (2012): Künstliche Intelligenz. Ein moderner Ansatz. 3., aktualisierte Aufl. München. Pearson (Pearson-Studium). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5133680>.
- Şahin, İsmail (1999): Railway traffic control and train scheduling based on inter-train conflict management. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 33 (7), S. 511–534. DOI: 10.1016/S0191-2615(99)00004-1.
- Samà, Marcella; Pellegrini, Paola; D’Ariano, Andrea; Rodriguez, Joaquin; Pacciarelli, Dario (2016): Ant colony optimization for the real-time train routing selection problem. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 85, S. 89–108. DOI: 10.1016/j.trb.2016.01.005.
- Schranil, Steffen; Weidmann, Ulrich (2012): Monitoring des Störgeschehens in Bahnsystemen. In: *V+T Verkehr und Technik* 65 (3), S. 83–87.
- Senger, Paul (2022): Standardisierung des Einsatzes von Störfallprogrammen. Masterarbeit. TU Darmstadt. Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Serafini, Paolo; Ukovich, Walter (1989): A Mathematical Model for Periodic Scheduling Problems. In: *SIAM J. Discrete Math.* 2 (4), S. 550–581. DOI: 10.1137/0402049.
- Sergienko, I. V.; Hulianytskyi, L. F.; Sirenko, S. I. (2009): Classification of applied methods of combinatorial optimization. In: *Cybern Syst Anal* 45 (5), S. 732–741. DOI: 10.1007/s10559-009-9134-0.

-
- Stegherr, Helena; Heider, Michael; Hähner, Jörg (2022): Classifying Metaheuristics: Towards a unified multi-level classification system. In: *Nat Comput* 21 (2), S. 155–171. DOI: 10.1007/s11047-020-09824-0.
- Steierwald, Gerd (2005): Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele. 2., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]. Springer.
- Steinbach, Cedric; Brauner, Anna-Katharina; Crespo, Arturo; Oetting, Andreas (2021): Integrierter Ansatz zur Planung und Durchführung von Störfallprogrammen. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 70 (11), S. 21–24.
- Steinbach, Cedric; Crespo, Arturo (2021): Integrated Approach for the Adjustment of Disruption Programs to the Actual Infrastructural Availability. In: RailBeijing 2021. 9th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA). Beijing, China, 03. - 07.11.2021. IAROR.
- Stemer, Bastian (2018): Entwicklung eines netzweiten Modells zur Konfliktidentifizierung und -charakterisierung im Kontext einer Störung des S-Bahn-Betriebs. Masterarbeit. TU Darmstadt. Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Talbi, El-Ghazali (2009): Metaheuristics. From design to implementation. Hoboken, NJ. Wiley.
- Tasler, Gerd; Wegele, Stefan (2014): Behandlung betrieblicher Ausnahmen durch einen regelbasierten Dispositionsassistenten. In: *Signal + Draht* 106 (4), S. 34–38.
- Toletti, Ambra; Leutwiler, Florin; Jordi, Julian; Caimi, Gabrio; Corman, Francesco (2023): Timetabling for Railways in Practice: Examples of Real-world Constraints. In: RailBelgrade 2023. 10th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA). Belgrad, Serbia, 25. - 28.04.2023. IAROR.
- Törnquist, Johanna (2006): Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms. Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik. In: *OASICS, Volume 2, ATMOS 2005* 2. DOI: 10.4230/OASICS.ATMOS.2005.659.
- Törnquist, Johanna; Persson, Jan A. (2005): Train Traffic Deviation Handling Using Tabu Search and Simulated Annealing. In: Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Big Island, HI, USA, 03-06 Jan. 2005: IEEE, 73a-73a.
- Transportleitung Regio Hessen (2016): Normiertes Dispositionsmanagement S-Bahn Rhein-Main. Unveröffentlicht.
- Trepata Borecka, Jacob; Bešinović, Nikola (2021): Scheduling multimodal alternative services for managing infrastructure maintenance possessions in railway networks. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 154, S. 147–174. DOI: 10.1016/j.trb.2021.10.009.
- UIC CODE 406, 01.06.2013: Capacity. International Union of Railways.
- Vaessens, R. J. M.; Aarts, E. H. L.; Lenstra, J. K. (1998): A local search template. In: *Computers & Operations Research* 25 (11), S. 969–979. DOI: 10.1016/S0305-0548(97)00093-2.

-
- Van Aken, Sander; Bešinović, Nikola; Goverde, Rob M.P. (2017a): Designing alternative railway timetables under infrastructure maintenance possessions. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 98, S. 224–238. DOI: 10.1016/j.trb.2016.12.019.
- Van Aken, Sander; Bešinović, Nikola; Goverde, Rob M.P. (2017b): Solving large-scale train timetable adjustment problems under infrastructure maintenance possessions. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 7 (3), S. 141–156. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2017.06.003.
- Van Lieshout, Rolf N.; Bouman, Paul C.; Huisman, Dennis (2020): Determining and Evaluating Alternative Line Plans in Out-of-Control Situations. In: *Transportation Science* 54 (3), S. 740–761. DOI: 10.1287/trsc.2019.0945.
- Vansteenwegen, Pieter; Dewilde, Thijs; Burggraeve, Sofie; Cattrysse, Dirk (2016): An iterative approach for reducing the impact of infrastructure maintenance on the performance of railway systems. In: *European Journal of Operational Research* 252 (1), S. 39–53. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.12.037.
- VDV-Schrift 462, 2017: Standardisierter Austausch von Liniennetz- und Fahrplandaten mit der europäischen Norm CEN-TS 16441 'NeTeX'. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV). Online verfügbar unter <https://www.vdv.de/schriften---mitteilungen.aspx>, zuletzt geprüft am 12.02.2024.
- Veelenturf, Lucas P.; Kidd, Martin P.; Cacchiani, Valentina; Kroon, L. G.; Toth, Paolo (2014): A Railway Timetable Rescheduling Approach for Handling Large Scale Disruptions. In: *SSRN Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.2472934.
- Vieira, Guilherme E.; Herrmann, Jeffrey W.; Lin, Edward (2003): Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies, and Methods. In: *Journal of Scheduling* 6 (1), S. 39–62. DOI: 10.1023/A:1022235519958.
- Weise, Thomas; Zapf, Michael; Chiong, Raymond; Nebro, Antonio J. (2009): Why Is Optimization Difficult? In: Janusz Kacprzyk und Raymond Chiong (Hg.): *Nature-Inspired Algorithms for Optimisation*, Bd. 193. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Studies in Computational Intelligence), S. 1–50.
- Weymann, Frédéric; Nießen, Nils (2015): Verbesserung der Disposition des Eisenbahnbetriebs durch innovative Optimierungsverfahren/Improved railway dispatching: Application of innovative optimization techniques. In: *ZEVrail – Glasers Annalen* 139 (3).
- Wolpert, David H.; Macready, William G. (1997): No free lunch theorems for optimization. In: *IEEE Trans. Evol. Computat.* 1 (1), S. 67–82. DOI: 10.1109/4235.585893.
- Wolters, Achim (2023): Betriebsmanagement. In: Nils Nießen und Andreas Oetting (Hg.): *Planungs- und Betriebsmanagement für das System Bahn*. 1. Auflage. Berlin: Bahn Fachverlag (DB-Fachbuch), S. 64–101.
- Zhu, Yongqiu; Goverde, Rob M. P. (2019): Railway timetable rescheduling with flexible stopping and flexible short-turning during disruptions. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 123, S. 149–181. DOI: 10.1016/j.trb.2019.02.015.
- Zhu, Yongqiu; Goverde, Rob M. P. (2021): Dynamic railway timetable rescheduling for multiple connected disruptions. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 125, S. 103080. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103080.

-
- Zhu, Yongqiu; Goverde, Rob M. P.; Quaglietta, Egidio (2018): Railway timetable rescheduling for multiple simultaneous disruptions. In: Caspt 2018: 14th Conference on Advanced Systems in Public Transport. Brisbane, Australia.
- Zilko, Aurelius A.; Kurowicka, Dorota; Goverde, Rob M.P. (2016): Modeling railway disruption lengths with Copula Bayesian Networks. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 68, S. 350–368. DOI: 10.1016/j.trc.2016.04.018.

Abkürzungsverzeichnis

B'	aktuelle Betriebssituation bei der Auswahl von p'
bk	Betriebskonzept aus einem Iterationsschritt von Modul 1
BK_e	Menge der in einem Iterationsschritt von Modul 1 erzeugten Betriebskonzepte
BK_{funkt}	Menge aller funktionsfähiger Betriebskonzepte, die bei der Anwendung von Modul 1 erzeugt werden
BK_p	Betriebskonzept von p ; entspricht einer Menge von betrieblichen Maßnahmen
BK_p^*	angepasstes Betriebskonzept (*) mit p' als Ausgangszustand
ebM	elementare betriebliche Maßnahme
FGK	Fahrgastkorridore
G	Infrastruktursituation des ungestörten S-Bahn-Netzes
G'	aktuelle Infrastruktursituation bei der Auswahl von p'
$K_{Kx,KLAy}$	Folgekonflikt durch KLA y von Konflikt x
$K_{vb,Infra,lr}$	Menge der Knoten und Kanten mit einer verletzten Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ von Linienroute lr
$K_{vb,Kap,bk}$	Menge der verletzten Bedingungen vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ von Betriebskonzept bk
$K_{vb,LNP,bk}$	Menge der Kanten mit einer verletzten Bedingung vom Typ „Liniennetzplan“ in Betriebskonzept bk
K_x	Konflikt x
KLA	Konfliktlösungsalternative
$KLA_{Kx,y}$	KLA mit der Nummer y von K_x
KE/KL	Konflikterkennung/Konfliktlösung
L	Menge der Linien im S-Bahn-Netz
l	beliebige Linie aus L
$lr_{a,lr}$	alternative Linienrouten für Linieroute lr
$LR_{a,y}$	Menge der alternativen Linienrouten für y mit $y \in LR_{x,er}$
LR_{bk}	Menge von Linienrouten mit einem Element für jedes $l \in L$
$LR_{bk,er}$	Menge der zu ersetzenden Linienrouten von Betriebskonzept bk
$LR_{G,l}$	Menge aller umsetzbarer Linienrouten von l in G ; es ist auch ein Element für den Ausfall der Linie enthalten

lr_l	Linienroute von l
LR_p	Menge von Linienrouten, die sich aus der Anwendung der betrieblichen Maßnahmen aus p ergeben
$LR_{p'}^*$	Menge von Linienrouten, die sich aus der Anwendung der betrieblichen Maßnahmen aus dem angepassten Betriebskonzept mit p' als Ausgangszustand ergeben
$LR_{p,l}$	Menge von Linienrouten von Linie l , die sich aus der Anwendung der betrieblichen Maßnahmen aus p ergeben
$LR_{p',l}^*$	Menge von Linienrouten von Linie l , die sich aus der Anwendung der betrieblichen Maßnahmen aus dem angepassten Betriebskonzept, welches p' als Ausgangszustand hat, ergeben
lr_{pa}	prä-alternative Linienroute als „Zwischenprodukt“ bei der Erzeugung von alternativen Linienrouten in der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ in Modul 1.2
$LR_{pa,w,y}$	Menge von prä-alternativen Linienrouten für y mit $y \in LR_{x,er}$, die in Abschnitt 1 der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ aus Modul 1.2 erzeugt wurden, zwei Umleitungen enthalten und verletzte Bedingungen aufweisen
$LR_{pa,y}$	Menge von prä-alternativen Linienrouten für y mit $y \in LR_{x,er}$
$n_{a,max}$	max. Anzahl an alternativen Linienrouten, die je Element, das ersetzt wird, ausgewählt werden
$n_{BK,max}$	max. Anzahl der Betriebskonzepte, die in einem Iterationsschritt von Modul 1 anzupassen sind
$n_{BK,neu}$	maximale Anzahl an erzeugten Betriebskonzepten in einem Iterationsschritt
$n_{er,max}$	max. Anzahl an zu ersetzenden Linienrouten je Iterationsschritt
$n_{LR,l,kom}$	Anzahl der möglichen Kombinationen für $LR_{l,p}^*$
$n_{LR,m}$	mittlere Anzahl der Linienrouten in $LR_{G,l}$ über alle $l \in L$
$n_{Netzast}$	Anzahl der Netzäste des S-Bahn-Netzes
$n_{Netzast,p}$	Anzahl der auf die Störung zulaufenden Netzäste im SFP p
$n_{S,x}$	Anzahl der Elemente in Suchraum S_x von Teilproblem $x \in \{I, II\}$
n_{Tabu}	max. Anzahl der Elemente der Tabu-Liste
$n_{U,max}$	max. Anzahl an Umleitungen einer Linienroute
$n_{vb,Infra,bk}$	Anzahl der Knoten und Kanten über alle Linienrouten von Betriebskonzept bk , die eine verletzte Bedingung vom Typ „Infrastrukturverfügbarkeit“ aufweisen

$n_{vb,Kap,bk}$	Anzahl der Knoten und Kanten in Betriebskonzept bk , die eine verletzte Bedingung vom Typ „Kapazitätsverbrauch“ aufweisen
$n_{vb,LNP,bk}$	Anzahl der Knoten und Kanten in Betriebskonzept bk , die eine verletzte Bedingung vom Typ „Liniennetzplan“ aufweisen
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
P	Menge von bestehenden SFP im S-Bahn-Netz
p	beliebiges SFP aus P
p'	für G' ausgewähltes SFP aus P
\hat{p}	ausgewähltes alternatives SFP aus P für G'
SFP	Störfallprogramm
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
T_E	Endzeitpunkt der KE/KL-Heuristik
$T_{E,i}$	Endzeitpunkt von Fahrplan i
$t_{periode}$	Periodendauer eines periodischen Fahrplans
T_S	Startzeitpunkt der KE/KL-Heuristik
$t_{SFPWende}$	Planungswert für die Wendezeit bei Störungen, der sich zusammensetzt aus der technischen Mindestwendezeit und einem Zuschlag (Chu 2014, S. 103)
vb	verletzte Bedingung
VB_x	Menge von verletzten Bedingungen von Betriebskonzept x
$w_{x,funk}$	Bewertung von Betriebskonzept x hinsichtlich des Ziels „funktionsfähiges Betriebskonzept“
$\emptyset\Delta w_{p, stabil}$	durchschnittliche Widerstandsveränderung von p in der stabilen Phase
$\emptyset\Delta w_{vorgab}$	Grenzwert für die durchschnittliche Widerstandsveränderung von SFP bei der Erstellung von SFP
ω_x	Netzast x des S-Bahn-Netzes

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Ablauf einer generischen KE/KL-Heuristik	10
Abbildung 2-2: „Badewannenmodell“	12
Abbildung 2-3: Prozess zum Einsatz von SFP	20
Abbildung 2-4: Störfalltrichter	21
Abbildung 2-5: Phasen der Anwendung eines SFP	22
Abbildung 2-6: Systemarchitektur des Ansatzes von Crespo (2020)	31
Abbildung 2-7: In Masing et al. 2022 betrachtete Szenarien, mit nicht verfügbarer Infrastruktur (rot) und den Bereichen der Anpassung (cyan)	36
Abbildung 2-8: Klassifikation von Metaheuristiken durch Sergienko et al. 2009	40
Abbildung 2-9: Klassifikation aus Molina et al. 2020 für Metaheuristiken, aufbauend auf deren Verhalten	41
Abbildung 3-1: Zusammenhang zwischen Zielen der Arbeit und den Anforderungen	50
Abbildung 3-2: Fachliche Systemarchitektur der Adaption von SFP	63
Abbildung 3-3: UML-Zustandsdiagramm von Betriebs- und Verkehrskonzept während der Adaption eines SFP	65
Abbildung 3-4: Vorgehensweise zur Entwicklung der Algorithmen	70
Abbildung 3-5: Beispiel des Kernbereichs eines S-Bahn-Netzes	71
Abbildung 4-1: Gewählte Objektstruktur von Modul 1	76
Abbildung 4-2: Ablauf von Operator 1	83
Abbildung 4-3: Überblick zur Objektstruktur von Operator 1	84
Abbildung 4-4: Ablauf Operator 2	85
Abbildung 4-5: Überblick zur Objektstruktur von Operator 2	86
Abbildung 4-6: Beispiel für Probleme bei der Speicherung von Mengen von Linienrouten in der Tabu-Liste, die eine Bedingungen verletzen, die durch eine Erhöhung des Angebots gelöst werden kann	88
Abbildung 4-7: Funktionalitäten und Ablauf eines Iterationsschritts der Heuristik zur Anpassung des Betriebskonzepts	91
Abbildung 4-8: Beispiel für elementare betriebliche Maßnahmen (ebM)	92
Abbildung 4-9: Beispiel für die Bestimmung von ebM „Änderung des Laufwegs (Umleitung)“	93
Abbildung 4-10: Beispiel für die Bestimmung von ebM „Änderung des Laufwegs (alternative Wende)“	94

Abbildung 4-11: Beispiel zur Verdeutlichung des Zusammenhangs von nicht verfügbaren Infrastrukturelementen eines Knotens und Infrastrukturverfügbarkeitskonflikten auf Laufwegebene	95
Abbildung 4-12: Beispiel zur Verdeutlichung des Zusammenhangs von einem nicht verfügbaren Streckengleis einer Kante und Infrastrukturverfügbarkeitskonflikte auf Laufwegebene	96
Abbildung 4-13: Beispiel für Linien, die Bedingung K1 und Bedingung K2 nicht erfüllen.	99
Abbildung 4-14: Beispiel für Linien, die Bedingung K3 und Bedingung K4 nicht erfüllen. ...	100
Abbildung 4-15: Aufbau der Funktionalität „Erzeugung von Betriebskonzepten durch Operatoren“	104
Abbildung 4-16: Beispiel der Diversifizierung durch die Ersetzung mehrerer zu ersetzender Linienrouten.....	106
Abbildung 4-17: Beispiel einer Menge von Linienrouten mit verletzten Bedingungen	107
Abbildung 4-18: Beispiel für die Änderung von Linienrouten mit einer verletzten Bedingung durch Operator 1.....	108
Abbildung 4-19: Beispiel für die Änderung von Linienrouten mit zwei verletzten Bedingungen durch Operator 1.....	109
Abbildung 4-20: Beispiel für eine verletzen Bedingung auf einer ebM „Umleitung“.....	110
Abbildung 4-21: Beispiel für die Zusammenfassung von alternativen Linienrouten	111
Abbildung 4-22: Beispiel für die Zusammenfassung zu ersetzender Linienrouten und nicht zu ersetzender Linienrouten.....	112
Abbildung 4-23: Durch die Ersetzung der $LR_{bk,er}$ entstehende Matrix aus erzeugten Betriebskonzepten.....	121
Abbildung 4-24: Beispiel für die Bestimmung von alternativen Mengen von Linienroute	122
Abbildung 4-25: Aufbau von Modul 1.....	138
Abbildung 4-26: Beispielhafte Anwendung der Funktion „Bestimmung der zu ersetzenden Linienroute“	143
Abbildung 4-27: Struktogramm von Abschnitt 1 der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten“	146
Abbildung 4-28: Beispielhafte Anwendung von Abschnitt 1 der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ mit Fokus auf die gelbe Linienroute	147
Abbildung 4-29: Struktogramm von Abschnitt 2 der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten“	148
Abbildung 4-30: Beispiel für die Anwendung ebM „alternative Wende“ auf eine zu ersetzende Linienroute (1) und eine alternative Linienroute aus Abschnitt 1 (2).....	149

Abbildung 4-31: Beispielhafte Anwendung von Abschnitt 2 der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ mit Fokus auf die gelbe Linienroute	150
Abbildung 4-32: Beispielhafte Anwendung von Abschnitt 3 der Funktion „Erzeugung von alternativen Linienrouten“ mit Fokus auf die gelbe Linienroute	151
Abbildung 4-33: Beispielhafte Anwendung der Funktion „Zusammenfassung von Linienrouten“ (Teil 1).....	152
Abbildung 4-34: Beispielhafte Anwendung der Funktion „Zusammenfassung von Linienrouten“ (Teil 2) mit Fokus auf die gelbe Linienroute	153
Abbildung 4-35: Beispielhafte Anwendung der Funktion „Erzeugung von Betriebskonzepten durch Ersetzung von Linienrouten“.....	158
Abbildung 5-1: Beispiel für die Anpassung eines Betriebskonzepts	167
Abbildung 5-2: Aufbau von Modul 2	176
Abbildung 5-3: Aufbau von Modul 2.1	180
Abbildung 5-4: Aufbau von Modul 2.2	184
Abbildung 5-5: Aufbau von Modul 2.3.....	186
Abbildung 6-1: Aufbau von Modul 5.....	191
Abbildung 6-2: Input und Vorgehen des Moduls „Verkehrskonzeptbewertung“ aus Brauner (2023).....	193
Abbildung 6-3: Angepasstes Vorgehen des Moduls „kundenorientierte SFP-Bewertung“ aus Brauner (2023) bei bei einer Durchführung von Modul 5 nach Modul 4.....	196
Abbildung 7-1: Zeit-Wege-Diagramm mit unterschiedlichen initialen Konfliktlisten bei verschiedenen Startzeitpunkten einer KE/KL-Heuristik.....	208
Abbildung 7-2: Zeit-Wege-Diagramm mit Ergebnis der KE/KL-Heuristik und Endzeitpunkt der KE/KL-Heuristik (T_E)	213
Abbildung 7-3: Einschränkung einer KLA in einem periodischen Fahrplan bei einer synchronen Reihung der Konflikte in der Konfliktliste	215
Abbildung 7-4: Zeit-Wege-Diagramm mit Reihung von Konflikten anhand der Linienzuordnung bzw. der Fahrtrichtung der am Konflikt beteiligten Züge.....	218
Abbildung 7-5: Aufbau von Modul 3.....	226
Abbildung 7-6: Mögliche Terminierungen der KE/KL-Heuristik von Modul 3 mit jeweiligem Output	232
Abbildung 8-1: Mögliche Modifikation des genetischen Algorithmus zur Entwicklung der PVSCS-Kombinationen im Modul „Auswahl eines PVSCS für jeden Zug und Kombination der ausgewählten PVSCS“ des Ansatzes von Crespo (2020)	243
Abbildung 8-2: Mögliche Terminierungen von Modul 3 mit jeweiligem Output	246

Abbildung 9-1: Ausschnitt des Liniennetzplans des S-Bahn-Netzes.....	250
Abbildung 9-2: Betriebskonzepte von SFP II und SFP III	251
Abbildung 9-3: Gleisplan der Knoten A2 - D	251
Abbildung 9-4: Angewendete betriebliche Maßnahmen des bestehenden SFP für Linie 6....	252
Abbildung 9-5: Periodischer Fahrplan durch Anwendung der betrieblichen Maßnahmen aus bk^*_8 auf den Taktfahrplan des Fahrplanjahres 2023	262
Abbildung 9-6: Konfliktlösungsalternative 1 zur Lösung von Konflikt K_1 ($KLA_{K1,1}$)	263
Abbildung 9-7: Konfliktlösungsalternative 2 zur Lösung von Konflikt K_1 ($KLA_{K1,2}$)	263
Abbildung 9-8: Periodischer Fahrplan nach der Lösung von K_1 und K_2	264
Abbildung 9-9: Konfliktlösungsalternative 1 zur Lösung von Konflikt K_3 ($KLA_{K3,1}$)	266
Abbildung 9-10: Konfliktlösungsalternative 2 zur Lösung von Konflikt K_3 ($KLA_{K3,2}$)	266
Abbildung 9-11: Konfliktlösungsalternative 3 zur Lösung von Konflikt K_3 ($KLA_{K3,3}$)	267
Abbildung 9-12: Periodischer Fahrplan nach der Lösung von K_3 und K_4	268
Abbildung 10-1: Resultierendes UML-Zustandsdiagramm von Betriebs- und Verkehrskonzept während der Adaption eines SFP mit erforderlichen Änderungen für die Berücksichtigung von verkehrlichen Einflussgrößen.....	281

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Forschung zu Störfallprogrammen	34
Tabelle 3-1: Anforderungen an ein SFP.....	52
Tabelle 3-2: Anforderungen an die Durchführung der Adaption.....	55
Tabelle 3-3: Anforderungen an die Systemarchitektur aus ISO/IEC 25010:2023.....	58
Tabelle 3-4: Teilprobleme und darin verwendete Maßnahmen	60
Tabelle 3-5: Aufteilung der Anforderungen 1.B.....	67
Tabelle 3-6: Behandlung der Konfliktarten, differenziert nach den betrieblichen Modulen....	69
Tabelle 4-1: Veränderung der Erschließungsfunktion der Linienroute sowie der Fahrgastkorridore bei der Ersetzung einer Linienroute	115
Tabelle 4-2: Veränderung der Bestandteile der Bewertungsfunktion bei der Ersetzung einer Linienroute.....	116
Tabelle 4-3: Vergleich der Bewertung der Anzahl der bedienten Verkehrsknoten von Linienrouten.....	118
Tabelle 4-4: Übersicht der Parameter der Heuristik	137
Tabelle 4-5: Beispielhafte Anwendung der Funktion „Bewertung der alternativen Linienrouten“ mit Fokus auf die gelbe Linienroute.....	155
Tabelle 5-1: Veränderung der Verbindungskonflikte des ausgewählten SFP und deren Lösungen durch die Anpassung des Betriebskonzepts	165
Tabelle 6-1: Mögliche Änderungen der Verbindungen durch die Adaption und deren Auswirkungen auf die Widerstandsveränderung	198
Tabelle 9-1: Bewertung der alternativen Linienrouten für den betrachteten Netzabschnitt..	258
Tabelle 10-1: Diskussion der Anforderungen.....	272